

仮想粘土による 3 次元自由形状モデリング

荒田 秀樹[†] 高井 昌彰^{††} 高井 那美^{†††} 山本 強^{††}

[†]北海道大学大学院工学研究科, ^{††}北海道大学大型計算機センター,

^{†††}北海道情報大学経営情報学部

コンピュータグラフィックスにおいて、3次元自由形状モデリングは難しい問題の1つである。制御点による手法では直感的な形状操作が困難である。また、物理法則に基づく手法では膨大な計算量を必要とし、対話型の自由形状モデリングには不向きである。本論文では並列計算モデルの1つであるセル構造オートマトンに着目し、これを3次元ボクセル空間における対話的な自由形状モデリングに応用する。可塑性を有する粘土状物体を想定し、各ボクセルに有限オートマトンを埋め込んだ能動的ボクセル空間の中で粘土細工的な形状操作による自由形状モデリングを実現する。仮想粘土細工システムのプロトタイプを構築し形状操作の実験例を通じて、自由形状モデリングの新しい可能性を示す。

3D Free-Form Shape Modeling by Virtual Clay

Hideki Arata[†], Yoshiaki Takai^{††}, Nami K. Takai^{†††} and Tsuyoshi Yamamoto^{††}

[†]Graduate School of Engineering, Hokkaido University,

^{††}Computing Center, Hokkaido University

^{†††}Faculty of Business Administration and Information, Hokkaido Information University

Modeling free-form shapes in 3D space is one of the difficult problems in computer graphics. In a parametric patch, intuitive control of free-form shapes is not easy. The methods based on strict physical laws need considerable computation time to deform objects, which are not suitable for interactive applications. In this paper we focus on a cellular automaton and try to apply it to interactive free-form modeling within a 3D voxel space. Each voxel is allocated a finite state automaton which repeats state transition according to the conditions of its neighbor voxels. Virtual clay objects defined in such an active voxel space are easily deformed. Through some experiments, we demonstrate the effectiveness of our approach.

1 はじめに

CGの発展に伴い、3次元自由形状のモデリング技術は益々その重要性を高めている。ユーザーに十分な幾何学的知識を仮定できる場合には、厳密な幾何学的操作によってソリッドモデルを構築することが可能である。しかしこのような幾何学的操作に基づいて自由形状を構築するには、ユーザーの数学的な知識と柔軟な空間認識力が不可欠である。

自由形状モデリングにおける上記の問題は、モデルの対象を自由に変形できる柔らかな塑性体に対応付けることで解決できる。もし、粘土細工の要領で立体形状を構築できれば、形状操作における煩わしさは軽減される。

厳密な物理モデルに基づく形状モデリングに関する研究としては、有限要素法に基づく弾性体の変形を扱うものや [1]、弾性理論に基づいて物体の変形を実現するものがある [2]。また、[3] は粒子ベースモデルによって粘土の形状変化を実現している。これらの手法は一般に膨大な計算量を必要とし、対話型の応用には不向きである。

物体表面を多数のパラメトリックなパッチから構築し、その制御点をコントロールすることで可塑性を有する自由形状のモデリングを実現することも可能である [4, 5, 6]。しかしこのような数学的モデルにおいては、直感的な形状操作は困難であり、物理的に自然な形状を形成するのに熟練を要する。

本論文では、ボクセル空間に配置された3次元セル構造オートマトンを応用し、可塑性を有する粘土状物体（以下、仮想粘土と呼ぶ）の自由形状モデリングを試みる。各ボクセルに仮想粘土の分配規則を与えたオートマトンを埋め込み、各オートマトンが近傍のボクセル値を参照し状態遷移を繰り返すことによって、仮想粘土全体の質量を保存した可塑的な形状変化を能動的ボクセル空間の中で実現する。

セル構造オートマトンのモデリングへの応用としては、火災などの自然物テクスチャの生成 [7, 8]、植物成長モデルへの応用 [9]、物理法則に基づいたパーティクルシステムへの

