

画像モーフィングにおける変化率制御手法

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などに多用されており、コンピュータグラフィックスにおいて重要な技法の一つとなっている。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一つに、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、また、切断に用いる面の高さにより色の変化率制御を行う。

A Method of Transition Control for Image Morphing

Yuma Otsubo[†] Kazufumi Kaneda[†] 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 field morphing method 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 surface.

1 まえがき

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などに多用されており、コンピュータグラフィックスにおいて重要な技法の一つとなっている。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[1]は、2つの画像間の特徴を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、優れたモーフィングを行うことのできる手法として広く用いられている。そして、その方法を曲線状の特徴が利用できるように拡張した手法[2]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出来なかった。

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[2]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、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、このモデルを様々な面で切断することにより、形状における

変化率制御を行う。

3次元形状に対するモーフィングにおいて、変形を制御する軸を加え、4次元空間でモーフィングを行う手法が提案されている。すなわち、Turk[3]らは、陰関数を用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する手法を提案した。また、愛島ら[4]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。

3次元幾何形状モーフィングで用いられた方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。すなわち、陰関数を用いる手法では、形状補間後、構成点の対応関係を取ることが困難である。また、三角形ポリゴンを用いた細分割メッシュモデルを用いる方法では、アニメーションを作成した場合、微小特徴線分が伸縮を繰り返してしまうため、ブレのあるアニメーションが作成されてしまう場合がある。また、再分割メッシュを用いる手法では、モーフィングの変化率制御を行う際、モデルをB-スプライン曲面により変形し、変形したモデルを等位面で切断している。しかし、画像モーフィングでは、形状変形のみならず、色の混合率の制御も同期して行う必要があり、この方法では、形状と色の変化率の同期を取ることができず、また、ユーザが直感的に変化率の制御を行うことは困難であると言った問題もある。

そこで、本論文では、アニメーションを作成した際に、

[†] 広島大学 大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Hiroshima University

特徴曲線をなす微小線分の伸縮を起こさないため、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を線分、ならびに曲線で結んだワイヤフレームモデルを用いる。また、形状および色の变化率の制御を1枚の平面または曲面で一元的に扱うことで、ユーザにも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。さらに、この3次元幾何モデルをFree-Form Deformation[5]を用いて変形させる。そして、変形した幾何モデルを平面または曲面で切断し、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、形状変化の制御を行う。

さらに、3枚の画像間におけるモーフィングへの拡張について、モーフィング比率を場所ごとに制御する手法についても述べる。

2 2枚の画像間での変化率制御

2.1 提案手法概略

提案手法では、ソース画像とターゲット画像、ならびにそれぞれの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を入力として与える(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、Free-Form Deformation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画素を求め、ワーピング画像を作成する(STEP3)。最後に、作成した2枚のワーピング画像と、3次元幾何モデルの切断に用いた面より、画像の各ピクセルにおいて色の混合率を考慮した画像の輝度補間(ブレンディング)を行うことにより、モーフィング画像を作成する(STEP4)。

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、この3次元空間中に幾何モデルを作成する。

3次元空間において、ソース画像の特徴曲線を $t = 0.0$ に、ターゲット画像の特徴曲線を $t = 1.0$ に配置する。次に、ソース画像ならびにターゲット画像の特徴曲線の構成点を併合し、双方の構成点を同数にする(図2参照)。これは、一般に、ソース画像とターゲット画像の特徴曲線の構成点は同数ではないためである。

構成点の併合処理は、まず、併合元となる特徴曲線の構成点から特徴曲線の始点と終点を結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、このときの値を u とする。次に、併合先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引き、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(図3参照)。この処理を、ソース画像とターゲット画像のそれぞれの特徴曲線に施すことにより、両者の構成点数を一致させる。

