

Earth Mover's Morphing

領域クラスタの EMD フローを用いたトポロジ非依存な形状モーフィング

榎原 靖[†] 八木 康史[†]

[†] 大阪大学

〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

E-mail: †{makihara,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

あらまし 従来の閉曲線・曲面に基づく形状モーフィング手法は、トポロジの異なる形状には適用できないという問題点がある。本論文では、そのような形状を扱うためのトポロジ非依存の形状モーフィング手法を提案する。まず、形状のシルエット領域をファジー C 平均クラスタリングにより多数の小クラスタ群に分割する。次に、対象となる二つの形状のクラスタ群間の Earth Mover's Distance を計算し、結果として得られるフロー量と対応するクラスタ中心間の変位から、ワーピングのための重み付き多対多対応を生成し、ファジークラスタ毎のモーフィングを行う。閉曲線・曲面に基づく手法とは異なり、モーフィング結果が 2 値になることが保証されていないため、空間 2 次元と遷移パラメタ 1 次元の計 3 次元のボリュウム画像に対して、グラフカットに基づくノイズ除去処理を行う。実験により、アルファベット文字や歩行シルエットなどのトポロジの異なる形状間のモーフィングが可能であることを示す。

キーワード 形状モーフィング, Earth Mover's Distance, トポロジー, ファジー C 平均クラスタリング, 多対多対応, グラフカット

Earth Mover's Morphing

Topology-free Shape Morphing using Region Cluster-based EMD Flows

Yasushi MAKIHARA[†] and Yasushi YAGI[†]

[†] Osaka university

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

E-mail: †{makihara,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

Abstract Existing methods of close curve/surface-based shape morphing are inapplicable to shapes with different genera. This paper describes a method of topology-free region cluster-based shape morphing. First, the region is decomposed into a number of small clusters by Fuzzy C-Means clustering. Next, Earth Mover's Distance between the sets of clusters of the two target shapes is calculate and the resultant minimal-work "flows amount" and position displacement between the cluster centers provide a weighted many-to-many correspondence for warping. Then, the obtained correspondence provides a fuzzy cluster-based morphing transition. Unlike the close curve/surface-based method, the morphs during the transition are not guaranteed to be binary image, and hence the three-dimensional graph-cut binary denoising is applied to a volumetric image of the two-dimensional positions and the one-dimensional transition control parameter. The experiments demonstrate that the proposed method can handle the morphing between shapes with different genera such as alphabetic characters or walking silhouettes.

Key words Shape morphing, Earth Mover's Distance, topology, Fuzzy C-Means clustering, Many-to-many correspondence, Graph-cut

1. はじめに

画像モーフィング [1] は、二つのキー画像間の滑らかな変形過程を実現する画像処理技術であり、特殊な遷移効果を生成するための有用なツールとして映画・CG アニ

メーション・画像編集の分野で用いられてきた [2] [3]. 更に、画像モーフィング技術は、効率的な教師付学習のための視点補間画像生成 [4] や変形物体の照合のための中間形状学習サンプル生成 [5] [6] といった目的で、パターン認識の分野においても広く用いられている。

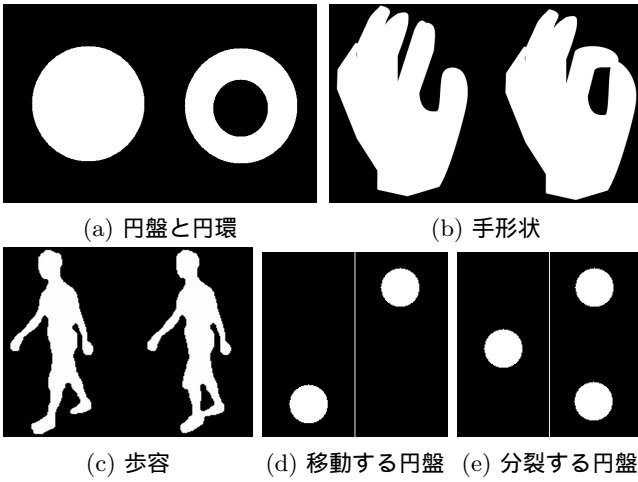


図 1 モーフィング対象の二つのキー形状の例。(a)(b)(c)において、左が種数 0、右が種数 1 の形状を表す。(d)は形状の位置が大きく変化する場合、(e)においては形状の個数が異なる例である。

モーフィングに関する研究の初期段階においては、キー画像間での点・線・曲線といった幾何要素の対応を手動で与えて、そこから様々なワーブ関数 [7] [8] [9] [10] [11] [12] を求めてモーフィングを実現している。その後、ワーブ関数生成のための自動対応取得方法として、画像特徴の一致度合いや変形量を考慮したエネルギー最小化による手法 [13] やオプティカルフローに基づく対応の取得方法 [4] [14] が提案されている。また、画像照合の分野に目を向けると、Toshev ら [15] の Co-saliency に基づく領域ベースの対応取得方法等も提案されている。しかし、当然のことながら、これらは画像のテクスチャがあることを前提としているので、テクスチャのない形状モーフィングには適用できない。

一方、形状モーフィングの問題は、画像全体の变形ではなく、よりコンパクトな表現である輪郭の变形問題として主に扱われている。Sederber [16] は形状を多角形近似し、その頂点の移動コストを最小にするような变形手法を提案している。また、モーフィングそのものを目的とした研究ではないものの、測地線距離に基づく形状照合 [17] や Earth Mover's Distance (EMD) を用いた形状照合 [18] といった手法を用いると、照合の結果得られる輪郭点間の対応を用いてモーフィングを行うことができる。さらに、これらの 2 次元形状モーフィングは、3 次元形状のモーフィングへと拡張されている [19] [20] [21]。

