

推薦論文

任意形状の堆積形成手法

櫻井 快勢^{1,a)} 宮田 一乗^{1,b)}

受付日 2012年8月1日, 採録日 2012年12月7日

概要: 本論文では, 任意の構成要素を指定した形状に凝集させる手法を提案する. ここでは, 堆積を凝集体表面付近に構成することで, 全体として堆積した凝集体を表現する. また, 任意の形状に凝集させるために, 物理法則を考慮せずに凝集体を生成する. はじめに, 指定した凝集体の形状に沿って構成要素を干渉するように配置する. 次に, 構成要素どうしの干渉を解消するために, 凝集体の形状の法線方向に干渉が少なくなるように構成要素の位置を調整する. 実験によって, 本手法が少ない計算コストで堆積を表現できることを確認した. 本手法を用いることにより, おにぎりなどの凝集体を表現することができる.

キーワード: プロシージャルモデリング, 堆積, 凝集体

A Procedure of Pile Modeling

KAISEI SAKURAI^{1,a)} KAZUNORI MIYATA^{1,b)}

Received: August 1, 2012, Accepted: December 7, 2012

Abstract: We propose a method for modeling piles of arbitrary objects. In our method, the first step arranges objects that slightly overlap their neighborhoods on the surface of user-specified pile-shape to determine the number of the objects. The arrangement is not applied to the inside of the pile-shape. Then, the next step rearranges the object toward normal on the pile-shape for avoiding intersections of piles. By this procedure, piles or condensations of objects, such as rice-ball, can be represented. An arbitrary aggregate can be generated because the method does not use any physical simulations.

Keywords: procedural modeling, pile, aggregate

1. はじめに

我々の身近には, おにぎりのように, ある構成要素が3次元的に凝集して形を成しているもの(以下, 3次元凝集体)が数多くある. 3次元凝集体の形状は, 構成要素の特性に大きく依存する. たとえば, 粘着性の低い要素が自然に積み上がったものは, 錐体を形成することが多い. 一方, ご飯粒のように粘着性があると, 3次元凝集体の形状は錐体に限らず, さまざまな形状になる. 本論文では, 堆積して形成される3次元凝集体に注目し, それらを任意の構成要素で生成する手法を提案する. ここでは, 凝集体の内部は考慮せずに, 主にCG用途として凝集体の外側のみを生

成することとする.

現在, 3次元凝集体をモデリングするためには, 要素の方向と位置を調整しながら手作業にて配置する必要があり, きわめて高いスキルを要する. このように制作困難なモデリングの作業量を軽減する手段として, 自動化が有用であると考えている. 自動的に形状モデルを生成する手法としてプロシージャルモデリングが多数提案されているが, 任意の要素を生成することは難しい. たとえば, L-systemなどの構文によるモデリング法では任意の形状をモデリングできるが, モデリングの他に, 規則作成スキルも必要である. 一方, 本論文では, 構文作成のスキルは不要であり, 構成要素と3次元凝集体の形状のモデリングのみで所望の3次元凝集体が生成できる. このとき, 干渉や摩擦などの古典

¹ 北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科
Japan Advanced Institute of Science and Technology, School
of knowledge science, Nomi, Ishikawa 923-1292, Japan

a) sakurai@jaist.ac.jp

b) miyata@jaist.ac.jp

本論文の内容は2011年11月グラフィクスとCAD研究会にて報告され, 同研究会前主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

力学を考慮すると、現実的なモデルを形成することを考えられるが、形成できるモデルは物理法則に基づいたものに制限されるため、任意の形状を扱うことが難しくなる。本手法では、物理法則には必ずしも基づかない任意形状の凝集体を生成することを目的とする。このため、干渉の許容量に対する制限は設けずに積み上がっているような構造を生成する。

また、本論文では、これまでの自然物を対象としたテクスチャ生成 [3] や自然な見た目の配置 [13], [20] と同様に、構成要素を非周期的に配置することで自然な見た目を表現する。

2. 関連研究

代表的な既存の堆積の表現手法として、物理計算の中で所望の錐形を形成するシミュレーション [10] や 3次元のサンプルから同様の構造を持つ集合体を生成する 3次元のテクスチャシネシス [15], 堆積された石のプロシージャルモデリング [19] などがあげられる。これらの手法は堆積を構成することが可能であるが、文献 [10] の手法は 3次元凝集体の形状を任意に指定できない、文献 [15] の手法は 3次元凝集体を入力とするため、入力の実成が難しい、文献 [19] の手法は任意の構成要素を指定できない、という問題点がある。これらに対して、本手法では、任意の構成要素を用いて、表現対象となる物体の外形表面を近似する 3次元凝集体を自動的に生成する。

また、任意の構成要素を配置して凝集体を表現する手法もいくつか提案されている。隙間なく繰返しパターンを生成する Escherization [11] や、2次元の任意構成要素のモザイクである Jigsaw image mosaics [12], 指定した形状を近似するように構成要素を配置する 3D collage [7], Poisson-disk distribution を用いて構成要素を一様に配置してテクスチャを生成する Object distribution function [13] などが代表的な手法としてあげられる。しかしながら、これらは堆積の形成を考慮しないため、構成要素が堆積してできたような凝集体を生成できない。

また、凝集体の 1つである一般的なモザイクを生成する手法も提案されているが [4], [9], これらも堆積を考慮していない。

自動的にパターンを生成する手法として、いくつかのプロシージャルモデリングが提案されている。その 1つとして Perlin が提案したテクスチャ生成手法があげられる [6], [18]。この手法は幅広く活用されており、煙、布地、岩肌などの表現が可能である。Worley が提案した領域分割によるテクスチャ生成手法も活用されている [21]。また、木 [16] や街 [17] などを対象とした手法も提案されている。これらの手法は、構成要素が限定的であり、任意の構成要素の配置は不可能である。

