

水面の絵画調映像生成システムの開発

鈴木 淳 示[†] 佐藤 倫 也^{††}
土橋 宜 典[†] 山本 強[†]

コンピュータグラフィックスにおいて、近年、非写実的画像生成と呼ばれる技術に注目が集まっている。本研究では、NPR手法の一つとして、水面の絵画調画像生成を提案する。提案法では、3次元コンピュータグラフィックスの技術を利用することで効率的に水面の絵画調画像を生成する。また、提案法は水面の静止画像だけでなく、川の流れなどのアニメーションの表現も可能とする。そして、提案法を利用したインタラクティブなシステムを構築した。これにより結果画像にユーザの意図を反映することができる。

Development of Painterly Image Generation System of Water Surface

JUNJI SUZUKI,[†] TOMOYA SATO,^{††} YOSHINORI DOBASHI[†]
and TSUYOSHI YAMAMOTO[†]

Recently, many researchers have paid attention to a technique called non-photorealistic rendering (NPR). In this paper, as one of the NPR techniques, we propose a method for painterly rendering of water surface. We propose an efficient method for generating painterly images of water surface by making use of techniques used in the field of three-dimensional computer graphics. Our method can create not only static images but also painterly animations of water such as the river. Moreover, we develop an interactive system using our method. This enables the user to reflect the user's mind on the resulting images.

1. はじめに

近年、3次元コンピュータグラフィックスを用いた映像生成が盛んに行われている。中でも画家やデザイナーが描く絵に似た画像を生成する手法である Non-Photo Realistic Rendering(NPR)に関する研究に注目が集まっており、TVや映画でのアニメーション作成やゲームの制作等への応用が期待されている。本研究では、NPRの中でも画家の筆の動き(ブラシストローク)を再現する手法である絵画調映像について注目する。

従来ではアニメーションを作成する際、手作業を強いられるため画家が絵を一枚一枚筆やペンなどを使って描かなければならず、多大な手間と時間がかかるという問題があった。そこで、コンピュータグラフィックスを利用することによって大幅な手間の削減、修正が容易という利点が得られ、視点を移動させたシーンの描画や物体自体を動かすといったアニメーションの

作成が可能となるため、現在さまざまな研究が行われている。Curtisらは、3次元モデルからの水彩画風の画像生成を提案した²⁾。また、Litwinowiczは、ビデオ画像からの絵画風アニメーション作成を提案した³⁾。

特に背景画像として用いられる水面は、常に動きに変化があるためシーン内でのキャラクタ等の動きの有無に関係なく絵を描かなければならず、コンピュータグラフィックスによる映像生成に期待が高まっている。その一方で従来の絵画調映像に関する研究では、水面をレンダリングの対象としたものはあまりない。

そこで本論文では水面に注目し、絵画調映像の生成にユーザの意図を反映したシステムの開発を提案し、アニメーションの作成を実現する。

以降、本論文の構成は、2章で従来手法についての簡単な説明を行い、3章で提案手法の概要を述べ、4章、5章で詳しい処理について述べる。次に6章で提案手法を用いた実験についての説明、考察を行い、最後に7章でまとめとする。

2. 従来手法の概要

3次元コンピュータグラフィックスを用いた絵画調

[†] 北海道大学大学院情報科学研究科, 札幌市

^{††} 北海道大学大学院工学研究科, 札幌市

映像生成に関する代表的な従来手法として Meier による手法¹⁾がある。Meier の手法の流れは、まず 3 次元空間内に配置したモデルの情報からブラシストロークの始点を決定し、色などの属性情報を付加する。さらに 2 次元スクリーンに投影してブラシストロークをテクスチャマッピングすることにより絵画調映像を生成するものである。これによりアニメーション作成時にフレーム間の一貫性を保つことができるため、ちらつきのない映像生成を実現している。本研究では Meier の手法を利用するため、以下に概要を説明する。