しかし、これらの手法の対象は種数の同じ形状に限定されており、2 次元における円盤と円環 (図 1(a))、3 次元における球とトラスといったような異なる種数の形状、即ちトポロジーの異なる形状間のモーフィングには適用できない。実際に、このような限定は、多くのシルエットベースの認証手法、例えば手形状認識 (図 1(b)) や歩容認証 (図 1(c))、行動認識においては致命的な問題となる。

このような形状のトポロジー変化を扱うための手法として、Osher らが提案したレベルセット法 (LSM) [22] がある。LSM においては、典型的には形状の輪郭からの符号付き距離などを用いて定義されるレベルセット関数を考え、その等値線/面によって輪郭を表現する。これは輪郭の陰関数表現の一手法であり、形状のトポロジー変化を扱うことができるといった利点があることから、Breen ら [3] によって種数の異なる形状間のモーフィングにも適用されている。

ここで、従来の対応ベースのワーブによる手法と LSM による手法との違いについて考えてみると、ワーブが移動に基づく遷移であるのに対して、LSM による手法が形状領域のモルフォロジー的遷移であるという違いが存在する。この違いは、図 1(d) に示すような形状に重なりが無い場合に現れる。ワーブに基づくモーフィングでは、円盤が下から上に移動する過程が得られるのに対して、LSM の場合には下の円盤が収縮過程によって消滅し、上の円盤が点からの膨張過程によって出現するという過程が得られる。モーフィングとして考えると、ワーブによる過程の方が自然であり望ましい結果と言える。対象形状が一つの場合には、あらかじめ位置合わせをしておいて並進分を別途補正することで、LSM でも同様の結果が得られるが、形状の個数が異なる場合 (図 1(e)) にはそのような位置合わせは不可能であり、一つの形状が二つに分裂するといった過程を表現することは困難である。

そこで、本論文では領域クラスタの EMD フローを用いたトポロジー非依存の 2 次元形状モーフィング手法を提案する。最初に、形状の領域を多数の小クラスタ群に分割し、二つのキー形状のクラスタ群間の EMD フローを計算する。EMD フローはクラスタ間の重み付き多対多対応と見ることができるので、その対応と遷移パラメタに基づいてクラスタ毎のモーフィングを行い、それを重ねることでモーフィング画像を得る。提案手法は EMD フローによる多対多対応のワーブに基づく手法であることから、トポロジーの異なる形状間のみならず、個数の異なるような場合 (図 1(e)) についても適用可能である。

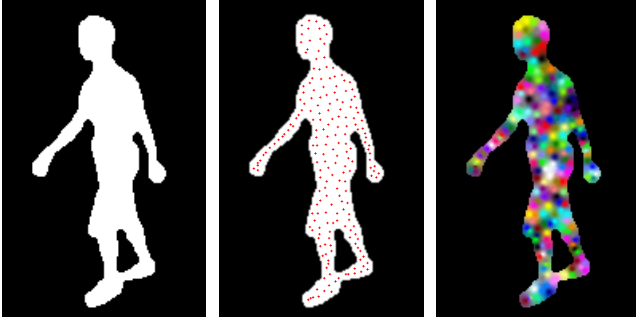
2. Earth Mover's Morphing

2.1 クラスタリング

処理の第 1 段階では、形状のシルエット領域から小クラスタ群を生成する。まず、画像中の 2 次元位置を $x = [x, y]^T$ とし、シルエット画像 $I(x)$ を以下で定義する。

$$I(x) = \begin{cases} 1 & \text{for inside shape} \\ 0 & \text{for outside shape.} \end{cases} \quad (1)$$

また、形状シルエットは形状内部の点集合 $X_s = \{x | I(x) = 1\}$ としても表現することができる。更に、後の定式化の準備のために、面積 $A(I) = \sum_x I(x)$ と面



(a) 形状シルエット (b) クラスタ中心 (c) メンバーシップ
 図2 FCM クラスタリングの結果例。(b)においてクラスタ中心は赤色の十字で表し、(c)においては各色のブレンド割合が各クラスタへのメンバーシップを表す。

積で正規化された各点の重み $w(x) = I(x)/A(I)$ を定義しておく。

次に、形状内部の点集合に対してクラスタリングを適用し、事前に定めた個数の N_c 個のクラスタを取得する。一般に、クラスタリングでは K 平均法が用いられることが多いが、本論文では 2.4 で説明する後段での処理においてファジーの特性が有効に働くため、ファジー C 平均 (FCM) クラスタリング [23] を用いるものとする。ここで、 c 番目のクラスタ中心 \bar{x}_c 、重み w_c 、及び位置 x におけるメンバーシップ $m_c(x)$ の間には、以下の関係式が成り立つ。

$$\bar{x}_c = \frac{\sum_{x \in X_s} m_c(x)x}{\sum_{x \in X_s} m_c(x)} \quad (2)$$

$$w_c = \sum_{x \in X_s} m_c(x)w(x) \quad (3)$$

$$\sum_{c=1}^{N_c} m_c(x) = 1. \quad (4)$$

このようにして得られたクラスタ中心の集合を $\bar{X} = \{\bar{x}_c\}$ 、その重みの集合を $w = \{w_c\}$ として定義しておく。FCM クラスタリングの結果例を図 2 に示す。