以上で示したように、既存手法では構成要素と 3次元凝

集体の形状の両者を任意に指定することは不可能である。本論文では、この課題を解決する手法を提案する。

3. 堆積構造を有する 3次元凝集体の生成

本研究では、指定された構成要素と 3次元凝集体の目安となる外形（以下、凝集体外形）から、堆積構造（構成要素が積み上がった構造）を有する凝集体を表現する。本論文で述べる堆積構造は、以下の 2つの必要条件を満たす状態とする。

- (1) 構成要素どうしが接触する。
- (2) 凝集体外形の接平面に投影した構成要素の領域が重なる。

たとえば、図 1 に示すように、接触している構成要素 A と B に対し、凝集体外形の接平面に投影された領域 A' と B' に重なりが存在するとき、A と B は堆積していると判断する。条件 (1) のみでは、外形表面に構成要素が並ぶだけの可能性があり、堆積構造として不十分である。したがって、構成要素の積み重なりを作るために、 $A' \cap B' \neq \emptyset$ となる条件 (2) を付加する。

本手法では、凝集体外形の表面付近においてのみ、上記の条件 (1), (2) を満たす堆積を構成し、見た目として、3次元凝集体を生成する。また、本手法では、構成要素間の干渉を判定するために、構成要素を内外が明確な閉じたメッシュで定義する。また、内外を判定するために、メッシュ上のすべての頂点の法線ベクトルを外側、もしくは内側に向くように統一する。凝集体外形もメッシュで指定するが、本手法では凝集体を内部に構成しないため、こちらは開いたメッシュでの定義を可能とする。3次元凝集体の生成のためには、構成要素の数および、個々の構成要素の方向（ロール・ピッチ・ヨーの回転角）と位置を決定する必要がある。本手法では、はじめに構成要素の数を決定し、その後方向と位置を変更する。このとき、3.1 節に後述する条件にしたがって構成要素を配置することで、その数を決定する。この処理を「初期配置」と呼ぶ。初期配置では、凝集体外形の接平面上にて、非周期的に構成要素を配置する（図 2(b)）。次に、自然な見た目のために、構成要素をランダムに回転させる（図 2(c)）。最後に、3.2 節で後述する構成要素の移動により堆積構造を形成する（図 2(d)）。ここでは、接触を避けるように各構成要素を凝集体外形の法線方向に沿って順次移動させる。図 3 に示すように、意

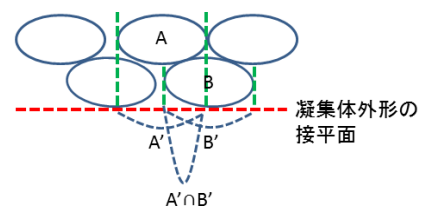


図 1 堆積構造の概略図

Fig. 1 Schematic of pile.

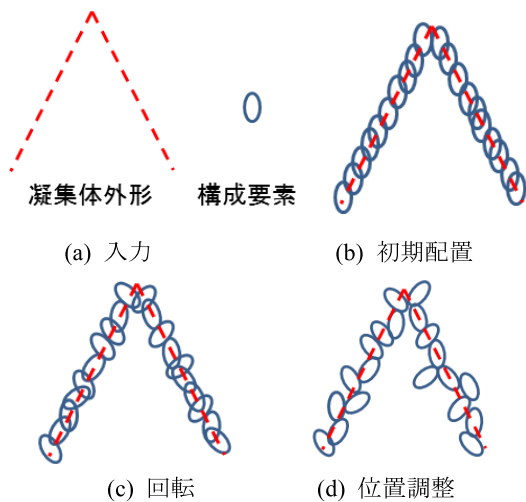


図 2 本手法の概略

Fig. 2 Process overview.

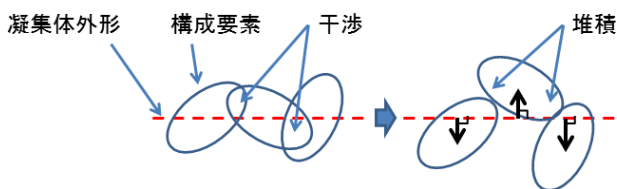


図 3 堆積の構成の模式図. 黒矢印は法線方向の移動

Fig. 3 Constructing pile from overlap.

図的に干渉するように初期配置することで、凝集体外形の法線方向の移動のみで堆積構造を形成できる。この処理を「位置調整」と呼ぶ。以上のように、構成要素の数を決め、その後、方向、位置の順で姿勢制御することで、3次元凝集体を生成できる。図 2(a) で示すように、凝集体外形と構成要素の形状を入力とし、図 2(b)–(d) の手続きで 3次元凝集体を生成する。

3.1 構成要素の初期配置と方向の決定

本節では、構成要素の初期配置と方向の決定方法について述べる。初期配置では、位置調整時に堆積を形成させるために構成要素を干渉させ、3次元凝集体を構成するために必要な構成要素の数を決定する。また、1章に先述したように、非周期的な配置を行う。これらを達成するために、次の3つの事項を満たすように構成要素の初期配置を求める。

- 堆積を形成するために構成要素どうしが干渉する。
- 3次元凝集体に穴を作らないように構成要素で覆う。
- 構成要素を非周期的に配置させる。

これらの事項は、初期配置の十分条件であり、Poisson sphere distribution [8] で満たされる。入力された凝集体外形のメッシュを細分割し、候補となる点を算出し、メッシュ表面の全体を埋め尽くすように Poisson sphere distribution で構成要素を配置する。得られる点は、凝集体外形上での位置と法線方向を保持しており、3.2節で後述する位置調

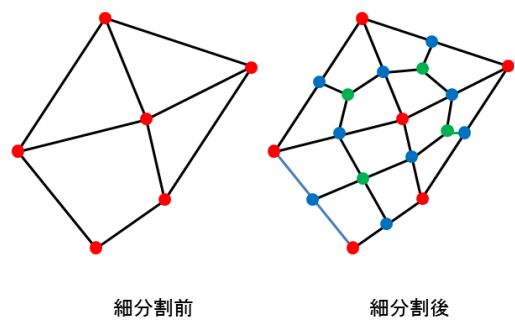


図 4 細分割による候補点の生成. 赤点は元の頂点, 青点は辺上の分割後の点, 緑点は面の分割後の点

Fig. 4 Preparing dense candidate by subdivision.

