

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

小田泰行 千葉則茂
岩手大学工学部情報工学科

自然物・現象のビジュアルシミュレーションの興味深い応用の一つとして、創作的アミューズメントシステムがある。本研究では、陶芸のアミューズメントシステムの開発を目的に、その要素技術の一つとして粘土のビジュアルシミュレーション技術の開発を行ってきている。

本報告では、可塑性をもつ粘土のビジュアルシミュレーション法として、粒子ベースの手法を提案する。

Particle-based visual simulation of complex clay transformation

Yasuyuki ODA and Norishige CHIBA
Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Iwate University

An artistic amusement system is one of the interesting application of visual simulation of natural phenomena. We are studying a visual simulation method for clay transformation with the aim of developing the creative amusement system of Ceramic Art.

In this paper, we propose a particle-based model for visually simulating the complex clay transformation caused by its plasticity.

1. はじめに

自然物・現象のビジュアルシミュレーションの興味深い応用の一つとして、創作的アミューズメントシステムがある。本研究では、陶芸のアミューズメントシステムの開発を目的に、その要素技術の一つとして粘土のビジュアルシミュレーション技術の開発を行っている。

陶芸の魅力は、予期せぬ形や色彩パターンとの出会いによる、芸術的感性の高揚にあると思われる。このようなインタラクティブな陶芸のアミューズメントシステムにはシミュレーションベースの表現法が適しており、粘土のモデル、釉薬の垂れや発色のモデル、貫入のモデルなどの開発が期待される。これまで、陶芸のCGに関する研究には、(1)形状モデリングに関するもの[島田87][亀井93][佐藤92]、(2)釉薬の貫入パターンの生成に関するもの[千葉90]、(3)練り込みの表現に関するもの[佐々木92]、および(4)釉薬の発色シミュレーションに関するもの[川瀬94]がある。これらのうち(2)と(4)がシミュレーションモデルの開発を目指したものであり、さらにその表現力の向上が期待される。本研究は、シミュレーションベースの形状モデリングに関するものであり、外力によって変形され、外力を取り除いても変形したままの形で残るような性質(可塑性)を持つ粘土モデルの開発を目的としている。

本報告では、相互作用力および外力のもとで運動する粒子群により、粘土の形状変形をモデル化する方法を提案する。なお、粒子ベースの柔軟物体の表現法に関する研究として、Demetri らによるもの[Dem89]と、Marie らによるもの[Mar97]とがある。前者は熱溶融する物体のモデルを、後者は分離や混合可能な柔軟物体のモデルを提案しているが、いずれも粘土のような塑性変形可能なモデルの実現を目指したのではない。

2. 粘土の可塑性

陶芸に使われる粘土は、その微粉末を湿らせれば可塑性を生じ、成形の時に任意の形を造ることができる。可塑性とは、外力によって変形され、外力を取り除いても変形したままの形で残るという性質すなわち形を作り得る性質である。この性質は成形する場合に非常に大切な要素であり、粘土の粒子が非常に微細で薄い板状をしているために生じる。つまり粘土に適量の水を加えて練り土にすると、板状の粒子の間に水が入り込んで粒子を引っ張り合うため、粒子が平たい層状に並ぶ。そして水の潤滑性のために粘土の粒子が滑って移動し、成形することができる[森, 風間76]。

3. 粒子ベースの粘土モデル

ここでは、可塑性を持つ粘土モデルの実現の試みとして、粒子ベースの粘土モデルを提案する。本モデルでは、相互作用力および外力によって粘土粒子を運動させることにより粘土の変形シミュレーションを行う。

粘土モデルにおいて、可塑性を持つ粘土を表現するためには、

- ・外力が作用していないときは形状を維持する、
- ・外力を加えることにより変形することができる、
- ・体積が一定である、

という性質を実現する必要がある。そこで本モデルでは以下のような仮定に基づいて粘土モデルを構成する。

仮定1: 粒子間には相互作用力が働く。

仮定2: 粒子に働く力の合力が一定の閾値を越える場合に限り粒子が運動する。

3.1. 相互作用力

仮定1における相互作用力は、以下のよう働くものとする(図1参照)。

- ・粒子間の距離が一定の距離よりも小さい場合には斥力が働く。
- ・粒子間の距離が一定の距離よりも大きい場合には引力が働く。ただし、粒子間の距離が隣接していると見なされる一定の距離よりも大きい場合には働かない。