2.1 パーティクルの生成

ブラシストロークの始点となるパーティクルと呼ばれる微小な粒子を生成する。レンダリングの対象はポリゴンモデルであることを前提とし、パーティクルはモデルの表面にランダムに生成する。このとき生成するパーティクルの数はポリゴンの面積に比例する。

2.2 座標変換

スクリーン上でブラシストロークをレンダリングするため、スクリーン座標が必要である。したがって 3 次元空間内にあるパーティクルを座標変換しスクリーン座標を計算する。

2.3 ブラシ属性の決定

生成した各パーティクルにブラシの色、サイズ、ストロークの方向（ストロークベクトル）といった情報を付加する。色については、絵画調画像の元となる画像（リファレンスイメージ）より参照する。リファレンスイメージはレンダリングするモデルに適切な色の設定を行い、さらに光の照射等によりシェーディングを施すことで作成する。サイズ、ストロークベクトルに関しても同様にリファレンスイメージを用いて決定する。また、ブラシの形についてはユーザがテクスチャ（ブラシテクスチャ）で指定し、その輝度値はブラシストロークを塗り重ねる際の不透明度に相当する。

2.4 レンダリング

2.3 節で決定したブラシ属性を用いてブラシストロークを作成し、パーティクルを始点としてスクリーン上にテクスチャマッピングすることでレンダリングを行う。また、レンダリングする順序は視点からパーティクルまでの距離の降順である。

以上の処理を毎フレーム行うことによりアニメーション作成を行う。

水面の絵画調映像を生成するために考えられる手法としては、流体解析や波動解析といった物理シミュレーションによりリアルな水面を生成し、Meier の手法を適用することがあげられる。しかし、シミュレーショ

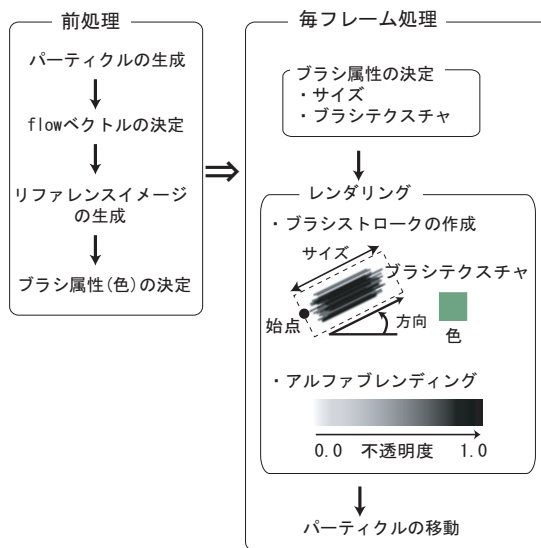


図 1 映像生成プロセス

ンは計算コストがかかるだけでなく、必ずしもユーザの意図した流れを表現できるとは限らない。また、水面などの流動体について適用した場合、フレーム間での色の変化によるちらつきが発生する。

提案手法では、これらの問題を解決し、ユーザの意図をインタラクティブに反映しながら絵画調映像を生成できるシステムの構築を目指す。

3. 提案手法の概要

提案手法における映像生成の簡単な流れを図 1 に示す。提案手法では、水面の生成に物理シミュレーション計算を用いず簡単なモデルを用いて絵画調映像を生成する。また、アニメーション作成に関しては水の流れる方向（flow ベクトル）に沿ってパーティクルを移動させることで流れを表現する。また、ブラシの色についてキーフレーム法を用いて補間することによりちらつきを抑制する。

前処理では、キーフレームにおけるブラシストロークの色を決定する。そのため、flow ベクトルを設定し水の流れを作る。また色を参照するリファレンスイメージの生成を行う。ブラシ属性（色）の決定においては補間を用いてキーフレーム間の色を決定する。

