

# テーブルトップインタフェースを利用した サンドアニメーションの生成シミュレーション

浦正広\*

山田雅之\*\*

遠藤守\*\*

宮崎慎也\*\*

安田孝美\*

\*名古屋大学大学院情報科学研究科

\*\*中京大学情報理工学部

## Simulation of Sand Animation based on Table-top Interface

Masahiro Ura\* Masashi Yamada\*\* Mamoru Endo\*\* Shinya Miyazaki\*\* Takami Yasuda\*

\*Graduate School of Information Science, Nagoya University

\*\*School of Information Science and Technology, Chukyo University

ura@nagoya-u.jp, {myamada, endo, miyazaki}@om.sist.chukyo-u.ac.jp, yasuda@is.nagoya-u.ac.jp

### アブストラクト

サンドアニメーションは砂を用いてアニメーションを作成するアート技法、また、その制作過程そのものを披露するパフォーマンスアートの総称である。作品制作に砂とライトを用いることで、セピア調で温かみのある独特の表現が可能である。しかしながら、砂による描画という独自性などから、制作には試行錯誤が必要となる。そこで本研究では、テーブルトップインタフェースを用いて、サンドアニメーションのシミュレーションによる制作環境の提供を実現する。手の形状を認識可能なテーブルトップインタフェースを制作し、また、既存の作品から制作技法の調査を行い、それぞれの状況における砂の振る舞いを再現する。実際の砂とシミュレーションとを比較することで、提案手法の再現性、同一性を確認する。

### Abstract

Sand Animation is a kind of performance arts. Sand Animation artists create a series of images made of sand. Those created images have warm color such as sepia tone, since a backlighted glass table is used as a canvas. Sand Animation artists create a work though trial and error, and must practice their performances again and again. Therefore, we aim to provide a system for supporting them. We simulate Sand Animation with table-top interface, that is suitable for simulating real Sand Animation work. We propose a multi-touch table-top interface which can recognize the whole shape of hand. We also evaluate the interactivity and the reproducibility of works by comparing the result of simulation with real Sand Animation.

## 1. はじめに

コンピュータを用いてアート作品の制作技法をシミュレートする試みは様々あるが、それらは2つに大別できる。1つは作品としての出力結果のみに重点を置くもので[1]、もう一方は出力結果のみでなく、制作の過程の再現にも重点を置くものである[2][3]。後者の目的には、制作環境の構築が難しいアート作品について、ユーザが手軽に実際と同じような工程をシミュレートできることや、制作過程そのものがパフォーマンスであるアート作品の練習環境を提供することなどがある。制作過程の再現のためには、実際の制作環境や技法のメタファに基づき個々の技法を表現できるとともに、アーティストの感性を反映できるインタフェースを提供することが重要である[4]。

サンドアニメーションは、砂を用いてアニメーション作品を制作するアート技法、また、その制作過程そのものを披露するパフォーマンスアートの名称である。キャンバス上に砂を配置し、それをライトにより背面から照らすことでセピア調の温かみのある独特の表現が可能である。また、制作過程そのものがアニメーションとして成立するという独自性などから、映像としてのインパクトも強く、テレビコマーシャルやミュージックビデオなどにも用いられている。

しかしながら、砂による描画という特殊性に加え、アニメーションとして成立させるために、シーン構成をすべて記憶した上で適切な技法を組み合わせる必要があるため、その制作は容易ではない。そのため、試行錯誤が必要となる作品構想の場としてコンピュータ上でのシミュレーションが有効であると考えられる。また、テーブル状のキャンバスに手で砂とインタラクションして作品を制作していくことから、インタフェースとしてテーブル状の入力・表示環境を備えるテーブルトップが望ましいといえる。

そこで本研究では、テーブルトップインタフェースを用いてシミュレーションによるサンドアニメーションの制作環境を実現する。アーティストの作品映像から制作環境・技法を調査し、各技法における砂のふるまいを再現する。また、アート表現の模倣のための、手の形状を入力可能なマルチタッチ式のテーブルトップインタフェースを提案する。シミュレーションと実際のサンドアニメーションの制作過程との比較を行うことにより、リアルタイム性を備え、また、同一の技法の組み立てによりアニメーションが表現されているかなど、その再現性と有効性を確認する。

## 2. サンドアニメーションとは

サンドアニメーションは砂によりアニメーションを描くアート技法であり、Caroline Leaf氏がその先駆者とされる[5]。独自の制作環境・技法を持つが、その独自性のため実施者が少なく、それらが体系化されていない。そこで、著名なサンドアニメーションアーティストである Ferenc Cako[6]、Ilana Yahav[7]、David Myriam[8]、Joe Castillo[9]、Aleksandra Konofalskaya[10]の各氏の作品映像から、制作環境および制作技法についての調査を行う。