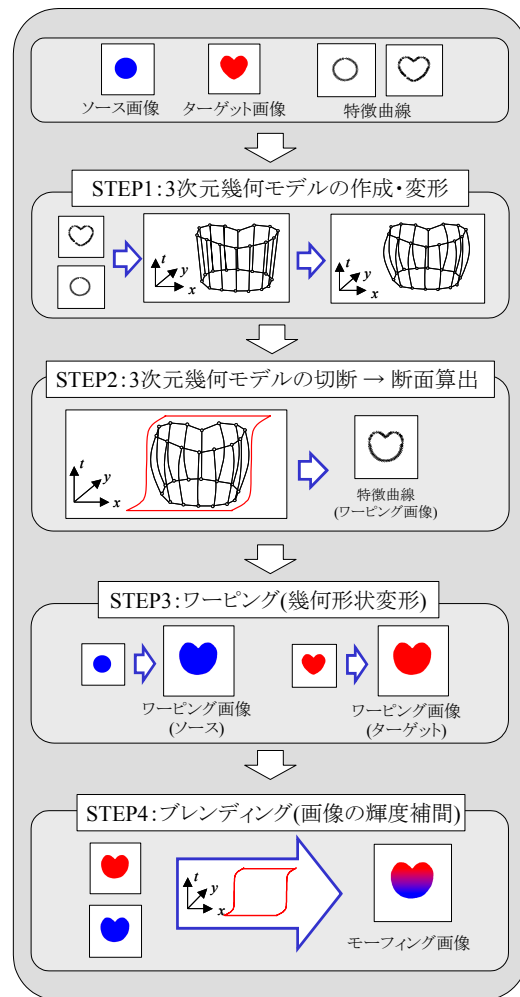


図1 概略処理手順

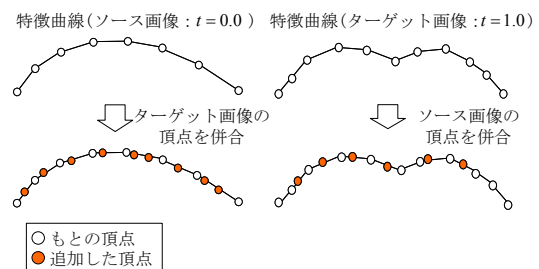


図2 特徴曲線の構成点の併合

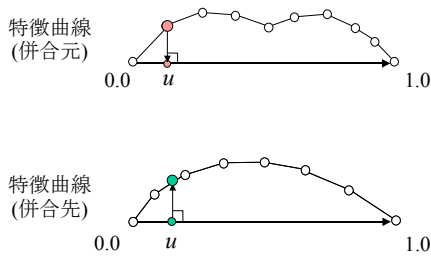


図3 特徴曲線の併合処理



図4 3次元幾何モデル

併合処理後のソース画像とターゲット画像の対応する構成点同士を順番に線分で結ぶことにより3次元幾何モデルを作成する(図4参照)。次に、この3次元幾何モデルに対し、Free-Form Deformation(以下 FFD)を用いてモデルの変形を行う(図5参照)。これにより、対応するソース画像とターゲット画像の特徴曲線の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、線形変化のみならず、非線形的に変化させることが可能となる。

次に、変形した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。曲面との交点を高速に算出するために、ソース画像とターゲット画像の特徴曲線の構成点を結ぶ線分が FFD により曲線に変換される場合には、その曲線は微小線分で近似する。そのため、まず FFD 変換前の線分を微小線分に分割しておき、微小線分の構成点を FFD により変換する。これにより、曲線の線分近似が可能となる。

モデルの切断には B-スプライン曲面を用いる。この B-スプライン曲面を複数の Bezier 曲面パッチに変換し、変換した Bezier 曲面と、前述の FFD により変形した微小線分との交点を Bezier Clipping 法[6]により算出する。この処理を全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で、断面形状を得ることができる。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 平面に投影することにより、ワーピング画像の特徴曲線が得られる。この得られた特徴曲線に基づいて、ソースとターゲット画像に対し、ワーピング処理を行う。

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となる。また、複数の FFD を適用することにより、形状変形をそれぞれの場所ごとに変えることも可能である。

