

仮想粘土の粒子ベース・ビジュアルシミュレーション

小 田 泰 行[†] 村 岡 一 信^{††} 千 葉 則 茂^{††}

形状モデリングにおいて、粘土を扱うような直感的な変形操作、すなわち、圧したり、曲げたり、延ばしたりするという素朴な変形操作が可能であれば、バーチャルな粘土細工が実現でき、教育あるいは芸術的創作活動のための造形ツールとして広い応用が期待できる。本論文では、粘土の形状変形のシミュレーションモデルとして、相互作用力の働く粒子群を用いた粒子ベースの粘土モデルを提案する。本モデルは、重力、粒子間に働く斥力、引力、摩擦力などの特殊な作用力、および外力のもとで運動する粒子群により、粘土の形状変形を実現する。粘土は、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可塑性の性質を持つが、本モデルでは、粘土の可塑性が実現でき、圧す、曲げる、延ばす、などの基本的な変形操作のシミュレーションが可能である。

Particle-based Visual Simulation of Virtual Clay

YASUYUKI ODA,[†] KAZUNOBU MURAOKA^{††} and NORISHIGE CHIBA^{††}

In the shape modeling of deformable objects for Computer Graphics or Virtual Reality, if the intuitive physical modification operations as those used in real clay craft, e.g., simple modification operations like pressing, bending and extending, are possible, "virtual clay craft" would be realizable. Such a realistic shape modeling technique has many applications in the areas of education, art, amusement, virtual reality, and so on. In this paper, we propose a clay model implemented by employing the particle based numerical simulation method where every pair of particles receives specific virtual mutual forces each other. These virtual forces consist of gravity, attractive force, repulsive force, friction force and external force that realize clay-like deformation of objects. Actual clay has the property of plasticity where its shape remains as it was after the external forces are removed. Our clay model realizes not only the fundamental modification operations applied to clay but also the 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1つとして、創作的アミューズメントシステムがある。筆者らは、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1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、予期しない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^{1)~3)}(2)釉薬の貫入パターンの生成に関するもの⁴⁾(3)練り込みの表現に関するもの⁵⁾、および(4)釉薬の発色シミュレーションに関するもの⁶⁾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。

CGやCADにおける幾何モデルは、多面体および自由曲面による境界面表現が基本であり、そのモデリングは境界面を対象とした特殊な変形操作に基づいている。そのため、現実の世界において「もの」を作るときの変形操作のような、物理法則に従った変形と反作用の効果は得られない。もちろん、これらの技術の目的はデザイン上の変形操作であり、必ずしも物理法則を反映したものである必要はない。一方、粘土を扱

[†] 岩手大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Iwate University

^{††} 岩手大学工学部情報システム工学科
Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Iwate University

うような、直感的な変形操作の可能なモデリング技術が開発されれば、CGの応用はさらに拡大する。すなわち、圧したり、曲げたり、延ばしたりするという素朴な変形操作によるバーチャルな粘土細工が実現でき、教育用造形ツールや“デジタル陶芸”などの芸術的創作活動用造形ツールとしての応用が広がる。

本論文では、人間の基本的な活動である創作的感性活動を支援するための陶芸のアミューズメントシステムを実現するために必要となる基礎技術の1つである粘土の形状変形のシミュレーションモデルとして、相互作用力の働く粒子群を用いた粒子ベースの粘土モデルを提案する。本モデルでは、重力、粒子間に働く斥力、引力、摩擦力などの特殊な作用力、および外力のもとで運動する粒子群により、粘土の形状変形を実現している。本モデルによれば、粘土の可塑性が実現でき、圧す、曲げる、延ばす、などの基本的な変形操作や、粘土どうしが接触した場合に、粘土の境界が残っている状態と強く押しつけられて融合した状態を区別してシミュレーションすることが可能である。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、Terzopoulosらによるもの⁷⁾と、Marieらによるもの⁸⁾とがある。前者は熱溶解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ものではない。また、Terzopoulosら⁹⁾は、非弾性変形の物理ベースモデリング法を提案し塑性変形、断裂などを実現しているが、物体どうしの接触と融合の区別は考慮されていない。また、粘土の形状変形のシミュレーションモデルとして、セルオートマトンによる方法¹⁰⁾が提案されているが、粘着性が実現されていないため、曲げる、延ばすなどの表現において難点がある。

