

## セル構造オートマトンによる微小剛体の集合体形状モデル

齋藤 敏樹<sup>†</sup> 富川 裕樹<sup>†</sup> 高井 昌彰<sup>††</sup>

<sup>†</sup>北海道大学大学院 工学研究科

<sup>††</sup>北海道大学 大型計算機センター

従来の3次元自由形状モデリング手法では、直感的な形状操作と実時間での対話的操作の両者を実現するものはみられなかった。そこで我々は両者を同時に実現することを目的とし、セル構造オートマトンを適用した仮想粘土モデルを構築した。仮想粘土モデルでは体積保存を考慮しておらず、体積保存が必要とされる用途には適用できなかった。また、直交格子状のセル空間を用いていたため隣接セル間の距離が均一ではなく、形状変形に方向依存性があった。そこで本論文では、体積保存を考慮した形状変形を実現するためにバイナリ型セル値を用い、隣接セル間の方向依存性を解消するために正六角形セルを導入したモデルを構築する。合わせて、格子状セル空間で用いられていたマーゴラス近傍を、正六角形セルの場合に適合するように変更を加えた近傍形を提案する。

### A Cellular Shape Model for a Rigid Ball Cluster

Toshiki Saito<sup>†</sup>, Yuki Tomikawa<sup>†</sup> and Yoshiaki Takai<sup>††</sup>

<sup>†</sup>Graduate school of Engineering, Hokkaido University

<sup>††</sup>Computing Center, Hokkaido University

There is no method that realizes both the intuitive sharp operation and real-time conversational operation among usual 3-D free-form shape modeling method. Therefore, we build the virtual clay model to realize both of them at the same time. Our virtual clay model takes no account of the volume keeping. Therefore, virtual clay model can't be applied to the case that needs volume keeping. In this paper, we adopt the binary cell value so that the shape deformation could realize volume keeping, and construct the shape model introduced regular hexagon. To add to, we propose a new neighborhood that is modified to fit the margolus neighborhood to the regular hexagon cell space.

#### 1 はじめに

近年、3次元コンピュータグラフィックス技術のめざましい発達に伴い、その利用範囲は大きく拡大し、同時にそれに対する需要も大幅に増加している。しかしながらその一方で、従来の3次元自由形状モデリング手法は製作者の習熟の必要性や計算時間が大きいなどの

問題が存在し、3次元CG製作の一般ユーザーへの普及の妨げになっている。

従来の3次元自由形状モデリング手法は大別して以下の2つのアプローチがとられてきた。

#### 数学的アプローチ

オブジェクト表面をB-スプライン曲面やベジェ曲面によって定義し、制御点を用いて曲

面の形状を制御してモデリングを行なう。高速な手法ではあるが、制御点と実際に変形する曲面とが離れているため直感的な形状操作が困難であり、形状モデリングに熟練を要するという欠点がある。

### 物理的アプローチ

有限要素法 [1] や弾性理論 [2] などに代表される厳密な物理法則に基づいたモデル。現実に近いリアルなモデリングが可能であるが、物体の変形処理に膨大な計算コストがかかるため、実時間での対話的モデリングが行えないという問題点がある。

上記2つのアプローチそれぞれが持つ問題点を同時に解決する手法はこれまで見られなかった。そこで我々は、直感的な形状操作とモデリング時の実時間対話性を同時に実現することを目的とし、3次元ボクセル空間の各ボクセルに仮想物体の質量とその分配規則を与えたオートマトンを埋め込んだ、能動的ボクセル空間を提案した [3]。そして仮想物体として「粘土」を想定し、仮想粘土細工型の自由形状モデリングシステムの構築を行なった [4]。仮想粘土細工システムは、厳密な物理シミュレーションではなく単純化された仮想粘土の分配規則に基づくため、少ない計算量で対話的・直感的な自由形状操作を実現している。

仮想粘土モデルでは仮想粘土の空間的密度分布の均一化の観点からの形状変形を考えているため、各セルに保持される仮想粘土の量(質量)が可変であり、体積の保存性は考慮されていなかった。しかし、自由形状モデリングにおいては体積の保存性を必要とするものも存在する。そこで本論文では、体積保存を実現するために「バイナリ型セル値」を導入して能動的ボクセル空間の構築を試みる。「バイナリ型セル値」の導入により、各セルに保持される質量が一定となるため、提案モデルは微小剛体の集合体形状モデルであると言える。

また、仮想粘土モデルにおいては直交格子状のセル空間を用いていたために隣接セル間の距離が均一ではなく方向依存性があった。そこで提案モデルでは方向依存性の解消を目的として「正六角形セル」を導入する。またこれに伴い、2次元の「正六角形セル」平面に適合するように変更を加えた「Triple Triangle Margolus(TTM) 近傍」を提案する。