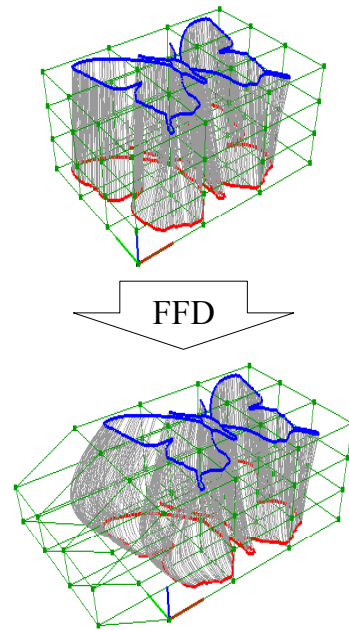


図5 FFDによる3次元幾何モデルの変形

2.3 曲面による色の変化率制御

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、2点 $(x, y, 0.0)$ と $(x, y, 1.0)$ を結ぶ線分と Bezier 曲面との交点を算出することで求められ、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。この処理を全てのピクセルについて行うことにより、モーフィング画像が作成される。

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た場合、画像中の位置毎に断面の t 座標値は変化する。これにより、場所ごとに形状の変化率を制御することが可能となる。同様に、ブレンディング処理においても、切断に用いる面の t 座標値は場所ごとに変化するため、色の変化率制御も可能である。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に用いた場合には、文献[2]の手法と等価な結果を得ることもできる。

2.4 ブレンディング処理の高速化

ブレンディング処理では、全てのピクセルについて、Bezier Clipping 法により曲面上での t 座標値を算出しなければならず、計算時間が増大してしまう。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、分割した各小領域内で双一次補間により t 座標値を算出する。これにより、Bezier Clipping 法により t 座標値を計算するピクセル数を減らすことができる。

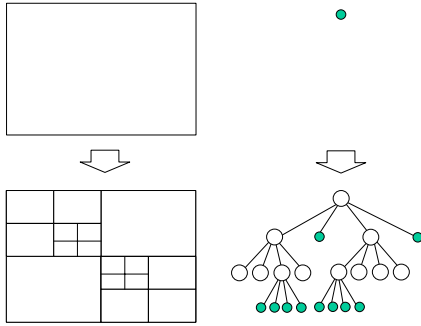


図6 ブレンド比の補間領域の分割

領域の再分割条件には、画像空間中での各補間領域を構成する四辺形における、各辺の中点 C_i ($i = 0,1,2,3$) における Bezier Clipping 法で求めた t 座標値と、辺の端点の t 座標値から線形補間で求めた t 座標値との差、ならびに、重心 G における、Bezier Clipping 法で求めた t 座標値と、四辺形の頂点の 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での Bezier Clipping 法により求めた 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一つでも満たす場合には、領域の再分割を行う.

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

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

ここで、 Δt は領域分割のためのしきい値である.

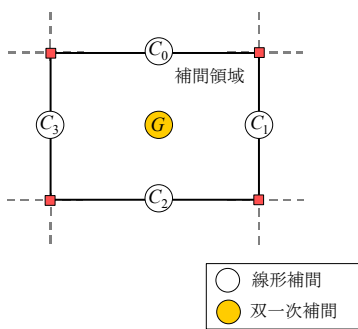


図7 領域の再分割条件

3 適用例

提案手法を用いて作成したアニメーションの一部を図8, 9に示す¹. 図8において、図(a), (b)はそれぞれ、ソース画像、ターゲット画像であり、図(c)はソース画像とターゲット

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、左の羽の部分にのみ FFD 格子を設置し、制御点を移動させることで、図(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($t = 0.2, t = 0.4, t = 0.6, t = 0.8$)で切断し、このとき得られたモーフィング画像をそれぞれ図(e)~(h)に示す. 右の羽と比較して、左の羽は、図(e)から図(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、図(a), (b)はそれぞれソース画像、ターゲット画像である. 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図(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図(d), (f), (h)に示す. 図(d), (f), (h)と向かうにつれ、まず、頭部と後足の部分が先に馬から虎へと変化し、その後、前脚から腹部にかける部分が虎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ディング処理時間は、各ピクセルで Bezier Clipping 法を行った場合と比較して約35倍から55倍の高速化が実現できている(表1参照).