毎フレーム処理では、ブラシ属性（サイズ、ブラシテクスチャ）を決定し、スクリーン上でブラシストロークを再現し、絵画調画像を生成する。

以下、各処理について詳しく述べる。

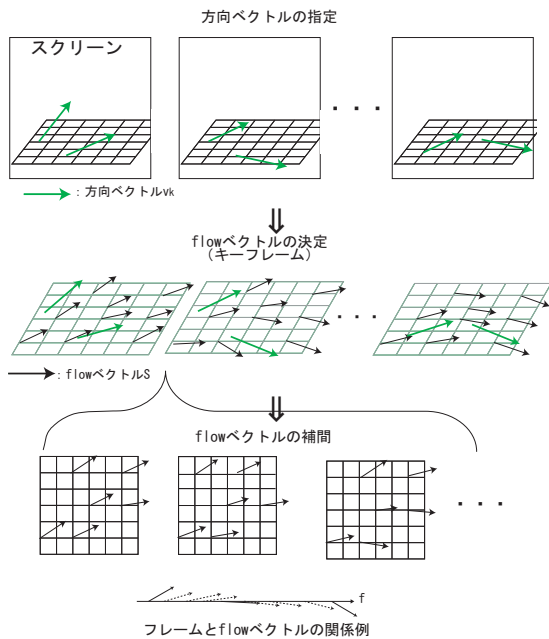


図 2 flow ベクトル設定の流れ

4. 前処理

4.1 パーティクルの生成

3次元空間内にて一枚の平面を水面として扱い、水面内に任意の数だけランダムに点を生成しパーティクルとする。生成したパーティクルを2次元座標へ透視変換することによりスクリーン座標を求め、最終的なブラシストロークの始点位置とする。

4.2 flow ベクトルの設定

水面の表現において、特に重要な要素の一つが水の流れ方であると考えられる。本研究では、水の流れの方向をユーザが指定することで結果画像にユーザの意図を反映させる。ここで、計算量を少なくするため水面を構成する格子点に flow ベクトルを設定し、格子点間についてはバイリニア補間を用いて flow ベクトルを決定する。ここで、全フレームで同じ flow ベクトルを用いては水面の動きが単調になる。しかし毎フレーム異なる flow ベクトルを設定しては膨大な手間がかかり、また、アニメーションにおいて一貫性を保つこともできない。したがって、本研究では任意のフレーム数の flow ベクトルをキーフレームとして設定し、キーフレーム間を補間することで全フレームの flow ベクトルを設定する。

処理の流れは図 2 のように、まずスクリーン上に n 個の方向ベクトルを指定し、水面上に逆透視変換を行うことで \mathbf{v}_k を得る。次に式 1 のように重みを用いて

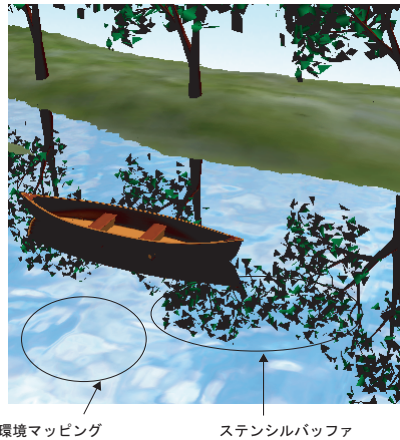


図 3 リファレンスイメージ

足し合わせることでキーフレームにおける水面の flow ベクトル \mathbf{S} を決定する。最後にキーフレーム間の flow ベクトルを線形補間により求める。また、ある格子点におけるフレームと flow ベクトルの関係例を図 2 に示す。

$$w_k = \exp(-d_k/\alpha), \quad \mathbf{S} = \sum_{k=1}^n (w_k \cdot \mathbf{v}_k) \quad (1)$$

ここで、 d_k は \mathbf{v}_k の始点から格子点までの距離、 α は比例定数である。また、得られた flow ベクトルは 5.2 節でブラシストロークを作成する際のブラシ属性 (ストロークベクトル) としても用いる。

