

正方形粒子の最密充填手法を用いた石畳テクスチャの生成

宮田 一 乗[†] 伊 藤 貴 之^{††} 嶋 田 憲 司^{†††}

本論文では、正方形粒子の最密充填手法を応用した石畳テクスチャの生成手法を提案している。引力や斥力を持つ四角形粒子を、力学シミュレーションによって与えられた領域内部に最密充填して、敷石の敷き詰めパターンを生成する。その後、各四角形粒子を3次元の敷石形状に置き換えて、石畳テクスチャを生成する。敷石形状は、サブディビジョンサーフェイス法で自動生成され、その表面にはフラクタルノイズを用いて微細形状が付加される。本手法では、道路形状の境界形状と敷石の平均サイズなどが幾何データとして指定され、敷石の表面の粗さや色、光学属性などの属性データも合わせて指定される。提案手法では、従来の手法と比較して短い計算時間で、現実感のある石畳テクスチャを自動生成することが可能になった。

Generating Pavement Textures via Close Packing of Squares

KAZUNORI MIYATA,[†] TAKAYUKI ITOH^{††} and KENJI SHIMADA^{†††}

This paper presents a method of generating pavement textures via close packing of squares. A pattern of packed square cells for a given area is generated by performing particle simulation with proximity-based forces. The pavement texture is then obtained by generating a stone shape for each cell with the subdivision surface method and then applying fractal noise to create a detailed surface geometry. In this method, the boundary shape of the pavement and the average size of the pavement stones are specified as input geometric data, along with attribute data such as the roughness, color, and optical attributes of the stones. The proposed method automatically generates a realistic looking pavement texture for an arbitrarily shaped pavement with much lower computational cost than previous methods.

1. はじめに

CGで現実感のある画像を生成する技術は、いかにして物体を忠実に表現するかの技術である。物体を特徴付ける要素としては、大きく分けて、物体の形状と、物体表面の色情報や光学属性などの表面属性がある。物体の表面属性を表現する場合、一般的には、パンプマッピングなどのさまざまなマッピング手法がとられている。CGデザイナーがマッピングに利用できる素材としては、市販のCD-ROMやインターネット経由で入手できる素材集、およびテクスチャ生成のプログラムから出力されるデータなどがある。

本論文で表現対象としている石畳を表現する場合、CGデザイナーが路面の敷石を1つ1つモデリングして

表現することが理想ではあるが、大変な労力を要するため現実的ではない。一方、石畳の写真素材を路面にマッピングして表現することも可能であるが、以下のような問題が生ずる。

- 表面の起伏が激しいため、光源の位置やカメラアングルの相違による不整合が発生しやすい。
- 素材の画像と道路形状のアスペクト比の違いにより、石畳の敷石模様継ぎ目が発生する。
- 素材の画像と道路形状の不一致により、道路の境界における隙間や敷石の切断が発生する。

本論文では、上記のようなさまざまな問題点を解決する1つの手法として、スクウェアパッキングと呼ばれる閉領域の充填パターン生成法を用いて、指定された閉領域を覆う石畳テクスチャを生成する手法を提案する。本手法では、まず、与えられた道路形状の領域内に、引力と斥力を持つ四角形粒子を発生させて、路面を構成している敷石の充填パターンを生成させる。その後、生成された充填パターンに従って敷石テクスチャを生成し、石畳テクスチャの生成を行っている。本手法を用いることにより、1つ1つの敷石をモデ

[†] 東京工芸大学 芸術学部 映像学科
Department of Imaging Art, Tokyo Institute of Polytechnics

^{††} 日本アイビーエム(株)東京基礎研究所
IBM Research, Tokyo Research Laboratory

^{†††} カーネギーメロン大学 工学部 機械工学科
Mechanical Engineering, Carnegie Mellon University

リングするような手間も要せず、表現したい道路形状の領域を指定して数個のパラメータを設定することで、デザイナーが希望する路面を被覆する石畳テクスチャの自動生成が可能になった。

次章では、本論文の研究の背景として、石畳パターンの特徴と関連研究について触れる。3章で本手法の概略を述べた後、4章では路面を構成している敷石の充填パターンを生成する手法について述べる。5章では、4章で得られた充填パターンに沿った石畳テクスチャの生成手法を述べる。6章で生成結果を示し、7章で結果の考察と今後の課題について述べる。

2. 研究の背景

本章では、石畳パターンの持つ性質と、本手法と過去の類似研究との比較について述べる。

2.1 石畳パターンの特徴

図1に示すような実際の石畳や写真集¹⁾を観察して、石畳パターンに対して以下のような傾向を仮定することができた。

- 道路の進行方向に沿って、敷石が整列するように石畳が作成されていることが多い。
- おおむね等密度に敷石が詰まっている。

これらの性質を考慮すると、

- 複雑なカーブを描く道路形状に対しても、自動的に等密度で粒子(パーティクル)を充填する。
- 指定された道路形状の領域に、うまく沿って整列するように粒子を充填する。

という条件を満たすパーティクルモデルが、石畳の表現に利用できると思われる。

筆者らは、すでに報告したスクウェアパッキングの手法^{18),20)}が以上の条件を満たす手法であることから、敷石パターンの生成過程において適用することにした。一方、与えられた閉領域の分割法としては、例えばポロノイ分割³⁾などが考えられるが、この分割法では一般に等方的な分割パターンの生成となり、以上で述べた目的を満たす手法ではない。等方的に敷石を敷き詰めた石畳テクスチャを生成したい場合は、次章以降で述べるパッキングパターンの生成手法の部分を、ポロノイ分割手法に置き換えればよい。したがって、本報告では、敷石の“流れ”が感じられるような、敷石の充填に異方性を持った石畳テクスチャの生成を目的として述べていく。