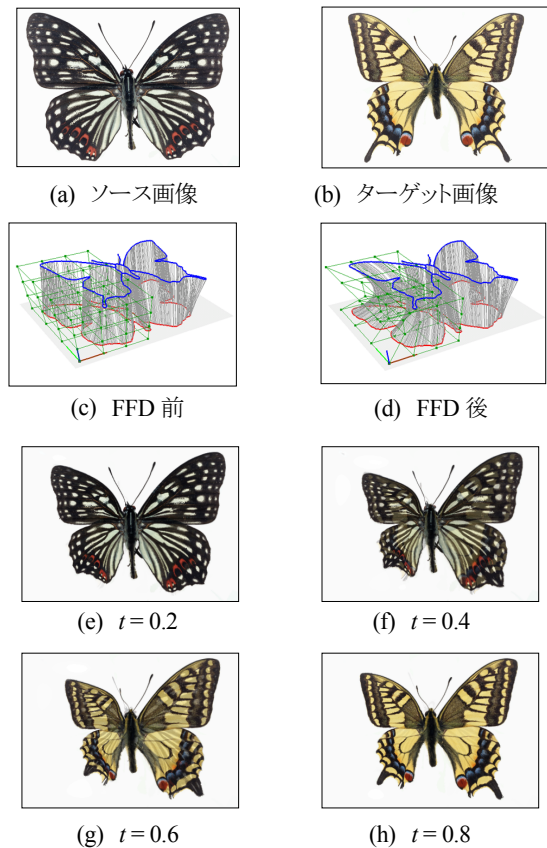


図8 FFDを形状変化制御に用いたモーフィング

¹ http://www.eml.hiroshima-u.ac.jp/gallery/tc_morph/animation/index.html 参照

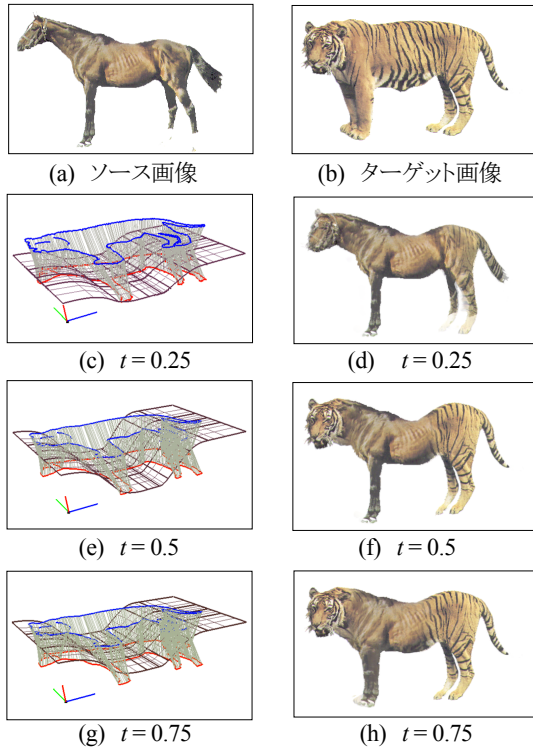


図9 曲面を切断面として用いたモーフィング

表1 ブレンディング処理時間の比較

	図(d)	図(f)	図(h)
提案手法(秒)	0.28	0.43	0.33
各ピクセルで Bezier Clipping 法を適用(秒)	15.83	15.83	15.84

画像サイズ(ピクセル) 494×298

使用計算機 CPU Intel Xeon 1.7GHz, メモリ 1GB

4 3枚の画像間での変化率制御

4.1 形状の変化率制御

これまでで述べた手法を拡張することにより、3枚の入力画像によるモーフィングの場合についても、形状および色の変化率制御が可能である。

入力画像が3枚でのモーフィングにおいて、モーフィング比率を制御するパラメータの数は2つに増える。入力画像A, B, Cにおけるモーフィング比率をそれぞれ α, β, γ とする。このとき、画像空間中における、各画像におけるモーフィング比率を(3)式のように指定することができる。

$$\begin{cases} \alpha = \alpha(x, y) \\ \beta = \beta(x, y) \\ \gamma = 1 - \alpha - \beta \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 α, β, γ は、 $0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$ を満たす。これにより、各モーフィング比率は xy 平面と、高さ方向に各モーフィング比率を取った3次元空間中において、面を形成することになる。