4.3 リファレンスイメージの生成

リファレンスイメージとは絵画調画像の元となる画像であり、本研究では 4.4 節でのブラシストロークの色を決定する際に利用する。

提案手法では、水面への映り込みに物理シミュレーション計算を用いない。そこで空の映り込みには環境マッピングを、その他のオブジェクトの映り込みにはステンシルバッファを用いることで擬似的に映り込みを表現する (図 3 参照)。また、この処理にはグラフィックスハードウェアを利用するためレンダリング時間の短縮を図ることができる。

4.4 ブラシ属性 (色) の決定

ここでは、キーフレームにおける各パーティクルのブラシの色を決定し、補間することでフレーム間の色を決定する。まずキーフレームにおけるブラシの色は、4.2 節で設定した flow ベクトルに沿ってパーティクルを移動させ、透視変換により求めたスクリーン座標における色をリファレンスイメージから参照する。ここで参照する色は波がない水面の色とする。

水面に波が発生した場合、水面における法線が変化し、反射方向がずれる。すなわち、波の動きに合わせて、その都度反射のシミュレーションを行わなくてはならないが、一般的に計算コストが高い。本研究では、ブラシストロークが占める領域内の色を平均化したものをブラシの色として考え、パーティクルの近傍から色 P_k を取得し元の色 P_0 と式 2 のように平均化することで反射方向のずれを考慮し、あたかも波が立っているかのように表現する。

$$P' = \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n P_k \quad (2)$$

すべてのキーフレームでのブラシの色を決定後、色の補間を行い各フレームにおける色 $C(t)$ を決定する。本研究では式 3 のように B-Spline 補間を用いることでなめらかな色の変化を可能とする。

$$C(t) = \sum_{j=-2}^{n+2} N^3(t-j)K_j \quad (0 \leq t \leq n) \quad (3)$$

ここで、

$$N^3(t) = \begin{cases} (3|t|^3 - 6|t|^2 + 4)/6 & (-1 < t < 1) \\ -(|t| - 2) 3/6 & (-2 < t < 2) \\ 0 & (t \leq -2, t \geq 2) \end{cases}$$

であり、 n は補間フレーム数、 K_j はキーフレームにおけるブラシの色である。

5. 毎フレーム処理

5.1 ブラシ属性の決定

(1) サイズ

座標変換には透視変換を用いているため遠方の水面にはパーティクルが密に存在する。したがってブラシのサイズは、式 4 のように透視変換時に得られた深度値 z に反比例したパラメータとする。

$$Size = \frac{\beta}{z} \quad (4)$$

ここで β は比例定数である。また本論文ではストロークの長さをサイズとしている。幅に関してはすべて一定の値を用いる。

(2) ブラシテクスチャの決定

レンダリング対象に同一のブラシテクスチャを使用すれば単調な表現になってしまう。したがって、複数のテクスチャを使用することで、水面上での場所による流れの違いを表現する。本論文では、川のような流れを考慮したブラシテクスチャを生成し適用する手法とあらかじめユーザが用意したブラシテクスチャを設定する手法の二通りについ