なお、本論文の目的は、粘土細工のような直感的なモデリングのための、粘土の定性的な性質を実現する形状変形モデルすなわち仮想粘土を提案することであり、粘土の厳密な物理的性質の解析や実用システムの提案ではないことを断っておく。本手法を発展させ、実用的なツールとして実現するためにはリアルタイム性や、変形のためのインタフェースの開発が今後必要である。

2. 粘土について

陶芸に使われる粘土は、微細なアルミナ珪酸塩を主成分とする鉱物の土状集合体で、その微粉末を湿らせれば可塑性を生じ、乾けば剛性を示し、十分に高温で焼けば焼固するという性質を持つ。粘土がその微粉

末を湿らせると可塑性を生じるという性質は、成形を行う場合に非常に大切な要素である。これは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。すなわち、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び、そして、粒子間に入り込んだ水の潤滑性によって粒子が滑って移動するため、成形することができる。このような、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、形を作りうる性質のことを可塑性という¹¹⁾。

3. 粒子ベースの粘土モデル

ここでは、粘土のような可塑性を持った仮想物体の変形シミュレーションを可能とするための粒子ベースの粘土モデルを提案する。本モデルでは、重力、粒子間に働く斥力、引力、摩擦力などの特殊な作用力、および外力のもとで運動する粒子群により、形状変形を表現している。

3.1 塑性変形モデル

形を作りうる性質（可塑性）を持つ粘土の形状変形を表現するために実現する必要がある性質としては、以下のような性質があげられる。

- 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。
- 形状変形の前後で体積が不変である。

本モデルでは、大きさが一定である粒子群の配置によって粘土の形状を定義する。粒子には、重力、粒子間に働く斥力、引力、摩擦力などの特殊な作用力、および他の物体からの外力が働くものとする。そして、これらの力のもとで粒子の運動シミュレーションを行うことによって粒子群の配置を変化させ、粘土の形状変形のシミュレーションを行う。

まず、粒子に働く力について説明する。粒子に働く力 F を式 (1) のように定義する。

$$F = f_g + f_i + f_e, \quad (1)$$

f_g : 重力 ($= mg$),
 m : 粒子の質量,
 g : 重力加速度,
 f_i : 粒子間に働く作用力の総和,
 f_e : 外力.

粒子間に働く作用力は式 (2) のように定義する。

$$f_i = f_d + f_v, \quad (2)$$

f_d : 粒子間の距離に応じた作用力の総和,
 f_v : 粒子間の相対速度に応じた作用力の総和.

粒子間の距離に応じた作用力は、以下のように定義

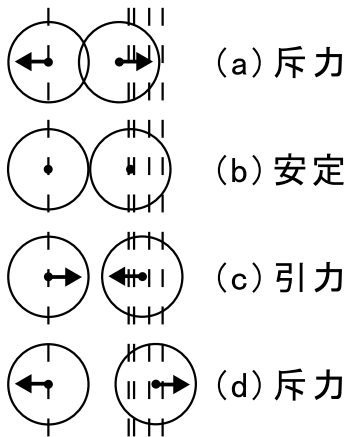


図 1 距離に応じた作用力
Fig. 1 Mutual force according to distance.

する(図 1 参照).ここでは,2つの粒子が接する距離(粒子の半径の2倍)を基準の距離とする.

- (a) 粒子間の距離が基準距離よりも小さい場合には斥力が働く.
- (b) 粒子間の距離が基準距離以上で,ある一定の範囲内の場合には安定状態とする.このとき,作用力は働かない.
- (c) 粒子間の距離が(b)の範囲よりも大きいようなある一定の範囲内の場合には引力が働く.
- (d) 粒子間の距離が(c)の範囲よりも大きいようなある一定の範囲内の場合には斥力が働く.