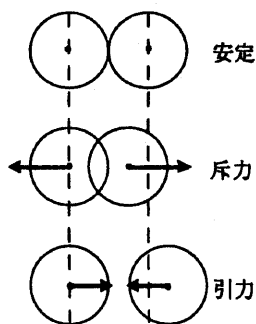


図1 相互作用力

以上のような相互作用力を仮定すると、粘土モデルの各粒子が隣接する粒子との距離を一定の距離に保とうとするため、粘土モデルの体積をほぼ一定に保つことができる。ここで、斥力は粒子の大きさを、引力は実際の粘土における粒子間の水が引っ張る力を表現したものと見なすことができる。

なお、本研究では図2に示すような相互作用力を用いた。

相互作用力

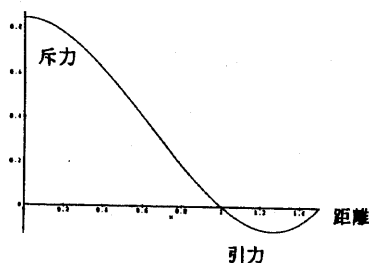


図2 相互作用力の概形

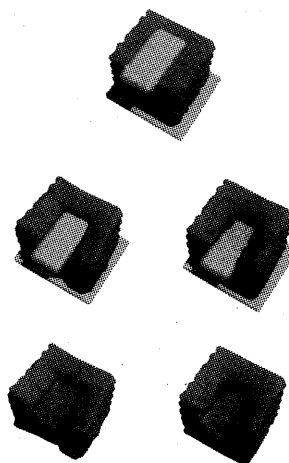
3.2. 閾値

相互作用力および外力によって粒子が自由に運動することにより、変形の範囲が必要以

上に広くなる、粘土モデルが任意の形状を維持できない、という問題が生じる。これらの問題は、粒子の大きさを非常に小さく設定し、多量の粒子を用いて粘土モデルを構成することにより解決され则认为られる。しかし、計算機環境やシミュレーション速度を考慮すると、なるべく少量の粒子を用いて粘土モデルを構成するのが望ましい。そこで、仮定2において粒子が運動するのに必要な力の閾値を設け、粒子の運動をある程度抑制することにより、前述の問題の解決を計る。ここで、全ての粒子に対して同じ閾値を適用した場合、粘土モデルが適度に変形し、なおかつ適度に形状を維持するような、最適な閾値の決定が難しくなる。そこで、仮定2における閾値は、静止している粒子に対する静的閾値と運動している粒子に対する動的閾値を用意し、粘土モデルの性質を細かく調節できるようにする。

4. シミュレーション結果

前述のモデルを用いて粘土の変形シミュレーションを行った例を図3～図5に示す。



(a) 閾値:小 (b) 閾値:大

図3 シミュレーション例1

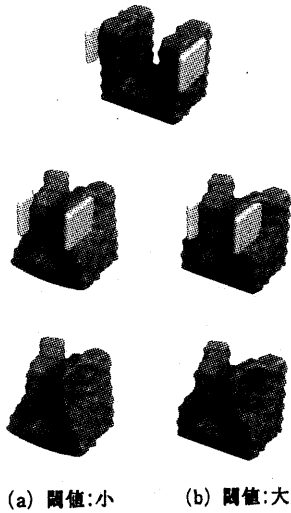
・静的閾値と動的閾値の値の大小により粘土モデルの性質を調節することができる。
これらの結果から、可塑性を持つ粘土の表現が実現できるという可能性が確認できた。