2.2 過去の関連研究

本論文の関連研究を以下の3つに分類して述べる。

- (1) タイリングテクスチャ：与えられた領域を分割し、各領域に対してテクスチャを生成する



図1 実際の石畳の例

Fig. 1 A collection of pavements

- (2) 岩石などのモデリングおよびレンダリング：山岳や岩、土などをCGで表現する手法
- (3) Cellular Texture法：パーティクルシステムを用いた、物体表面の形状モデリング法

以上の3つに分類された研究例のうち、Cellular Texture法は、本論文での提案手法に関連が深いため、以下ではこの手法に重点を置いて述べる。

2.2.1 タイリングテクスチャ

Grunbaumらは、2次元のさまざまなパターンやタイリング法に関して分類および解析を行った¹⁰⁾。C.I.Yessiosは、建築物を構成している石材や木材ごとに領域分割し、それぞれの部材に対して2次元の線のパターンを発生して、建築物を表現する手法を提案した⁹⁾。K.Miyataは、C.I.Yessiosの手法を拡張して、立体的な石垣パターンを自動生成する手法を提案した¹⁹⁾。石井らは、ポロノイ分割を用いて、人間の皮膚のテクスチャ生成手法を提案した²²⁾。また東海らは、ポロノイ分割を発展させた皮革テクスチャの生成手法を報告している²³⁾。

これらの手法は、与えられた2次元の領域を分割し、その各領域に対してテクスチャをプロシージャルに生成している。しかし、得られたテクスチャを3次元物体の表現に用いる場合、一般的に境界部分で隙間や重なりができるなどの不都合が生じる欠点を持つ。

一方、Praunらは、1枚の2次元のサンプルテクスチャを、3次元モデルの表面に継ぎ目なく生成する手法を提案した²⁴⁾。この手法では、表面の接線ベクトル場をユーザが指定することにより、テクスチャの流れもコントロールすることが可能である。ただし、本手法で取り扱うような低周波成分の多いテクスチャに対しては、継ぎ目が目立つという欠点がある。

2.2.2 岩石などのモデリングおよびレンダリング
 岩石などの無機物のモデリングおよびレンダリングの研究例としていくつか報告されている。古くから、フラクタル手法は山岳のモデリング手法に応用されている¹³⁾。K.Perlin は、乱流関数による大理石のソリッドテクスチャの生成法を提案した¹⁴⁾。また、J.Dorsey らは、岩石の経年変化の表現法を提案した¹²⁾。

これらの様々な手法は、市販の CG ソフトの中に組み込まれているものも多く、CG 映像における表現の幅の拡充に役立っている。

2.2.3 Cellular Texture 法

K.W.Fleischer らは、Cellular Texture 法(以下 CT 法と略す)と名づけられた、鱗や棘などの物体表面の形状モデリング手法を提案した⁴⁾。CT 法では、セルプログラムにより性格付けされたパーティクルが、位置や方向性、周囲のパーティクルの影響などを考慮しながら、テクスチャを貼り付ける物体表面に配置される。その後、各パーティクルは棘や半球などの幾何形状に置換され、最終的なテクスチャが生成される。

本手法と CT 法とは、アルゴリズムの大筋では非常に類似している。特に、

- 各粒子がエネルギーポテンシャルを持つ。
- 各ポテンシャルは、隣接粒子との距離や方向性から算出される。
- ポテンシャルの総計を最小化するための反復処理を行う。

という3点では、両手法の概念はほぼ一致している。

CT 法が例示しているモデルでは、各粒子のプログラムは隣接粒子への引力や斥力などを明示的に算出しない。ただし、引力や斥力を算出するプログラムを書くこと自体は可能ではある。

一方、本手法では隣接粒子への引力や斥力を陽に算出するので、隣接粒子の移動方向が明確である。この結果として、本手法は収束性の点で有利であると考えられる。実際に、CT 法では計算時間が数時間かかった例があることを論文中で述べており、経験的に本手法のほうが計算時間ははるかに短いと考えられる。

また、本手法では正方形の粒子を仮定したポテンシャル場を各粒子に与えているが、長方形や五角形、六角形などの正方形以外の形状を仮定したポテンシャル場の記述も容易である。その場合にアルゴリズムの修正は非常に少ない。

一方、CT 法では、粒子の形状が複雑になると、エネルギーポテンシャルの算出式がかなり複雑になることが予想される。この結果として、形状が複雑な粒子であるほど、本手法のアルゴリズムの優位性が発揮で

きると思われる。ただし、この利点は、本報告で取り扱っている石畳ではない、別の物体を表現するときに初めて発揮できるものであると考えられ、この点に関しては、別途報告する予定である。

3. 提案手法の構成

提案手法の詳細を述べる前に、本章では、提案手法の概略、データ構造および、テクスチャデータのレンダリング法などの、提案手法の構成について述べる。

3.1 提案手法の概略

提案手法は、図2に示すような3つのモジュールから構成されている。

充填パターン生成モジュール スクエアパッキング法を用いて、指定された道路形状に沿った敷石の充填パターンを生成する。

敷石形状の生成モジュール 生成された充填パターンに従い、サブディビジョンサーフェイス法やフラクタルノイズ関数を用いて、敷石の形状および敷石表面のテクスチャを生成する。

レンダラ 生成された敷石のデータを、指定された光源データのもとにレンダリングし、最終的なテクスチャ画像を生成する。

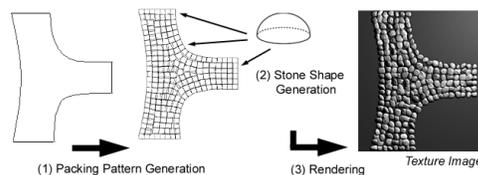


図2 提案手法の概略
 Fig.2 Process overview

3.2 テクスチャのデータ構造

本手法では、図3に示すように、テクスチャデータをバンブ属性、色属性、光学属性の3つの属性データプレーンに分類して、2次元マトリックスの各セルに保持する。データプレーンの解像度は、生成されるテクスチャ画像の解像度と等しく設定する。

