

CG マーブリングの基礎的検討

藤田 昇、茅 暁陽、今宮 淳美
山梨大学工学部電子情報工学科

概要

製本などの身近な工業製品の表面に、マーブリングという伝統的な技法で作られた印象的な模様を目にすることがある。本研究は、このマーブリング技法に基づくテクスチャ生成技法をコンピュータ上に実現することを目的とする。研究の第一歩として、本論文では実際のマーブリングの基本的な作成方法やその特徴について考察し、CG による実現方法を検討する。マーブリング特有の模様は、溶液が攪拌されたときに生じる流れ場に沿って、液表面上の顔料の粒子が流されることによって作り出されると考えられる。この仮定のもとで、2次元の流れ場における色付き粒子の移流を計算するアルゴリズムを開発し、人工的な流れ場を与えてその効果を具体的に検証する。

Initial studies on CG Marbling

Noboru Fujita, Xiaoyang Mao, and Atsumi Imamiya
Department of Electrical Engineering and Computer Science,
Yamanashi University

abstract

Marbling, both as an art and a powerful texture generation technique, has been loved and used by people all over the world for more than several centuries. This paper surveys the basic principles of traditional marbling and exploit the possibility of simulating it with computer graphics. We model the generation of typical marbling textures as the displacement of colored particles in 2D flow fields and present an algorithm for shifting the particles along the local pathlines. Several marbling like textures has been generated by experimentally applying the proposed algorithm to the artificially designed 2D vector fields.

1 はじめに

印象的で綺麗な模様を作り出すマーブリング (marbling) は、古来より世界各地で広く知られている伝統的技法の一つである [1]。この技法では、顔料を落とした特定の溶液を、櫛等を使って流動させることにより、液面上に文字通り大理石の模様を作り出し、完成後の模様を紙等に写し取る。マーブリングによって生成される模様は、芸術的な作品としてだけでなく、我々が日常よく目にするような包装紙やポストカード、本あるいは衣類やスカーフの柄などの工業デザインとしても重用されている。しかし、現実のマーブリングにおける溶液の流動は、本来的に不可逆操作であり、一度出来てしまった不本意な模様を元に戻すようなことはできない。効果的な模様を生成するためには、溶液の粘性、顔料の性

質、櫛の形状や攪拌時の軌跡・速度、写し取る紙の材質等の多くの事項を調整しなければならず、手間のかかる反復作業が強いられる。

そこで本研究では、このマーブリング技法をテクスチャ生成法としてコンピュータ上で実現することを試みる。マーブリングは、感性だけに依存する手法ではなく、旧来の知見を分析することによって明確な規則性が見い出せる点に、CG の対象としての魅力が存在する。CG マーブリングは、一般のアプリケーションと同様に、undo/redo を含む対話的操作環境をデザイナーに提供し、所望のテクスチャを得るまでの試行錯誤の過程を効率化することができる。また、テクスチャジェネレータを既存の CAD/CAM のシステムに組み込めば、デザインしたテクスチャを各種のプロダクトに直接的に利用することも期待できる。さらにテクスチャデータペー

スは、再現された既存の優れたマーブリング模様の継承、発展にも寄与することができる。

本論文の目的は、今後の本格的なマーブリングテクスチャ生成法の実現に向けて、予備的なアルゴリズム作成と考察を行うことにある。次節で現実のマーブリングの概略を説明した後、3節ではマーブリング溶液における顔料の2次元的な移流のモデルに基づいて、顔料を落として生成された初期のテクスチャ画像を変形するアルゴリズムの基本設計を行う。続いて4節では、同アルゴリズムを実装し、2種類の簡単な人工的流れ場を与えることによって、スキャナで取り込んだ初期画像から、現実のマーブリングが作り出す模様に近いテクスチャが実際に生成できることを実験的に確認する。最後に5節で、今後の研究に向けての課題を述べる。

2 マーブリングの概略

マーブリングは古くから世界中で用いられてきた伝統的な模様生成技法である。その起源は、現在のところまだはっきりとされていないが、一説によれば、13世紀ごろにイスラム圏からヨーロッパにもたらされ、本の表紙などの装飾によって広まったと言われている。また、平安期まで遡ることのできる日本古来の「墨流し」と呼ばれる伝統的な技法を起源とする説も有力視されている。

墨流しでは、粘性のない水面上に墨を落として基礎となる模様を作り、息を吹きかけるなどして、模様を作り出すが、マーブリングを用いた生成行程はそれとは異なり、以下のような3つの基本ステップから構成される：