(a)で定義する斥力は粒子どうしが重なり合うような位置関係にある場合に働かせるもので,この斥力を定義することにより,粒子間の距離が一定の距離以上に保たれるようになり,粒子群の配置が隣接する粒子どうしが互いに重なり合わないような配置となるため,形状変形の前で粘土モデルの体積をほぼ一定に保つことができる.(b)において粒子どうしが接する場合だけでなく粒子間の距離がある一定の範囲内である場合にも安定状態であるとするのは,シミュレーションにおいて(a)の斥力の範囲と(c)の引力の範囲との間で粒子の振動が起こるのを抑制するためである.(c)で定義する引力は,実際の粘土における粒子間の水が粒子を引っ張る力を表現したものと見なすことができる.(d)で定義する斥力は,粘土の異なる表面を融合させるのに必要な力を表現するためのものである.実際の粘土において,異なる表面を融合させるためには,それらの表面をただ接触させるだけではなく,ある程度の強さの力で押しつけるなどの操作が必要になる.本モデルでは,粘土の異なる表面上の粒子間の距離が,(d)の斥力の範囲であるときにそれらの表面が接触し

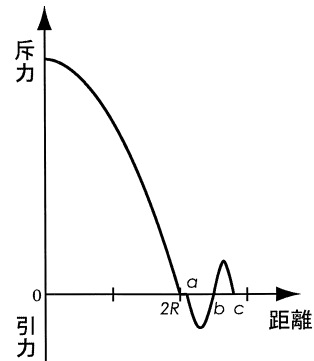


図 2 作用力 f_d のグラフの概形
Fig. 2 Outline of mutual force " f_d ".

ている状態であると見なし,さらに近づいて(c)の範囲となったときにそれらの表面が融合したものと見なす.

以上の定義に基づく粒子間の距離に応じた作用力は式(3)で表される.式(3)をグラフで表したときの概形を図2に示す.

$$f_d = \begin{cases} k_1 \left((2R)^2 - r^2 \right) & (0 < r < 2R, \text{ (a) 斥力}), \\ 0 & (2R \leq r < a, \text{ (b) 安定}), \\ -k_2(a-r)(r-b) & (a \leq r < b, \text{ (c) 引力}), \\ k_3(b-r)(r-c) & (b \leq r < c, \text{ (d) 斥力}), \\ 0 & (c \leq r), \end{cases} \quad (3)$$

R : 粒子の半径,

r : 粒子間の距離,

k_1, k_2, k_3 : ばね定数 ($k_1, k_2, k_3 > 0$),

a, b, c : 任意定数 ($2R < a < b < c$).

粒子間の相対速度に応じた作用力は,式(4)で表されるような力として定義する.この力は,粒子間の相対速度を減少させる加速度を生じさせる力,すなわち粒子間の相対的な運動を減衰させる力であり,粒子間の摩擦力すなわち粘性を表現するためのものである.

$$f_v = \frac{1}{n} \sum_{i \neq j} (-C(v_i - v_j)), \quad (4)$$

n : 影響を及ぼす粒子の数,

C : 減衰定数,

v : 粒子の速度.

式(4)は式(5)のように変形できる.

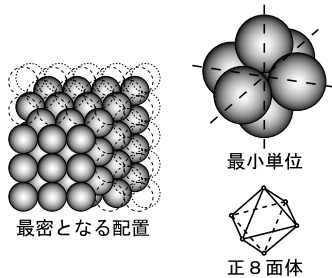


図3 最密となる球の配置
Fig. 3 Spheres arranged most densely.