整に用いる。

3.1.1 Poisson sphere distribution の候補点

Poisson sphere distribution の候補点となる密な点群は、凝集体外形のメッシュを細分割して得られる頂点を用いる。ただし、この細分割は、曲面を滑らかにせず、頂点を増やすのみとする。細分割を十分に行うことで、凝集体外形に多くの点を生成できる。本手法は、Catmull-Clark 細分割 [2] を応用した細分割で、面と辺の中心に新しい頂点を作る。密度を保証するために、メッシュの一辺がサンプリングに用いる r 以下になるまで細分割を繰り返す。Catmull-Clark 細分割で滑らかな曲面に近似するとき、特異点（メッシュのリンクが4頂点以外の頂点）周りの分割で尖る問題がある [14] が、本手法では、滑らかな曲面に近似しないため、この問題は無視できる。図 4 に示すように、ポリゴンの重心と辺の中心に新しい頂点を付加する。

3.1.2 初期配置の Poisson sphere distribution

初期配置では、Poisson sphere distribution で得られた点を構成要素の位置とする。Poisson sphere distribution は、3次元のブルーノイズ特性を持った点群の分布である。この分布を用いることで、ある点とその近隣点との距離を一定に保ちながら、非周期的に配置される。配置される各点は、半径 r の球で与えられる排他領域を持ち、ほかの点の排他領域と干渉しないようにランダムに配置される。このとき、分布した点群では、点間の距離は $2r$ 以上 $4r$ 以下になる [5]。

排他領域の半径 r を構成要素に内接する最大球 S の半径の半分にすると、Poisson sphere distribution で得られる最も遠い距離 $4r$ であっても、近接する構成要素どうしが必ず干渉する距離となる。ただし、干渉の量は、形状と大きさに依存するため、初期配置では考慮しない。図 5 は、近接する構成要素 A と B が、Poisson sphere distribution で得られる最も遠い距離 $4r$ にある場合でも接触する例を示す。配置された構成要素は、近接の構成要素と $4r$ 以下の距離にあるため、必ず干渉する。また、初期配置された構成要素は、与えられた凝集体外形を被覆する。

構成要素は、球 S の中心を構成要素の中心として配置さ

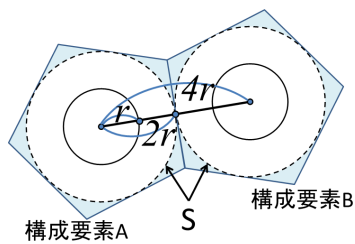


図 5 構成要素の配置で点間距離が $4r$ の例. 構成要素 (水色の領域) の最大球 S (黒破線) の半径を $2r$, 半径 r の球 (黒実線) を排他領域とする

Fig. 5 Two components in contact.

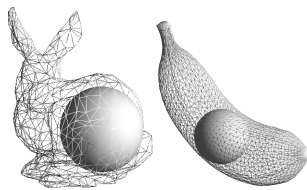


図 6 構成要素に内接する最大球

Fig. 6 Largest inner sphere.

れる. 球 S は, 文献 [1] の手法と同様に, 構成要素に内接する球群の中から図 6 に示すような最大の球を選択する. 3次元凝集体を被覆するためには, 球 S よりも小さな球でも可能であるが, 小さな球を用いて配置すると構成要素数が多くなり, 3.2 節に後述する位置調整の回数が増え, 現実的な時間で解けない可能性がある. また, 位置調整後においても, 干渉が多すぎて, 積み上がっているように見えない可能性がある. これらを防ぐために, 最大球を用いている.

ここでは, ダートスローイング法を用いて Poisson sphere distribution を実装する. 2次元での一般的なダートスローイングは, 画像上にフラグを持たせ, 配置済みと排他的な領域を区別することで実装している. これを応用し, 本手法では, 3次元凝集体の表面に密な候補点を用意し, その点群内で配置済みと排他的な領域内のフラグを持たせることで実装する. すべての点にフラグが立ち, 配置可能な頂点がなくなると構成要素の配置を終了する.

複数種の構成要素を配置する場合, 指定した割合で配置の構成要素を替える.

3.2 構成要素の位置調整

本節では, 堆積を形成するための位置調整について述べる. 位置調整は, 凝集体外形の法線方向に各構成要素を移動し, 初期配置での干渉を解消する. 干渉を解消するために, 構成要素を陰関数で表現して, 干渉を関数化し, その関数を指定範囲内の移動で最小にする. 干渉を完全に解消すると, 構成要素が凝集体外形から遠く離れる可能性があるため, 移動の範囲を指定して外形を保つこととした.

具体的には, 3.2.1 項に後述するように干渉が最小になる

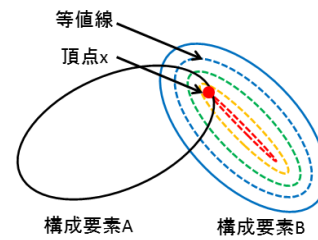


図 7 陰関数の模式図. 陰関数の値を色で表現 (赤黄緑青の降順). 構成要素 A 上の頂点 x は, 構成要素 B に対して赤色の深度

Fig. 7 Schematic of implicit function.

ように配置された構成要素を順次移動する. ここでは, ランダムな順番で, 1つの構成要素に対して, 1度だけ位置調整する. すべての構成要素に対して位置調整したときに本処理を終了する.