2.2 EMD フロー

第 2 段階では、変形元の形状から変形後の形状へのクラスタ群間の EMD フローの計算を行う。変形元の形状に対するクラスタ中心と重みの集合を \bar{X}^s, w^s 、変形後の形状に対するそれを \bar{X}^d, w^d としてそれぞれ定義する。次に、変形元の j 番目のクラスタから変形後の k 番目のクラスタへの輸送コストとフロー (輸送量) をそれぞれ t_{jk}, f_{jk} として定義する。

輸送コストとしては、クラスタ中心間のユークリッド距離 $d_{jk} = \|x_j^s - x_k^d\|$ が用いられることが多いが、その場合には一部のクラスタの輸送距離が長く、多くのクラスタの輸送距離が短い、といったような不均一な輸送距離分布が生じることがある。あくまでも距離尺度として EMD を利用する場合には問題がないが、モーフィング



図3 NOR 領域横断距離

におけるワープとして考えると、このような状況は望ましくない。そこで、代わりにユークリッド距離のべき乗 $d_{jk}^n (n > 1)$ を輸送コスト t_{jk} の候補として考え、本研究では実験的にべき指数を $n = 2$ とした。この場合、距離の増加に対するコストの増加が 2 乗で効いてくるため、長距離の輸送が抑制される。そのため、近傍領域においては輸送距離が互いに近い値となることが期待され、近傍のクラスタが一緒になってワープするような効果が期待できる。

更に、モーフィング過程において非常に大きな変形が必要となる場合には、いくつかのフローが変形前後の形状領域の NOR (Not-OR) 領域を横断することがある (図 3)。このようなフローが必ずしもモーフィングにおいて望ましくない訳ではないが、ある種ショートカットしたモーフィング過程とも見て取れるため、そのような NOR 領域の横断を抑えるためには、NOR 領域横断距離を輸送コストに加えることが必要となる。

$$t_{jk} = d_{jk}^2 + \lambda^{NOR} d_{jk}^{NOR^2}, \quad (5)$$

ここで、 λ^{NOR} は NOR 領域横断距離に対する重み係数である。

最後に、EMD フローを以下の輸送コスト最小化問題の枠組みで最適化する。

$$\{f_{jk}\}^* = \arg \min_{\{f_{jk}\}} \sum_j \sum_k f_{jk} t_{jk} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_l f_{kl} = w_k^s \quad \forall k$$

$$\sum_k f_{kl} = w_l^d \quad \forall l$$

$$f_{kl} \geq 0 \quad \forall k, l$$

上記の問題は、いわゆるハンガリアン・アルゴリズム [24] によって多項式時間 $O(N_c^3)$ で効率的に解くことができる。

従来手法では 1 対 1 対応に基づくワープ関数を考えているが、本研究では EMD フロー $\{f_{jk}\}^*$ をクラスタ間の多対多対応への重み係数として見なす。結果として得られる EMD フローの対応例と見易さのためにクラスタ毎に EMD フローで重み付け平均した対応をそれぞれ図 4(a)(b) に示す。

2.3 領域クラスタに基づくモーフィング

第 3 段階では、EMD フロー $\{f_{jk}\}^*$ を用いた領域クラ

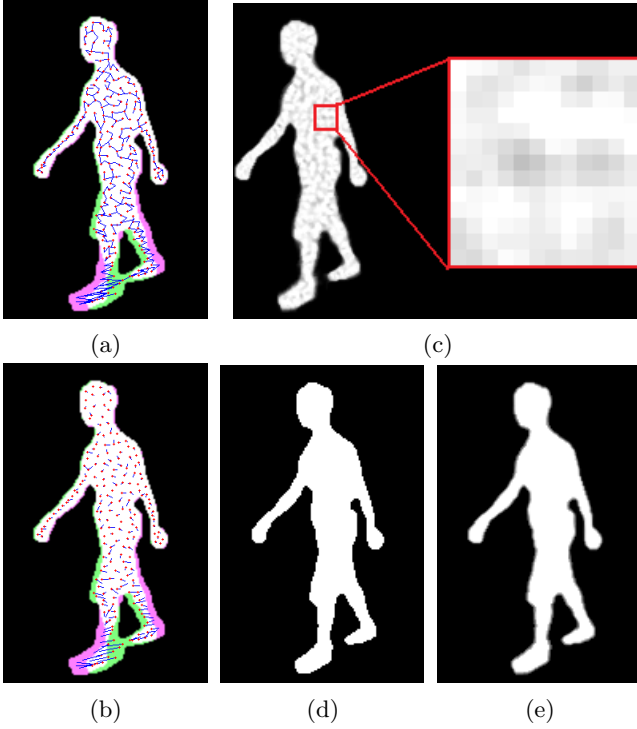


図 4 EMD フローの対応とモーフィング過程 (キー形状は図 1(c)) (a) EMD フローの対応, (b) クラスタ毎に EMD フローで重み付けした対応 (c) アーティファクトを含む合成モーフィング画像 (d) 2 値化モーフィング画像 (e) 境界ディザリングモーフィング画像