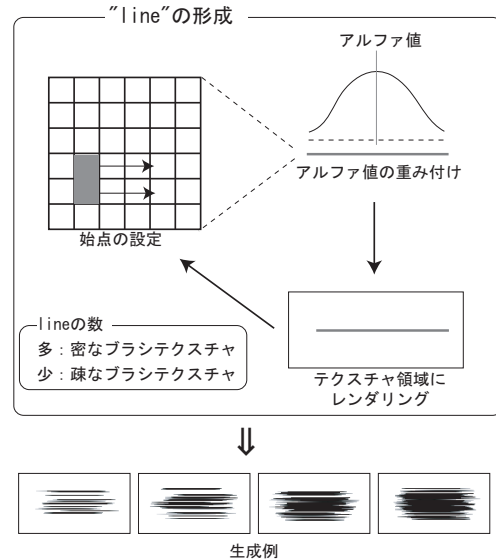


図 4 流れを考慮したブラシテクスチャ

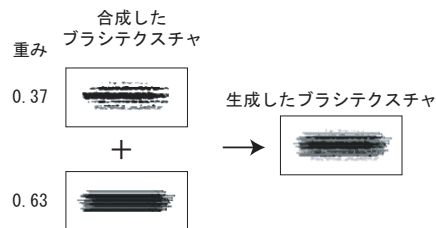


図 5 ユーザ指定のブラシテクスチャ

て提案する。

(a) 流れを考慮したブラシテクスチャ

流れを考慮するために"line"の集合により方向性のあるブラシテクスチャを生成する(図 4 参照)。各々の"line"には任意の太さ、重み付けしたアルファ値を持たせ、テクスチャにレンダリングすることでブラシテクスチャとする。

各パーティクルにおけるブラシテクスチャの決定方法は、4.2 節でユーザが指定した方向ベクトルが任意の領域に存在する数に依存し、密なブラシテクスチャと疎なブラシテクスチャが生成される。ここで、疎なブラシテクスチャは"line"間に間隔ができ、レンダリングの際ブラシストロークの重なりによって方向性ができやすく、水の流れの変化を表現することができる。密なブラシテクスチャは"line"が密集しており変化が少ないゆるやかな水の流れを表現できる。

(b) ユーザ指定のブラシテクスチャ

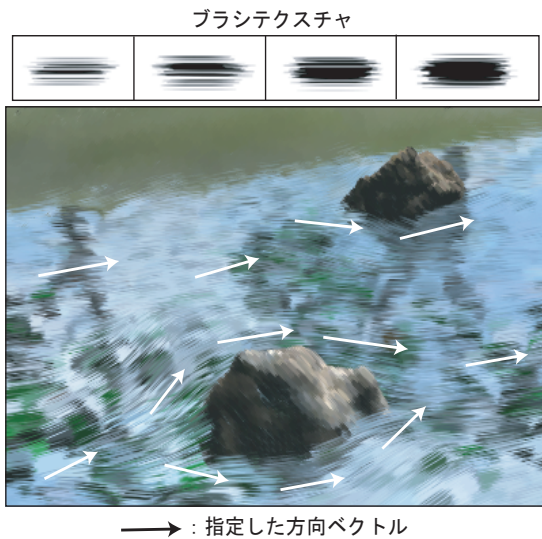


図 6 適用例 1

ユーザがあらかじめ用意した複数のブラシテクスチャをパーティクルごとに以下のように設定する。

まず、あらかじめ用意したブラシテクスチャを選択する。次に任意のスクリーン座標を選択し水面上へ逆透視変換することにより 3 次元座標を得る。最後にパーティクルとの距離に反比例した重みをつけ、ブラシテクスチャを合成することで生成する。生成例を図 5 に示す。

5.2 レンダリング

図 1 に示すように、決定したブラシ属性（色、サイズ、ストロークベクトル、ブラシテクスチャ）を用いてブラシストロークを作成する。レンダリングはブラシテクスチャに設定されているアルファ値（不透明度）を用いてアルファブレンディングを行い、スクリーン上にブラシストロークをテクスチャマッピングすることで絵画調映像を生成する。このとき、すべてのパーティクルを深度値（透視変換後の z 値）の降順にソートレンダリングする順序を決定する。また、パーティクルを flow ベクトルに沿って移動させることにより次フレームにおけるブラシストロークの始点位置とする。

6. 実験結果

提案手法を用いて水面の絵画調映像生成システムの開発を行った実験結果を示す。実験環境は、CPU:Pentium4 3.06GHz、グラフィックスハードウェア:GeForce4Ti 4800SE、生成した画像の解像度は縦