応用 [10]、および、幾何学的制約充足による2次元図形描画 [11] などが報告されているが、3次元自由形状モデリングへの適用例は見られない。

本論文の提案手法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いているため、少ない計算量で対話的な自由形状操作が可能である。あわせて、仮想粘土の形状変化は実際の粘土の振舞いを十分に連想させるものである。

本モデルに基づく仮想粘土細工システムのプロトタイプを構築し、実際に形状操作を行うことで本仮想粘土モデルの有効性を示す。

2 Virtual Clay

2.1 可塑性の考え方

我々は仮想粘土の空間的密度分布の均一化の観点から形状変形を考える。すなわち、仮想粘土がある形状を保持するのはその空間的密度がある閾値以下のためであり、変形とは閾値を越える密度部分が仮想粘土の移送によって解消されていく過程にほかならないと考える。もちろん仮想粘土の質量保存則は成立しなければならない。

このアプローチを3次元離散ボクセル空間で考えるならば、ボクセル値をそのボクセルが有する仮想粘土の質量に対応付けることを意味する。ボクセル空間にはボクセル値に対するある閾値が定められ、これを越えた場合ボクセル値の更新が発生する。我々はこのボクセル値の更新すなわち形状変形を、3次元マーグラス近傍を有するセル構造オートマトンで実現する。以下、ボクセルを単にセルと呼ぶ。

簡単のために2次元マーグラス近傍の例を図1に示す。2次元版では格子上で最隣接の4セルを1つのブロックとみなし、ブロック内のセルを一度にまとめて状態遷移させる [12]。つまりブロック内の任意のセルの近傍とは自分が属するブロック全体である。またブロックの境界は固定ではなく、状態遷移の1ステッ

づごとに1セル分移動する。すなわちどのセルも奇数ステップと偶数ステップで異なる近傍を有する。

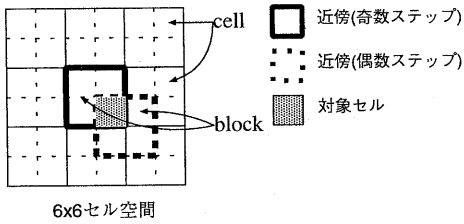


図 1: 2次元マーゴラス近傍

図 2 に 2 次元の場合の状態遷移規則を示す。障害物が存在しない空間では、閾値以上のセルがブロックに含まれるパターンは回転対称を除いて 4 種類存在する。それぞれのセルが持つ仮想粘土の質量を $m_1 \sim m_4$ とすると、図 2 左上の状態遷移は、 α をパラメータ ($0 < \alpha < 1$) として次のように定められる。

$$\begin{aligned} \Delta m &\leftarrow m_1 \times \alpha; \\ m_1 &\leftarrow m_1 - \Delta m; \\ m_k &\leftarrow m_k + \Delta m/3 \text{ for } k = 2, 3, 4; \end{aligned}$$

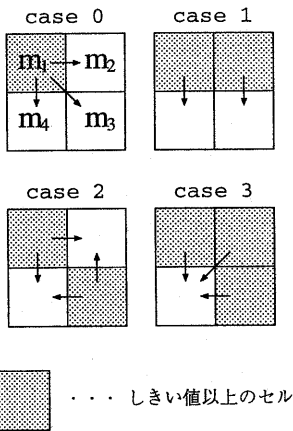


図 2: 2次元ブロックパターンと状態遷移規則

このように閾値以下のセルへの仮想粘土の分配は等方的であり、きわめて単純である。状態遷移の結果、閾値以上のセルがブロック内に新たに生まれる場合もある。これは次のステップの状態遷移すなわち異なるブロックでの

仮想粘土の分配を引き起こし、結果として仮想粘土のバケツリレー的な移送が起こる。この移送はブロック内のセルがすべて閾値以下となる場所で停止する。

2.2 状態遷移規則

3次元マーゴラス近傍における1ブロックは、図 3 に示すように最隣接の 8 セルから構成される。2次元の場合と同様に、どのセルも奇数ステップと偶数ステップでは異なるブロックに属する。障害物の無い 3次元空間に