1. 小石模様の生成

粘性のあるゴム溶液に、絵の具などの数色の顔料を適当に落して表面を埋めて、無数の丸い小石が飛び散ったような「小石模様」(図1)を作る。

2. 溶液の攪拌

小石模様が得られた液面上の模様を、等間隔に釘などを打ちつけた櫛や棒などを用いてゆっくりとかき混ぜ、さまざまな模様を液面上に作り上げる。

3. 転写

液面を固定化した後、模様を紙に写し取り、紙面を水洗いして乾かす。

マーブリングで使われるゴム溶液には、粘性が高いり状のものが使われる。粘性は、顔料の沈み込

みを防止し、溶液の攪拌時の乱流生成を抑止する上で重要である。また、顔料同士の混合を避けるために、牛胆という液体を顔料に添加することもある。

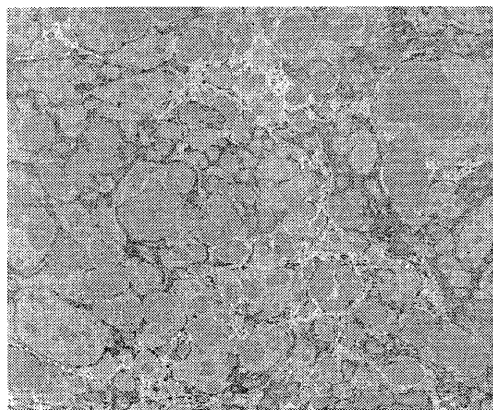


図1: 小石模様の例 (文献 [1] より)

小石模様は、その小石の大きさや配色により最終的な模様に必要な影響を与えるが、マーブリングらしい印象的で多様な模様を生成する上で決定的な役割を果たすのは、攪拌に用いられる用具の形状と攪拌の仕方にある。マーブリングの代表的な模様には、櫛目模様 (図2)、矢羽根模様 (図3)、渦巻模様 (図4) などがある。櫛目模様はその名の通り、等間隔に釘を打ち付けられた櫛状の道具を通して得られる模様である。櫛の目は釘の間隔によりその細かさが変わる。この櫛目の間から逆方向に櫛を通すと矢羽根模様となる。渦巻模様は竹ぐしなどの細い棒を用い、渦を描くように動かすことで模様ができる。



図2: 櫛目模様 (文献 [1] より)

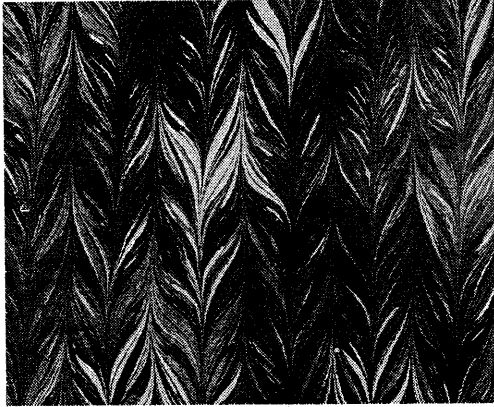


図 3: 矢羽根模様 (文献 [1] より)



図 4: 渦巻模様 (文献 [1] より)

これらの他、顔料の拡散の度合を利用した、静寂模様、ストーンモント模様、さらに、櫛と拡散を利用したゼブラ模様なども知られている。CG マープリング独自の模様は、これら代表的な模様の組み合わせ・発展になると考えられる。

小石模様のテクスチャ生成自身も、興味ある CG の問題の一つであるが、ここでは、実験に用いる小石模様のテクスチャはスキャナで取り込むこととし、攪拌によるテクスチャ変形のモデル化に焦点を当てることにする。

3 溶液攪拌アルゴリズム

実際のマープリングでは、櫛や棒を動かしたときに溶液中に流れ場が生じる。この流れ場に沿って溶液上の顔料が移動することにより小石模様が変形

を受け、マープリング特有の模様が生じると考えられる。顔料は溶液表面に薄く漂っていることから、マープリングは 2 次元の問題として近似することができるかと仮定する。この仮定から、溶液表面に広がる顔料を色の付いた粒子の集まりとして、櫛や棒の動作によって駆動される流れ場を記述できれば、その流れ場に沿った色付き粒子の移流現象として模様の攪拌をシミュレートすることができると考えられる。