入力画像が3枚のモーフィングでは、 xy 平面と高さ方向に α 軸あるいは β 軸をとった3次元空間を考える。入力画像の特徴曲線における対応する3点 P_A, P_B, P_C を配置し、それぞれ3次元三角形を構成する。以下、モーフィング比率 α について説明する。画像A, B, Cについて、対応する特徴曲線の構成点の座標をそれぞれ $(x_A, y_A), (x_B, y_B), (x_C, y_C)$ とすると、 xy 空間に、さらに高さ方向に α 座標を加えた3次元空間を考える。このとき、画像Aの構成点の α 座標のみ1.0とし、それ以外の画像B, Cの構成点については α 座標を0.0とする。この場合、三角形は3点 $(x_A, y_A, 1.0), (x_B, y_B, 0.0), (x_C, y_C, 0.0)$ より構成されることになる(図10参照)。同様に、モーフィング比率 β についても $xy\beta$ 空間中で、 $(x_A, y_A, 0.0), (x_B, y_B, 1.0), (x_C, y_C, 0.0)$ からなる三角形を構成する。

上述の方法により作成した2つの三角形と、(3)式で示したモーフィング比率を指定する関数、つまり3次元空間中の面 $\alpha = \alpha(x, y), \beta = \beta(x, y)$ を用いて、ワーピング画像の特徴曲線の構成点を算出する(図11参照)。ここで、混合率 α ならびに β について構成した三角形をそれぞれ三角形A, 三角形Bとする。

まず、三角形Aと、画像Aにおけるモーフィング比率を指定する面 $\alpha = \alpha(x, y)$ との交線を探し、求めた交線を xy 平面上に投影する。同様に、三角形Bについても、画像Bにおけるモーフィング比率を指定する面 $\beta = \beta(x, y)$ との交線を算出し、その交線を xy 平面上へ投影する。そして、 xy 平面に投影された2本の交線の交点を求め、その交点が xy 平面上の三角形 $P_A P_B P_C$ 内部に存在するとき、その交点をモーフィング画像における特徴曲線の構成点とする。この処理を全ての画像A, B, Cの特徴曲線における対応する構成点の組について行うことで、モーフィング画像の特徴曲線が得られる。

ブレンディング処理については、画像空間中のピクセル (x, y) での $\alpha = \alpha(x, y), \beta = \beta(x, y)$ の値を算出することにより、色の混合率を算出することが可能である。

図12に3枚の画像を入力として与えたときの、モーフィング比率制御の適用例を示す。入力として図(a), (b), (c)に示す画像を与え、各画像におけるモーフィング比率を図(d), (e), (f)で示すように指定した。このときに得られたモーフィング画像を図(g)に示す。図(g)より、 x 座標の値が大きくなるほど、 α の値が大きくなるため、入力画像Aの割合が強い、尖った形状が得られ、また、 y 座標値が大きくなるほど、 γ の値が大きくなっており、それに対応して、形状も、画像Cの割合が強い、直線に近い形状が得られていることが分かる。

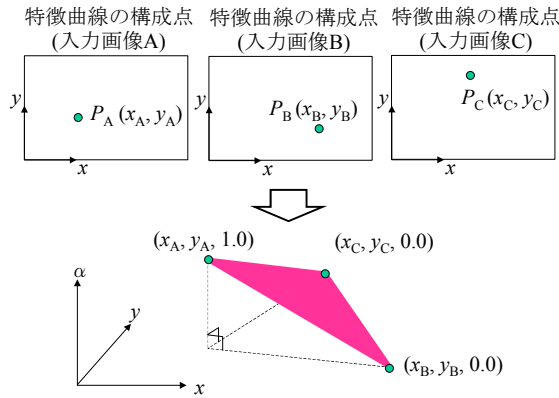


図 10 モーフィング比率決定のための 3 次元三角形の構成 (モーフィング比率 α について)

