

絵画風画像モーフィング

白石路雄[†], 山口泰[†]

近年のコンピュータグラフィクスでは、様々な画像効果が求められており、絵画風画像の生成技術もその1つとして研究・開発が進められている。本論文では、2枚の画像とそれらの間での位置対応関係を明示的に与え、画像モーフィングと同様に絵画風のアニメーションを生成する「絵画風画像モーフィング」を提案する。絵画風画像のシーケンスからなる絵画風アニメーションでは、フレーム間の連続性が非常に重要な要素であり、ブラシストロークが連続的に変化・移動しなくてはならない。絵画風画像モーフィングでは、2枚の入力画像でのブラシストロークの属性を計算し、各属性を補間することでフレーム間の連続性を保証する。一方、フレームにおける絵画風画像の質を向上させるためにはブラシストロークを大きさの順に塗り重ねることが望ましい。しかし、これはフレーム間の連続性と相反することから、ポップアップと呼ばれる問題が生じることを指摘する。そこで、このポップアップを軽減するために、3次元空間にブラシストロークを傾けて配置する新しいブラシストロークレンダリング手法を提案するとともに、手法の有効性を実験によって示す。

Painterly Morphing

MICHIO SHIRAISHI[†] and YASUSHI YAMAGUCHI[†]

Painterly rendering techniques have been studied for applying special effects to various images. This paper proposes “painterly morphing” which generates a painterly animation from two key images and their correspondence information. Coherency between consecutive frames in a sequence is a key issue of the painterly animation. For instance, each brush stroke must gradually change its position, shape, color, etc., frame by frame. Painterly morphing guarantees this coherency by interpolating those attributes of the initial and final brush strokes calculated from the input images. It is known that better painterly images are obtained by painting brush strokes in their size order. However, it contradicts coherency between frames and causes a “pop-up” problem. A new brush stroke rendering method is proposed in order to solve this pop-up problem. It creates a painterly images with multiple brush strokes located in a 3D space.

1. 背景

これまでに計算機を用いたリアリスティックな画像の生成法について様々な技術が開発され実際の映像制作で多く用いられている。その一方で、イラストレーションやセルアニメーションのようにリアルではない画像や映像を生成する手法も多く提案されてきている。このような手法は、総称してノンフォトリャリスティックレンダリングと呼ばれる¹⁾。

絵画風アニメーションはそれぞれのフレームが絵画のような風合いを持つアニメーションである。絵画風アニメーションの生成技術は、映像制作者が利用でき

る映像表現の幅を広げる、という点で注目を浴びつつある技術である。

しかしながら、絵画風のアニメーションに関する研究はまだまだ発展途上の段階であり、入力されたビデオシーケンスを絵画風に変換する手法には多くの問題点が残されている。本論文では、その問題を解決する糸口として絵画風アニメーションの一種である絵画風モーフィングを生成する手法について考察する。

本論文の構成は次のようになっている。まず、2章において、絵画風アニメーションに関する先行研究について触れ、その問題点を指摘するとともに、本論文で扱う絵画風画像モーフィングを定義する。次に、3章で絵画風画像モーフィングの生成法について述べ、計算機上での実験結果を4章に示す。最後に5章において本論文をまとめる。

[†] 東京大学大学院総合文化研究科
Graduate School of Arts and Sciences, The University
of Tokyo
現在、株式会社ガリレオ
Presently with Galileo, Inc.

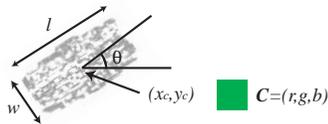


図 1 長方形ブラシストロークの属性⁶⁾

Fig. 1 The attributes of a rectangular brush stroke⁶⁾.