### 2.1 制作環境

サンドアニメーションは、図2-1で示すような環境下で制作される。キャンバスに背面から光を照射することで、砂の存在を際立たせて濃淡を表現する。パフォーマンスアートとして制作過程を披露する場合には、キャンバスをカメラで撮影し、その映像をスクリーンに投影する。

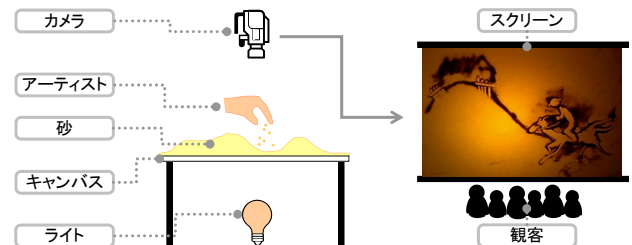


図2-1. サンドアニメーションの制作環境。

背面光として白熱灯のような暖色系の光を放つものを用いることで、黄色がかったセピア調の温かみのあるキャンバスになる。図2-2は、同一の砂の配置における、“室内光あり・背面光なし”と“室内光なし・背面光あり”という条件によるキャンバスの違いを示したものである。左図では室内光以外の光がないために、砂同士の濃淡の差、また、キャンバスと砂との濃淡の差が表れにくい。一方で、右図のように暗室にしてキャンバスの背面から光を照射することにより、砂が適度に光を遮り、砂の量が濃淡を表す役目を果たす。彩色されたキャンバスを用いることにより、海や陸などの風景を表現することもある。

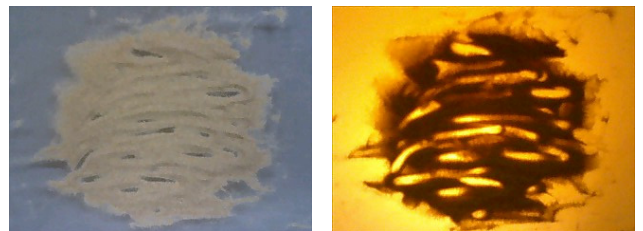


図2-2. 背面光によるキャンバスの違い。

### 2.2 制作技法

サンドアニメーションには、その制作のための描画技法、また、それを用いたアニメーション技法が存在する。制作には主にアーティスト自身の手が用いられるが、特殊な例として、紙やブラシが用いられることもある。本研究では手を用いた技法のみを対象とし、以下、調査したそれぞれの技法において、図2-3～2-8の左図で手の動作を、右図で実際に試行した結果を示す。

#### 2.2.1 砂を置く

手に砂を持ち、キャンバス上にそれを置くようにして線や点を描く。キャンバスと手が離れていると砂がはねて広範囲に飛び散ってしまうため、キャンバスと手を近づけて砂を置く必要がある。

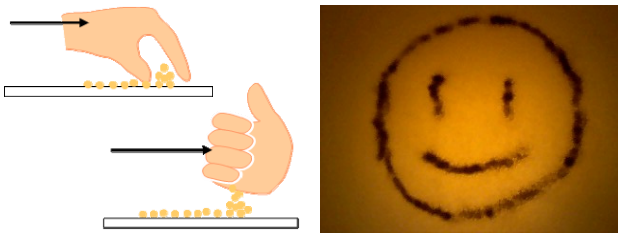


図2-3. 砂を置く.

### 2.2.2 砂を撒く

一定の範囲を淡く塗りつぶす, また削るための下地を作る場合に用いる. 砂がある程度の範囲に広がるように, 手を揺すりながら撒く.

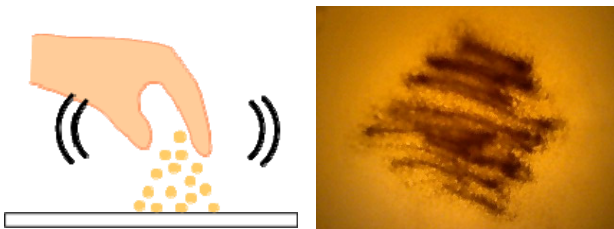


図2-4. 砂を撒く.

### 2.2.3 砂を飛ばす

砂を飛ばすように撒くことで, 速さや勢いのある動きを表現する. 手を動かす際の慣性のつけ方により, 細かい動きの調整を行う.

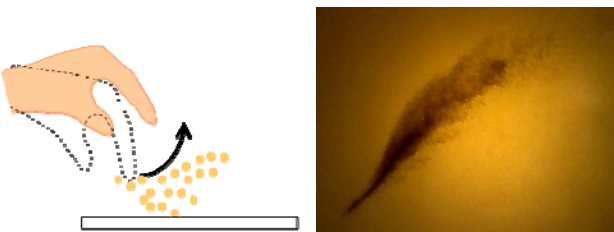


図2-5 砂を飛ばす.

