グラフィクスとCAD 81－12
（1996．8．23）

シームレステクスチャ生成とマッピング

橋本 秋彦　　下原 勝憲

hashi@nttcvg.hil.ntt.jp　katsu@nttcvg.hil.ntt.jp
ＮＴＴヒューマンインタフェース研究所映処部
〒238-03 神奈川県横須賀市武1-2356　TEL 0468-59-4982

シームレステクスチャを四角形領域内に生成する方法を提案した．このシームレステクスチャは，任意の向きで四角形領域を並べても境界が必ず連続する，境界連続で内部パターンが異なり，かつ，境界近傍と内部で質感が変わらないテクスチャを複数生成できる等の特徴がある．これを用いて複数パターンのシームレステクスチャを予め生成し，レンダリング時にはこの中から適当に選択して向きをランダムに変えながらマッピングすることにより，

1．少量のマッピングデータを用いて大面積のマッピングがテクスチャの境界を見せることなく可能
2．テクスチャパターンの単純な繰り返しが見えず，あたかも一枚の大面積のテクスチャデータをマッピングしたような効果
3．レンダリング中にテクスチャの計算／生成がない単純マッピングなので処理が高速

等の特徴が得られ，マッピング面積を気にすることなく質の高いテクスチャマッピングをすることが可能となった．また，本方法は従来のテクスチャマッピングに，複数のテクスチャからの選択機能，マッピング向きの選択機能を付け加えるだけで良く，単純な処理なのでハードウェア化も容易である．

Seamless Texture generating and mapping methods

Akihiko Hashimoto and Katsunori Shimohara

hashi@nttcvg.hil.htt.jp　katsu@nttcvg.hil.ntt.jp
Advanced Video Processing Laboratory, Human Interface Laboratories, NTT
1-2356 Take Yokosuka-Shi Kanagawa 238-03 Japan

We have developed Seamless Texture generating and mapping methods. A complex and seamless texture can be mapped by using a few of small seamless textures, and mapping size is unlimitted. Mapping process is very simple and fast because of no texture synthesizing process.

1．はじめに

テクスチャマッピングは少ない計算コストでＣＧのリアル性など質感を効率よく向上できる重要な技術である．しかし，用意したテクスチャサイズよりマッピング対象面のサイズが大きい場合，面積の不足分をどう補って全面にマッピングするかが問題であった．

テクスチャを単純に繰り返してマッピングするだけでは，明らかに繰り返し部分の境界が不連続になる．簡易な対処法として繰り返しの際テクスチャを裏返してマッピングする方法もあるが，境界で画素値が連続する分だけ不連続感は減じられるものの本質的な解決にはほど遠い．

一方，テクスチャデータを予め用意するのではなく，レンダリングと同時にテクスチャを計算し生成値を用いる方法がある．テクスチャ生成に無限距離まで定義された関数を使用するのであればこの方法は前記問題を本質的に解決する．しかし，この方法ではレンダリング時にテクスチャ計算のオーバーヘッドが加わってしまい，特に重い計算コストを要する生成関数や，再帰的処理を行う生成関数を用いる場合に問題が大きい．逆に座標からの単純な四則，剰余計算で表現できる生成関数を用いればオーバーヘッドは軽微であるが，チェッカーボード模様等の単純な幾何学パターンしか得られないので有効性の範囲が限定される．

本稿は，以下に示す３つの課題，

1．レンダリング時にはデータのマッピングだけで済む．
2．テクスチャに不連続な部分が発生しない．
3．テクスチャパターンの単純な繰り返しが見えない，つまり，あたかも一枚の大面積のテクスチャデータをマッピングしたかのような効果を有する．

の実現をねらいとしたテクスチャの生成とマッピング方法について検討し，上記の課題を全て満足するシームレステクスチャの生成，マッピング方法を提案するものである．

2．単純シームレステクスチャ

横幅Ｌｘ，縦幅Ｌｙの長方形領域を考える．これを隙間なく並べたときに境界で不連続にならない，即ち，シームレスなテクスチャを該領域内に生成できれば前記課題の１と２は解決できる．