2. 絵画風画像モーフィング

2.1 ブラシストロークモデル

油彩画などの絵画では、顔料を乾性油などの展開材と混ぜ合わせた絵具を用いる。絵画を描くには、絵筆を用いて絵具をキャンバス上に配置するが、絵筆の一描きでキャンバス上に現れるパターンはブラシストロークと呼ばれる。絵画風画像を生成する手法の1つである、ブラシストロークに相当するテクスチャを塗り重ねるブラシストロークモデルは、比較的簡単に実装できることから、多くの油彩画風の画像の生成アルゴリズムで用いられている^{2)~6)}。

使用するブラシストロークの形状には様々なものがあるが、基本的には、図1に示すような長方形形状を用い、以下の属性を用いて制御することが多い。

位置 キャンバスにおけるブラシストロークの位置であり、長方形の中心座標を用いる。

幅 長方形の短辺の長さであり、絵筆の太さに相当する。

長さ 長方形の長辺の長さに相当する。

向き ブラシストロークの長辺がキャンバスの横軸となす角度で表す。

色 RGB空間における座標で表現する。

2.2 絵画風アニメーション

絵画風アニメーションを生成する手法は、入力の種類によって2つに大別できる。第1の手法は、写実的な画像を生成する手法と同様に、3次元物体と照明を空間内に配置した3次元のシーン情報を入力とする手法である^{5),8)}。この手法では、各物体の表面上にマーカーを配置する。ブラシストロークの位置属性は、マーカーをキャンバス面に投影した位置とする。ブラシストロークの位置属性以外の属性は、参照画像と呼ばれる画像をもとに決定され、たとえばブラシストロークの色は、3次元モデルを通常の方法でレンダリングして得られる参照画像をサンプリングして決定する。

第2の手法は、2次元のビデオシーケンスを入力とする手法である^{4),7)}。これらの手法では、描かれているオブジェクトの動きにブラシストロークを追従させるため、画像空間上でのオブジェクトの速度ベクトル

を表すオプティカルフローを算出し、次フレームでのブラシストロークの位置を決定する。また、ブラシストロークの属性の決定には、2次元の入力画像の場合と同様の方法を用いることが多い。すなわち、入力となるビデオシーケンス中のフレームを2次元の入力画像と見なし、配置されたサンプリング点における画像の色や輝度の勾配などの情報をもとにブラシストロークの属性を決定する。

これら2つのアプローチのうち、前者の手法では、ブラシストロークをオブジェクトの動きに追従させることは容易である。しかしながら、後者の手法では、すべてのブラシストロークがオブジェクトの動きに追従できない、という問題が残されている。一般にオプティカルフローの計算では、各フレームにおけるノイズの影響もあり、完全にオブジェクトの動きを算出するのは困難である。このとき、オブジェクトの動きとは無関係に、ブラシストロークがキャンバス上に固定されてしまうという問題が生じる。

この現象は「シャワードア効果」として知られている現象である⁵⁾。これは、シャワールームでシャワーを浴びている人物を外から見ると、実際にはシャワードアについた水滴を見ていることから名付けられた現象である。この現象が生じた絵画風アニメーションでは、キャンバス面にブラシストロークが張り付いているように見え、不自然な印象を与える。

2.3 絵画風画像モーフィングの定義

ところで、一般にアニメーションを作成する場合、キーフレームと呼ばれる特徴的なフレームにおけるデータを作成し、その他のフレームではキーフレームのデータを補間することで生成される。これと同様に、2次元ビデオシーケンス中にキーフレームを設定し、キーフレームにおけるオブジェクトの位置を与えることを考える。

このようなキーフレームは複数設定する必要があるが、本論文では、最も単純な場合として、2枚のキーフレームに対応する画像を与え、その間を補間するシーケンスを考える。この条件は、画像モーフィングとして知られている手法に類似している。画像モーフィングは、2枚の画像間に位置対応関係を与えて、その画像間をスムーズに補間するアニメーションを作成する技術である。たとえば、図2に示すように、2枚の2次元画像と画像間の位置対応関係を入力として与える。モーフィングの手法には様々なものがあるが、本論文ではBeierらの手法⁹⁾を用いており、この手法では位置対応関係を有向線分の組として与える。この入力に対し、画像モーフィングを適用することで、図3



図3 画像モーフィングシーケンス
Fig.3 Painterly morphing sequence.



図2 2枚の入力画像と画像間の位置対応関係

Fig.2 Two input images and correspondence information.