提案した微小剛体の集合体形状モデルを2次元で実装し、仮想粘土モデルとの比較により提案モデルの形状変形時の特性について考察する。

## 2 仮想粘土モデル

能動的ボクセル空間の構築の基本となっているセル構造オートマトンについて簡単に説明した後、仮想粘土モデルの概要とその特徴について述べる。

### 2.1 セル構造オートマトン

セル構造オートマトン (CA:Cellular Automata) とは、多数の有限オートマトンがある定められた近傍とトポロジーの下で規則的に連結された形式的な局所計算モデルであり、比較的簡単な近傍形と状態遷移規則によって全体として複雑な挙動を示すことが知られている。

### 2.2 仮想粘土モデルとその特徴

仮想粘土モデルは、3次元ボクセル空間にCAを適用することにより構築した能動的ボクセル空間上で実現されている。セルの属性値(セル値)としては、セル内に存在する仮想粘土の質量をfloat型で与えている。近傍形としては、系内の質量を保存するためにマーゴラス近傍 [6] を採用している。

仮想粘土モデルでは、仮想粘土の空間的密度分布の均一化の観点からの形状変形を考えている。この考えに基づく状態遷移規則は、隣接セル内でしきい値以上のセルからしきい値以下のセルへ、一定割合の仮想粘土を等配

分するように記述されている。このように単純化された仮想粘土の分配規則に基づくため、仮想粘土モデルは少ない計算量で対話的・直感的な自由形状操作を実現している。

仮想粘土モデルにおいては、複数存在する隣接セルへの仮想粘土の等分配により分配規則を記述するため、セル値として float 型の値を採用している。このため各セルに保持される仮想粘土の量（質量）が可変であり、体積保存性は考慮されていない。このため、体積保存性を要求するようなモデリングへの適用は困難である。

また仮想粘土モデルにおいては直交格子状のセル空間を用いているため、隣接セルの重心間の距離が均一ではなく方向依存性がある。この方向依存性の2次元における様子を図1に示す。このため、形状変形の結果が重心間の距離の長い方向に偏って盛り上がる傾向が見うけられる場合もあった。

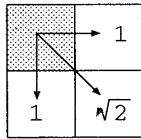


図 1: 方向による移動距離の不等性

### 3 微小剛体の集合体形状モデル

本論文では仮想粘土モデルで実現されていない「体積保存性」に着目し、「微小剛体の集合体」を構築することでその実現を行なう。微小剛体は「バイナリ型セル値」の導入により実現する。また、方向による移動距離の不等性の解決のため、「正六角形セル」を導入する。これに伴い、マーゴラス近傍を正六角形セルに適合するように独自に拡張を行なった新しい近傍形を採用する。

#### 3.1 バイナリ型セル値の導入

仮想粘土モデルでは、1つのセル内に複数の粘土粒子の進入を許すため、体積保存の実

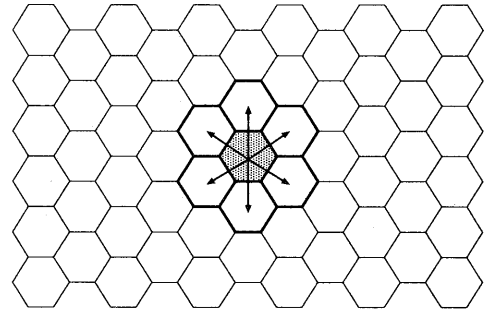


図 2: 正六角形セルによる平面敷詰め

現が難しかった。これは逆に、セル内に進入することのできる粘土粒子を最大で1つにすれば体積保存が可能であることを示している。この場合セルの状態は、粘土粒子が「存在する、存在しない」の2つの状態で表現できる。これはすなわちセル値を 0,1 のバイナリ型で持つことで、体積保存が実現できることを意味する。

#### 3.2 正六角形セルの導入

方向による距離の不等性は正六角形セルを導入することで解決する。図2からわかるように、正六角形で平面を埋めた場合、あるセルとそれに隣接する全てのセルとの重心間の距離が等しくなる。

自然界においても六角形は最も安定した2次元形状の1つとして知られ、さらに、3次元に拡張した場合、充填密度最大の結晶構造である六方最密構造をとることができる。

##### 3.2.1 TTM 近傍

近傍形としてはマーゴラス近傍 [6] を独自に拡張した「Triple Triangle Margolus 近傍 (TTM 近傍)」を適用する。本来、マーゴラス近傍は正形状の最近接4セルを近傍とし、対称セルに対して奇数ステップと偶数ステップで X,Y 軸に対して1つつずらすものであり、謂わば「Double Square Margolus 近傍」(二重正方形)とも表現できる。