$$f_v = -C \left(v_i - \frac{1}{n} \sum_{j \neq i} v_j \right). \quad (5)$$

したがって、この力は周囲の影響を及ぼす粒子の平均速度との相対速度を減少させるように働く力であるといえる。

粒子間に働くこれらの作用力は、隣接していると見なされる粒子間にだけ働くものとし、ある一定の距離以上離れている粒子間には働かないものとする。ここで、大きさが一樣な球を密度が最大になるように配置した場合を考えると、その構造の最小単位となる配置は、球の中心が正八面体の各頂点となるような配置である(図3参照)。したがって、接していない2つの球の中心間距離の最小値は、球が接する距離(球の半径の2倍)の $\sqrt{2}$ 倍となる。このことを考慮すると、これらの作用力の影響範囲は最大でも粒子が接する距離の $\sqrt{2}$ 倍程度にするのが望ましい。

次に、粒子の運動について説明する。粒子の運動は式(6)に示す運動方程式に従うものとする。

$$F(t) = m \cdot a(t), \quad (6)$$

$F(t)$: 時刻 t での粒子に働く力,

$a(t)$: 時刻 t での粒子の加速度 ($= dv(t)/dt$),

$v(t)$: 時刻 t での粒子の速度 ($= dx(t)/dt$),

$x(t)$: 時刻 t での粒子の位置。

シミュレーションにおける数値積分計算は、式(7)~(9)に示す式を用いて行う。式(7)および式(9)は改良オイラー法による差分方程式である。

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \frac{\Delta t}{2} (v(t) + v^*(t + \Delta t)), \quad (7)$$

$$v^*(t + \Delta t) = v(t) + \Delta t \cdot a(t).$$

$$a(t + \Delta t) = F(t + \Delta t)/m. \quad (8)$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \frac{\Delta t}{2} (a(t) + a(t + \Delta t)). \quad (9)$$

計算手順は以下のようである。

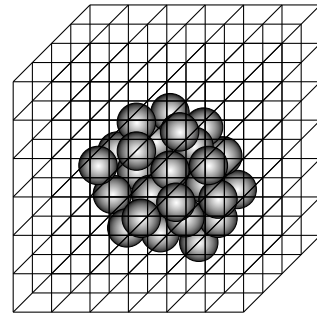


図4 空間分割法
Fig. 4 Uniform space subdivision.

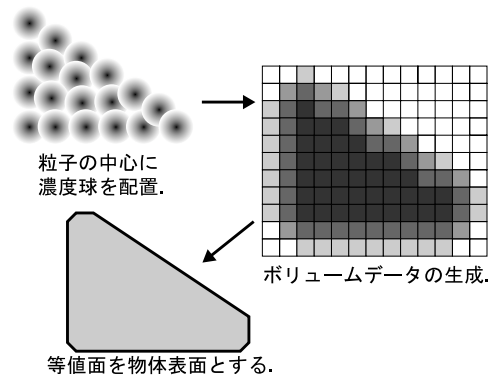


図5 表面形状の生成
Fig. 5 Generating the surface of clay.

- (1) 初期化
- (2) すべての粒子が安定するまで次の(3)~(4)を繰り返す。
- (3) すべての粒子について、式(7)により次の計算ステップでの位置を求める。
- (4) すべての粒子について、次の計算ステップで粒子に働く力を式(1)により求め、式(8)および式(9)により次の計算ステップでの加速度および速度を求める。

粒子ベースのモデルでは、粒子数の増加にともなって膨大な計算量が必要となる。素朴に計算すると、毎ステップですべての粒子について計算を行わなければならない。また、ある粒子に働く作用力を求める処理において、粒子間に作用力が働くかどうかの判定処理を他のすべての粒子との間で行わなければならない。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図る。

まず、空間を粒子間に働く作用力の影響範囲と同じ大きさの幅を持つセルに分割する(図4参照)。このとき、粒子間に働く作用力は、同じセル内およびその

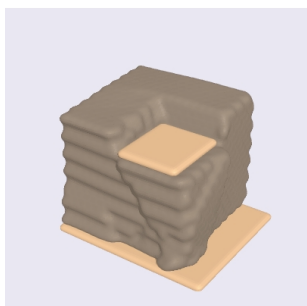
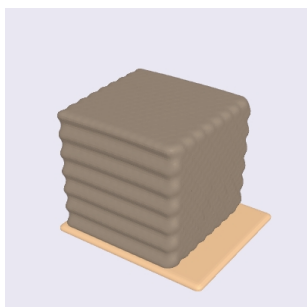


図6 シミュレーション例 “板で压す”

Fig.6 Simulation example “Clay pressed by a plate”.