に示すアニメーションシーケンスが得られる。

本論文では、この画像モーフィングシーケンスに絵画風の効果を加えた絵画風画像モーフィングについて議論する。画像モーフィングシーケンスが、ある画像から別の画像へと連続的に変化するのに対し、絵画風画像モーフィングシーケンスは、ある絵画風画像から別の絵画風画像へと変化するムービーシーケンスである。このとき途中の全フレームも絵画風画像となる必要がある。したがって、初期画像と最終画像を絵画風画像として、これらに画像モーフィングを施しただけでは絵画風画像モーフィングとはいえない。

3. 絵画風画像モーフィングの生成法

3.1 ブラシストローク属性の補間

絵画風のアニメーションを作成するには、フレーム間でブラシストローク属性の連続性を保つことが必要とされる。たとえば、通常画像モーフィングシーケンスの各フレームを絵画風画像に変換してアニメーションとすると、各フレームのブラシストロークが独立に描かれるために不自然になる。たとえば、ブラシストロークの位置が固定されるとシャワードア効果が生じるし、フレームごとにランダムに配置するとちらつきの目立つアニメーションになってしまう。これを

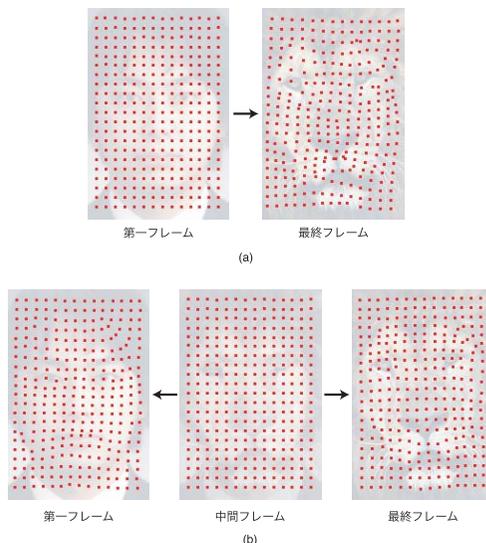


図4 (a) 初期フレームの格子点を写像した結果。(b) 中間画像におけるサンプリング点を格子状に配置した場合
Fig.4 (a) Result of mapping regular grid at the first frame. (b) Result of mapping regular grid at the middle frame.

回避するには、フレーム間でブラシストロークの各属性を連続的に変化させる必要がある。

このために、本手法では第1フレームと最終フレームにおける属性が対応づけられたブラシストロークを生成する。途中のフレームは、対応づけられたブラシストローク属性を補間したブラシストロークによって描画される。

第1フレームと最終フレームでのブラシストロークの位置は、画像モーフィングの際の位置対応関係を持っている。ここで、図4(a)に示すように、第1フレームにおいて格子点を配置すると、最終フレームでは大きくゆがんでしまう。

したがって、図4(b)に示すように、モーフィングシーケンスのちょうど中間となるフレームを求めて、そのフレームに格子点を配置する。次に、モーフィングシーケンスの位置対応関係を用いて格子点を写像し、第1フレームと最終フレームにおける、ブラシ

ストロークのサンプリング点を得る．このようにブラシストロークを配置することで，どちらかの入力画像における格子点を写像するのに比較して，全フレームを通じて，より均等なサンプリング点の配置が可能である．

このサンプリング点において，2枚の入力画像をサンプリングしブラシストロークの属性を決定する．ブラシストロークの属性決定アルゴリズムには様々なものがあるが，本論文では画像モーメントによる手法⁶⁾を用いた．

このように各ブラシストロークの属性を決定した後には描画を行う．各フレームの描画はこれらのブラシストロークを大きさの順にソーティングし，大きいブラシストロークから小さいブラシストロークという順に塗り重ねる．しかしながら，これらのブラシストロークだけでは，ブラシストロークがカバーできない領域が発生し，塗り重ねた結果のキャンバス画像に隙間が生じてしまう．そこで，Goochらの手法²⁾と同様に，別のブラシストロークによって背景となる絵画風画像を生成しておく．このような背景画像の存在により，第1フレームと最終フレームにおけるブラシストロークのサンプリング点が格子点にならないことが画質に影響を与えることはほとんどない．