3.2.1 陰関数を用いた干渉の最小化

干渉を解消することは, 構成要素のブール積の体積を最小化するともいい換えることができるが, ブール演算で複数の任意形状の積集合を求めて体積を計算することは多くの計算時間を必要とする. これを避けるために, 本手法では陰関数を用いて, 構成要素の干渉の深度を求める. 陰関数は面からの距離に依存した値を返すため, 図 7 に示すような構成要素 A, B の干渉がある場合, 頂点 x での構成要素 B の陰関数値を求めることで, 構成要素 A の頂点 x における構成要素 B に対する深度が分かる. 本手法では, 構成要素の干渉の量を, 各構成要素の頂点の陰関数値の総和として求める. 陰関数値は, 近隣の構成要素の陰関数値に対して求める. 陰関数のサポートサイズは構成要素の内部に限定されるように設定し, 陰関数は構成要素の外部では 0 の値を返す. 構成要素のコスト関数 c は式 (1) で定義する.

$$c(t) = \sum_{\mathbf{x} \in X} f(\mathbf{x} + t\mathbf{n}) \quad (1)$$

このとき, X はある構成要素の頂点 \mathbf{x} の集合, \mathbf{n} は構成要素が配置された凝集体外形の法線ベクトル, t は法線方向の移動距離, f は 3.2.2 項に後述する陰関数である. ただし, t は符号付き距離とし, 正の値では凝集体外形の法線方向外側に, 負の値では内側に移動する. $c(t) = 0$ を満たすとき, 構成要素どうしが重なることはなくなるが, 構成要素どうしが離れる可能性がある. 構成要素どうしを近づけるために, 堆積形状の表面に近い位置を低コストとする式 (2) のコスト関数 c' を用いる.

$$c'(t) = c(t) + a|t| \quad (2)$$

このとき, a は距離を操作するための係数とする. 各構成要素に対して, 式 (2) のコスト関数 c' が最小となる t を求める.

最小値の解法は, Golden section search を用いる. Golden section search は, 指定した範囲における最適解を求める. 図 8 のように, 範囲を指定し, 構成要素を最小

コストの位置に移動する．範囲を指定することで，凝集体外形からの距離に制限を付ける．一般的には大域解が望ましいが，計算コストが膨大である上に，解が確実に求まらない可能性があるため，本手法では局所解を求めることとした．

3.2.2 球を用いた陰関数

本手法では，陰関数に球状の関数群を用いる．この関数群は，任意の点に対して，内側に限定して構成要素の表面との距離を返す．

関数群を構成する球状の関数は，図 9 に示すように，スケルトン（もしくは medial axis と呼称される幾何情報）上に中心点を取り，中心点から構成要素の表面までの最短距離を半径として持つ．本手法では，Amenta らの手法 [1] を用いて，スケルトンに近似したメッシュを取得する．スケルトンのメッシュの頂点を中心とし，構成要素に接触する球は，必ず内側にある．これらの球状の関数の 0 セットサーフェイスの和集合は，構成要素の表面を近似する．そのため，構成要素の表面からの距離を返す関数として用いることができる．この陰関数 f を式 (3) で定義する．

$$f(\mathbf{x}) = \max_{g \in G} g(\mathbf{x}) \quad (3)$$

$$g(\mathbf{x}) = (r - \|\mathbf{x} - \mathbf{c}\|) s(\mathbf{x}, \mathbf{c}, r)$$

$$s(\mathbf{x}, \mathbf{c}, r) = \begin{cases} 1 & \text{if } \|\mathbf{x} - \mathbf{c}\| < r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

このとき， G は g の集合であり， r は球の半径， \mathbf{c} は球の中心（スケルトン上の点）， s はサポート関数である．陰関数 f は， \mathbf{x} が構成要素の内側のとき，正の値を返す．

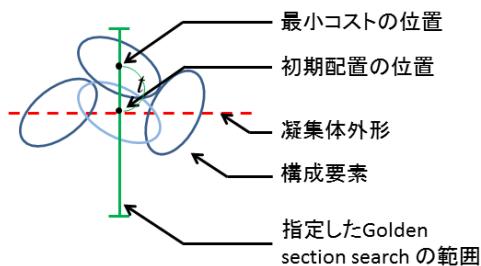


図 8 干渉の最小化. 指定した Golden section search の範囲（緑線分）内で $d(t)$ (式 (2)) の最小コストの位置を探す

Fig. 8 Optimizing position.

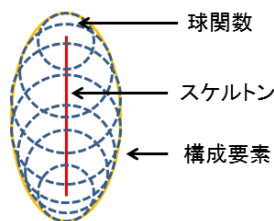


図 9 スケルトンと球を用いた陰関数の模式図. 黄線は構成要素の表面，赤線はスケルトン，青破線は球関数

Fig. 9 Skeleton and sphere for function.

4. 結果

本手法は，幾何計算ライブラリ CGAL と GPGPU ライブラリ OpenCL を用いて C++ で実装した．幾何計算ライブラリ CGAL は 3.1.1 項に先述の細分割と 3.2.2 項に先述したスケルトンを算出するためのボロノイ図の構築に用いた．GPGPU ライブラリ OpenCL は 3.2.2 項に先述した陰関数値の算出に用いた．実験の環境は，CPU : Intel Core i7 950 (3.07 GHz)，メモリ : 12.0 GB RAM，OS : Windows7 64 bit，GPU : NVIDIA GeForce GTX 570 の構成である．実験に用いる図 10 に示すモデルは，Maya® (Autodesk 社) を用いて球を変形させてモデリングした．それぞれの制作時間はおおむね 2 分程度であった．また，Stanford dragon と Stanford bunny も実験のモデルとして使用した．ただし，Stanford bunny は配置するには頂点が多すぎるため，頂点数を削減して使用した．モデルの頂点数と面の数，サイズの目安としてモデルの外接球の半径を表 1 に示す．

単一の構成要素を用いた結果を図 11 に示す．コスト関数式 (2) 内の a は 0.1 とした．位置調整のための移動範囲を指定する際，経験的に 3 次元空間内での距離を絶対的に指定することが難しいため，モデルの大きさを基準として相対的に指定した．位置調整の距離 t を制御するためにパラメータ b を定義し，位置調整の距離 t の範囲を $[-b, b]$ とした．ここでは， b には各構成要素の中心から最遠点の距離（外接球の半径）を設定した．図 11 (a) と (c) は，図 10 (a) のおにぎり形に構成要素を配置した結果である．構成要素はそれぞれ図 10 (b) のご飯粒と Stanford bunny である．また，図 11 (b) と (d) は，Stanford dragon 形に構成要素を配置した結果である．また，図 11 (d) では，凝集体全

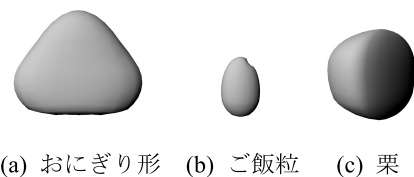


図 10 凝集体外形と配置する構成要素. (a) は凝集体外形，(b) と (c) は配置する構成要素

Fig. 10 Examples of pile-shape and component.