バンブ属性プレーンは、物体表面の凹凸状態を表し、底面からの変位量、すなわち高さ情報をデータとして持ち、4バイトの浮動小数点データとして保持する。

色属性プレーンは、物体表面の色を表す。色の表現モデルは多数あるが、本手法では、RGB モデルを用いており、R,G,Bそれぞれ8ビットの色深度を持つ。

光学属性プレーンは、物体表面の光学属性を表す。光学属性は、物体を表現する際に用いるシェーディン

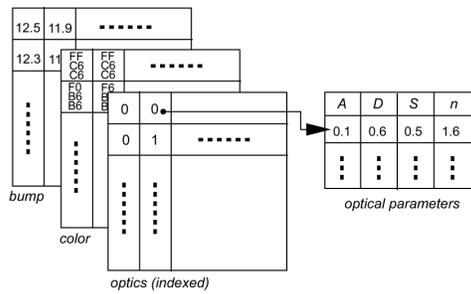


図3 テクスチャのデータ構造
Fig. 3 Texture data structure

グモデルに依存している。本手法では Phong のモデルを用いており、構成データとしては環境光の反射率 (A), 拡散反射率 (D), 鏡面反射率 (S), およびハイライト特性 (n) の4つからなる。光学属性のデータをセルごとに保持するのは非効率的なので、光学属性データテーブルを参照するインデックス形式で、各セルのデータを保持する。

生成された敷石形状の各データは、各敷石が生成されるごとに、それぞれの属性データプレーンにスクリーンコンバージョンされて書き込まれていく。

3.3 テクスチャデータのレンダリング法

テクスチャデータのレンダリングは、格納された各セルの情報を用いて、セルごとに行われる。バンプ属性プレーンのデータは、シェーディング計算時の面の法線ベクトルを算出する際に用いられる。色属性および光学属性プレーンのデータは、レンダリング時の属性データとして用いられる。レンダリング時の光源としては、平行光源もしくは点光源のいずれか1つが選択されて用いられる。

4. スクウェアパッキングについて

本章では、敷石のパッキングパターンを生成する過程で用いられる、スクウェアパッキング手法について述べる。

4.1 スクウェアパッキングとは

スクウェアパッキング^{18),20)}とは、引力や斥力を持つ四角形粒子を、力学シミュレーションによって、与えられた領域内部に最密充填する手法である。本手法には、

- (1) 複雑な形状であっても自動的に、隙間や重なりが少ない適度な密度で粒子を充填できる。
- (2) ユーザーの意図する任意のベクトル場に沿うように整列させて粒子を充填できる。

などの特徴がある。したがって、本手法を用いるこ

とで、2章で述べたような石置の整列状態を表現することができる。なお、本手法はもともとCGのために開発された手法ではなく、有限要素解析のための四角メッシュ生成を目的として開発された手法である。

4.2 スクウェアパッキングの処理の流れ

本手法ではまず、図4(a)に示すように、領域形状および、粒子の整列方向を表すベクトル場を入力する。

続いて、図4(b)に示すように、領域境界線上および領域内部に適当な密度で粒子を発生させる。本手法では、領域境界線上の粒子は不動であり、領域内部の粒子は可動であるとする。

続いて、各々の粒子が近接粒子間から受ける引力や斥力の総和を算出し、運動方程式を用いて領域内部の粒子の移動量を算出する。この粒子移動処理を反復することで、粒子が整列方向ベクトル場に沿いながら最密充填した状態を得ることができる。図4(c)に、粒子を最密充填した結果を示す。なお、本手法によって得られる粒子の充填結果は、粒子の初期配置によって多少異なるが、ビジュアルな印象には大差ない。

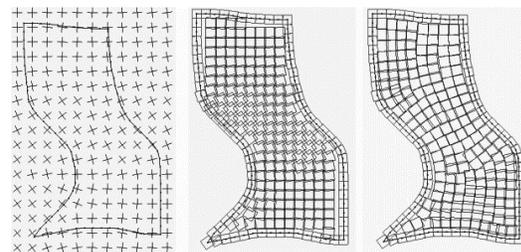


図4 スクウェアパッキングの実行情例。左から、(a) 入力データ、(b) 粒子の初期配置、(c) 最密充填結果。
Fig. 4 An example of the output of the square packing method. (a) Input data. (b) Initial location of particles. (c) Result of the packing process.

本手法では、粒子Aから粒子Bへの斥力を、Aを原点としたときのBの位置の関数で算出する。図5に、粒子Aから粒子Bへの斥力の分布図を示す。この関数は、四角形粒子の中心点および4頂点に極大をもつ5個の3次関数を重ね合わせたものである(文献¹⁸⁾参照)。この関数がもたらす斥力の等値曲線は、四角形に近い形状となる。この斥力が、四角形粒子の内部まで近隣粒子が接近することを防ぎ、近隣粒子間の一定の距離を保っている。

四角形粒子の方向は、入力データであるベクトル場を参照して決定される。しかし、ベクトルの大きさがゼロになる特異点(渦中心点など)では、四角形粒子の方向を決定することができない。このような場合に

は、四角形粒子の4頂点の座標値を算出できないので、4頂点を極大点とする斥力の関数をすべてゼロにし、四角形粒子の中心点を極大点とする斥力の関数だけを用いて、近隣粒子との斥力を算出する。ただし現実的には、ベクトル場の特異点と厳密に同じ位置に四角形粒子が到達する可能性は極めて低いので、この実装によって結果に影響が出ることはほとんどない。

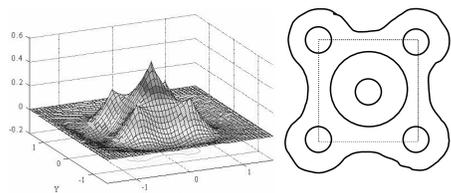


図5 粒子の引力や斥力の算出に用いる関数。左から、(a) 3D表示、(b) 等値曲線表示。

Fig. 5 A function of attractive and repulsive forces of a particle. (a) Three-dimensional representation. (b) Iso-contour representation.