これの実現方法としては，

一撃的にテクスチャを生成する方法については，使用する生成関数の基本波周波数が，横周期Ｌｘ，縦周期Ｌｙの周期となるようにする．

書き込み処理を逐次行ってテクスチャを生成する方法については，書き込み時に書き込み座標に対してＬｘ，Ｌｙで剰余をとり，剰余値を新たな書き込み座標として書き込む．

の２通りの方法がある．

前者の例として，空間周波数に変調をかけてテクスチャを生成する方法を考えてみる．この方法の場合では，変調波および被変調波を共に横周期Ｌｘ，縦周期Ｌｙを基本波周波数とする周期関数を用いることによって変調後の波形は条件を満たし，該波形を用いて生成したテクスチャはシームレスとなる．図１に空間周波数変調法によるシームレステクスチャの生成結果を示す．

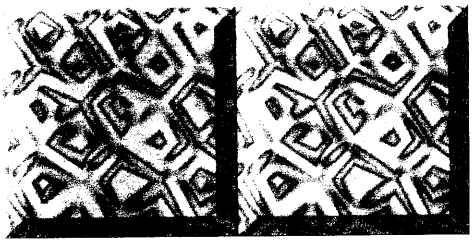

図１

後者はフラクタル法から人手による書き込み方法まで幅広い生成方法に対応できる有用な方法であり，インプリメントも比較的容易である．原書き込み座標がｘ０，ｙ０の時，

ｘ ＝ ｘ mod Ｌｘ；　ｙ ＝ ｙ mod Ｌｙ；

として，座標ｘ，ｙに書き込めば，全書き込み処理終了後にシームレステクスチャが生成される．この方法は手動生成か自動生成かを問わなければ公知の方法でもあり，身近なところに応用例を見いだせる．（例：ガストやスカイラークガーデンに敷かれたタイルカーペット，ＤＱ，

ＦＦ等のＲＰＧで使われるの世界地図など）

更に座標変換式を工夫することによって面白い効果を得ることができる．例えば，

```
y = y0 mod Ly;
if ((y/y0) mod 2 == 0)
    x = x0 mod Lx;
else
    x = (x0−Loff) mod Lx;
```

なる変換式を用いると，オフセットLoffをかけながら配列した時にシームレスとなるテクスチャを生成することができる．

3．多様性を有するシームレステクスチャ

前節で述べた手法を使うことによりシームレステクスチャを生成することは比較的簡単に実現できる．また，このテクスチャを用いることによって課題１と２は解決される．しかし，同パターンのテクスチャが規則正しく並ぶので，課題３の［テクスチャパターンの単純な繰り返しが見えない，つまり，あたかも一枚の大面積のテクスチャデータをマッピングしたかのような効果を持つ．］は依然未解決である．

我々はこれを解決するために次の方法を検討した．

A．境界で連続し内部パターンの異なるテクスチャの複数生成

B．向きを変えて並べても境界で連続するテクスチャの生成

Aを実現するためには，テクスチャパターンの質感が境界近傍と内部で同一であることが必要である．これを実現するための方法は使用するテクスチャ生成方法に依存するが，シームレス化可能な生成関数であるならば比較的実現し易い．

むしろAの問題な点は，課題３の効果を視覚的に十分感じさせるためにはある程度のパターン数を必要とすることである．必要数はテクスチャパターンに依存し，４－５枚程度ないと十分な効果をあげられないこともある．たとえ必要なパターン数が複数あっても計算機内に閉じた話であれば大きな問題ではないが，実際の製品への応用を図る場合，生産／流通／販売／管理／施工コストの削減のためパターン数は極力少ないのが望ましい．

そこでBの方法の併用を検討する．例えば，９０度単位任意の向きで接続しても境界連続なテクスチャを正方領域内に生成できれば，Aにおいて４枚分のテクスチャを用意する効果を１枚で持たせることができ，必要枚数を最大１／４に削減することができる．

4．接続の向き任意なシームレステクスチャ

境界でテクスチャが連続することを境界面が連続につながっていると見なすと，一定の向きで接続して境界連続なテクスチャの生成面は平面ではない．更に，９０度あるいは１８０度単位任意の向きで接続して境界連続なテクスチャの生成面はトポロジカルに見ると平面はもとより多様体ですらない．図２，図３にそれを示す．