スタに基づくモーフィングを行う。まず、変形前形状の j 番目のクラスタから変形後形状の k 番目のクラスタへの遷移率 α におけるモーフィングを考える (図 5)。ここで、変形前の j 番目のクラスタ中心 \bar{x}_j^s と変形後の k 番目のクラスタ中心 \bar{x}_k^d の遷移率 α の時の補間位置は以下となる。

$$\bar{x}_{jk}(\alpha) = (1 - \alpha)\bar{x}_j^s + \alpha\bar{x}_k^d \quad (7)$$

次に、変形前の j 番目のクラスタを x_j^s から x_k^d へ輸送することを考え、それを途中の補間位置 $\bar{x}_{jk}(\alpha)$ で下ろすことを考える (図 5(a))。ここで、変形前の j 番目のクラスタから全クラスタへの EMD フローの総和が $\sum_k f_{jk} = w_j^s$ であることから、変形後のクラスタ k への輸送比率は、 (f_{jk}/w_j^s) となることに注意されたい。また、本論文では、この過程を順方向モーフと呼ぶ。この順方向モーフを全ての EMD フローについて計算し重畳することで順方向モーフィング画像 $I_{morph}^F(x; \alpha)$ を作成する。同様に、変形先から変形元への逆方向モーフィング画像 $I_{morph}^B(x; \alpha)$ も作成する (図 5(b))。最後に、一般的なモーフィング処理において行われるのと同様に、順方向モーフィング画像 $I_{morph}^F(x; \alpha)$ と逆方向モーフィング画像 $I_{morph}^B(x; \alpha)$ をアルファブレンディングして、合成モーフィング画像 (図 5(c)) を以下の通り作成する。

$$I_{blend}(x; \alpha) = (1 - \alpha)I_{morph}^F(x; \alpha) + \alpha I_{morph}^B(x; \alpha) \quad (8)$$

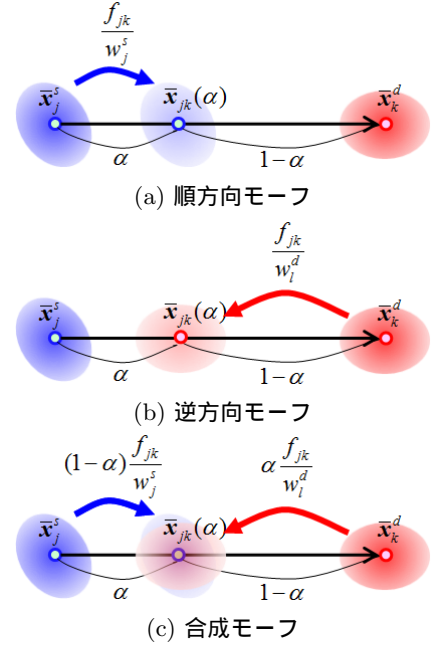


図 5 領域クラスタに基づくモーフィング過程

2.4 グラフカットによるノイズ除去

クラスタに基づくモーフィングを行うと、図 4(c) に示すようなシルエット値が不均一になるアーティファクトが現れる。これらは場合によっては、穴や欠損といったより顕著なアーティファクトになることもあり、ノイズとして除去することが望ましい。そこで、空間 2 次元と遷移率 α の 1 次元の合計 3 次元のモーフィングボリューム画像 $I_{blend}(x; \alpha)$ に対して、グラフカットによるノイズ除去処理 (2 値化処理) を適用する。ここで、3 次元のサイトとそのサイトにおけるラベルをそれぞれ $u = [x^T, \alpha]^T$, l_u として定義し、シルエット領域にラベル 1 を、それ以外にラベル 0 を割り当てるものとする。

グラフカットによるノイズ除去は以下のエネルギー最小化問題として定式化される。

$$E(L) = \sum_{u \in U} g_u(l_u) + \sum_{(u, v) \in V} h_{uv}(l_u, l_v), \quad (9)$$

ここで、 L は各サイトへのラベル割り当ての組み合わせ、 U は全てのサイトの集合、 V は近傍サイトの全組み合わせの集合である。式 (9) のデータ項 (第 1 項) は、合成モーフィング画像のシルエット値で以下のように定義する。

$$g_u(l) = \begin{cases} 1 - I_{blend}(x; \alpha) & (l = 0) \\ I_{blend}(x; \alpha) & (l = 1) \end{cases} \quad (10)$$

一方、平滑化項 (第 2 項) は Potts モデルを用いて以下で定義する。

$$h_{uv}(l_u, l_v) = \lambda_{potts}(1 - \delta_{l_u l_v}), \quad (11)$$

ここで λ_{potts} は平滑化項重みであり、 δ は Kronecker のデルタである。このようにして定義されるエネルギーを

最小切断アルゴリズムによって最小化し、対応するラベルによって2値化モーフィング画像 $I_{bin}(\mathbf{x}; \alpha)$ を得る (図4(d)).

更に、視覚効果の改善のために、境界を元の合成モーフィング画像に置き換えて、境界ディザリングモーフィング画像 $I_{dith}(\mathbf{x}; \alpha)$ を作成する (図4(e)).

$$I_{dith}(\mathbf{x}; \alpha) = \begin{cases} I_{blend}(\mathbf{x}; \alpha) & (\mathbf{x} \text{ is boundary}) \\ I_{bin}(\mathbf{x}; \alpha) & (\text{otherwise}). \end{cases} \quad (12)$$

2.1節で述べたように、FCMクラスタリングは上述のノイズ除去の観点で望ましい性質を持つ。K平均法を用いた場合には各画素の所属クラスが唯一であることから、合成時に現れるシルエットの穴や欠損といったアーティファクトが顕著になる。それに対して、FCMクラスタリングの場合はより広い範囲の複数クラスに所属することから、合成モーフィング画像におけるアーティファクトが複数のクラスによって緩和され、グラフカットによるノイズ除去処理が容易になる。

3. 実験

3.1 円盤と円環

最初に、最も単純な例として、円盤から円環へのモーフィングを扱う (図6)。変形前の円盤から遷移率が増加するに伴い、円盤の中心付近にシルエットの穴が現れ、この時点で形状の種数が0から1に変化する。そして、更に遷移率が増加することでその穴が膨張していき、最終的には変形後の形状である円環に一致していることが分かる。