3.2 ポップアップ

ブラシストロークモデルではブラシストロークの大きさの順に塗り重ねる方が良い結果が得られることが知られている⁶⁾．これは，色の変化の少ない部分は大きいブラシストロークで描き，色の変化の大きい部分は小さいブラシストロークで描くためである．例として，図5に第1フレームを2種類の方法でレンダリングした例を示す．中間フレームにおけるブラシストロークの大きさの順で塗り重ねたものが図5(a)である．第1フレームでのブラシストロークの大きさの順に塗り重ねた結果(図5(b))と比較すると，細かいブラシストロークで描かれるべき，目や鼻や口などの詳細部分が失われてしまっているのが分かる．

しかしながら，ブラシストロークを各フレームごとに大きさの順に塗り重ねると，塗り重ねる順序に関してフレーム間のコヒーレンスが失われ「ポップアップ」問題が生じる．ポップアップはアニメーションの過程で突然ブラシストロークが現れる現象である．たとえば，あるフレームで，図6(a)のように，大きさ3.0のブラシストローク1と大きさ2.7のブラシストローク2が描かれているとする．このとき，ブラシストローク2の方が小さいため，より手前に描かれている．そこで，次フレームでブラシストローク1の大きさが

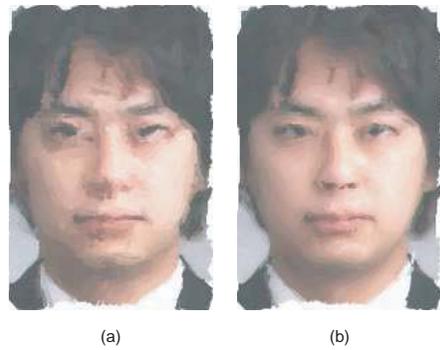


図5 第1フレームのレンダリング結果．(a) 中間フレームでの大きさの順にブラシストロークを塗り重ねたもの．(b) 第1フレームでの大きさの順にブラシストロークを塗り重ねたもの
Fig.5 Result of rendering the first frame. (a) Brush strokes are sorted by the size order at the middle frame. (b) Brush strokes are sorted by the size order at the first frame.



図6 ポップアップが起こる場合
Fig.6 The situation when the pop-up occurs.

3.0から2.8へ，ブラシストローク2の大きさ2.7から2.9へと変化したとする．このとき，ブラシストロークの大きさの順序が変化し，ブラシストローク1の方がより小さく手前に描かれ，図6(b)のように突然前に浮かび上がったように描かれる．この変化がポップアップとして目立ってしまう．

3.3 ポップアップの軽減法

本論文で提案する手法は，3次元空間でブラシストロークを傾けて配置することによりポップアップの軽減を図る．まず，3.3.1項で3次元空間にブラシストロークを配置すれば，既存のブラシストロークのレンダリング手法と同様の結果が得られることを示す．次に3.3.2項において，3次元空間内でブラシストロークを傾けることにより，ポップアップが軽減できることを示す．

3.3.1 3次元空間でのブラシストローク配置

従来の手法では，ブラシストロークを大きさの順にソートして2次元平面上に塗り重ねていた．これと同様の手法として，3次元空間にブラシストロークを配置してレンダリングする手法を考える．すなわち，図7(a)に示すように，中心が (x, y, lw) で xy 平面に平行な長方形を配置する．ここで， x および y はキャンバス上でのブラシストロークの位置であり， l はブラシストロークの長辺の長さ， w はブラシストローク

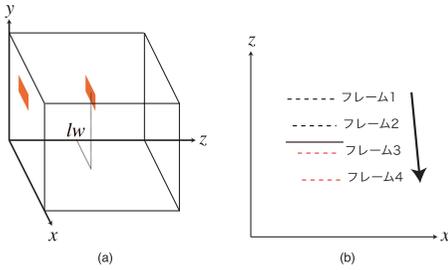


図 7 (a) 3次元空間に配置されたブラシストローク。(b) ブラシストロークの大きさが変化し、破線で描かれたブラシストロークが突然描かれる

Fig. 7 (a) Brush strokes located in 3D space. (b) The brush stroke indicated with broken line suddenly appears because the size of the brush stroke changes.