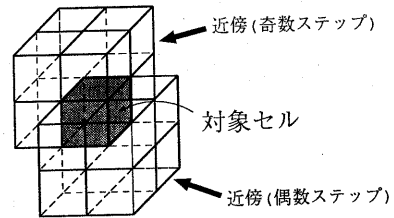


図 3: 3次元マーゴラス近傍

において、閾値以上のセルが1ブロックに含まれるパターンは、図 4 に示すように回転対称を除いて 21 種類存在する。以下に、3次元の場合の状態遷移規則を示す。

Step 1 閾値以上のセル k に対して、

$$\begin{aligned} \Delta m_k &\leftarrow m_k \times \alpha, \quad m_k \leftarrow m_k - \Delta m_k, \\ m_k &\text{ はセル } k \text{ の仮想粘土量、} \alpha \text{ は分配率} \\ &(0 < \alpha < 1). \end{aligned}$$

Step 2 閾値以下のセル j に対して、

$$\begin{aligned} m_j &\leftarrow m_j + (\Delta m_1 + \dots + \Delta m_r)/n, \\ n &\text{ は閾値以下のセルの個数、} r \text{ は閾値以上} \\ &\text{のセルの個数} \end{aligned}$$

質量保存則が成立するのは明らかである。また、全セルが閾値以下または全セルが閾値以上であるブロックでは状態遷移は起こらない。

仮想粘土が分配されない特別なセルを考慮すれば、ボクセル空間において障害物を扱うことも可能である。

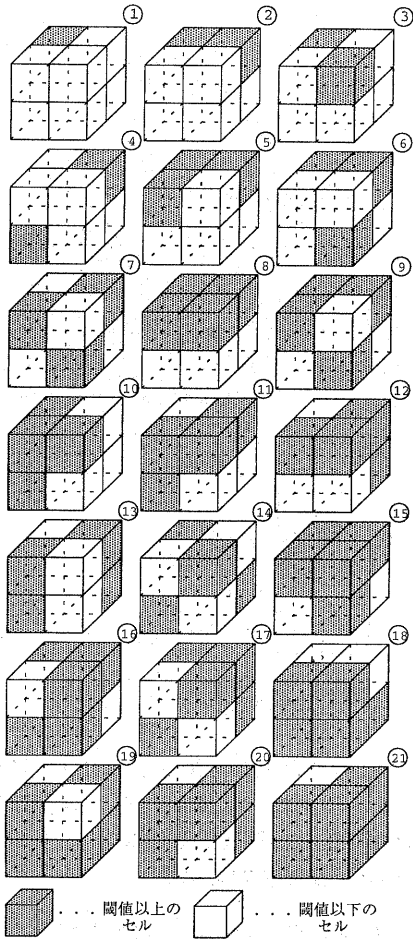


図 4: 3次元ブロックパターン

2.3 形状操作と収束性

本仮想粘土モデルでは、全ての変形は「押し」操作に基づいている。本モデルでは力の伝搬を直接考慮していない。そのため対象となるセルの仮想粘土を隣接セルに強制的に移動させることにより「押し」操作を実現する。例えば、平板などの障害物を仮想粘土に押しあてて変形させる場合、図 5 のように接触面に位置するセルの仮想粘土を平板の押し方向のセルに移動させる。平板は、毎ステップ高々 1 セル分移動する。これにより閾値以上のセルが生じると、状態遷移規則に従って仮想粘土の分配・移送が起こる。この状態遷移は閾