表 1 使用するモデルの頂点数と面数，外接球の半径 (Bunny のカッコ内の値は図 11 (d) の半径)

Table 1 Numbers of vertices and faces.

	頂点数	ポリゴン数	外接球の半径
図 10(a)	382	400	20.0
図 10(b)	382	400	1.1
図 10(c)	382	400	4.4
Dragon	50,000	100,000	46.2
Bunny	546	1,088	4.4 (1.7)

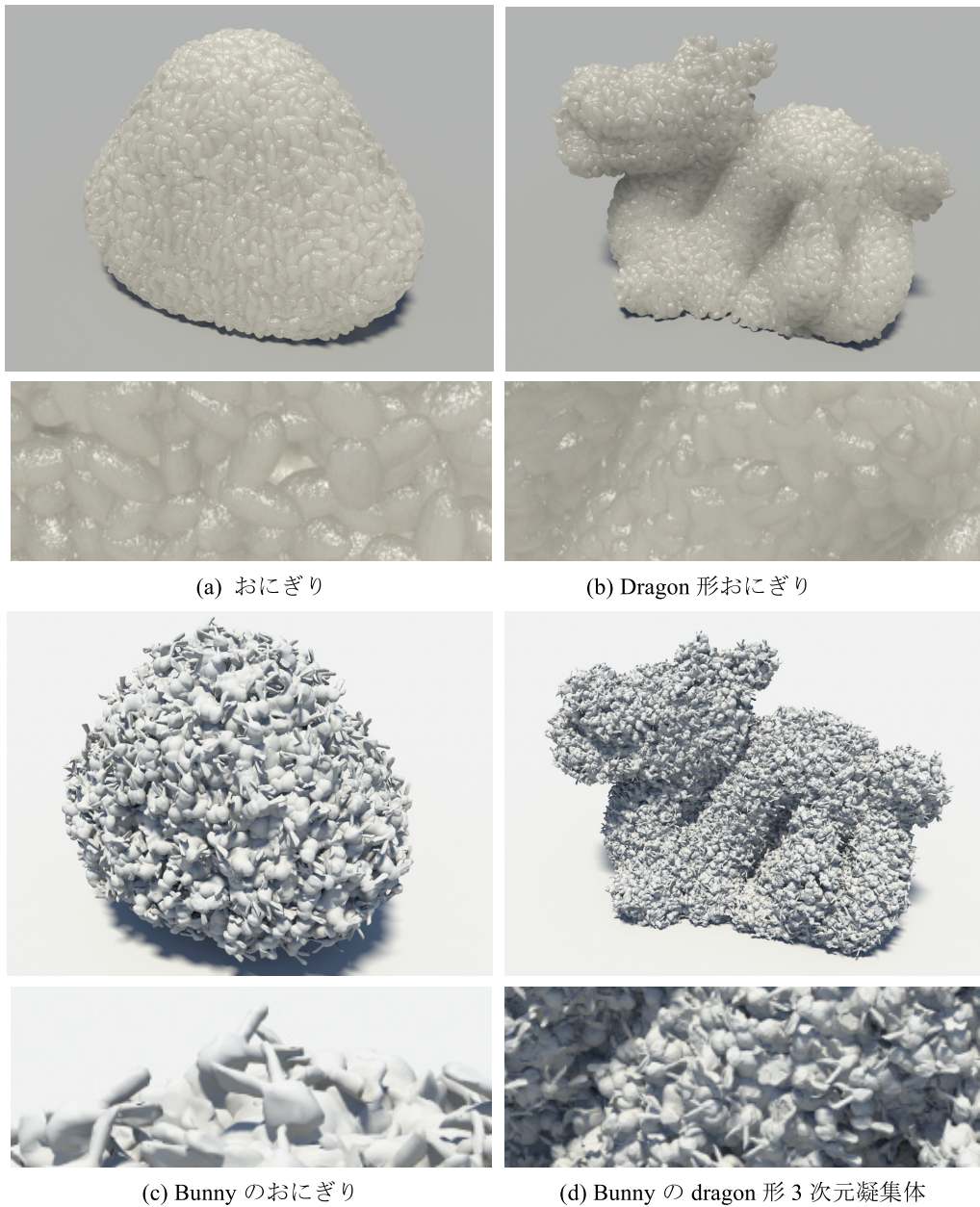


図 11 3次元凝集体の生成結果. 全体像と拡大図

Fig. 11 Results of this method.

体の形状を視認しやすくするために構成要素のサイズを図 11(c) より小さくした。

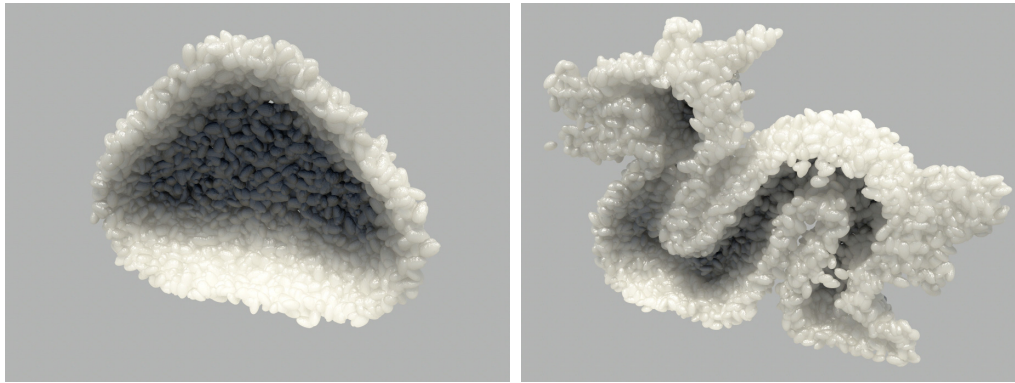
次に、凝集体の内部を図 12 に示す。図 12(a) と (b) はそれぞれ、図 11(a) と (b) を切断したモデルである。生成した凝集体は、外形表面に構成要素を分布させるため、図 12 に示すように内部は空洞である。