の短辺の長さを表す。

簡単のためブラシストロークの向きが x 軸方向である

と仮定すると、この長方形の各頂点の座標は、
 $(x - l/2, y + w/2, lw)$, $(x - l/2, y - w/2, lw)$,
 $(x + l/2, y - w/2, lw)$, $(x + l/2, y + w/2, lw)$
 となる。

このように配置した長方形を、視線方向を $(0, 0, 1)$ とした平行投影を行い、 z バッファ法を用いて xy 平面上にレンダリングすると、ブラシストロークの投影像は、

$$(x - l/2, y + w/2), (x - l/2, y - w/2),$$

$$(x + l/2, y - w/2), (x + l/2, y + w/2)$$

となり、ブラシストロークの位置や大きさを反映して描かれることになる。

また、3次元空間に配置された長方形の z 座標がブラシストロークの面積となっていることから、面積の大きなブラシストロークは奥に配置され、小さなブラシストロークは手前に配置される。すなわち、既存の手法で用いられていた、ブラシストロークを大きさの順にソートし、大きいものからキャンバス上に描画していく手法と同様の結果が得られることになる。

このように空間に配置されたブラシストロークは、時間とともに大きさが変化すると、 z 座標が変化する。たとえば、図 7(b) に示すように、大きさが一定のブラシストローク(実線)と徐々に小さくなるブラシストローク(破線)を考える。この場合、フレーム 2 とフレーム 3 では順序が入れ替わっている。この結果、破線で示したブラシストロークが急にキャンバス上に出現することになる。

3.3.2 ブラシストロークの傾斜

前項で、ブラシストロークの3次元空間での奥行き順序が入れ替わることで、ブラシストロークが他のブラシストロークとの順序が入れ替わって手前に表示さ

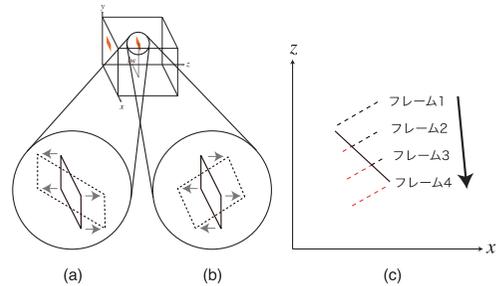


図 8 (a) 3次元空間に配置されたブラシストロークを短辺にオフセットを加えて傾けた例。(b) 長辺にオフセットを加えて傾けた例。(c) ブラシストロークを傾けることで、ブラシストロークが一度に出現する可能性が低くなる

Fig. 8 (a) Brush strokes with offset of shorter edge. (b) Brush strokes with offset of longer edge. (c) The brush stroke is less likely to appear entirely.

れるため、ポップアップが起こることを述べた。そこで、図 8(a) に示すように、ブラシストロークの各頂点を z 軸方向にずらし、 xy 平面と平行ではなくなるように傾けて配置することを考える。

ブラシストロークの傾斜のさせ方はいろいろ考えられるが、代表的な例として図 8 の 2 通りを考えることとする。まず、図 8(a) に示すように、短辺をオフセットし傾ける場合、長方形の各頂点は、

$$(x - l/2, y + w/2, lw - d),$$

$$(x - l/2, y - w/2, lw - d),$$

$$(x + l/2, y - w/2, lw + d),$$

$$(x + l/2, y + w/2, lw + d)$$

となる。ここで d はブラシストロークごとに定まるオフセット量である。この定め方については後に詳しく説明する。また、図 8(b) に示すように、長辺をオフセットし傾ける場合、長方形の各頂点は、

$$(x - l/2, y + w/2, lw + d),$$

$$(x - l/2, y - w/2, lw - d),$$

$$(x + l/2, y - w/2, lw - d),$$

$$(x + l/2, y + w/2, lw + d)$$

となる。これらの長方形を z 軸方向に平行投影した際の投影像は、ブラシストロークを傾けて配置しない場合とまったく同様になるが、最終的なレンダリング結果は異なる。なぜなら、ブラシストロークを傾けて配置すると、図 8(c) に示すように 3次元空間内で近接したブラシストロークは空間的に干渉するからである。この場合では、フレームの進行につれて小さくなるブラシストローク(破線)が描かれる範囲が徐々に大きくなる。このため、キャンバス上にブラシストロークが突然出現する可能性が低くなりポップアップを軽減できる。