5. シミュレーションの高速化

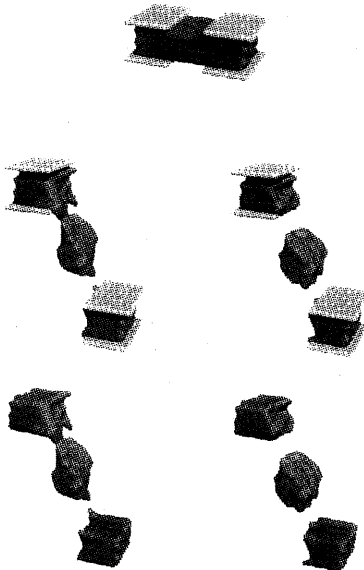
前述のモデルによって、可塑性を持つ粘土を表現することが可能であることが分かった。しかし、粒子ベースのモデルでは、粒子数の増加に伴って膨大な計算量が必要になってくる。したがって、この計算量を低減してシミュレーションを高速化するための手法が必要になる。本モデルでは、空間を分割して粒子を管理することによって計算量を低減しシミュレーションの高速化を計るという手法を採用した。

特に高速化の手法を用いない場合には、ある粒子に働く相互作用力の計算に関する処理は、他の全ての粒子について行わなければならない。この場合、相互作用力が明らかに働かないような遠距離に存在する粒子についても処理を行うことになる。このような不必要な処理をなるべく減らすことにより高速化を計ることができる。

まず、粘土モデルが存在する3次元空間を、均等な大きさの立方体の集合に分割する（図6参照）。このときの分割の幅は、粒子間の相互作用力が作用する最大の距離と等しい距離にする。そして各立方体の内部に存在する粒子を記憶しておく。



(a) 閾値:小 (b) 閾値:大
図4 シミュレーション例2



(a) 閾値:小 (b) 閾値:大
図5 シミュレーション例3

シミュレーションにより、閾値について以下のような結果が得られた。

- ・ 閾値が大きいほど変形しづらくなり、変形が及ぶ範囲が狭くなる。
- ・ 閾値が小さいほど変形しやすくなり、変形が及ぶ範囲が広くなる。

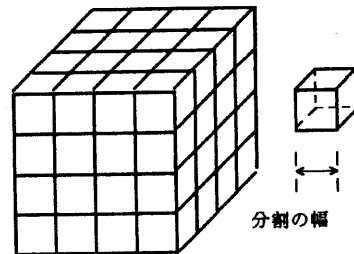


図6 空間分割

空間を分割して粒子を管理する場合、粒子間の相互作用力が作用する最大の距離で空間を分割しているので、ある粒子に働く相互作用力を求める処理は、その粒子が存在する空間を中心とする $3 \times 3 \times 3$ 個の近傍空間内に存在する粒子についてのみ行えばよい（図7参照）。したがって、計算量を低減することができ、シミュレーションの高速化を計ることができる。高速化前と高速化後の計算時間の比較を図8に示す。

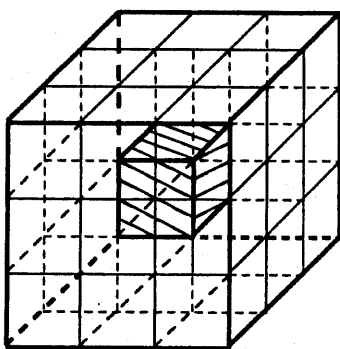


図7 $3 \times 3 \times 3$ 個の空間領域

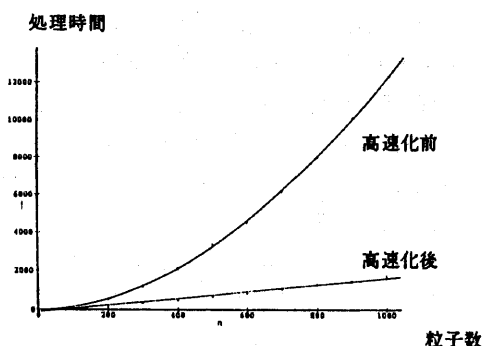


図8 計算時間の比較

6. 画像生成手法

本報告で提案するモデルによって得られる粒子の座標から粘土の画像を生成する手法を以下に示す。

(1) 濃度値を持つボクセル空間の生成

粘土モデルを構成する各粒子をメタボールと見なし、各メタボールが作り出す濃度分布の合成を、各ボクセルの中心点について求めそのボクセルの濃度値とする。

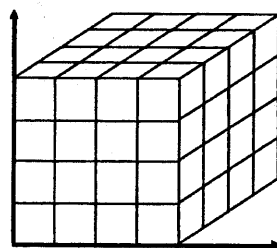


図9 ボクセル空間

(2) ボクセル空間の平滑化

(1)で求められたボクセル空間の各ボクセルに対して、そのボクセルを中心とした近傍 $3 \times 3 \times 3$ 個のボクセルの濃度値の平均を求めそのボクセルの濃度値とする。