### 2.2.4 砂を広げる

キャンバスのクリアや, 削るための下地を作る際に用いる. 配置済みの砂を手や指で延ばすようにして行う.

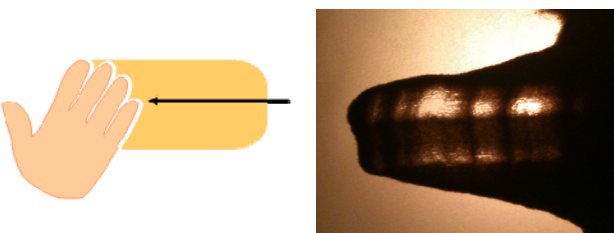


図2-6 砂を広げる.

### 2.2.5 砂を削る

指によりキャンバス上の砂を削る. 削った後にできる砂の隙間から光が洩れ, はっきりとした線に見えることから, 輪郭を際立たせる際に用いられる. 砂を払う, 乱れた砂を整えるといった細かい作業にも用いられ, 複数の指を用いて髪や波などを表現する際にも用いられる.



図2-7. 砂を削る.

### 2.2.6 砂を拭う

現在の描画物を構成する砂が, 新たに描く描画物の妨げになる場合, 手の側面で砂をキャンバスの隅に追いやりキャンバスを無地の状態にする.

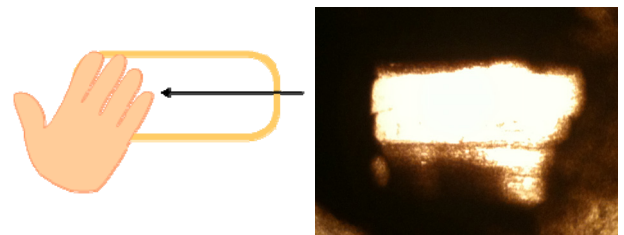


図2-8. 砂を拭う.

## 3. インタフェースの製作

前章で示したように, サンドアニメーションは主に手により砂を操作しアニメーションを制作する. そのほとんどの技法においては, 手をキャンバスと接し, その上, 同時に複数の動作が行われることもある. また, 重力により砂が平面に積み重なることで濃淡が変化し, キャンバス上での描画が成立するという点からも, そのシミュレーションにおけるインタフェースとして, 実際の制作環境と同様にテーブル状のものが望ましい. そこで, テーブルに接地した手の形状をポインタとし, 複数ポインティングを可能とする, サンドアニメーションの入力に適したマルチタッチ式のテーブルトップインタフェースを製作する[11][12].

### 3.1 FTIR テーブルの製作

テーブルに接地した手の形状を入力として取得するために, FTIR (漏れ全反射) を利用して指や掌の接触センシングを行う[13]. 赤外線的全反射する性質を利用することで, テーブルに手が触れた箇所を白, 触れていない箇所を黒とするグレースケール画像が, カメラを介して取得可能となる. 図 3-1 にハードウェア構成を示す.

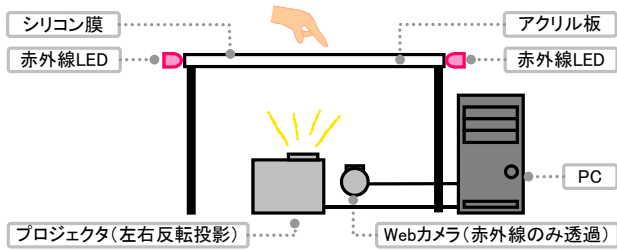


図3-1. インタフェース構成.

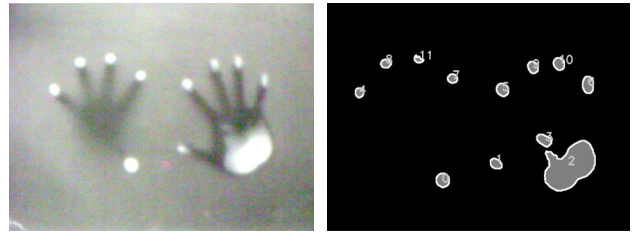


図3-3. 入力画像からのポイントの認識.

### 3.2 ポインタの認識

FTIR テーブルを用いたマルチタッチ環境構築用ライブラリの1つに Touchlib があり[14], これは複数の指によるポインティングを認識する機能も有するが, 入力形状をすべて円形とみなす. 一方, サンドアニメーションにおける技法—広げる・削る・拭う—は, 砂やテーブルに触れている手の接地面形状が重要である. Smith らは, FTIR を用いたテーブルトップにシリコンを貼り付けることで, 安価に圧力センシングを実現する方法を提案している[15]. また, このインタフェースのデモンストレーションとして, 手や筆など様々な形状を入力とするペイントツールを開発している. しかしながら, 入力形状をそのまま取得して描画に反映させる処理を行っているため, 各入力が移動した際にトラッキングが行えない. このため, 入力の移動量が大きい場合には補完処理が行なえず, ストロークが分断されるなど, 意図した結果が得られない場合がある. サンドアニメーションでは, 微妙な入力の差異が表現力の違いとして現れるため, 入力が適切に反映されない作品の完成度に影響を及ぼす. そのため, サンドアニメーションの制作技法に対応するには, 入力形状をトラッキング可能なポインタとして扱う必要がある. そこで, 前節のインタフェースで取得可能な画像から, テーブルに接地した手の形状をポインタとして認識し, 複数ポインティングおよびトラッキングを可能とするための手法を提案する.