本手法で粒子を整列させるために入力するベクトル場は、ユーザが明示的に与えることもできるし自動生成することもできる。本報告では、形状領域の境界に沿った整列方向を自動算出することでベクトル場を生成している。形状領域の境界線が n 本の線分列 $s_i (i = 1..n)$ で構成されているとき、本報告では形状領域内部の任意の点 p におけるベクトル値 v を、式(1)で算出する。

$$v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{d_i^2} \quad (1)$$

ここで d_i は p と s_i との距離を表す。この式は電磁気学における電界算出の式に類似していることから、この式によって与えられるベクトル場は、電気力線のように滑らかなカーブを描く曲線になる場合が多いことが想像できる。

本手法では、粒子の整列方向だけでなく、大きさも制御することができる。石畳を構成する石材の大きさは必ずしも一定ではなく、むしろ不規則に変化していることも多い。本報告では、ユーザーの指定する大きさに $0.8 \sim 1.2$ 程度の乱数を乗じた値を各々の粒子の大きさとしている。図6(a)は、粒子の大きさに乱数を用いて充填した結果である。

さらに、粒子の大きさの分布を、位置の関数で表現することも可能である。図6(b)は、位置の関数で表現された粒子の大きさ分布を参照しながら、粒子を充

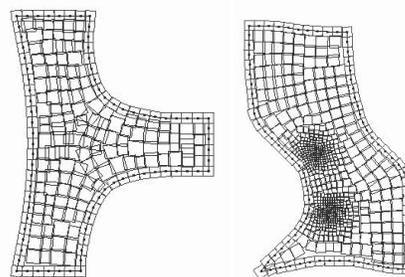


図6 大きさの異なる四角形粒子を充填した結果。左から (a) 粒子の大きさに乱数を乗じたもの (b) 粒子の大きさに位置の関数を用いたもの。

Fig. 6 A result of packing process of non-uniform square particles. (a) Sizes of particles are randomized. (b) Sizes of particles are calculated according to a function of position.

填した結果である。ただし、本論文の6章で示す実験結果では、粒子の大きさ分布の関数を用いていない。

スクウェアパッキングの計算時間は、近隣粒子間の力の算出回数に比例する。ここで、粒子の総数を n 、1個の粒子に近隣する粒子の数の平均を m とすると、計算時間は $O(mn)$ となる。

ここで筆者らの実装では、入力形状を覆う直交格子を用いて、各々の粒子がどの格子の内部にあるかを登録しながら運動方程式の反復計算を進めている。これにより、粒子の斥力算出の際には、斥力が働く近隣粒子だけを直交格子から検索することができるので、1個の粒子に近隣する粒子の数 m をおおむね定数とみなすことができる。よって本手法の計算時間は、おおむね $O(n)$ である。

5. 石畳テクスチャの生成について

石畳テクスチャは、4章で述べた手法を用いて生成されたパッキングパターンの各閉領域(セル)に対し、以下の3段階の過程により生成される敷石テクスチャを生成して得られる。

- (1) 敷石形状を定義する初期格子の生成と変形
- (2) 基本格子のスムージング(丸め)処理
- (3) 敷石表面への微細凹凸の付加

以降、各段階の処理について詳しく述べる。

5.1 初期格子の生成と変形

敷石テクスチャは、得られた2次元のパッキングパターンをもとに、以下で述べるような処理を経て3次元データとして生成される。

はじめに、各セルが必要に応じてスケールングされる。この処理は、生成したい路面のタイプに応じて、敷石の間隔を空けたり、逆に敷石をより緊密に敷き詰

めたい場合に行われる。

つづいて、得られた各セルを用いて、3次元の初期格子を生成する。初期格子は、パッキングパターンの各セルを底面とし、図7(a)に示すように、与えられた底面を指定された敷石の高さ分だけ垂直方向にスイープした角柱として与えられる。

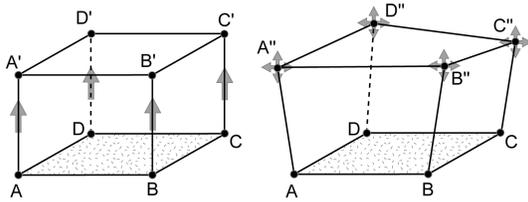


図7 初期格子の生成と変形。左から、(a) 初期格子の生成。(b) 初期格子の変形操作。

Fig. 7 Initial stone mesh. (a) Base sweeping. (b) Shape deformation.