ブラシストロークの頂点の z 軸方向へのオフセット量 d は、ブラシストロークごとに固有の定数値でフレームによらず一定とする。 d としては、 $[-\alpha s_{\max}, \alpha s_{\max}]$ の範囲のランダムな値を用いた。ここで、 s_{\max} はブラシストロークのとりうる最大の大きさである。 α はオフセット量の最大値を制御するための値で、0 以上の実数である。ただし、面積に応じたブラシストロークの前後関係を保存するためには、あまり大きな値は不適切であり、 $\alpha \in [0, 1]$ と考えるのが妥当である。

キャンバス上で描かれるブラシストロークの形状は、ブラシストローク間の干渉により、ももとの長方形の一部のみが表示されることになる。干渉による断片化が進むとブラシストロークらしさを損なう可能性が高いため、オフセット量 α を調整する必要がある。この点について 4 章で議論する。

4. 実験と考察

前章で述べた手法を計算機上に実装し実験を行った。実験に関しては、次の 3 種類の入力組を用いた。

入力 A 男性の顔とライオン (図 2)

入力 B 2 羽のインコ (図 9)

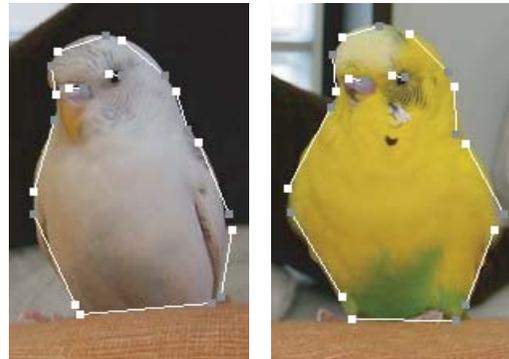
入力 C 男性の顔と女性の顔

画像の大きさはいずれも横 150 ピクセル縦 224 ピ

クセルである。サンプリング点として、中間フレームにおける 2 ピクセル間隔の格子点を用いた。その結果 7,140 個のブラシストロークが生成された。生成された絵画風画像モーフィングシーケンスの例を図 10 に示す。

4.1 ポップアップの軽減

ポップアップがどの程度軽減できたかは静止画を見ただけでは判断しにくい。そこで、 α の値に応じてど



入力画像1

入力画像2

図 9 実験に使用した 2 枚の入力画像と画像間の位置対応関係 (入力 B)

Fig. 9 Two input images and correspondence information (Input B).



(a)



(b)

図 10 入力 A (図 2) から生成した絵画風画像モーフィングシーケンス
Fig. 10 Painterly morphing sequence generated with Input A (Fig. 2).

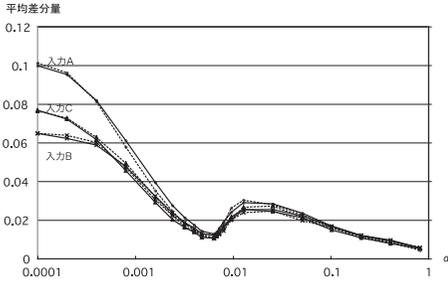


図 11 α と平均差分量間の関係．それぞれの入力について，短辺をオフセットした場合を実線で，長辺をオフセットした場合を点線で示す

Fig. 11 The relation between α and the average difference. The solid lines indicates the case when the offset of shorter edge is used. The dotted lines indicates the case when the offset of longer edge is used.

の程度ポップアップを軽減できたかを議論するために，本節では次に述べる尺度を利用する．フレーム i を描くブラシストローク群を生成し，

- 各ブラシストロークのフレーム i における大きさを z 座標として描いた画像 $I(x, y)$ (本来の描画法)
- 各ブラシストロークのフレーム $i - 1$ における大きさを z 座標として用いて描いた画像 $I'(x, y)$

の 2 つの画像を生成する．ここで， $I(x, y), I'(x, y)$ は，ともに $r, g, b \in [0, 1]$ を成分とするカラー画像とする．この 2 つの画像はフレーム i とフレーム $i - 1$ におけるブラシストロークの奥行きの違いのみを反映した画像であるので，これら 2 つの画像の差分量を用いることで，ポップアップにともなう変化を数値的に近似できると考えた．