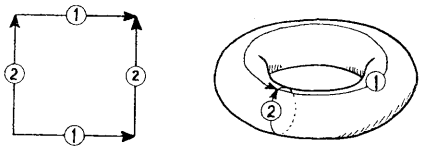

図２　a　b

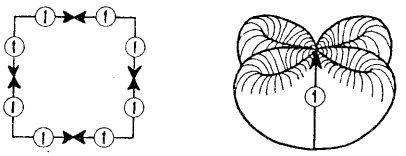

図３　a　b

図２ａにおいて同番号の矢印で示した辺は共有されており，隣接する平面は矢印の方向が一致するようにお互いに連続につながっている．図２ａ上にテクスチャを生成すれば同一方向の向きで境界の連続するテクスチャが得られ，その曲面のトポロジーは図２ｂの多様体となる．多様体の任意の局所面の性質は平面と同等なので境界近傍と内部の面の性質の違いに由来する質感の変化は起きない．

ところが，図３ａに従うと９０度単位で任意の向きに境界の連続するテクスチャが得られる

が，そのトポロジーは図３ｂのようになる．これは多様体ではないので境界近傍は平面と性質が異なる．この点を考慮しないと境界近傍と内部で質感の異なるテクスチャパターンが生成されてしまう．そこで，境界近傍と内部でテクスチャ生成条件が等価になるような補正をかけてテクスチャを生成しなければならない．

5．具体例１（ランダム書き込み法）

９０度あるいは１８０度単位任意の向きで並べても境界連続なテクスチャで内部パターンの異なるテクスチャの複数生成の方法について，ランダム書き込み法を例にとって説明する．

ランダム書き込み法とは用意したテクスチャ要素を書き込み面内に座標（ｘ，ｙ），テクスチャ要素の向きΘで次々に書き込んでいく方法である．ｘ，ｙ，Θはランダムに与えられるものとする．また，書き込み面を長さＬの正方領域とした時，画素の書き込み座標は常にＬで剰余をとるものとする．

ここで，テクスチャ要素を内包する最小の円の半径をｒとし，書き込み座標は円の中心座標を表しているものとする．すると，書き込み座標（ｘ，ｙ）が，

ｘ＜ｒ／２，　ｘ＞１－ｒ／２，

ｙ＜ｒ／２，　ｙ＞１－ｒ／２

のいずれかの条件を満たすなら，内包円は境界上にまたがっている．この時の書き込みの向きがΘであるなら，ｘ座標，ｙ座標，Θが各々

（ｙ，１－ｘ，Θ＋９０）

（１－ｘ，１－ｙ，Θ＋１８０）

（１－ｙ，ｘ，Θ＋２７０）

で指定された位置と向きにテクスチャ要素を３つ書き加えることによって境界上で隣接する面上のテクスチャ要素が連続する．

これでシームレステクスチャが一応できるが，上記の追加した書き込みのために境界近傍の書き込み頻度は内部の４倍になる．これについては内部の書き込み座標の指定頻度を４倍にすることによって同等の書き込み頻度に補正する．

また，Θを乱数によらず制御して与える場合，上記処理のため境界近傍のΘの統計的分布が９０度回転対称になるので内部で与えるΘの統計的分布も９０度回転対称となるように補正する．

次に内部パターンの異なるテクスチャを複数枚生成する方法について述べる．原シームレステクスチャ生成時に，境界にまたがったテクスチャ要素の書き込み位置ｘ，ｙと向きΘ，および内部に書き込んだテクスチャ要素の総書き込み数を履歴に残す．

新たに生成する時は，履歴に従って境界にまたがるテクスチャ要素を書き込み，次に新しい乱数系列に基づいた内部への書き込みを履歴の総書き込み数だけ行うことによって，境界で連続し，かつ，内部パターンの異なるシームレステクスチャが生成できる．

複数生成する場合，書き込みの方法に注意する必要がある．書き込み関数が書き込み前の画素値と書き込みの画素値について可換でない場合，内部と境界近傍の書き込みを均一に混ぜて行わなければならない．内部と境界近傍の書き込みの選択にＤＤＡ法を用いれば，指定された個数を均一に混ぜて行う処理を高速に実行できる．

6．具体例２（フラクタル法）

別な例として，中点変位法によるフラクタル生成法のシームレス化を述べる．中点変位法による面のフラクタル生成では，正三角形の４分割が一般的であるが，図３上で行うのには都合が悪いので，図４に示す正方形から菱形，菱形から正方形の分割を交互に行ってフラクタルを生成する．中点はどちらか一方の対角点の画素値の平均にノイズを加えて決定するものとする．