周囲の隣接するセル内に存在する粒子間にだけ働く可能性がある。したがって、ある粒子に働く作用力を求める処理において、粒子間に作用力が働くかどうかの判定処理は、その粒子が存在するセルを中心とする $3 \times 3 \times 3$ のセル内に存在する粒子との間で行えばよく、それ以外のセル内に存在する粒子との間では作用力が働く可能性がないということが明らかなので、この判定処理を省略することができる。また、ある計算ステップにおいて、あるセルが安定状態、すなわちセル内に存在するすべての粒子が運動していない状態であり、かつ、その周囲の隣接するすべてのセルが安定状態であるとき、次の計算ステップでは、そのセル内の状態が変化しないので、そのセル内に存在する粒子に関する計算を省略することができる。すなわち、ある計算ステップで $3 \times 3 \times 3$ のセルがすべて安定状態であるとき、次の計算ステップではその

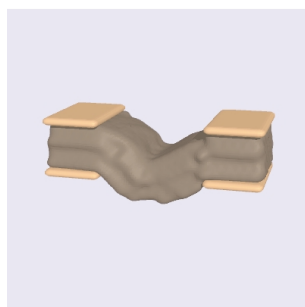
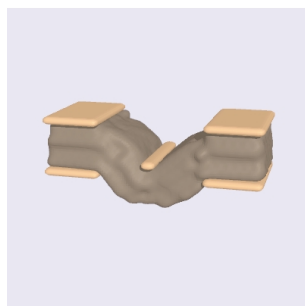
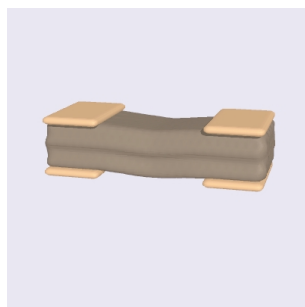


図7 シミュレーション例 “棒で压す”

Fig.7 Simulation example “Clay pressed by a bar”.

中心のセル内に存在する粒子についての計算を省略することができる。

3.2 表面形状の生成法

本モデルでは、粒子の中心に配置した濃度球による濃度分布の合成からボリュームデータを生成し、その等濃度面をポリゴンに変換するという手法により、粘土の表面形状を生成する（図5参照）。

まず、すべての粒子の中心に式(10)による濃度分布関数で定義される濃度球を配置する。

$$D(r) = \begin{cases} D_0 \left(1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right)^2 & (0 \leq r \leq a), \\ 0 & (a < r), \end{cases} \quad (10)$$

D_0 : 濃度球中心における濃度,

r : 濃度球中心からの距離,

a : 濃度球の半径.

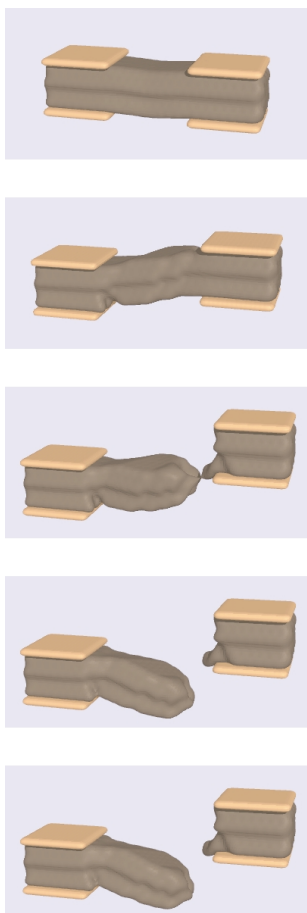


図8 シミュレーション例“引っ張る”

Fig. 8 Simulation example “Clay pulled by the ends”.

