

仮想粘土モデルの着色とその応用

小松 竜太[†] 楨 康仁[†] 高井 昌彰^{††}

[†]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

現在3次元自由形状モデリングに関する様々な研究が行われている。モデリング作業の負担を軽減させるためには、直感的な形状変形と実時間での対話的操作を両立させることが必要である。我々は3次元ボクセル空間にセル構造オートマトンを適用することで、粘土細工型の自由形状モデリングを実現する研究を行ってきた。従来の仮想粘土モデルでは質量の概念しか存在せず、粘土表面はグレースケールでレンダリングされていたため、表現力に限界があった。本論文では、仮想粘土の着色とその応用を検討し、より多様な物体を表現することを試みる。各ボクセルでの色を決定するカラー値を定義し、形状変形に伴う色の更新モデルを構築する。合わせて、混色・非混色の特徴を利用した応用について述べる。

Coloring of the Virtual Clay and its Applications

Ryota Komatsu[†], Yasuhito Maki[†] and Yoshiaki Takai^{††}

[†]Graduate school of Engineering, Hokkaido University

^{††}Computing Center, Hokkaido University

Freeform shape modeling based on physical substance such as clay makes it easier to create freeform shapes user-friendly. So far, we have proposed an active voxel space for interactive freeform shape modeling. Each voxel is allocated a finite state automaton which repeats state transition according to the conditions of its neighbors. Virtual clay defined in the active voxel space are easily deformed under the constraint of a physical conservation law. In this paper, we focus on coloring of the virtual clay. We define a model of color blending associated with the local clay transportation that is governed by the state transition rules. Deformation of a virtual clay object including different colors brings about blur on the object's surface. We show some applications of colored virtual clay.

1 はじめに

近年CG技術の発達に伴って、その利用範囲が急速に拡大している。現在実用になっている3次元モデラーで、思い描いた形状を自在に構築するためにはユーザの習熟が必要であり、モデリング作業の負担の軽減が求められている。

モデリングボトルネックの解消を目指す自由形状モデリング研究の大きな流れとして、数学的モデルおよび物理的モデルそれぞれに基づくモデリング手法がある。

数学的モデルに基づくものとしては、物体表面をB-スプライン曲面等によって定義し、その制御点を操作することでモデリングを行

なうものが一般的である。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、物理的に自然な形状をモデリングするのに熟練を要する。また、個々の曲面を一つずつ変形していかななくてはならず、結果として膨大な手間と時間がかかるという問題がある。

物理的モデルに基づくものとしては、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がある。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、実時間で対話的モデリングが行えないという問題点がある。

上記のアプローチそれぞれが持つ問題点を解決する手法として、ユーザの直感に近いボリュームベースの形状構築手法が注目されている [3, 4]。ボクセル空間における粘土細工ベースのアプローチの一つとして、我々は仮想粘土モデルを提案している [5, 6]。

仮想粘土モデルは、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の状態遷移によって、オブジェクト全体の質量を保存した可塑的な形状変化を実現する。仮想粘土モデル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・直感的な自由形状操作が可能である。また、仮想粘土モデルを応用した研究として、仮想粘土の微細形状加工 [7]、粘土特性の制御 [8] 等がある。

従来の仮想粘土モデルではオブジェクトの形状にのみ着目し、その表面はグレースケールでレンダリングされていた。しかし、形状のみでは表現の自由度に限界がある。

そこで本論文では、仮想粘土モデルの着色とその応用を検討し、多様な物体を表現することを試みる。各ボクセルでの色を決定するカラー値を定義し、形状変形に伴う色の更新モデルを構築する。合わせて、混色、非混色の特徴を利用した応用について検討する。

2 仮想粘土モデル

2.1 概要と特徴

仮想粘土モデルは、3次元ボクセル空間にセル構造オートマトン (Cellular Automata) [9] 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。ボクセルの属性値 (ボクセル値) としては、ボクセル内に存在する仮想粘土の質量のみを与えている。近傍形として質量保存則が成り立つ3次元マーゴラス近傍 [10] 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、隣接ボクセル内でしきい値以上のボクセルからしきい値以下のボクセルへ、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。

2.2 状態遷移

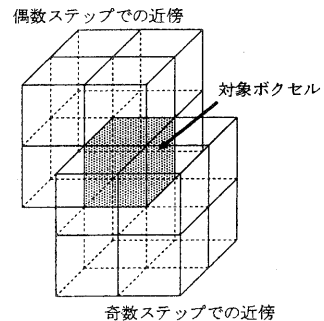


図 1: 3次元マーゴラス近傍

3次元マーゴラス近傍を図1に示す。最近接8ボクセルからなる領域をブロックと呼ぶ。一つのブロックを構成するボクセルは一度にまとめて状態遷移する。また、隣接するブロックの境界を偶数ステップと奇数ステップでX, Y, Z方向に1ボクセル分移動させることによ