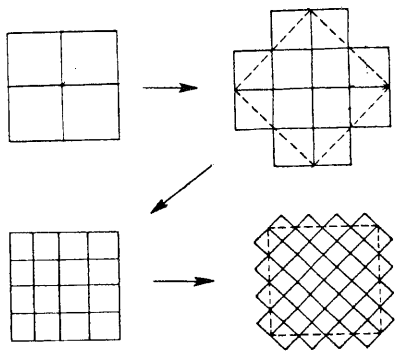

図４

ところで，図４の菱形から正方形への分割を行う際，境界をまたぐ菱形は１頂点を正方領域外に持つことになる．図２ｂ上では領域外点に相当する位置は一意に決まるが図３ｂ上での相当する位置は４点あり，折り返し面の位置も含めると７点ある．しかし，自分自身を含めた８点の平均値にノイズを加える処理を行うと境界近傍が内部に比べて不自然になだらかになってしまう．これは８点の平均値をとる処理が平滑化フィルタとして作用するからである．

一方，正方領域内の１点と領域外７点のうちランダムに選択した１点との間で平均値を求めるようにすれば領域外と領域内は同等の条件になる．しかしながら，対角頂点が中点計算に用いられる確率が内部では１／２であるのに対して，境界をまたぐ場合には１／８になってしまう．これは境界近傍と内部の性質の差に由来して起こることであり両方同時に境界近傍で同等にすることができない．そこで，両者の中間をとって４点の組を２組作り，どちらか一方の組をとった後でその４点の平均値にノイズを加えることとする．

７．生成結果のマッピング例

本フラクタル法によって生成したシームレステクスチャの画像を図５に示す．使用されているテクスチャは，向きを変えて接続しても境界連続なテクスチャであり，内部パターンの異なる４種類の組を用いている．濃淡は生成されたフラクタルの画素値に対応しており一種の等高線ともみなせる．ただし，画素値と濃淡値の対応は非線形なので等高線の間隔と画素値の間に比例関係は成立しない．

本方法で生成したシームレステクスチャを向きを変えて並べることによって，境界で不連続性によるつなぎ目が見えず，境界近傍と内部でテクスチャの質感も一定であり，同一パターンの繰り返しも見えないテクスチャを得ていることが図５よりわかる．