画像 $I(x, y)$ と $I'(x, y)$ との各ピクセルの色の差 $d(x, y)$ を次式のように定義する．

$$d(x, y) = |I(x, y) - I'(x, y)| \tag{1}$$

このピクセルでの色差を全フレームの全ピクセルに関して平均したものを平均差分量と定義する．

α と平均差分量の関係について，入力 A, B, C を対象として実験した結果を図 11 に示す．この結果から，全体的な傾向として， α が増加するに従って平均差分量が減少していることが分かる．つまり，ブラシストロークを傾けて配置することでポップアップが軽減されている．しかしながら， α の値が $\alpha = 0.0064$ 近辺を超えると，一時的に平均差分量が大きくなり後に低下するという現象が見られる．これはブラシストロークの傾きが大きくなることによって，他のブラシストロークに覆い隠されていた大きいブラシストロークの一部が前面に出現するためと推測される．

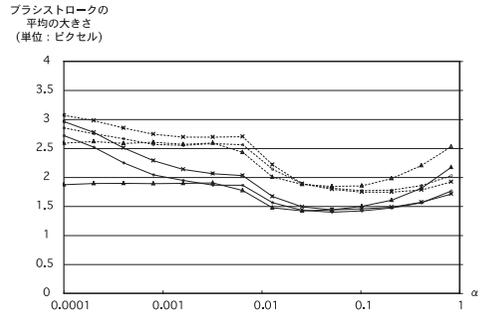


図 12 α とブラシストロークの平均面積の関係．短辺をオフセットした場合を実線で，長辺をオフセットした場合を点線で示す． : 入力 A, \times : 入力 B, \square : 入力 C

Fig. 12 The relation between α and the average size of brush strokes appeared in the canvas image. The solid lines indicates the case when the offset of shorter edge is used. The dotted lines indicates the case when the offset of longer edge is used. : Input A, \times : Input B, \square : Input C.



図 13 短辺にオフセットを加えて入力 A から生成した結果 (ランダムな色のブラシストロークを用いた結果)．左から $\alpha = 0.0, 0.008, 0.128$ の場合

Fig. 13 The results from Input A with the offset of shorter edge. The brush stroke color is randomized. The parameter α is 0.0, 0.008 and 0.128 respectively.

4.2 ブラシストロークの断片化

ブラシストロークを 3 次元空間に傾けて配置しレンダリングすると干渉が起こり，ブラシストロークの形状は単なる長方形ではなくなり，その一部のみが画像上に表示される．ブラシストロークのオフセット量，すなわち α を大きくすると，ブラシストローク間の干渉が増加するためブラシストロークの断片，すなわち，最終的な表示部分は小さくなることが予想される．この最終的な表示部分の平均面積は，フレームの全ピクセル数をキャンバス上に描かれているブラシストロークの個数で除算することによって得られる．

図 12 に，入力 A, B, C に関して α と最終的な表示部分の平均面積との関係をプロットしたグラフを示す．この結果から， α の増加にともなって平均面積が減少していることが確認できる．また，長辺をオフセットした場合と短辺をオフセットした場合を比較すると，前者の方が平均面積が小さくなる傾向が見られる．さらにいずれの場合も 0.01 前後で，平均面

積の減少割合が一時的に大きくなっていることが判明した。

個々のブラシストロークの形状を確認するためにランダムな色を割り振って描画した画像を図 13 に示す。この結果からも、 $\alpha = 0.0064$ あたりまでは長方形に近い形状を保持しているが、それ以降では断片化が進んでいることが確認できる。

前節の実験結果とあわせて考えると、今回の実験に用いた画像組に関しては、各フレームでのブラシストロークがある程度の大きさを保ち、なおかつ、ポップアップが少なくなる α の値として 0.0064 前後が望ましいことが分かった。

5. ま と め

5.1 ま と め

本論文では絵画風アニメーションにおける問題について議論するため、2 枚の画像と対応関係をもとに、絵画風画像モーフィングを実現する手法を提案し議論を行った。

ブラシストローク属性の連続的な変化を実現するために、キーフレームでの属性を補間したブラシストロークを用いることとした。このために、画像モーフィングの中間フレーム上で格子状のサンプリング点を取り、このサンプリング点を 2 枚の入力画像に写像した結果の位置で第 1 フレームと最終フレームにおけるブラシストロークの属性を決定する。