合成モーフィング画像 (図6上段) においては、シルエットのアーティファクトが存在しているものの、グラフカットによる2値化モーフィング画像 (図6中段) においてそのアーティファクトが消え、最終的な境界ディザリングモーフィング画像が生成される (図6下段)。

更に種数の異なる形状への適用例として、円盤から二重円環、三重円環、四重円環へのモーフィングを扱い、その結果を図7に示す。円環の例と同様に、いずれの例でも遷移の初期段階でシルエットの穴が現れ、それが徐々に膨張して変形後の形状に一致している。また、出現するシルエットの穴の数は、変形後の形状の種数と一致していることが分かる。

3.2 実データへの適用

次に実データとして、フレームレート60fpsの歩容シルエットシーケンスから取り出した二つの姿勢に対するモーフィングを行う。変形前の姿勢には脚の部分にシルエットの穴が存在する種数1の姿勢 (図8左端) を、変形後の姿勢には穴の存在しない種数0の姿勢 (図8右端) を選択する。ここでは、選択した二つの姿勢間の原画像列とモーフィング画像を比較することで、モーフィングの妥当性を確認する。

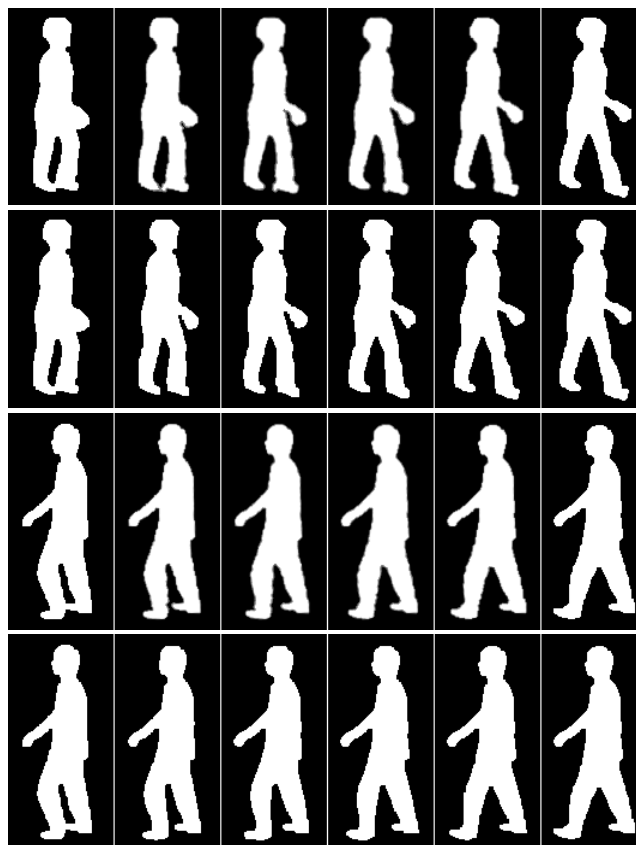


図8 種数1の歩容シルエット (左端) から種数0の歩容シルエット (右端) へのモーフィング結果。奇数段は境界ディザリングモーフィング画像列であり、偶数段は原画像列である。上2段: 斜め前から見た歩容画像列, 下2段: 真横から見た歩容画像列

結果として、モーフィング画像列 (図8の奇数段) が、原画像列 (図8の偶数段) と良く類似していることが分かる。このことは、提案手法をパターン認識や画像処理の分野で様々な応用し得る可能性があることを示している。例えば、形状照合の問題において学習サンプルの仮想生成を行うことを考えると、二つの学習サンプル形状の中間形状が生成可能となる。また、行動認識や歩容認証において低フレームレート画像列が与えられた場合に、フレーム間のシルエットをモーフィングにより生成することで、より高いフレームレートの画像列を入力として与えることができる。いずれの場合においても、図8にあるようなトポロジー変化の有無によらず適用できる点が従来の閉曲線・曲面に基づく手法とは異なる。

3.3 NOR領域横断距離の効果

ここでは、大きな変化を伴う形状の例として、アルファベット文字の間のモーフィングを取り扱い、ショートカットを防止するNOR領域横断距離の効果について確認する。まず、「A」から「B」へのモーフィング (図9上2段) を考える。ユークリッド距離の自乗 d_{jk}^2 を輸送コスト t_{jk} とした場合には、「A」の中央の横線の内、一部が上方へ、残りが広いNOR領域を横断して下方へと移