ここでは、入力画像の各ピクセルを、顔料の粒子と仮定する。また、櫛や棒を動かしてできるベクトル場は、時間とともに変化する非定常流となることから、流れに沿って粒子を移動させるために、流跡線 (pathline) を計算する必要がある。流跡線とは流れに沿って移動する粒子の軌跡のことであり、各時刻における流体の速度ベクトルを用いて、数値積分により算出することができる [4]。

以上のことをベースにした小石模様の変形アルゴリズムを図 5 に示す。ここで、小石模様 P 、ベクトル場 G を入力とし、出力を画像 O とする。また、 F は衝突判定フラグである。

```

出力画像  $O \leftarrow$  小石模様  $P$ ;
フラグ  $F$  を 0 で初期化;
for( 全てのピクセル  $P(x,y)$  ){
    格子  $G(x,y)$  での流跡線を計算;
 $x' \leftarrow$  流跡線の終点での  $x$  座標;
 $y' \leftarrow$  流跡線の終点での  $y$  座標;
 $v \leftarrow G(x',y')$ ;
    if(  $F(x',y') == 1$  ){
        proc(  $x',y',v$  );
    }
     $O(x',y') \leftarrow P(x,y)$ ;
     $F(x',y') = 1$ ;
}

```

図 5: 小石模様の変形アルゴリズム

ここで、ベクトル場に沿って移動させられた粒子が同じピクセルに入り込むという可能性を考慮する必要がある。この矛盾を解消する副関数 $\text{proc}()$ が重要である。そこでは、粒子同士が衝突したと考え、その周辺で粒子が入っていない位置を探してそこに格納する。もし、直接隣接しているピクセルに空きが無ければ、隣の粒子を押し処理を再帰的に繰り返し、粒子の格納先を探索していく。この粒子周辺での探索や隣接した粒子を押しするという処理では、その方向を重視する必要がある。ここでは、流跡線上の辿ってきた方向と衝突が起こるピクセルでのベクトル方向を考慮し、その 2 つのベクトルの和の方向へ優先的に処理を行なうこととする。

図6にアルゴリズムを示す。

```

proc(x,y,v)
{
  if(座標(x,y)が領域外) goto lab;
  v' ← G(x,y) + v;
  周囲のピクセルを探索(v'方向を優先的に
  処理);
  if(周囲に粒子を格納するピクセルが無い){
    x' ← v方向に隣接する格子のx座標;
    y' ← v方向に隣接する格子のy座標;
    proc(x',y',v');
    O(x',y') ← P(x,y);
  }else{
    x' ← 格納先のx座標;
    y' ← 格納先のy座標;
    O(x',y') ← P(x,y);
    F(x',y') = 1;
  }
}
lab:
}

```

図6: 粒子衝突時の格納先検索アルゴリズム

実際には、上記のアルゴリズムの作用はピクセル処理の順序に大きく依存する点に注意してほしい。

4 実験

本節では、前節のアルゴリズムを実装し、2つの簡単な定常流を用いてマーブリング模様テクスチャを生成する実験結果について述べる。実験に用いる流れ場は、現実の櫛や棒の動きを記述する非定常流からはまだほど遠いが、ここでは提案したアルゴリズムの効果の一次的検証をその目的とする。

4.1 例1: 平行流による櫛目模様の生成

図2の櫛目模様や図3の矢羽根模様には規則的な顔料の移動が見られる。そこで、図7に示されるような、同一の方向を向く速度ベクトル場を指定し、上記のアルゴリズムを図1に与えられた小石模様のテクスチャに適用した結果を図8に示す。この結果の画像を見る限りでは、実際の櫛目模様に近い効果が得られていることがわかる。

4.2 例2: CavityFlowによる模様生成

次に閉じた容器内の連続的な流れ場の例として、CavityFlowを用いて実験を行った。CavityFlowとは図9に示される渦状の流れである。この流れ場を

用いて上述のアルゴリズムを適用した結果を図10に示す。この結果の画像より、渦に沿って移流しているのがわかる。しかし、所々でノイズのように孤立したピクセルが見られる。