また、図 10(b) のご飯粒と (c) の栗の構成要素を用いた結果を図 13 に示す。ご飯粒と栗の配置数の割合は、100:1 とした。位置調整の範囲は、ご飯粒が $[-b, b]$ 、栗が $[-0.1b, 0.1b]$ とした。栗の範囲が小さい理由は、ご飯粒に比べてサイズが大きく、位置調整で栗が外に出やすくなるのを防ぐためである。ただし、 b を基準にせず、絶対的な距離で指定した場合には、相対的なサイズの違いを考慮

する必要はない。

最後に、細分割による初期配置での候補点生成の効果を確認するために、メッシュ単純化によって頂点を減らしたモデルを凝集体外形とした結果を図 14 に示す。凝集体外形以外の入力は図 11(b) と同じで、凝集体外形は、50,000 頂点の Stanford dragon を 10,000 頂点に減らしたモデルを用いた。メッシュ単純化は Maya[®] の標準機能を用いた。図 14 から、凝集体外形を覆うように構成要素が配置されており、粗いメッシュでも見た目として十分な凝集体を生成できることが視認できる。

以上の結果の配置数と計算時間を表 2 に示す。陰関数化の計算時間は、3.2.2 項に記述したスケルトンと球の半径を求めた時間の総和である。陰関数化の計算時間の差異



(a) 図 11(a) の内部

(b) 図 11(b) の内部

図 12 生成された凝集体の内部

Fig. 12 Inside of aggregate.

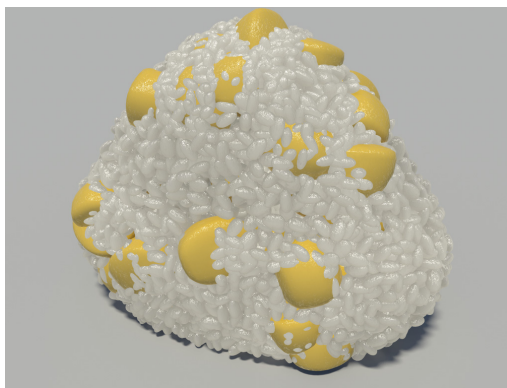


図 13 複数の構成要素での生成結果

Fig. 13 Aggregate of two types of components.

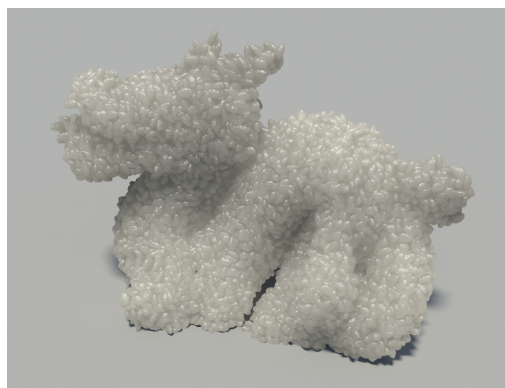


図 14 メッシュ単純化処理を入力した結果 (50,000 頂点から 10,000 頂点)

Fig. 14 Result of reduced mesh.

表 2 配置数と計算時間. ()内は候補点の数. 初期配置は細分割による候補点生成も含む

Table 2 Numbers of components and times.

	配置数	陰関数化	初期配置	位置調整
図 11 (a)	5,788 (6,242)	0.24s	6.71s	272.86s
図 11 (b)	16,396 (50,000)	0.24s	33.27s	628.28s
図 11 (c)	3,096 (6,242)	0.39s	3.37s	254.35s
図 11 (d)	23,031 (50,000)	0.39s	86.80s	1,365.07s
図 13	5,365 (6,242)	ご飯:0.24s 栗:0.12s	6.27s	194.30s
図 14	16,223 (39,873)	0.24s	15.04s	627.00s

は、スケルトンの計算が構成要素の形状に依存するためと考えるが、原因は特定できていない。図 11(a) と (c) は同じモデルを凝集体外形に用いたにもかかわらず、配置数が異なっている。これは bunny よりご飯粒の方が小さいため、ご飯粒の方が多く配置された。また、初期配置の計算時間は、構成要素数に依存することを確認した。図 11(a) は (c) のおおよそ倍の数の構成要素で構成され、配置にかかる時間もおおよそ 2 倍である。初期配置のダートスロー

イング法での終了条件である、「配置可能な頂点が無くなること」を満たすまで配置を繰り返すため、計算時間は構成要素数に比例する。ただし、候補点の数に応じて計算回数が増えるため、比例の係数は凝集体外形の入力メッシュの頂点の密度や構成要素のサイズによって変化する。一方、位置調整では、図 11(a) と (c) の計算時間がおおむね同じである。陰関数により干渉の深度を計算するため、1つの構成要素ごとの位置調整は、陰関数の数が計算時間に影

響する。陰関数に Amenta らの手法で求めたスケルトンを用いるため、陰関数の数はモデルの頂点数と同数となり、bunnyの方が時間を要する。そのため、配置数に違いがあるにもかかわらず、おおむね同じ程度の時間を要したと考える。図 11 (b) と (d) の比較でも同様のことがいえる。また、位置調整では、配置数の割合に比べて、図 11 (d) の方が時間を要しており、陰関数の数が多いためと考える。