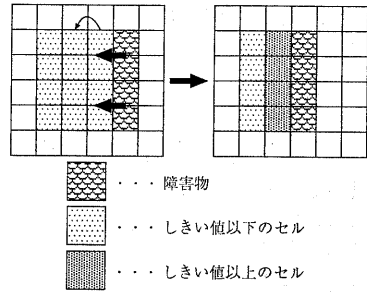


図 5: 平板による押し操作

値以上のセルがなくなるまで繰り返され、形状の全体的な変化が起こる。

ここである形状を構成するすべてのセルが閾値以下である場合を安定状態と呼ぶことにする。安定状態に達するまでに要する状態遷移のステップ数は、仮想粘土の初期値、閾値、およびパラメータ α に依存する。ブロック内の仮想粘土の分配方向の自由度が 2 以上である場合には、各自由度の方向にそれぞれ減衰する疎密波を発生するため、仮想粘土全体は安定状態に収束する。

分配方向の自由度が 1 であるような細い筒状障害物の内部では、仮想粘土の疎密波が減衰せずに伝搬する。そのため、筒の一端を塞ぎ他端から内部の仮想粘土を押し込んだ場合には、両端で疎密波が反射し非減衰振動が発生する。

また 1 セルが有することのできる仮想粘土量の上限は存在しない。従って平板を 1 セル移動させる度に安定状態に達するのを待つという操作だけでなく、安定状態に達する前に平板を移動させる操作も可能である。

3 自由形状モデリング

3.1 仮想粘土の振る舞い

はじめに、仮想粘土の基本的な振る舞いを示す。実験は SGI 社の Indigo2 IMPACT10000(クロック 166MHz, メモリ 192MBytes) 上で行った。可視化ツールには AVS を使い、仮想粘土表面(等値面)をレンダリングした。

実験条件として、状態遷移規則のパラメー

タを $\alpha = 0.3$ 、初期形状を形成している各セルの初期値を 20.0、閾値を 21.0 とした。ボクセル空間全体の大きさは $128 \times 128 \times 128$ である。

図 6 は、直径 32 セル、長さ 64 セルの円柱を押した時の様子を示している。この変形は、実際の粘土の挙動を十分に想起させるものである。状態遷移の速度は 46.5 ステップ/秒となっている。ただし、可視化処理の時間は含まれていない。

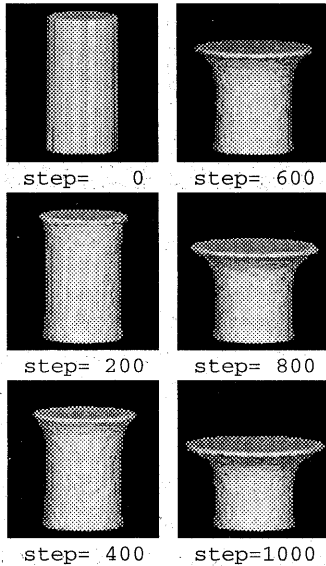


図 6: 円柱の押しつぶし

3.2 仮想粘土細工作品

仮想粘土細工を実現するための簡単なユーザーインターフェースを構築した。図 7 にその概略を示す。ボリュームデータの可視化にはマーチングキューブ法を用いた。仮想粘土の初期形状は、球・立方体・円柱など予め定義された中から選択することができる。形状変形は「押し」操作により行われ、その方向および位置は任意である。図 8 は灰皿、図 9 は土偶を本システムで細工した例である。ボクセル空間の大きさは $64 \times 64 \times 64$ である。

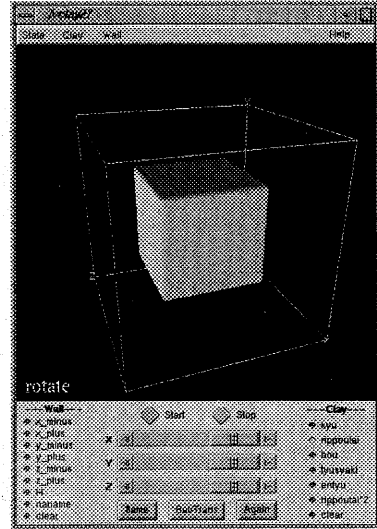


図 7: ユーザ・インターフェース

4 おわりに

本論文では、仮想粘土による自由形状モデリングについて考察した。3次元マーガラス近傍を有するセル構造オートマトンをボクセル空間に配置し、簡単な変形規則を内包した能動的ボクセル空間において仮想粘土のモデリングを試みた。実験により、実際の粘土を想起させるような形状変化が現実的な計算時間で可能であることを示した。また仮想粘土細工システムのプロトタイプを構築し、直感的な形状操作がある程度可能であることを確認した。

仮想粘土の「引き延ばし」操作をモデルに導入することは今後の課題である。また状態遷移処理の更なる高速化など、自由形状モデリングの実用化に向けて仮想粘土細工システムを現在改良中である。

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).