次に、図5に示すように、濃度球が存在する範囲を完全に覆うようにボクセルを配置する。ボクセルの中心位置の濃度を、そのボクセルの濃度値とすることにより、ボリュームデータを生成する。これに、 $3 \times 3 \times 3$ の空間フィルタを施して濃度値を平滑化し、4面体格子法¹²⁾により、等濃度面を三角形パッチで近似して、これを粘土の表面形状とする。

4. シミュレーション例

本論文で提案する粘土モデルに基づいて粘土の形状変形のシミュレーションを行った結果を図6～図12に示す。今回のシミュレーションは、粒子の半径 $R = 0.5$ 、粒子の質量 $m = 1.0$ 、重力加速度 $g = 0.004$ として行った。また、シミュレーションで用いる各式のパラメータは、

$$\text{式 (3): } k_1 = 5.0, k_2 = 50.0, k_3 = 8.0, a = 1.05, \\ b = 1.25, c = 1.4,$$

$$\text{式 (4): } C = 5.0,$$

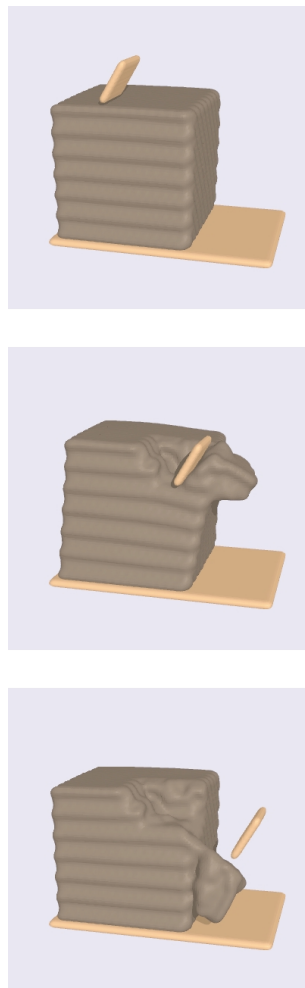


図9 シミュレーション例“削る”

Fig. 9 Simulation example “Clay scraped”.

式 (7)～(9): $\Delta t = 0.1$,

とした。粘土を表現するのに用いた粒子数は、図6、図9、および図10に示す例が4,845個、図7に示す例が1,500個、図8に示す例が1,050個、図11に示す例が2,400個、図12に示す例が1,848個である。また、シミュレーションは空間を $100 \times 100 \times 100$ 個のセルに分割して行った。シミュレーションには、HPC-Alpha DP264 (Alpha 21264 500 MHz $\times 2$) を使用した。それぞれのシミュレーションに要した時間は、図6、図10、および図11に示す例がおよそ10分、図7および図8に示す例がおよそ3分、図9に示す例がおよそ20分、図12に示す例がおよそ30分である。それぞれのシミュレーション例を比較すると、使用した粒子数が等しくてもシミュレーションに要する時間が大きく異なる場合や使用した粒子数が多い例よりも少ない例の方がより時間を要する場合がある。こ



図 10 シミュレーション例 “押し込む”
Fig. 10 Simulation example “Clay squeezed”.

れは本手法におけるシミュレーション時間が、シミュレーションに用いる粒子の数よりもシミュレーションにおいて運動する粒子の数に依存していることによるものであると考えられる。また、粘土の表面形状の生成において、式 (10) のパラメータは、濃度球中心における濃度 $D_0 = 1.0$ 、濃度球の半径 $a = 1.15$ とし、等濃度面を生成するための閾値は 0.66 とした。なお、粘土の表面形状の生成に要した時間は約 1 分程度である。粘土を変形させるための物体は、粒子間の距離を一定とした粒子の集合で構成し、物体の表面を滑らかに保つためと、粘土粒子がその内部に侵入してしまうことを防ぐため、粒子間距離を 0.5 とした。したがって、表面形状の生成において、濃度が粘土より高くなる。このため、物体の表面形状の生成においては、濃度球の半径 $a = 0.7$ とし、等濃度面を生成するための閾値は 0.68 とした。