生成された初期格子は、角柱の上面に位置する四隅の頂点 $A'B'C'D'$ を、図7(b)に示すように与えられた変形量の範囲でランダムに移動させて変形される。指定された変形率 Dr に対する変形量の範囲 $Range$ は、敷石の大きさが $Ssize$ で与えられた場合、式(2)で表される。

$$Range = Ssize \times (1.0 + Dr \times Random) \quad (2)$$

ここで、 $Random$ は、正規分布乱数である。

設定する変形量が大きいと、自然のままに採取されたような敷石が生成され、変形量が少ないと、人工的に形の整えられたような敷石が生成される。このようにして生成された初期格子をもとに、以降の処理で敷石形状が自動生成される。

5.2 初期格子のスムージング

5.1節で述べた変形後の初期格子を制御格子と想定して、サブディビジョンサーフェスの生成による角柱のスムージング(丸め)処理を行い、敷石のおおまかな形状を生成する。

5.2.1 サブディビジョンサーフェスの生成法

サブディビジョンサーフェスの生成手法には、Doo-Sabinの手法⁵⁾や、Catmull-Clarkの手法⁶⁾、Loopの手法⁷⁾などが報告されている。本手法では、三角形メッシュが生成されることなどの理由から、筆者らの開発環境になじみやすいLoopの手法を用いている。以下に、Loopのアルゴリズムを簡単に述べる。

Loopのサブディビジョンサーフェス生成のアルゴリズムでは、図8(a)のように与えられた三角メッシュの各エッジに対し、図8(b)に示すように新しい

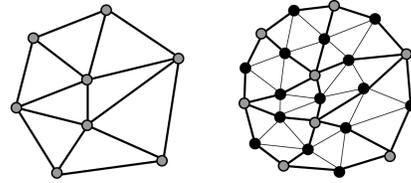


図8 Loopの手法による三角メッシュの分割。左から、(a) 与えられた三角メッシュ。(b) 1回分割された三角メッシュ。

Fig. 8 Loop's subdivision method. (a) Initial mesh. (b) After subdivision.

頂点(図中の黒丸)が計算され、各エッジは2つに分割される。さらに、新しい頂点同士を結んで、1枚の三角形が4枚の三角形に新たに分割され、分割前の三角形を置き換えていく。新しい頂点の位置は、周囲の頂点の位置とエッジの接続状況などから計算される。

5.2.2 敷石形状の種類

本手法では、初期格子のメッシング法を変えることで、丸石と角石の2種類の敷石形状が定義されている。

(1) 丸石の場合 変形後の基本格子に対し、図9に示すような三角メッシュを生成し、上記の分割を繰り返すことで、基本格子がスムージングされて敷石形状が生成される。

(2) 角石の場合 角石を生成する場合は、図10に示すように、基本格子のコーナーの部分に頂点を追加して、分割を行う。ここで、図10において、灰色の点が追加された頂点であり、コーナーからの各距離 $D_{fromCorner}$ は、エッジの長さ $Length$ との比率として与えられたパラメータ Br から、式(3)を用いて求める。

$$D_{fromCorner} = \frac{Length}{2} \times Br \quad (3)$$

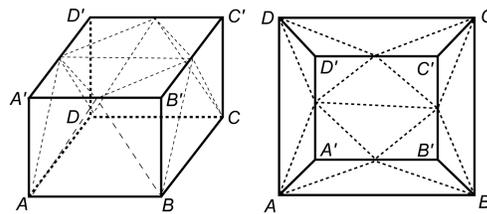


図9 丸石に対する基本格子の三角メッシュ。左から、(a) 俯瞰図。(b) 真上から見た接続関係。

Fig. 9 Triangular mesh for cobblestone. (a) Aerial view. (b) Top view.

5.3 微細凹凸の付加

5.2節で生成された敷石形状の表面に、フラクタルノイズを用いて微細な凹凸形状を付加して、最終的な

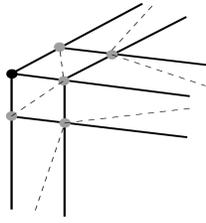


図 10 角石の三角メッシュ時の追加頂点と三角メッシュ(一部)
Fig. 10 Triangular mesh for flagstone (partial)

敷石形状とする。フラクタルノイズは、中点変位法²¹⁾にて生成されるものとし、作業領域として用意された2次元格子上に発生させる。

微細凹凸を付加するには、まず、図 11 に示すように、生成された敷石形状を垂直方向に投影してできる領域、すなわち、敷石形状のデータが存在する領域を、マスクデータとして作成する。続いて、生成されたフラクタルノイズが、このマスクデータでクリッピングされ、敷石形状をバンプ属性のデータプレーンに書き込む時に付加される。

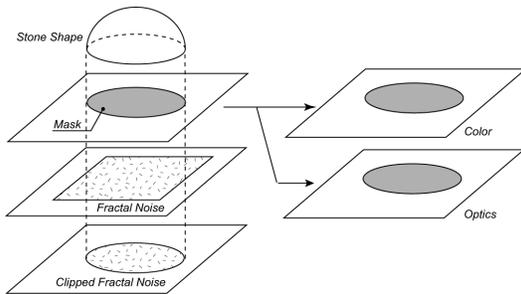


図 11 微細凹凸の付加と敷石の属性データ
Fig. 11 Surface displacement and attributes

5.4 敷石の属性

敷石の色や光学属性を指定するそれぞれの属性データプレーンは、与えられた初期値で初期化される。各敷石の属性データは、敷石の高さ情報をバンプデータプレーンに書き込む際に、図 11 に示すようにそれぞれの属性データプレーンに書き込まれていく。本手法では、あらかじめ属性データのセットを与えておき、コンピュータが乱数を振って、それらの属性データのセットからランダムに選択して、各敷石に色や光学属性を割り振るようにしてある。

6. 実験結果

本章では、以上で述べた手法で生成された石畳テク

スチャを数例挙げる。なお、本章で提示しているすべての石畳テクスチャの大きさは、512x512 である。

パラメータ

生成時に指定したパラメータリストを表 1 に挙げる。以下に、各パラメータ記号の意味を列挙する。

- C_s : セル (敷石の底面) の平均の大きさ
- V_s : セル (敷石の底面) の大きさのバラツキ
- H_s : 敷石の高さ
- S_v : セル (敷石の底面) のスケール値
- D_r : 初期格子の変形率 ($0.0 < D_r < 1.0$)
- F_d : 敷石の表面の粗さ (フラクタル次元, $1.0 < F_d < 2.0$)
- A_f : フラクタルノイズの振幅
- B_r : 敷石のベベル率 ($0.0 < B_r < 1.0$) (角石の場合のみ)