り、連鎖的に質量を移動させる。

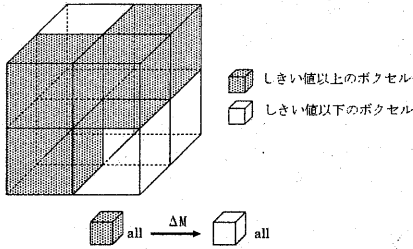


図 2: ブロックパターンの一例

しきい値以上のボクセルからしきい値以下のボクセルへの仮想粘土の分配は、等方的に行われる。ブロックパターンの一例を図2に示す。しきい値以上のボクセル k では、 k の質量を M_k 、分配する質量を ΔM_k 、分配率を α とする次の式に従って粘土量を減少させる。

$$\Delta M_k \leftarrow M_k \times \alpha$$

$$M_k \leftarrow M_k - \Delta M_k$$

一方、しきい値以下のボクセル j では、しきい値以下のボクセルの個数を n 、しきい値以上のボクセルを個数 r とする次の式に従って粘土量を増加させる。

$$M_j \leftarrow M_j + (\Delta M_1 + \dots + \Delta M_r) / n$$

全ボクセルがしきい値以上、しきい値以下であるブロックでは状態遷移は起こらない。全てのボクセルがしきい値以下となるまで、ボクセル空間全体に対して同様の処理を繰り返す。

3 粘土の着色と色の更新

仮想粘土モデルではボクセル値を質量のみとしていた。モデルに色の属性を持たせるため「カラー値」をボクセル値として導入する。仮想粘土の形状は質量値、色はカラー値によって定義される。

仮想粘土の形状変形によりボクセル間で質量移動がおこると、各ボクセルで色の更新が

発生する。その際に色が混じり合うものを「混色モデル」、混ざらないものを「非混色モデル」と名付けて、二通りの色の更新方法を示す。

3.1 混色モデル

混色モデルでは、ボクセルのカラー値のフィールドは1つだけであり、あるボクセルで形状変形に伴う質量移動が起きた時、移動元のボクセルの色と、移動先にもともと存在していたボクセルの色を混ぜ合わせ、そのボクセルの色を更新する。例えば、赤と青の色を持つ仮想粘土オブジェクトを変形させると紫色の部分が発生する。

あるボクセルにおいてもともと存在していた質量値を M_0 、そのカラー値を C_0 、移動してきた質量値を M_1 、そのカラー値を C_1 とする。あるボクセルでの新しいカラー値 C_{new} は次のように定義される。

$$C_{new} = \frac{M_0 C_0 + M_1 C_1}{M_0 + M_1}$$

つまり C_{new} は、それぞれの質量値に重みづけされたカラー値 C_0 、 C_1 の比によって決定される。同様の計算を RGB それぞれのカラー値に対して行う。図3にモデルの図を示す。

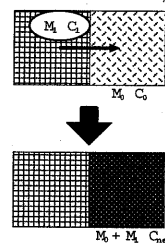


図 3: 混色モデル

混色モデルを用いると、異なる色の境界部では色のにじみ効果が得られる。図4は 64x64 x64 のボクセル空間に異なる色のついた板状仮想粘土を配置し、土台の粘土に押しあてた様子を示している。土台の仮想粘土が持つ色のにじみにより、表面の仮想粘土の色が連続

的に変化している。質量の移動に付随してカラー値も移動するため、にじみの度合いは分配率 α に比例する。

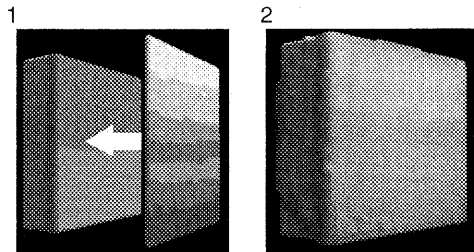


図 4: 形状変形による色のにじみ効果

3.2 非混色モデル

ボクセルの仮想粘土質量フィールドを、色の異なる粘土の種類数だけ用意し、それぞれ独立にあつかう。すなわち、非混色モデルにおいてははじめに仮想粘土に与えられた色は質量と共に移動していくのみであり、オブジェクト全体での各色の割合は形状変形を経ても変化しない。これは各色毎の質量を設定し、それぞれに対して質量保存則を成り立たせているためである。ボクセルのレンダリングにおいては、各ボクセル毎最も質量の多い色をそのボクセルの色とする。

例えば、赤、青、黄 3 色の仮想粘土オブジェクトであれば、各ボクセルは色毎の質量値、 M_{red} , M_{blue} , M_{yellow} を持つ。あるボクセルに含まれる各質量値が $M_{red} = 6$, $M_{blue} = 3$, $M_{yellow} = 2$ の場合、そのボクセルの色は赤となる。