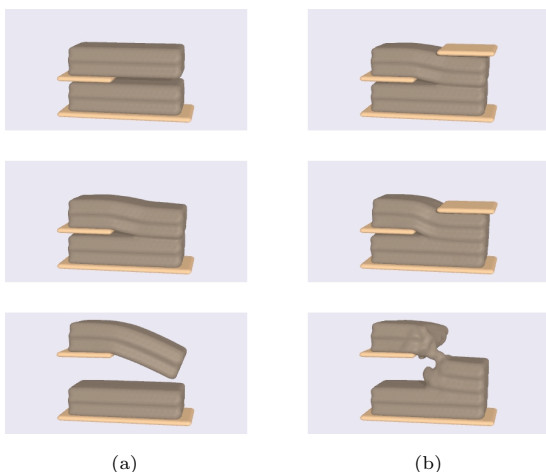


図 11 シミュレーション例 “はがす”
Fig. 11 Simulation example “Clay peeled”.

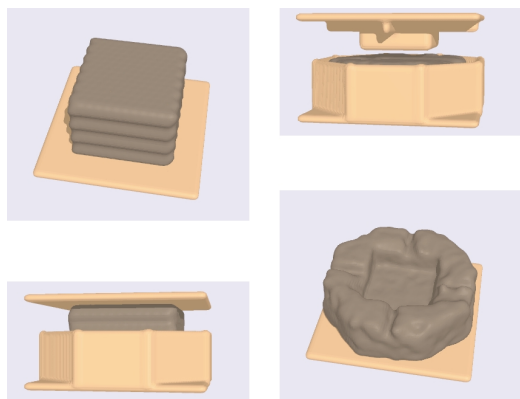


図 12 “灰皿”
Fig. 12 “Ashtray”.

図 6 に示す例は、板で圧す操作による粘土の変形のシミュレーション例である。この例では、圧された部分の下側が広がるようにして粘土が潰れる様子が表現されている。図 7 に示す例は、棒で圧す操作による粘土の変形のシミュレーション例である。この例では、一部を圧された粘土が曲げられる様子が表現されている。図 8 に示す例は、引っ張る操作による粘土の変形のシミュレーション例である。この例では、粘土が引きちぎられる様子が表現されている。図 9 に示す例は、削るような操作による粘土の変形のシミュレーション例である。この例では、一度削り取られた粘土が再び融合することなく接した状態を保っている様子が表現されている。図 10 に示す例は、型を押し込む操作による粘土の変形のシミュレーション例である。この例では、型を押し込むことで形作られた溝が型を取り除いた後も残り続ける様子が表現されている。

図 11 に示す例は、2 つの粘土を引き剥がす操作のシミュレーション例であり、(a) は接触状態から引き剥がした例、(b) は一度融合させてから引き剥がした例である。この例では、(a) の場合は接触している境界面で分離が起こるのに対し、(b) の場合は融合により接触していた境界面がなくなり異なる部分で分離が生じている。図 12 に示す例は、粘土細工の作品例として灰皿を作った例である。この例では、初期形状とはまったく異なる形状に粘土が変形されていく様子が表現されている。

これらのシミュレーション例により、本論文で提案する粘土モデルによって粘土の可塑性が実現でき、圧す、曲げる、延ばす、削るなどの基本的な変形操作のシミュレーションが可能であることが示される。また、重力による変形や接触状態の表現も実現できている。

このように、本手法によって定性的な粘土の性質を表現できることが分かる。しかしながら、粘土表面が平らにならず凸凹しており（図 12 など）、物体を取り除いた後の粘土表面がわずかに盛り上がっている（図 10）など、不自然な点も見られる。前者は、定義する形状に対して粘土粒子のサイズが大きく、個数が少ないことによる影響と考えられる。後者は、物体からの反発力がなくなったため、粘土表面の粒子が外向きの力を受けて移動したためである。この移動距離は粘性が大きく粒子サイズが小さいほど短い。粘性の値は形状変形のしやすさと数値計算上の安定を考慮して決めているため、粒子サイズを小さくし、粒子数を多くすることで、この影響を小さくすることができると考えられる。