表 1 パラメータリスト

Fig. No	C_s	V_s	H_s	S_v	D_r	F_d	A_f	B_r
13(1b)	23	0.0	18	1.0	0.3	1.5	2.0	-
13(2b)	18	0.1	18	1.0	0.3	1.5	2.0	-
13(3b)	23	0.3	18	1.0	0.3	1.5	2.0	-
14(b)	20	0.0	20	1.0	0.3	1.5	2.0	-
14(c)	20	0.0	12	1.0	0.2	1.4	1.4	0.2
15(a)	23	0.0	20	1.1	0.0	1.5	2.0	-
15(b)	23	0.0	20	1.1	0.3	1.5	2.0	-
15(c)	23	0.0	20	1.1	0.6	1.5	2.0	-
16(a)	21	0.0	18	1.0	0.3	1.5	2.0	-
16(b)	25	0.0	20	1.0	0.5	1.5	2.0	-
16(c)	15	0.0	8	1.0	0.2	1.3	1.0	0.2
16(d)	23	0.0	14	1.1	0.3	1.5	2.0	0.2
16(e)	20	0.0	12	1.0	0.2	1.3	1.2	0.2
16(f)	20	0.0	18	0.8	0.3	1.5	2.0	-

計算時間

平均の処理時間は、ペンティアム の 300MHz の PC を用いて生成するテクスチャサイズが 512 × 512 の場合、スクウェアパッキングの処理に約 5 秒、石畳テクスチャを生成するのに約 10 秒であった。

スクウェアパッキングのパラメータによる違い

図 12 に、スクウェアパッキングのパラメータを変化させた場合の違いを挙げる。図 12(1a) ~ (3a) が得られたパッキングパターン、図 12(1b) ~ (3b) が生成された石畳テクスチャの例である。図 12(1b) を基準とした場合、図 12(2b) はパッキング粒子の大きさを小さくした例、図 12(3b) はパッキング粒子の大きさを大きくした例である。図 12(3b) では、敷石の大きさが大きくばらついていることがわかる。

丸石と角石

本手法で定義されている 2 種類の敷石形状による違

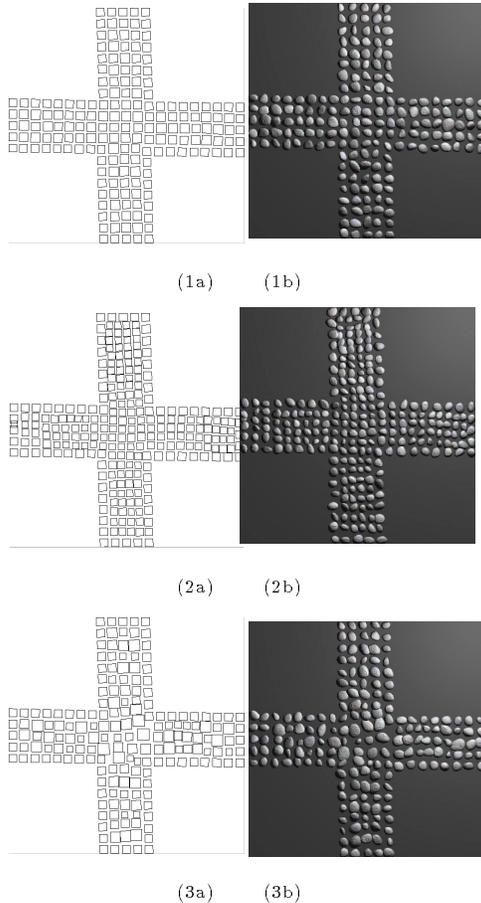


図 12 パッキングパラメータによる違い
Fig. 12 Change in packing parameters

いを図 13 に示す。図 13(a) に示すパッキングパターンから、丸石 (図 13(b)) と、角石の石畳テクスチャ (図 13(c)) をそれぞれ生成した例である。

初期格子の変形率の違い

初期格子の変形率の違いを図 14 に示す。図 14 は、図 14(a) を基準とした場合、図 14(b) は基本格子の変形を 0 にした例、図 14(c) は基本格子の変形を大きくした例である。図 14(b) では、ほとんどの敷石が同じような形状になっていることがわかる。

様々な石畳テクスチャ

図 15 に、様々な石畳テクスチャの例を示す。道路に穴が開いていたり、道路が分岐していても、敷石が“流れ”を保ちながら敷き詰められていることがわかる。

7. おわりに

道路形状と数個のパラメータを入力して、自動的に石畳テクスチャを生成する手法について述べた。本手

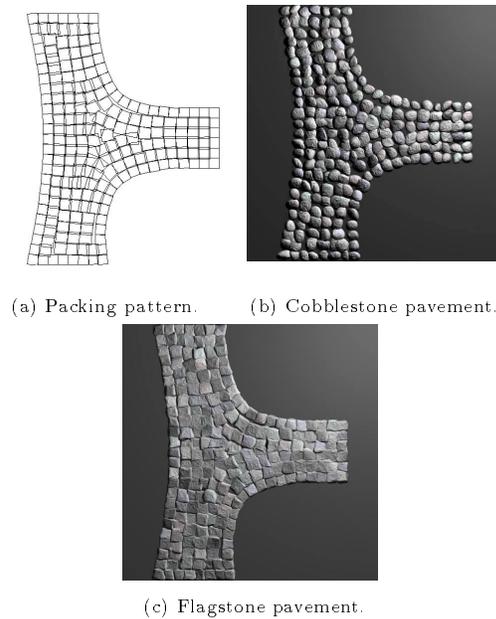


図 13 敷石の形状の違い
Fig. 13 Comparison of cobblestone and flagstone

法を用いることにより、1つ1つの敷石をモデリングするような手間も要せず、デザイナーが希望する路面を被覆する、石畳テクスチャの自動生成が可能になった。

ユーザが、よりデザインしやすいシステムにするには、初期入力した道路形状を編集することで、石畳テクスチャを編集できるようなシステムへの変更が必要である。これは、ユーザーインターフェイスを組み替えることで可能であると考えている。