(3) 等濃度面の三角形パッチによる近似

(2)で求められたボクセル空間から、四面体格子法を用いた方法[土井 87]により、等濃度面を三角形パッチによる近似で構成し、この等濃度面を物体（粘土）の境界面とする。

・ボクセルを格子点として、直方体を構成する。

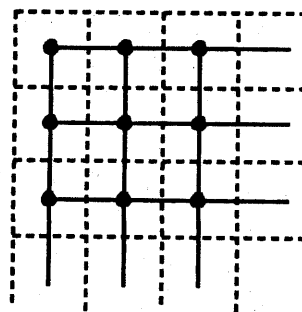


図10 直方体生成

- ・直方体を6個の四面体に分割する.

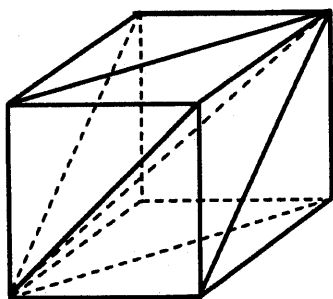


図 1.1 四面体に分割

- ・それぞれの四面体について、頂点の濃度値を調べ、等濃度面が四面体内にあれば、三角形を生成する.

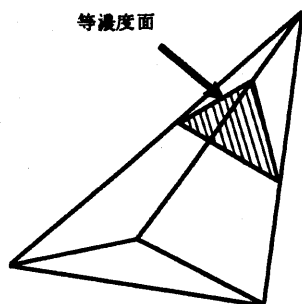


図 1.2 三角形の生成

(4) レイトレーシングによる画像生成

- (3)で生成された三角形パッチデータからレイトレーシングによって画像を生成する.

7. おわりに

本報告では、粘土のビジュアルシミュレーション手法として、粒子ベースの粘土モデルを構成し、粒子間の相互作用力および外力による粒子の運動シミュレーションを行うという手法を提案し、それに基づくシミュレーション例を示した.

今後に残された課題としては、

- ・相互作用力や閾値などのパラメータについての詳細な検討,

- ・粘土モデルとのインタフェースの構築,
 - ・粘土の質感表現のための画像生成法の開発,
- などが挙げられる.

なお、本研究の一部は文部省科研費基盤研究(B)08458085の補助による.

参考文献

- [島田87] 島田：デザイン教育のためのCADシステムの試作，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.87，No.314，pp.25-28，1987.
- [亀井93] 亀井：エネルギー最小化による変形可能仮想ろくろモダラ，電子情報通信学会論文誌，J76-DII，8，pp.1772-1779，1993.
- [佐藤92] 佐藤：仮想ろくろによる形状モデリング，日経CG，11月号，pp.168-172，1992.
- [千葉90] 千葉他：ひび割れの行動モデルとそのCGへの応用，電子情報通信学会論文誌，J73-DII，10，pp.1742-1750，1990.
- [佐々木92] 佐々木：CGによる練込技法の表現，情報処理学会研究報告，Vol.92，No.63，92-CG-58，pp.45-52，1992.
- [川瀬94] 川瀬，西関，千葉：陶芸のCGに向けた基礎的検討，情報処理学会シンポジウム論文集，Vol.94，No.7，pp.11-18，1994.
- [森，風間76] 森，風間：陶芸教室，創元社，pp.16-17，1976.
- [土井87] 土井，小出：等関数値曲面生成のための4面体格子法，第3回NICOGAPH論文コンテスト，pp.55-61，1987
- [Dem89] Demetri Terzopoulos, John Platt and Kurt Fleischer, "Heating and Melting Deformable Models", Proceedings Graphics Interface'89, pp.219-226, 1989
- [Mar97] Marie-Paule, Cani-Gascuel and Mathieu Desbrun, "Animation of Deformable Models Using Implicit Surfaces", IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS, Vol.3, No.1, pp.39-50, 1997