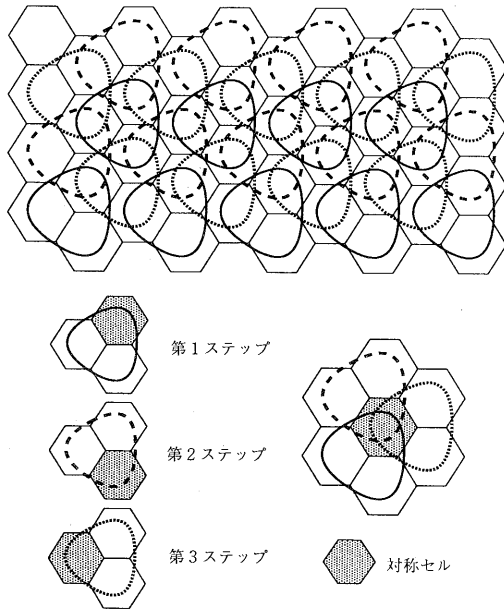


図 3: Triple Triangle Margolus 近傍

これに対して、今回我々が考案した TTM 近傍は図 3 のように、三角形の最近接 3 セルを近傍とし、対称セルに対して第 1、第 2、第 3 ステップで 120 度ずつ回転させたものとなっている。さらに各ステップ内では奇数ラインと偶数ラインで近傍が X 軸に 1、Y 軸に 2 ずつずれる。この様子から我々はこの近傍形を「Triple Triangle Margolus 近傍」(三重三角形)と名付けた。また TTM 近傍で 3 つのステップを合わせて考えると、対称セルは隣接する全てのセルに移動可能であることがわかる。(図 3 右下)。

### 3.3 状態遷移規則

状態遷移は既に粒子が存在するセルに、外から新たな粒子が進入してきた場合に発生する。この時、最初から存在していた粒子が外に弾き出され、外から進入してきた粒子が新たにそのセルに留まることにする。イメージとしてはパチンコ玉の衝突に近い振舞いを行なう。この衝突の瞬間、一時的にセル値を 2

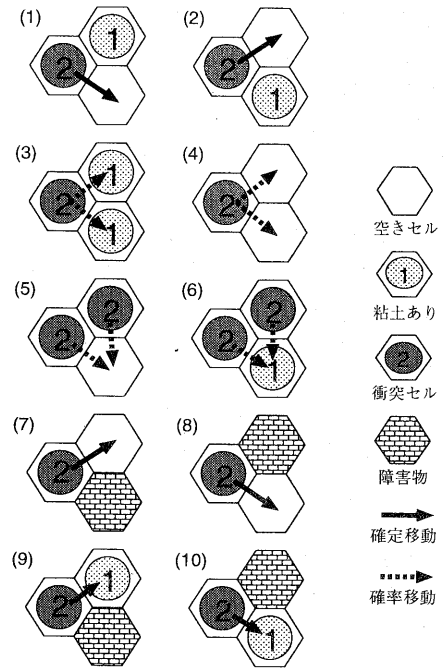


図 4: 状態遷移規則

とすることになると、近傍内にセル値が 2 のセルが発生した時のみ、状態遷移が行なわれることになる。このセル値 2 のセルを「衝突セル」と呼ぶ。回転対称形を除くと、状態遷移が発生するのは図 4 の 10 パターンのみとなる。さらに各パターンを見ていくと、粒子の移動パターンは同じものが多く、最終的な状態遷移規則は 4 つにまで集約できる。

状態遷移は次のような基本ルールで行なわれる。「衝突セルのセル値を 1 だけ、近傍内の自分以外のセルで最もセル値の低いセルに移動させる」

ここで図 4 のパターン 3,4 を見ると、自分以外のセルのセル値はどちらも同じ値である。この場合、従来の仮想粘土モデルだと両方のセルにセル値 0.5 を分配するということが行なえたが、本モデルでのセル値は「セル内の粒子の存在の有無」を表しているのだからそのような「分配」は不可能である。よってこ

の場合の状態遷移規則は「自分以外のセルがどちらも同じセル値を持っていた場合、そのどちらかに確率的に移動させる」こととする(ランダム移動)。また、パターン 5,6 も同様の考え方で、「近傍内の2つのセルが衝突セルであり、残りの1つのセルが自分よりも低いセル値を持っていた場合、2つの衝突セルのどちらか一方のみから確率的にセル値を移動させる」こととする。