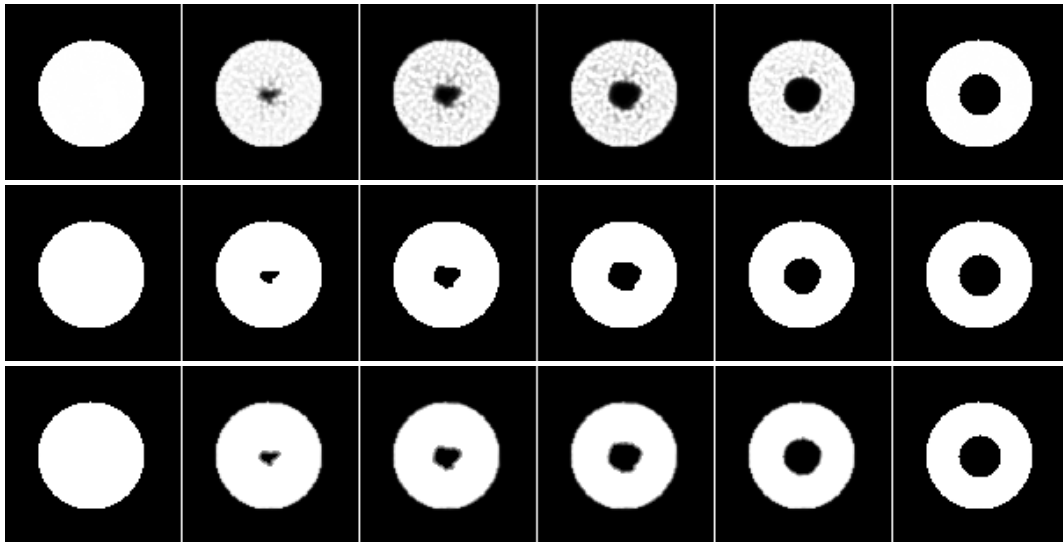


図 6 円盤 (左端) から円環 (右端) へのモーフィング結果. 中間の 4 枚の画像は, それぞれ遷移率 $\alpha = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ に対するモーフィング画像である. 上段: 合成モーフィング画像, 中段: 2 値化モーフィング画像: 下段: 境界ディザリングモーフィング画像

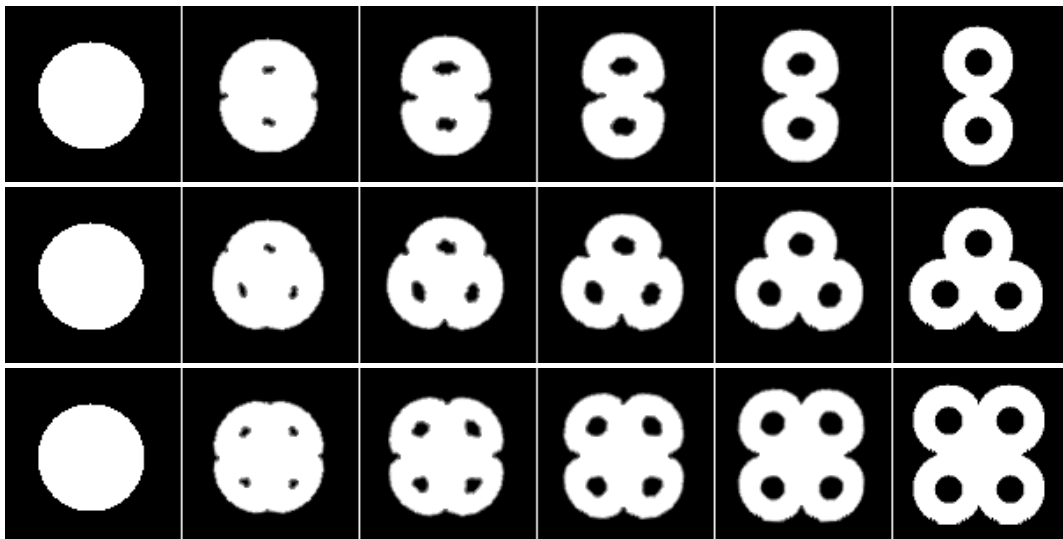


図 7 円盤 (左端) から多重円環 (右端) へのモーフィング結果. 中間の 4 枚の画像は, それぞれ遷移率 $\alpha = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ に対するモーフィング画像である. 上段: 二重円環, 中段: 三重円環: 下段: 四重円環

動しており, 領域が孤立して移動しているように見える (図 9 上段). 他方, NOR 領域横断距離 d_{jk}^{NOR} を輸送コスト t_{jk} に取り入れた場合は, "A" の中央の横線のクラスタの EMD フローがより狭い NOR 領域を横断して上方のクラスタに対応していることが分かる (図 9 の 2 段目, 左端). これは, 広い NOR 領域を横断する際の輸送コストが大幅に増えるために, その間の輸送が抑制されたためである. 結果として, ユークリッド距離の自乗の場合には現れていた孤立領域のモーフィングが抑制されていることが分かる (図 9 の 2 段目).

"B" から "C" へのモーフィングについても同様の傾向が見られる. ユークリッド距離の自乗が用いられる場合には, "B" の中央の横線のクラスタが様々な方向に移動

している (図 9 の 3 段目) のに対して, NOR 領域横断距離を加えると, それらのクラスタの移動が, NOR 領域を通らない主に 3 方向に限定されていることが分かる (図 9 の 4 段目).

このような文字のモーフィングはビデオ編集応用における新しいトランジション効果の技術としての利用可能性がある. 従来のカットやフェードイン・アウト, スライド, ワイプ等のトランジション効果と比べると, モーフィングによるトランジション効果は独特であり, それが自動対応で実現できる効果は大きいものと考えられる.