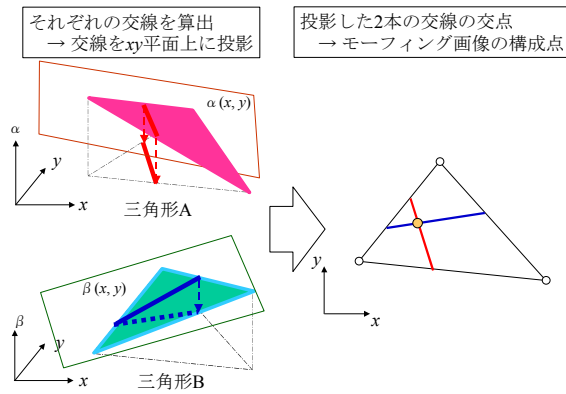


図 11 モーフィング画像の構成点算出

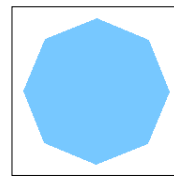
5 むすび

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FFDにより変形し、変形したモデルを曲面等で切断することにより、画像モーフィングにおける形状変形を制御する。そして、モデル切断に用いた面の高さを利用して、色の変化率制御を行う手法を提案した。さらに、この手法を拡張することにより、入力画像が3枚のモーフィングにおいても適用可能であることについても述べた。

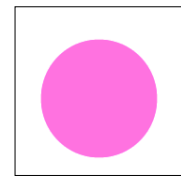
今後の課題としては、入力画像が3枚の場合におけるモーフィング比率指定面入力のためのユーザインタフェースの作成が挙げられる。すなわち、モーフィング比率を指定する面を指定する際、 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ の制約を満たすように各モーフィング比率の設定が行えるようなユーザインタフェースを作成する必要がある。

参考文献

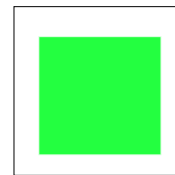
- [1] T. Beier, S. Neely : Feature - Based Image Metamorphosis, *Computer Graphics*, **26**(2), pp. 35 - 42 (1992).
- [2] 金田, 陸野, 山下 : 線分近似した特徴曲線に基づく画像モーフィング, *画像電子学会論文誌*, **29**(4), pp. 320 - 329 (2000).
- [3] G. Turk, J. F. O'Brien : Shape Transformation Using Variational Implicit Functions, *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, 1999, pp. 335 - 342 (1999).
- [4] 爰島, 大淵, 高橋 : 再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).
- [5] T. W. Sederberg, S. R. Parry : Free - form Deformation of Solid Geometric Models, *Computer Graphics*, **20**(4), pp. 151 - 160 (1986).
- [6] T. Nishita, T. W. Sederberg, M. Kakimoto : Ray Tracing Trimmed Rational Surface Patches, *Computer Graphics*, **24**(4), pp. 337 - 345 (1990).



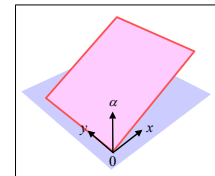
(a) 入力画像 A



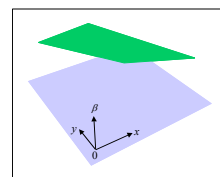
(b) 入力画像 B



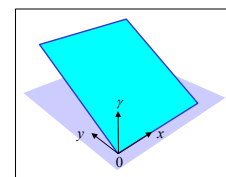
(c) 入力画像 C



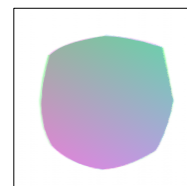
(d) モーフィング比率 α



(e) モーフィング比率 β



(f) モーフィング比率 γ



(g) モーフィング画像

図 12 3 枚の入力画像によるモーフィングの変化率制御