またパターン 7,8,9,10 のように近傍内に障害物セルがある場合は、障害物セル以外のセルにセル値を移動させる。

### 3.4 粒子集合体への形状操作

障害物によって粒子集合体を押すことで形状操作を行なう。障害物によって押された粒子は障害物の進行方向へ1セル分強制的に移動させる。この際、押された粒子の移動先に既に粒子が存在した場合、前述の衝突セルが発生するため、状態遷移が行なわれ、結果として粒子集合体の変形を引き起こす。

## 4 実行例

本モデルを用いて実際に形状操作を行なった様子を図 5左列に示す。41x41のセル空間に20x20の正形状の粒子集合体を配置し、右側から板上の障害物で押していった。また、比較対称として仮想粘土モデルで同様の形状操作を行なった様子を示した(図 5右列)。

各時刻毎に両者を比較すると、仮想粘土モデルよりも提案モデルの方が面積が大きいことがわかる。特に、最終ステップに注目すると、提案モデルではセル空間の端に到達しそうな位の変形をしているが、粘土モデルでは粘土が潰れてしまうため変形の度合はあまり大きくない。このように、体積保存性を実現した本モデルでは、ユーザによる形状操作をよりダイレクトに反映した形状変形が可能である。

また、剛体集合体の表面に細かい変位が確

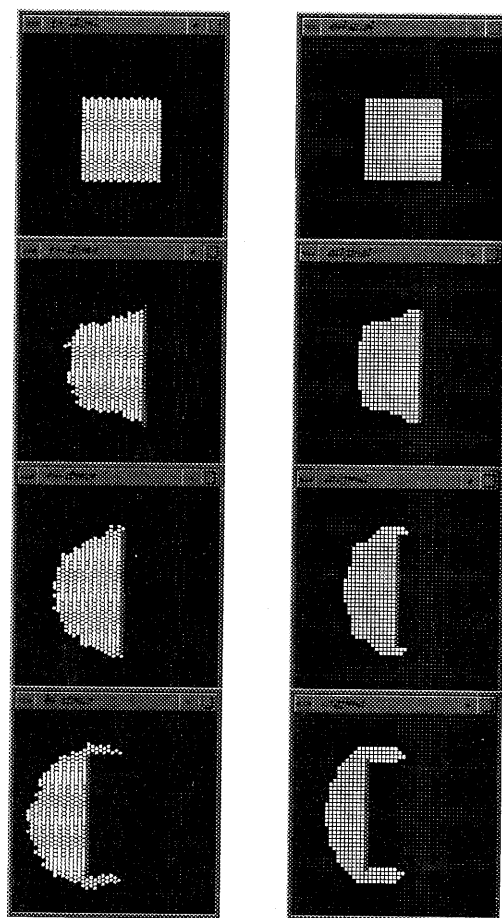


図 5: (左) 提案モデル (右) 仮想粘土モデル

認できる。これは状態遷移にランダム移動が含まれていることが原因であり、ランダム移動による確率の波が剛体集合体表面に現れたと考えられる。この凸凹はセル空間の解像度を十分に上げることで解決可能である。

## 5 おわりに

体積保存を実現するために「バイナリ型セル値」を導入して能動的ボクセル空間の構築を試みた。また方向依存性の解消を目的として「正六角形セル」を導入した。これに伴い2次元の「正六角形セル」平面に適合するように変更

を加えた「Triple Triangle Margolus(TTM)近傍」を考案した。

さらに、本手法を用いて実際に形状変形を行ない、仮想粘土モデルとの比較を交えて、その特徴を述べた。

現在、本モデルの3次元版を実装中である。また、ランダム移動による計算時間の増大を解消するため、新たに「粒子の移動方向」をセル値に持たせて、ランダム移動の排除が行なえないか思索中である。さらに、実際にビー玉やパチンコ玉などの剛体を用いた物理シミュレーションを行ない、本研究との比較を行ないたい。

## 参考文献

- [1] A.Pentland and J.Williams: "Good vibrations: Modal dynamics for graphics and animation", Computer Graphics, Vol.23, No.3, pp.215-222(1989).
- [2] D.Terzopoulos and K.Fleischer: "Deformable models", The Visual Computer, Vol.4, No.6, pp.306-331(1998).
- [3] 荒田秀樹, 高井昌彰, 山本強: セル構造オートマトンによる仮想粘土モデリング, 情報処理学会研究報告, Vol.97, No.124, pp.19-24(1997).
- [4] 斎藤敏樹, 荒田秀樹, 高井昌彰, 山本強: "セル構造オートマトンを用いた仮想粘土細工システム", 情報処理学会北海道シンポジウム'98, pp.131-132(1998).
- [5] T.Toffoli and N.Margolus: Cellular Automata Machines, MIT Press (1987).
- [6] N.Margolus: "Physics-like models of computation", Physica, Vol.10D, pp.81-95(1984).