4 着色による応用

仮想粘土モデルへの着色、その混色、非混色モデルを用いた応用を検討する。

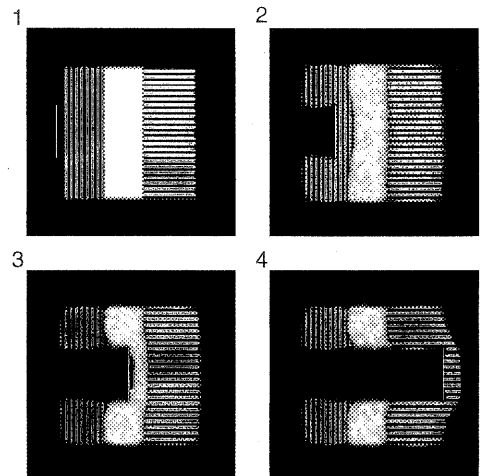


図 5: 2次元モデルでの形状変形

4.1 内部の質量移動の可視化

これまでの仮想粘土モデルでは単色で表現されていたため、形状変形時の仮想粘土の挙動がわからなかった。仮想粘土を着色することにより、内部での質量移動の様子を可視化できる。

2次元版の仮想粘土モデルに非混色モデルを適用して形状操作を行った様子を図5に示す。64x64のセル空間に3層に色付けした32x32の正方形の仮想粘土を配置し、左側から板状の障害物で押し進めた。障害物の移動に伴って粘土が引き込まれている様子がわかる。

4.2 木版画的表現への応用

木版画は版木に紙を押し付けて摺るという過程から仕上がりに絵具のにじみがみられ、それが独特の味になっている。版画的なCG画像生成において、混色モデルの色のにじみ効果が適用できるものと考えられる。また、仮想粘土モデルを用いることで、「版木」の作成、着色、そこに「紙」を押し付けるまでの過程、彫りから摺りまでを対話的に行えるシステムへと応用できる可能性もある。

画像生成までの手順を図6に示す。彫刻素

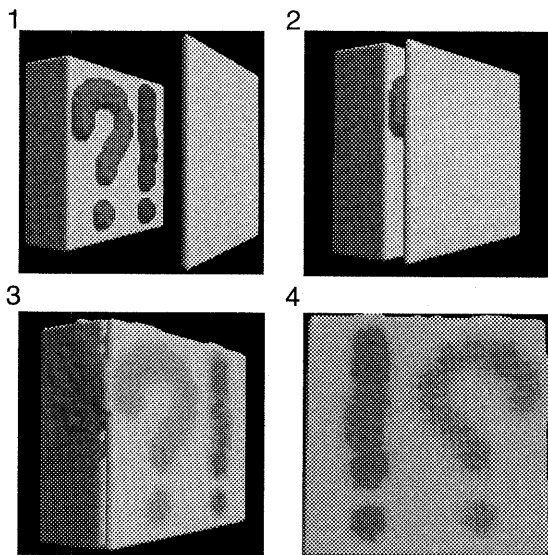


図 6: 木版画的応用例

材としての版木は厚板状の仮想粘土を用意し、これに凹凸をつける。次に、版木に対して着色を施す。最後に、紙にあたる薄い平板状の粘土を用意し、版木に対して平行に押し込んでから離すことで、にじみ効果を持った版画的画像を得ることができる。

5 おわりに

仮想粘土モデルの着色とその応用を検討することでより多様な物体を表現することを試みた。各ボクセルでの色を決定するカラー値を定義し、形状変形に伴う色の更新方法を混色、非混色とした二つのモデルを構築した。合わせて、混色、非混色の特徴を利用したその応用について検討した。この応用例として木版画的表現への応用を示した。

現在、仮想粘土を半透明着色した応用について検討中である。

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).
- [2] D.Terzopoulos and K.Fleischer: "Deformable models", *The Visual Computer*, Vol.4, No.6, pp.306-331(1998).
- [3] T.A.Galyean and J.F.Hughes, "Sculpting: An interactive volumetric modeling technique", *Computer Graphics*, Vol.25, No.4, pp.267-274, (1991).
- [4] 水野慎士, 岡田稔, 鳥脇純一郎, 横井茂樹: "仮想彫刻-仮想空間における対話型形状生成の一手法", *情報処理学会論文誌*, Vol.38, No.12, pp.2509-2516(1997).
- [5] 荒田秀樹, 高井昌彰, 高井那美, 山本強: "能動的ボクセル空間における仮想粘土モデリング -モデルの基本理念-", *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J82-D-II, No.11, pp.2008-2016(1999).
- [6] 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).
- [7] 高井昌彰, 斎藤敏樹, 高井那美: "局所的しきい値操作による仮想粘土の微細形状加工", *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J83-D-II, No.6, pp.1556-1558(2000).
- [8] 小松竜太, 高井昌彰: "仮想粘土モデルの粘土特性に関する一考察", *情報処理学会北海道シンポジウム*, pp.58(2000)
- [9] T.Toffoli and N.Margolus: *Cellular Automata Machines*, *MIT Press* (1987).
- [10] N.Margolus: "Physics-like models of computation", *Physica*, Vol.10D, pp.81-95(1984).