表 2 に示すように、図 14 では、メッシュ単純化により頂点数を 10,000 頂点に減らしたが、細分割によって生成された 39,873 点の候補点を用いて初期配置した。配置数は図 11 (b) とほぼ同様であった。図 11 (b) では、メッシュの細かさが十分であったため、入力時の頂点数である 50,000 頂点を候補点として用いている。一方、図 14 では初期配置の密度が不十分であったため、メッシュが細分割された。疎なメッシュであっても初期配置に十分な候補点が生成できることが示された。また、初期配置の時間は、候補点が少なく、計算回数が減少したため図 14 の方が図 11 (b) よりも短かったと考える。位置調整の時間は、凝集体外形のメッシュは依存しないため、差が小さいと考える。これらのことから、初期配置においては、適切なメッシュ単純化を用いることで短時間で計算が可能になると考えられる。

5. 考察

本研究では、堆積を簡単にモデリングする手法を提案した。生成する凝集体の指定を簡単にするために、パラメータの設定が難しい物理計算や L-system を避けて幾何的な処理で自動生成した。実験により、凝集体外形と構成要素、および位置調整の範囲を指定するパラメータのみを設定するだけで所望のモデリングが可能であることを確認した。

最近の堆積生成の手法である 3 次元のテクスチャシミュレーション [15] では、入力のサンプルで小さいながらも手作業で堆積を形成する必要があるが、本手法では、その必要はないため、手作業の量は減ると考える。

本手法は、非周期的な堆積を対象としており、粘着性がある構成要素の表現に適していると考えられる。一方、粘着性が低く、球に近い構成要素が形成するような周期的な配置は不可能である。しかし、周期的な配置はコピー&ペーストで生成できるため、手作業でも大きな労力を要しないと考える。

本手法での初期配置には、離散的な候補点に対してサンプリングする手法を用いた。この手法では、サンプリングの領域が重複しないため、計算量が候補点の分布している領域の面積と比例する。しかしながら、候補点はメッシュを分割して密に発生させるため、必要以上に密な候補点を発生させる可能性がある。これにより検索時に無駄が発生していると考えられる。ただし、無駄を削減するためのメッシュ単純化の処理はないため、今後、形状に応じた適切な密度の候補点（たとえば曲率が高い領域は疎）を発生

させることで、無駄を減らすことで高速な計算が望める。また、連続空間を対象とした効率的なダートスローイング [5] を用いることでの高速化も望める。文献 [5] の手法では厳密な $O(n)$ ではないが、実験結果から時間的に $O(n)$ である。さらに、この手法は候補点を必要としないため、本手法よりも効率的である可能性がある。

また、初期配置のダートスローイング法では、モデルに内接する最大球を用いた。本手法は、結果に示したような中身がある構成要素では有効に働いているが、「長い棒や薄い皿のような異方性が強い形状」や「ワイヤーで構成されるオブジェクト」、「中空のオブジェクト」、「お椀のような薄くて窪みが大きなオブジェクト」のように、オブジェクトのバウンディングボリュームと比較して最大球が小さくなるオブジェクトでは、調整が必要であると考えられる。今後、モデルの形状を考慮したダートスローイング手法を検討する。

位置調整で、大域解を避けた理由は、高次元の計算をなくすためであるが、今後コンピュータの計算能力、またはアルゴリズムの向上により、可能となると考える。本手法での最適化に局所解を用いたのは、計算コストの問題のみであるため、大域解を用いても堆積を形成できると考える。

また、位置調整においては、干渉の量に制限を設けていないため、凝集体外形の曲率が高い領域や空間が狭い領域では、構成要素の干渉が多くなる。最悪の場合、構成要素の全体が干渉する。今後、干渉の量に制限をつけ、制限に応じて構成要素を削除することを検討する。

構成要素の姿勢は、現状ではランダムに決定しているが、ベクトル場などの方向の指定をすることで、操作できると考える。

本手法では、陰関数に Amenta らの手法で求めたスケルトンを用いるため、陰関数の数はモデルの頂点数と同数となる。そのため、頂点の数が多い場合、陰関数の計算回数が増加する。また、陰関数のサポートサイズの重なりも多くなるため、無駄な計算が多くなる。実験では、GPU 上の並列処理を用いて陰関数値を求めているため計算時間に大きな影響を与えないが、CPU-GPU の転送に時間を要するうえに、計算時にメモリを圧迫し、計算が不可能になることがあるため、今後、適切な削減が必要である。削減手法として、陰関数の間引きや、メッシュ単純化、もしくは必要に応じた段階的なメッシュ単純化などで計算回数を削減できると考えられる。

位置調整での制限として、構成要素の干渉があげられる。本手法では、調整の範囲を定めているため、凝集体外形の曲率が高い部分では、干渉が避けられない。また、極端に長い構成要素でも干渉が避けられない可能性がある。今後、構成要素と数と方向の再調整を検討する。

サイズが異なる複数の構成要素をダートスローイング法で配置するとき、大きな構成要素の内側に小さな構成要素

が配置されることがある。これは、配置された小さな構成要素の周りに立てたフラグでは、後から配置する大きな構成要素の範囲ではないため、大きな構成要素が配置される。結果的に、大きな構成要素の中に小さな構成要素が入り込んでしまう。このように現状では、構成要素の重なりが多くなりすぎる場合があるため、今後、不要な構成要素を間引いて、干渉を解消することを目指す。

6. まとめ

本論文では、非周期的に堆積された構成要素を表現する手法を提案した。構成要素で任意の堆積を形成するために、配置する数、個々の構成要素の姿勢、位置の順で決定した。配置する数は、ダートスローイングの要領で構成要素を配置することで決定した。これにより、おおむねの位置を決定することができ、位置調整では、移動方向を凝集体外形の法線方向のみに限定することができた。姿勢をランダムに決定することで構成要素が非周期的に配列した堆積を表現した。位置調整の移動量は、陰関数を用いて定めたコスト関数を最適化することにより求めた。最適化では、大域解は計算コストが高すぎるため、局所解を用いた。実験により、凝集体外形と構成要素、および位置調整の範囲を指定するパラメータのみを設定するだけで所望のモデリングが可能であることを確認した。