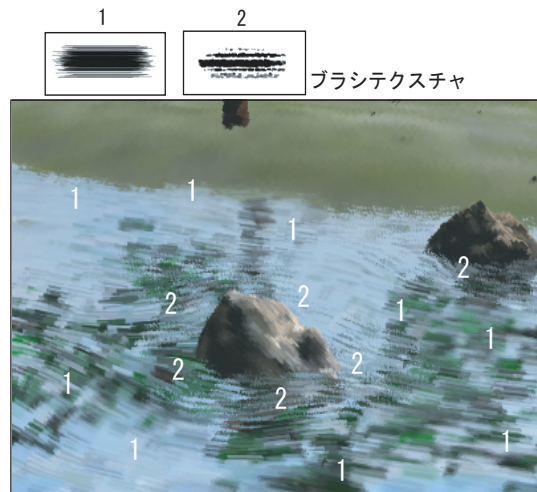


図 7 適用例 2

400 ピクセル、横 400 ピクセル、レンダリングに用いた水面のパーティクル数は約 7000 である。

図 6 は、5.1 節においてブラシテクスチャを決定する際 (a) を適用した画像であり、図 7 は (b) を適用した画像である。提案手法によりブラシテクスチャの違いにより物体を避ける水の流れなどを表現した映像生成が可能である。また、ストロークベクトルをユーザ側で指定するため水の流れる方向を制御することができるため、曲がりくねった河川等のレンダリングも可能である。図 9 のように提案手法を応用することで滝の絵画調映像を生成することも可能である。図 8 に開発したシステムを示す。本システムにより、ユーザの意図をインタラクティブに反映しながら絵画調映像を生成することが可能である。120 フレームのアニメーション作成に要した時間は前処理で約 8 秒、毎フレーム処理では約 0.15 秒であるため高速な映像生成が可能であると言える。

7. まとめ

本論文では、水面の絵画調映像生成システムの開発について提案した。提案手法では、B-Spline 補間を用いることでちらつきを抑えたアニメーションの作成が可能である。また、生成システムの開発により、ユーザ側の意図をインタラクティブに反映した映像生成が可能となった。

今後の課題としては、さらなるちらつきの改善等の画質の向上やレンダリングの高速化が挙げられる。



図 8 水面の絵画調映像生成システム

参考文献

- 1) Barbara J.Meier, "Painterly Rendering for Animation," , *Proc. of SIGGRAPH'96*, pp477-484(1996).
- 2) Cassidy J.Curtis, Sean E.Anderson, Joshua E.Seims, Kurt W.Fleischer, and David H.Salesin, "Computer-Generated Watercolor", *Proc. of SIGGRAPH'97*, pp.421-430(1997).
- 3) Peter Litwinowicz, "Processing images and video for an impressionist effect", *Proc. of SIGGRAPH'97*, pp.407-414(1997)

ブラシテクスチャ



水飛沫に使用した
ブラシテクスチャ

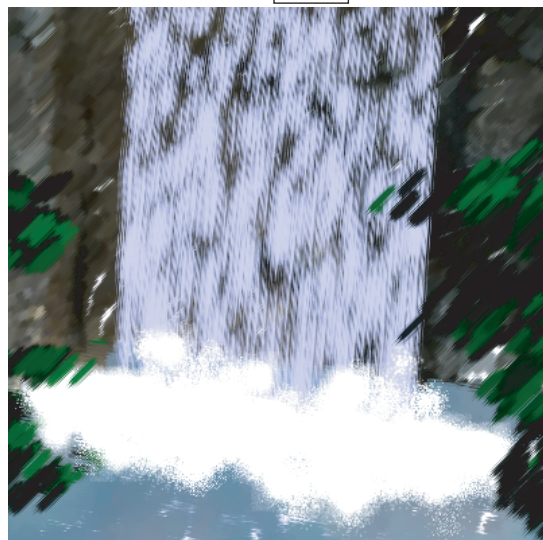


図 9 滝の絵画調映像