今後の課題として、以下の3つが挙げられる。

経年変化

本手法で生成された石畳テクスチャは、汚れや摩滅の全くないものとなっている。より現実感を増すためには、何らかの経年変化を付加する必要がある。経年変化に関しては、いくつかの研究例が報告されており、例えば、金属の錆のシミュレーション¹¹⁾ や、石の経年変化¹²⁾ などが挙げられる。これらの自然な経年変化以外に、石畳の場合には、車の走行や人の歩行に起因する人為的な摩滅や破壊なども考慮する必要がある。

様々な敷石

本手法では、敷石形状をプロシージャルな手法で生成した。今後の課題としては、実サンプルからの敷石形状のパラメータ抽出法や、ぬれた敷石や苔むした敷石、敷石の汚れの付加などの表現が挙げられる。

有機的なテクスチャへの応用

2.2.3 で述べたように、すでに、丸いセル^{15),16)} や、

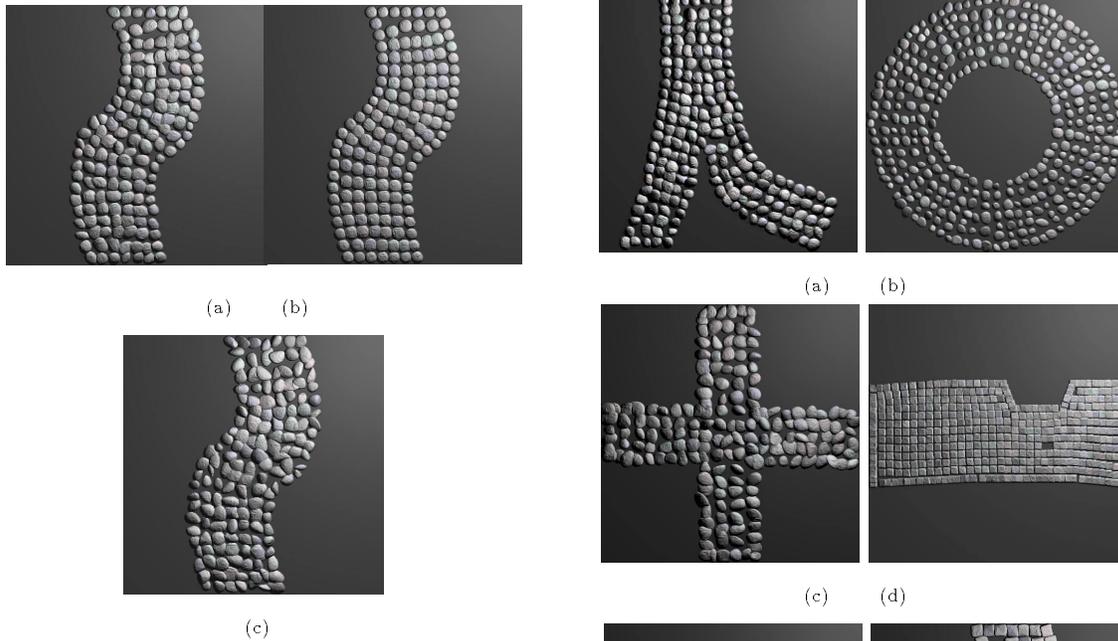


図 14 初期格子の変形率による違い変形率
Fig. 14 Change in deformation ratio

楕円セル¹⁷⁾、矩形セル²⁰⁾ など、さまざまなパッキングセルの形状に対する充填法を報告している。これらの手法を組み合わせ、爬虫類の鱗や亀甲などの有機的なテクスチャの生成法に応用していきたい。

参 考 文 献

- 1) 重森三玲, "庭、神々へのアプローチ," 誠文堂新光社, 1976.
- 2) 伊藤他, "自動四角メッシュ生成手法の検討," シミュレーション, Vol.18, No.2, pp.19-25, 1999
- 3) 杉原厚吉, "パターン認識の道具としてのポロノイ図構成算法の整備," 情報研報-グラフィックスとCAD, Vol.89, No.16, pp.1-8, 1989.
- 4) K.W.Fleischer, et.al, "Cellular texture generation," Proceedings of SIGGRAPH'95, pp.-. 1995.
- 5) D. Doo and M.Sabin, "Analysis of the behavior of recursive division surfaces near extraordinary points," Computer Aided Design, Vol.10, No.6, pp.356-360, 1978.
- 6) E.Catmull and J.Clark, "Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes," Computer Aided Design, Vol.10, No.6, pp.350-355, 1978.
- 7) C.Loop, "Smooth subdivision surfaces based on triangles," Master's thesis, University of Utah, Department of Mathematics, 1987.
- 8) K. Mehlhorn and S. Naher (1999), LEDA: a