今後、計算コストの無駄を減らしつつ、指定した凝集体外形により近づくような幾何計算を試みる。

謝辞 本研究は科研費・新学術領域 (23135513) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Amenta, N., Choi, S. and Kolluri, R.K.: The power crust, *Proc. 6th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, Ann Arbor USA, pp.249–266 (2001).
- [2] Catmull, E. and Clark, J.: Recursively Generated B-Spline Surfaces on Arbitrary Topological Meshes, *Computer-Aided Design*, Vol.10, No.6, pp.350–355 (1978).
- [3] Deussen, O., Ebert, D.S., Fedkiw, R., Musgrave, F.K., Prusinkiewicz, P., Roble, D., Stam, J. and Tassendorf, J.: The elements of nature: Interactive and realistic techniques, *ACM SIGGRAPH 2004 Course Notes SIGGRAPH '04*, Los Angeles, USA (2004).
- [4] Dobashi, Y., Haga, T., Johan, H. and Nishita, T.: A Method for creating mosaic images using voronoi diagrams, *Proc. Eurographics 2002 Short Presentations*, Saarbrücken Germany, pp.341–348 (2002).
- [5] Dunbar, D. and Humphreys, G.: A spatial data structure for fast Poisson-disk sample generation, *ACM Trans. Graphics (TOG) – Proc. ACM SIGGRAPH 2006*, Vol.25, No.3, pp.503–508 (July 2006).
- [6] Ebert, D.S., Musgrave, F.K., Peachey, D., Perlin, K. and Worley, S.: *Texturing and Modeling A Procedural Approach Third Edition*, 3rd edition, Morgan Kaufmann (Dec. 2002).
- [7] Gal, R., Sorkine, O., Popa, T., Sheffer, A. and Cohen-

Or, D.: 3D collage: Expressive non-realistic modeling, *NPAC '07 Proc. 5th International Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering*, pp.7–14 (2007).

- [8] Gamito, M.N. and Maddock, S.C.: Accurate multidimensional Poisson-disk sampling, *ACM Trans. Graphics*, Vol.29, No.1, pp.8:1–8:19 (Dec. 2009).
- [9] Hausner, A.: Simulating decorative mosaics, *SIGGRAPH '01 Proc. 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp.573–580 (2001).
- [10] Hsu, S.-W. and Keyser, J.: Piles of objects, *ACM Trans. Graphics (TOG) – Proc. ACM SIGGRAPH Asia 2010*, Vol.29, No.6, pp.155:1–155:6 (Dec. 2010).
- [11] Kaplan, C.S. and Salesin, D.H.: Escherization, *SIGGRAPH '00 Proc. 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp.499–510 (2000).
- [12] Kim, J. and Pellacini, F.: Jigsaw image mosaics, *ACM Trans. Graphics (TOG) – Proc. ACM SIGGRAPH 2002*, Vol.21, No.3, pp.657–664 (July 2002).
- [13] Lagae, A. and Dutre, P.: A procedural object distribution function, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.24, No.4, pp.1442–1461 (Oct. 2005).
- [14] Loop, C.: Second order smoothness over extraordinary vertices, *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, pp.165–174 (2004).
- [15] Ma, C., Wei, L.-Y. and Tong, X.: Discrete element textures, *ACM Trans. Graphics (TOG) – Proc. ACM SIGGRAPH 2011*, Vol.30, No.4, pp.62:1–62:10 (July 2011).
- [16] Palubicki, W., Horel, K., Longay, S., Rumions, A., Lane, B., Mech, R. and Prusinkiewicz, P.: Self-organizing tree models for image synthesis, *ACM Trans. Graphics (TOG) – Proc. ACM SIGGRAPH 2009*, Vol.28, No.3, pp.58:1–58:10 (Aug. 2009).
- [17] Parish, Y.I.H. and Muller, P.: Procedural modeling of cities, *SIGGRAPH '01 Proc. 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp.301–308 (2001).
- [18] Perlin, K. and Hoffert, E.M.: Hypertexture, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics – Special issue: Proc. 1989 ACM SIGGRAPH*, Vol.23, No.3, pp.253–263 (July 1989).
- [19] Peytavie, A., Galin, E., Merillou, S. and Grosjean, J.: Procedural Generation of Rock Piles Using Aperiodic Tiling, *Computer Graphics Forum (Proc. Pacific Graphics)*, Vol.28, No.7, pp.1801–1810 (2009).
- [20] Ramanarayanan, G., Bala, K. and Ferwerda, J.A.: Perception of complex aggregates, *ACM Trans. Graphics (TOG) – Proc. ACM SIGGRAPH 2008*, Vol.27, No.3, pp.60:1–60:10 (Aug. 2008).
- [21] Worley, S.: A cellular texture basis function, *SIGGRAPH '96 Proc. 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp.291–294 (1996).

推薦文

本報告ではポリゴンメッシュで与えられる任意の3次元形状の堆積形成手法を提案している。ここで堆積とは物体が米粒のように粘りついて互いに接した状態でつながり合い、全体としてシェル状の構造体となることを指し、筆者らによる新しいモデリング手法である。この問題を解くに

あたって、筆者らは目的とする構造体を近似する初期配置と各要素の位置を微調整して接触させる再配置の2段階の処理を行っている。またGPUを用いた並列計算によって処理の高速化を実現している。本報告は新規性に優れるとともに、手法の有効性も十分な研究であり、情報処理学会会員にとっても興味深くかつ有益な研究と考えられる。よって、論文誌での掲載価値を十分に有していると判断し、本研究会は本論文を推薦論文として推薦するものです。

(グラフィックスとCAD研究会前主査 山口 泰)



櫻井 快勢 (正会員)

2008年北陸先端科学技術大学院大学博士前期課程修了。同年、大日本印刷(株)入社。2010年北陸先端科学技術大学院大学博士後期課程入学。現在、北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士後期課程兼大日本印刷(株)

所属。



宮田 一乘 (正会員)

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。同年日本アイビーエム(株)東京基礎研究所入社。1998年東京工芸大学学術部助教授。2002–2012年、北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育

研究センター教授。2012年より、北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科教授。博士(工学)。コンピュータグラフィックスおよびデジタル映像表現に関する研究に従事。芸術科学会、映像情報メディア学会、ACM、IEEE等各会員。