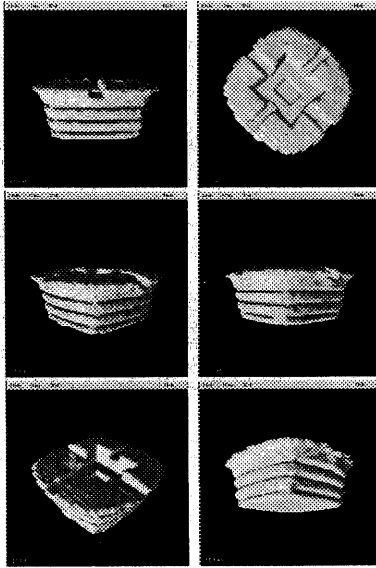


図 8: 粘土細工例 (灰皿)

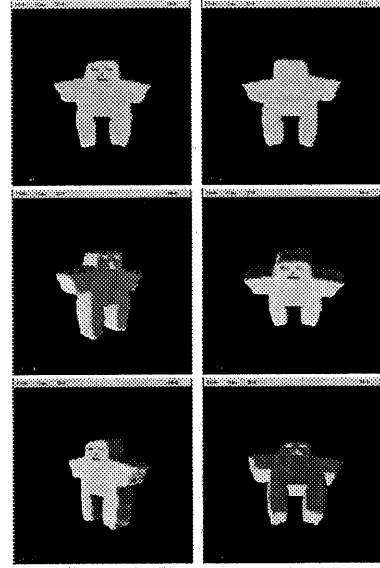


図 9: 粘土細工例 (土偶)

- [2] D.Terzopoulos and K.Fleischer: "Deformable models", *The Visual Computer*, Vol. 4, No. 6, pp. 306-331 (1988).
- [3] 小田泰行, 千葉則茂: "粒子ベースモデルによる粘土のビジュアルシミュレーション", 情報処理学会研究報告, Vol. 97, No. 124, pp. 25-30 (1997).
- [4] G.Wyvill, D.McRobie and M.Gigante: "Modeling with features", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 17, No. 5, pp. 40-46 (1997).
- [5] W.Welch and A.Witkin: "Variational surface modeling", *Computer Graphics*, Vol. 26, No. 2, pp. 157-166 (1992).
- [6] W.M.Hsu, J.F.Hughes and H.Kaufman: "Direct manipulation of free-form deformation", *Computer Graphics*, Vol. 26, No. 2, pp. 177-184 (1992).
- [7] R.Fisch: "Cyclic Cellular Automata and Related Process", *Physica*, Vol. 45D, pp. 19-25 (1990).
- [8] 安居院猛, 河野雄三, 中嶋正之: "コンピュータグラフィックスにおける火炎の2次元画像の生成", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J74-D-II, No. 2, pp. 184-189 (1991).
- [9] N. Greene: "Voxel space automata: Modeling with stochastic growth processes in voxel space", *Computer Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 175-184 (1989).
- [10] Y. Takai, K. Ecchu and N. K.Takai: "A cellular automaton model of particle motions and its applications", *The Visual Computer*, Vol. 11, No. 5, pp. 240-252 (1995).
- [11] 荒田秀樹, 高井昌彰, 高井那美, 山本強: "セル構造オートマトンに基づく宣言的図形描画モデル", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No. 6, pp. 1278-1284 (1998).
- [12] N.Margolus: "Physics-like models of computation", *Physica*, Vol. 10D, pp. 81-95 (1984).