3.4 形状の重なりが無い場合への適用

最後は, 形状の重なりが無い場合として, 一つの円盤

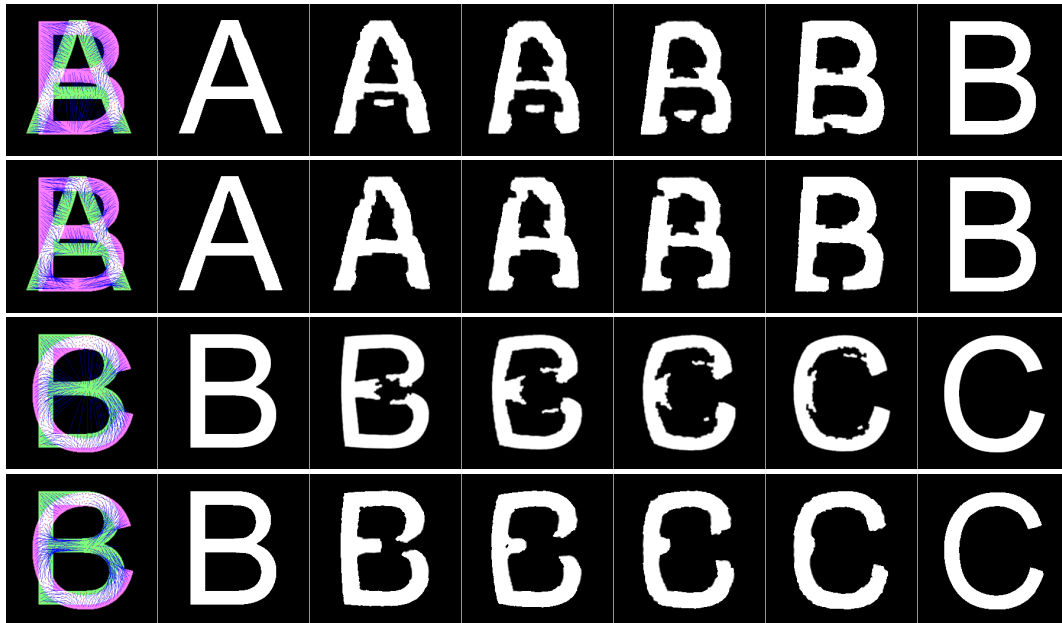


図9 EMD フロー (左端) とアルファベット文字 "A" (種数 1), "B" (種数 2), "C" (種数 0) の間のモーフィング. 奇数段: 輸送コストとして, ユークリッド距離の自乗のみを用いた場合, 偶数段: NOR 領域横断距離も考慮した場合

が二つの円盤に分離する例を扱う. レベルセット法の偏微分方程式に基づく輪郭線の変形モーフィングによる手法 [3] は, 基本的に形状に重なりのある場合に適用できる手法であるため, 今回のような例に直接適用することはできない. 代わりに, 二つの形状間のレベルセット関数を直接アルファブレンディングすることでモーフィング遷移過程を作成すると, 図 10(上段) にあるように, 変形前の円盤が収縮して消滅して, 変形後の二つの円盤については, その中心から出現して変形後の円盤の大きさまで膨張するといった結果が得られる. これはレベルセット法に基づくモーフィングにおいては, ある種のモルフォロジー的な変形が生じるためである. これに対して, 提案手法では従来のワーブに基づく手法に分類されることから, レベルセット法によるモルフォロジー的な変形とは本質的に異なる. 結果として, 図 10(下段) に示すように, 変形前の円盤が二つの半円に分裂して, それぞれが変形後の円盤の形に近づきつつ上下に移動するというモーフィング過程になっている. このようなモーフィング過程は提案手法に独特な現象である.

4. 考 察

提案手法のモーフィング過程においては, クラスタに基づく EMD フローの多対多対応を直接的にクラスタのモーフィングに適用している. 一方, この対応関係に基づいて従来のワーブ関数 [7] [8] [9] [10] [11] [12] を求めることも考えられることから, 従来手法による形状モーフィングの前段処理として提案手法を用いることも可能である.

また, 提案手法のクラスタに基づく EMD フローは, モーフィングのみならず, 形状照合, 可変形状モデリン

グ, シルエットベースの動作解析などへの応用が考えられる. これらの分野に対する従来の輪郭ベースの手法が閉曲線で表現される形状を対象としていたのに対して [18], 提案手法では対象のトポロジーに関係なく用いることができる点が特長である. テクスチャのある画像から抽出したオプティカルフローが実際の動きに対応するのに対して, EMD フローは実際の動きではなく, あくまでも擬似的な動きへの対応である. しかし, このような擬似的な動きも, シルエットに基づく運動解析のための新しい動き特徴としての利用可能性が有ると考えられる.

一方, 本手法においては, クラスタ数 N , 領域横断距離の重み係数 λ^{NOR} , 平滑化項重み λ_{potts} 等, いくつかのハイパーパラメタがあり, これらの値によって計算時間やモーフィング結果が変化することが予想される. 特に平滑化項重み λ_{potts} は, 生成されるシルエットのアーティファクトの大きさによって適切な値が変化することから, これらのハイパーパラメタの設定に関する評価が今後の課題となる.

5. ま と め

本論文では領域クラスタに基づく EMD フローを用いたトポロジー非依存な形状モーフィングの手法を提案した. まず, 形状の領域を FCM クラスタリングにより多数の小クラスタに分割し, 二つのキー形状に対するクラスタ間で EMD を計算する. 結果として得られる EMD フローをクラスタ間の重み付き多対多対応として利用し, クラスタに基づくモーフィングを行う. その際にアーティファクトが生じることがあるため, 空間 2 次元と遷移率 1 次元のシルエットボリューム画像に対するグラフカッ

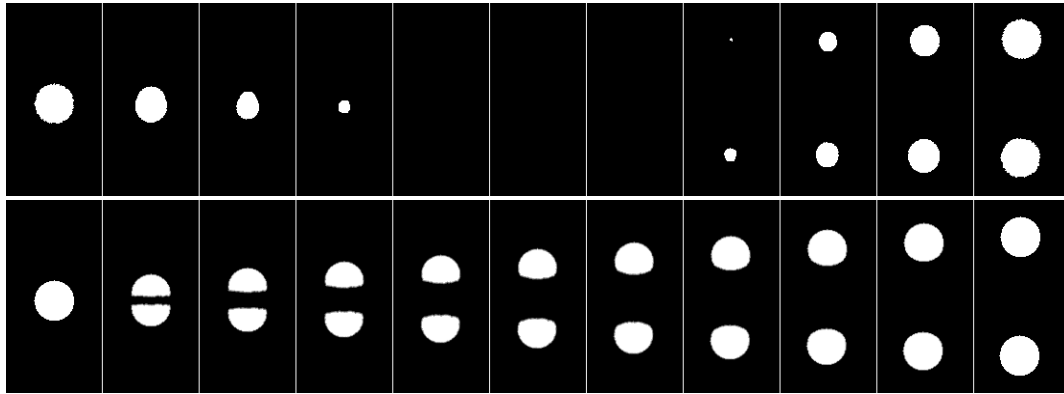


図 10 円盤 (左端) から二つの円盤 (右) への分裂モーフィング. 上段: レベルセット関数のアルファブレンディングによる手法. 下段: 提案手法.