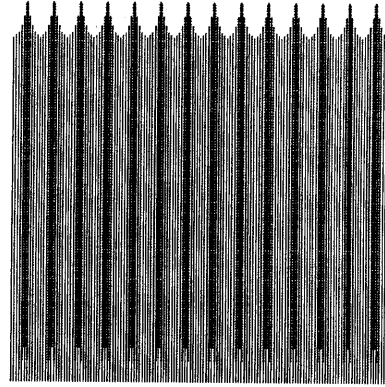


図7: シフト量

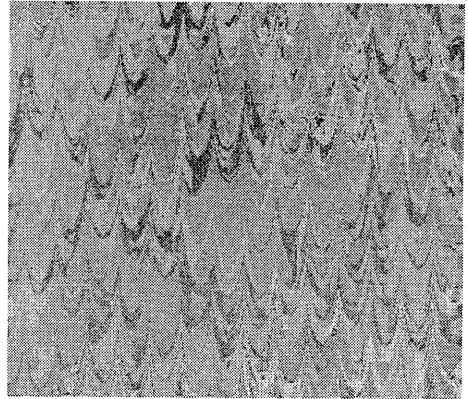


図8: シフトにより生成した画像

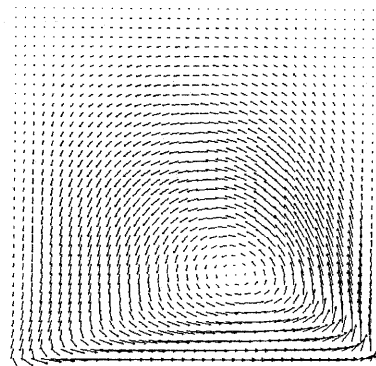


図9: CavityFlow

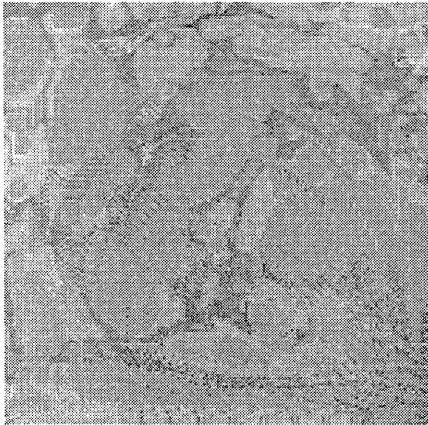


図 10: CavityFlow により生成した画像

5 まとめ

本論文では、はじめに実際のマーブリングの調査を行ない、その特徴や性質を検討した。その検討内容に基づき、色つき顔料粒子の移流現象のシミュレーションにより、スキャナから取り込んだ小石模様画像からマーブリング模様のテクスチャを生成するアルゴリズムを設計した。さらに、簡単な人工の流れ場を用いた初期的な実験により、同アルゴリズムの適用可能性に対する基礎的指針を得た。

CG マーブリングによって発生することができるテクスチャの種類を現実の場合と同じくらいに増やし、かつその模様の表現上の質を向上させるためには、溶液攪拌を記述する流れ場をより忠実にモデリングすることが最優先の課題である。

また、今回実装した粒子の移流アルゴリズムでは、入力画像の各ピクセルを顔料の粒子と仮定し、個々の粒子の流れに沿って移動させているため、流跡線計算における数値積分の誤差により、同色粒子の散逸化現象が生じるという問題がある。これは、現実のマーブリング溶液の特徴に反するものである。この点を改善するために、牛胆のもつ顔料散逸防止の制約を移流アルゴリズムに組み込む必要がある。

さらに、今回提案した粒子の衝突を解消するアルゴリズムでは、周辺での格納先を探索し、無ければ隣接した粒子を押ししていくという局所的なルールに基づく再帰的手続きをとっている。しかし、衝突による粒子の移動の影響は模様全体に及ぶであろうと考えられる。大局的な処理を考慮するにあたっては、たとえばセラオートマトンを応用することが考

えられる。

この他、前段の小石模様のテクスチャ生成、また後段の紙等へのテクスチャマッピングも併せて実現し、マーブリングの全ステップを網羅したシステムの実装を目指す予定である。

謝辞

流体について助言を頂いた山梨大学工学部機械システム工学科の宮田勝文教授に感謝します。また、cavity データセットを提供して頂いた宮地英生さんに感謝します。

この研究は部分的に通信・放送機構からの平成9年度受託研究費で支援されている。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] 貴田 庄, "母と子のマーブリング", 美術出版社 (1992)
- [2] 河村 哲也, "流体解析 I", 朝倉書店 (1996)
- [3] 河村 哲也, 渡辺 好夫, 高橋 聡志, 岡野 覚, "流体解析 II", 朝倉書店 (1997)
- [4] D.Stalling and H.-C.Hege, "Fast and Resolution Independent Line Integral Convolution." *Proceedings of SIGGRAPH'95*, ACM SIGGRAPH, pp.249-256. (1995)