各フレームでは画像の詳細部分を保存するのにブラシストロークを大きさの順に描くことが望ましいが、フレーム間の連続性と相反するためにポップアップという問題が生じることを指摘した。さらに、このポップアップを除去するために、ブラシストロークを 3 次元空間内に傾けて配置してレンダリングする手法を提案した。さらに、ポップアップの程度を反映する平均差分量を定義し、実験によって提案手法の有効性を確認した。

5.2 展 望

1 章で述べたように、本研究における目標は、任意のビデオシーケンスに複数のキーフレームを設定し、それを絵画風アニメーションに変換する手法の確立である。この手法は、本論文で述べた 2 枚の画像間を絵画風アニメーションとして補間する技術を応用することで実現できると思われる。最も大きな問題点は、キーフレームの前後でブラシストロークの連続性を保証することである。その際には、キーフレームにおけるブラシストロークの集合を決定し、本手法における中間フレームにおけるブラシストロークの集合との関

連づけを行う手法が必要となると思われる。

本論文では、ブラシストロークを傾ける大きさの制御にパラメータ α を用いている。本論文では、特定の画像組に関しては α の最適値を求めるための指標として、4 章で示した平均差分量やブラシストロークの平均面積を利用することを提案している。しかしながら、その他の画像組についても自動的に最適な α を決定できることが望ましい。このために今後の課題として、様々な実験を行ったうえで、平均差分量と α の関係、あるいは、ブラシストロークの平均面積と α の関係を理論的に解明することが必要であろう。

謝辞 本研究の一部は財団法人旭硝子財団からの研究助成、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (B) 731-14380137 を受けて行われた。

参 考 文 献

- 1) Lansdown, J. and Schofield, S.: Expressive Rendering: A Review of Nonphotorealistic Techniques, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.15, No.3 (1995).
- 2) Gooch, B., Coombe, G. and Shirley, P.: Artistic Vision: Painterly Rendering Using Computer Vision Techniques, *2nd International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR 2002)* (2002).
- 3) Hertzmann, A.: Painterly Rendering with Curved Brush Strokes of Multiple Sizes, *Proc. 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (1998).
- 4) Litwinowicz, P.: Processing Images and Video for an Impressionist Effect, *Proc. 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (1997).
- 5) Meier, B.: Painterly Rendering for Animation, *Proc. 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (1996).
- 6) Shiraishi, M. and Yamaguchi, Y.: An Algorithm For Automatic Painterly Rendering Based On Local Source Image Approximation, *1st International Symposium On Non Photorealistic Rendering and Animation (NPAR2000)* (2000).
- 7) Hertzmann, A. and Perlin, K.: Painterly Rendering for Video and Interaction, *Proc. 1st International Symposium On Non Photorealistic Rendering and Animation (NPAR2000)* (2000).
- 8) Daniels, E.: Deep Canvas in Disney's Tarzan, *SIGGRAPH 99 Conference Abstracts and Applications* (1999).
- 9) Beier, T. and Neely, S.: Feature-based Image

Metamorphosis, *Proc. 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (1992).

(平成 15 年 2 月 17 日受付)

(平成 15 年 11 月 4 日採録)



白石 路雄 (正会員)

1974 年生 . 2003 年東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻博士課程修了 . 2003 年より株式会社ガリレオ最高技術責任者 . コンピュータグラフィクス等の研究に従事 . 学

術博士 .



山口 泰 (正会員)

1961 年生 . 1988 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了 . 同年東京大学教養学部助手 . 1989 年東京電機大学工学部講師 , 1992 年同助教授 . 1993 年東京

大学大学院総合文化研究科助教授 , 2002 年同教授 . 2003 年より東京大学大学院情報学環教授 . コンピュータグラフィクス , 画像処理 , 形状モデリング等の研究に従事 . 工学博士 . ACM , IEEE CS , SIAM , 電子情報通信学会 , 精密工学会等の会員 .