トによるノイズ除去を行い, 2 値化モーフィング画像を作成し, 最後に境界のディザリングを加えた画像を作成する. 実験では, 様々な種数の異なる形状に対するモーフィングを行い, 提案手法の有効性を確認した.

今後の課題としては, 以下が挙げられる.

- EMD フローの重み付き多対多対応に基づくワーブ関数の復元
- EMD フローの疑似的な動き特徴の行動認識や歩容認証等のシルエットベースの認証手法への適用

謝 辞

本研究は科研費 21220003 の助成を受けたものである.

文 献

- [1] G. Wolberg, "Image morphing: a survey," *The Visual Computer*, vol. 14, no. 8/9, pp. 360–372, 1998.
- [2] V. Blanz and T. Vetter, "A morphable model for the synthesis of 3d faces," In *Proc. of ACM SIGGRAPH*, 1999.
- [3] D. Breen and R. Whitaker, "A level-set approach for the metamorphosis of solid models," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 7, no. 2, pp. 172–192, Apr. 2001.
- [4] D. Beymer and T. Poggio, "Image representations for visual learning," *Science*, vol. 272, no. 28, pp. 1905–1909, Jun. 1995.
- [5] T. Cootes, C. Taylor, D. Cooper, and J. Graham, "Active shape models - their training and application," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 61, no. 1, pp. 38–59, 1995.
- [6] T. F. Cootes, G. J. Edwards, and C. J. Taylor, "Active appearance models," *IEEE TPAMI*, vol. 23, no. 6, pp. 681–685, 2001.
- [7] G. Wolberg, "Digital image warping" *IEEE Computer Society Press*, 1990.
- [8] T. Beier and S. Neely, "Feature-based image metamorphosis," *Computer Graphics*, vol. 26, no. 2, pp. 35–42, 1992.
- [9] N. Arad, N. Dyn, D. Reifeld, and Y. Yeshurun, "Image warping by radial basis functions: applications to facial expressions," *CVGIP: Graph Models Image Processing*, vol. 56, no. 2, pp. 161–172, 1994.
- [10] S. Lee, K.-Y. Chwa, J. Hahn, and S. Shin, "Image morphing using deformable surfaces," *Proc of Computer Animation'94*, *IEEE Computer Society Press* pp. 31–39, 1994.
- [11] K.-Y. Chwa, J. Hahn, and S. Shin, "Image morphing using deformation techniques," *J. of Visualization Computer Animation*, vol. 7, no. 1, pp. 3–23, 1996.
- [12] S.-Y. Lee, K.-Y. Chwa, and S. Y. Shin, "Image metamorphosis using snakes and free-form deformations," *SIGGRAPH '95: Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, New York, NY, USA ACM pp. 439–448, 1995.
- [13] P. Gao and T. W. Sederberg, "A work minimization approach to image morphing," *The Visual Computer*, vol. 14, no. 8/9, pp. 390–400, 1998.
- [14] M. Tekalp, "Digital video processing" *Prentice Hall PTR*, 1995.
- [15] A. Toshev, J. Shi, and K. Daniilidis, "Image matching via saliency region correspondences," *Proc. of IEEE computer society conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1–8, June 2007.
- [16] T. W. Sederberg, "A physically based approach to 2-d shape blending," *Computer Graphics*, vol. 26, no. 2, Jul. 1992.
- [17] D. Kaziska and A. Srivastava, "Cyclostationary processes on shape spaces for gait-based recognition," In *proc. of European Conf. on Computer Vision*, 2 pp. 442–453, 2006.
- [18] K. Grauman and T. Darrell, "Fast contour matching using approximate earth mover's distance," *IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 220–227, 2004.
- [19] G. Castro and H. Ugail, "Shape morphing of complex geometries using partial differential equations," *Journal of Multimedia*, vol. 2, no. 6, pp. 15–25, 2007.
- [20] A. M. Bronstein, M. M. B., and R. Kimmel, "Numerical Geometry of Nonrigid Shapes" *Springer*, 2008.
- [21] D. C. Schneider and P. Eisert, "Fast nonrigid mesh registration with a data-driven deformation prior," In *Proc. ICCV Workshop on Non-Rigid Shape Analysis and Deformable Image Alignment (NOR-DIA)*, Sep. 2009.
- [22] S. Osher and J. Sethian, "Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithm based on hamilton-jacobi formation," *Journal of Computational Physics*, vol. 79, no. 1, pp. 12–49, 1988.
- [23] F. Hoppner, F. Klawonn, R. Kruse, and T. Runkler, "Fuzzy Cluster Analysis" *John Wiley and Sons*, 1999.
- [24] H. W. Kuhn, "The hungarian method for the assignment problem," *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 2, no. 1 and 2, pp. 83–97, 1955.