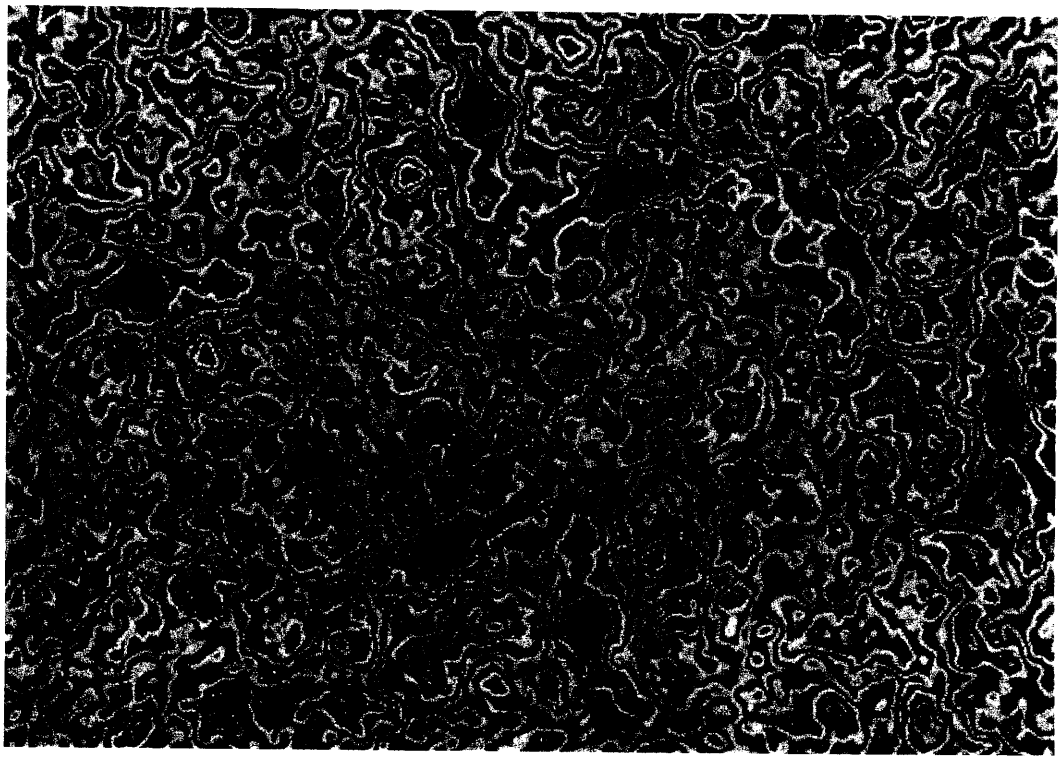

図５

8．まとめ

シームレステクスチャを四角形領域内に生成する方法を提案した．本方法は，

1．任意の向きで四角形領域を並べても境界が必ず連続する．
2．境界連続で内部が異なり，かつ，境界近傍と内部で質感が変わらないテクスチャを複数生成できる．

と言う特徴がある．これを用いて複数のシームレステクスチャを予め生成し，レンダリング時にはこの中から適当に選択して向きをランダムに変えながらマッピングすることにより，

1．少量のマッピングデータを用いて大面積のマッピングがテクスチャの境界を見せることなく可能
2．テクスチャパターンの単純な繰り返しが見えない，つまり，あたかも一枚の大面積のテクスチャデータをマッピングしたかのような効果を持つ．
3．テクスチャ生成とレンダリングが別プロセスなのでレンダリング時のオーバーヘッドがほとんどない．

等が実現でき，マッピング面積を気にすることなく質の高いテクスチャマッピングをすることが可能となる．

また，本方法は従来のテクスチャマッピングに，複数のテクスチャからの選択機能，マッピング向きの選択機能を付け加えるだけで良い．これは非常に単純な処理であるのでハードウェア化も容易である．

本方法で残された課題について述べる．

第1の課題は，境界近傍と内部の質感を同じにするための補正方法である．隣接点数や書き込み頻度の違いに基づく差を補正する方法や補正量は，数学的に明確であり簡単に求められることが多い．

ところが，本来境界近傍と内部で面の性質が異なるので上記書き込み条件を同等に補正しても生成されたテクスチャパターンに癖が発生することがある．この癖を除去するには，結果としての見栄えを同じにするように生成条件を近傍と内部で異なるようにしなければならない．この逆補正は補正方法も補正量もテクスチャ生成方法に強く依存するばかりかヒューリスティックに決めざるを得ないところがあり，より統一的で数学的に根拠のある補正の考え方が求められる．

第2の課題は有効性の評価である．シームレス化そのものの効果は明白であるが，はじめに示した［テクスチャパターンの単純な繰り返しが見えない，つまり，あたかも一枚の大面積のテクスチャデータをマッピングしたかのような効果］と言う課題については，テクスチャパターン，生成枚数，評価者の違いによりかなり変動する．また，4方向に向きを変えたテクスチャは内部パターンの異なるテクスチャ4枚ほどパターンの独立性が高くないので必ずしも必要なテクスチャの枚数を1／4に削減できるとは言えない．経験上1／2から1／3程度と感じられるが，これもテクスチャのパターンに強く依存し，これらを定量的に把握するためには心理評価実験が欠かせない．残念ながら，我々はこれらの分野については知見も経験も（時間も！）乏しい．この分野に詳しい外部の方々と共同実験等ができれば幸いである．

今後の発展課題として次のようなことに取り組む．

一つは天然テクスチャのシームレス化である．自然界に存在する天然のテクスチャに対する需要は大きく，これをシームレス化できれば産業に大きな貢献ができる．そこで質感の変化を最小限に抑えながらシームレス化する方法について今回の研究成果も反映させながら検討していきたい．

もう一つはソリッドテクスチャへの展開である．ソリッドテクスチャは，データ量が膨大になるためにより効率的なデータ格納方法が求められる，天然のソリッドテクスチャを3次元的に入力することはほとんど不可能なため計算機による自動生成が2次元の場合より重要である等，本技術の特徴がより有効に生かせられる．

補正方法については若干3次元特有の検討が必要と思われるが，生成方法自体は2次元から3次元への拡張だけなので容易に拡張できる．