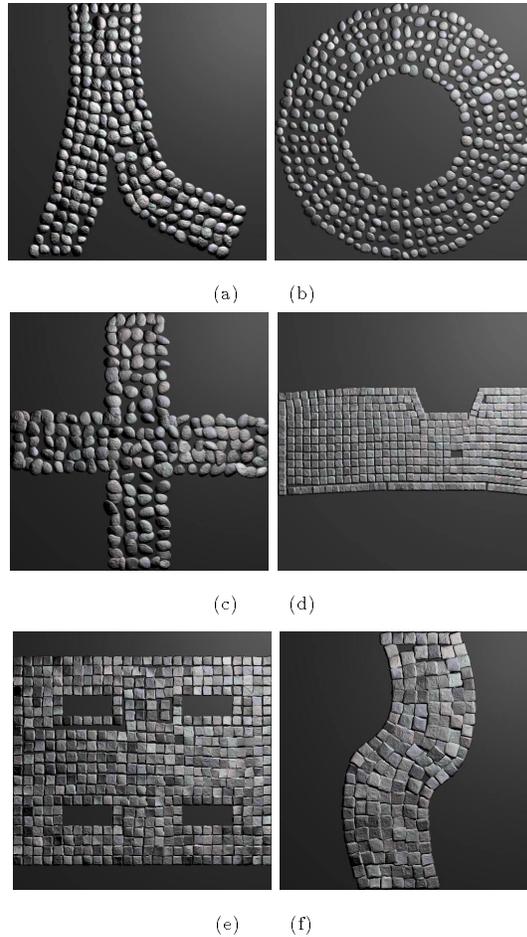


図 15 さまざまな石畳テクスチャの例
Fig. 15 Various pavement textures

- platform for combinatorial and geometric computing, 686-707.
- 9) C.I. Yessios (1979), "Computer drafting of stones, wood, plant and ground materials," Computer Graphics, Vol.13, No.2, 190-198.
 - 10) B. Grunbaum and G.C. Shephard (1987), Tiling and Patterns, W.H. Freeman and Co., New York.
 - 11) J. Dorsey and P. Hanrahan (1996), "Modeling and rendering of metallic patinas," Proceedings of SIGGRAPH '96, 387-396.
 - 12) J. Dorsey, et al (1999), "Modeling and Rendering of Weathered Stone," Proceedings of SIGGRAPH '99, 225-234 .
 - 13) H-O. Peitgen, et al (1988), The Science of Fractal Image: "Chapter 1 - Fractals in Nature," Springer-Verlag, New York.
 - 14) K. Perlin (1985), "An Image Synthesizer," Proceedings of SIGGRAPH '85, 287-296.
 - 15) K. Shimada (1993), "Physically-based Mesh

- Generation: Automated Triangulation of Surfaces and Volumes via bubble Packing," Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, U.S.A.
- 16) K. Shimada and D.C. Gossard (1995), "Bubble Mesh: Automated Triangular Meshing of Non-manifold Geometry by Sphere Packing," Third Symposium on Solid Modeling and Applications; 409-419.
- 17) K. Shimada, A. Yamada, and T. Itoh (1997), "Anisotropic Triangular Meshing of Parametric Surfaces via Close Packing of Ellipsoidal Bubbles," 6th International Meshing Roundtable, 375-390.
- 18) K. Shimada, J. Liao, and T. Itoh (1998) "Quadrilateral Meshing with Directionality Control through the Packing of Square Cells," 7th International Meshing Roundtable; 61-76.
- 19) Kazunori Miyata (1990), "A method of generating stone wall patterns," Proceedings of SIGGRAPH '90, 387-394.
- 20) N. Viswanath, K. Shimada, and T. Itoh (2000), "Quadrilateral Meshing with Anisotropy and Directionality Control via Close Packing of Rectangular Cells," 9th International Meshing Roundtable, 227-238.
- 21) A. Fournier, D. Fussell, and L. Carpenter (1982), "Computer rendering of stochastic models," Communications of the ACM, Vol. 25, No. 6, 371-384.
- 22) 石井 他 (1992), "表面の微細構造に注目した皮膚の質感表現の一手法," 情処学論, Vol. 32, No. 5, 645-654.
- 23) 東海 他 (1994), "爬虫類皮革の質感表現の一手法," 情処学論, Vol.35, No.5, 801-809.
- 24) E .Praun , A .Finkelstein , and H .Hoppe (2000), "Lapped Textures, " Proceedings of SIGGRAPH 2000, 465-470

(平成?年?月?日受付)

(平成?年?月?日採録)



宮田 一乗 (正会員)

1962年生. 1986年東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻修士課程修了. 同年日本アイ・ピー・エム(株)入社, 東京基礎研究所勤務. 1998年より東京工芸大学芸術学部映像学科助教授. 博士(工学). フラクタル, 自然形状のモデリングおよびレンダリング, テクスチャ生成, 画像合成, などの研究に従事. 電子情報通信学会, 画像電子学会, 芸術科学会, ACM 各会員.



伊藤 貴之 (正会員)

1968年生. 1992年早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了. 同年日本アイ・ピー・エム(株)入社. 現在同社東京基礎研究所に勤務. 博士(工学). 写実的な画像生成, メッシュ生成, 曲面生成, 情報視覚化, などの研究に従事. IEEE, ACM, 芸術科学会各会員.



嶋田 憲司 (正会員)

1983年東京大学工学部精密機械工学科卒業. 1985年同大学院精密機械工学専攻修士課程修了. 同年日本アイ・ピー・エム(株)入社, 東京基礎研究所にて形状処理, ロボティクス, コンピュータグラフィックス, 計算力学などの研究に従事. 1989年より1993年までマサチューセッツ工科大学博士課程. Ph.D. 1996年よりカーネギーメロン大学機械工学科とロボット研究所の助教授と準教授を歴任. 1994年本会山下記念研究賞, 同年ニコグラフ論文コンテスト優秀論文賞, 2000年米国立科学財団(NSF) CAREER AWARD. ACM, ASME, IEEE, SIAM 各会員.