5. おわりに

本論文では、粘土の形状変形のシミュレーションモデルとして、相互作用力の働く粒子群を用いた粒子ベースの粘土モデルを提案し、これに基づくシミュレーション例によりその効果を示した。すなわち、仮想的な粘土に対して、圧す、曲げる、延ばす、削るなどの基本的な形状変形操作が行え、粘土の可塑性を表現することができる。

今後の課題としては、動力学シミュレーションの高速化や、粒子群から粘土の表面を生成する高速アルゴリズムの開発などがあげられる。また、インタラクティブな陶芸のアミューズメントシステムの実現のためには、形状変形操作を容易にするための GUI や、フォースフィードバック装置を利用したユーザインタフェースの開発なども重要である。また、形状パラメータと実際の粘土の変形との関係を明らかにすることも興味

深い。このためには、シミュレーション結果と実際の粘土の振舞いを比較する検証実験を行う必要がある。今後、本手法を実用システムとして完成させるための計算速度の改善のためには、数値計算に使用している改良オイラー法を、より精度の高い方法に置き換え、時間刻み幅を大きくし、シミュレーションの計算ステップ数を減らすことが考えられる。また、並列計算機を用いて、粒子を管理するために等分割された空間のそれぞれにプロセッサを割り当てれば、良好な並列性を保ち、効率的に計算できるのではないかと考えている。

参 考 文 献

- 1) 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).
- 2) 亀井：エネルギー最小化による変形可能仮想ろくろモデラ，電子情報通信学会論文誌，Vol.J76-DII, No.8, pp.1772-1779 (1993).
- 3) 佐藤：仮想ロクロによる形状モデリング，日経 CG，11 月号，pp.168-172 (1992).
- 4) 千葉，海野，和田，村岡：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，Vol.J73-DII, No.10, pp.1742-1750 (1990).
- 5) 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).
- 6) 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).
- 7) Terzopoulos, D., Platt, J. and Fleischer, K.: Heating and Melting Deformable Models, *Proc. Graphics Interface '89*, pp.219-226 (1989).
- 8) Marie, P., Cani, G. and Desbrun, M.: Animation of Deformable Models Using Implicit Surfaces, *IEEE Trans. Visualization and Computergraphics*, Vol.3, No.1, pp.39-50 (1997).
- 9) Terzopoulos, D. and Fleischer, K.: Modeling Inelastic Deformation: Viscoelasticity, Plasticity, Fracture, *SIGGRAPH '88*, pp.269-278 (1988).
- 10) 荒田，高井昌彰，高井那美，山本：能動的ボクセル空間における仮想粘土モデリング，電子情報通信学会論文誌，Vol.J82-DII, No.11, pp.2008-2016 (1999).
- 11) 森，風間：陶芸教室，pp.16-17，創元社 (1976)。
- 12) 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 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集，pp.55-61 (1987).

(平成 12 年 10 月 15 日受付)

(平成 13 年 3 月 9 日採録)



小田 泰行

平成 7 年岩手大学工学部情報工学科卒業。平成 9 年同大学院修士課程修了。現在、同大学院博士後期課程に在学中。コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。



村岡 一信 (正会員)

昭和 51 年東北工業大学電子工学科卒業。同年同大学研究生。昭和 52 年仙台電子専門学校教員。平成元年岩手県立盛岡短期大学講師。平成 3 年同大学助教授。平成 11 年岩手大学大学院博士課程修了。平成 11 年岩手大学工学部助教授。博士(工学)。コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。



千葉 則茂 (正会員)

昭和 59 年東北大学大学院博士課程修了。同年東北大学助手。昭和 61 年仙台電波高等専門学校助教授。昭和 62 年岩手大学工学部助教授。平成 3 年同大学教授。工学博士。アルゴリズム、コンピュータグラフィックスの研究に従事。