まず, カメラからの入力画像を2値化, ラベリングし, 領域画素およびその輪郭画素を抽出する. つぎに, 各領域の輪郭画素座標の平均値を算出し, それをポインタの中心点とする. ポインタのトラッキングは, 各ポインタの中心点の位置を前回フレームと比較し, 距離の近いものを同一ポインタとして処理し, 新しいポインタには識別 ID を付与する. これらをポインタのパラメータとし, 図 3-2 で示す構造により保持する. 図 3-3 に, ポインタの認識例を示す. 左図が処理前の, 右図が処理後の画像であり, 灰色が接地面, 白色が輪郭, 数字がポインタの識別 ID である.

```
struct pointer {
    int id; // 識別 ID
    list<pixel> area; // 領域のリスト
    list<pixel> outline; // 輪郭のリスト
    point center; // 中心点
};
```

図3-2. ポインタの構造.

## 4. サンドアニメーションのシミュレーション

2 章で示した制作技法を体系化し, 各技法における砂のふるまいを再現することで, サンドアニメーションのシミュレーションを実現する[16][17]. シミュレーション処理の手順は, まず, シミュレートする制作技法を選択する. つぎに, 前章で示したように, カメラからの映像よりポインタを認識する. ポインタの形状や動きの情報を用いて, 選択された技法に関する砂の配置処理を行い, その配置結果に基づいて描画処理を実行する. テーブルトップインタフェースを用いてユーザに描画を体験させるシステムは多数存在するが, それらは入力に対応して, 文字や絵を描くなどの平面上を塗り重ねたり[18][19][20][21], 平面上にプリミティブなオブジェクトを生成する[22][23]といった描画処理を行っている. また, 3D 描画のインタフェースとして用いられている事例もあるが[24], 入力からストロークオブジェクトを生成するものであり, 描画処理自体は平面的なオブジェクト生成の派生形であるといえる. 一方で, サンドアニメーションでは, 局所的に砂が積み重なったり削られたりすることにより描画が成立するため, 平面的な入力で立体的な形状を変化させるよう, データを扱う必要がある.

### 4.1 砂の表現

コンピュータ上でリアルタイムに砂のふるまいをシミュレートする手法は様々あるが[25][26][27][28], サンドアニメーションにおいては, 配置された砂の量が映像としての濃淡や質感に影響するため, サンドアニメーションのシミュレーション・再現のためには, キャンバス上の砂の量の管理および濃淡や質感を表現する描画方法が必要である. ここでは, ハイトフィールドにより砂量を管理し, 砂量に応じて描画を変更することで, 濃淡や質感を表現する方法を提案する. ここでハイトフィールドとはフィールドを格子状に分割し, 各セルごとに高さ(あるいは量)を管理するデータ構造である. 本研究ではキャンバスに対応する画面の各画素を1セルとし砂量を管理する. 砂量と色の対応関係は Ferenc Cako 氏の作品映像からサンプリングすることにより決定する. 具体的には, 砂が無い状態すなわち砂量0の場合の色を RGB(255,240,120), 砂量が  $T$  以上で背面光が遮断されている状態の場合の色を RGB(40,0,0)とする. また, 砂量のみでの色の決定では, 砂の凹凸感までは再現されない. そこで, 図 4-1 で示すように, デザ法によりフィールドの各画素にランダムで閾値を設定し, 砂量が閾値に満たない場合, 描画時の輝度を高める. これにより, 同一の砂量でも輝度にばらつきが生じ, 砂の質感が表現できる.



図4-1. 砂量と描画の関係.

なお、実際の砂は積み重なると自重により崩落するが、サンドアニメーションにおいて砂が大規模に崩落するまで積み上がることは少ない。そこで、計算量の削減のため、厳密なシミュレーションによる統一的な崩落処理は行わず、技法ごとに簡易的な崩落モデルを用いる。

## 4.2 制作技法のシミュレーション

2章で調査した6つの制作技法を、手の動作と砂の状態から「置く・撒く・削る」の3つのモードに分類し、これらの組み合わせにより制作のシミュレーションを実現する。なお、実際のサンドアニメーションでは砂を「置く・撒く」際には、手はキャンバスには触れないが、本研究で用いるインタフェースでは接地が検出されないとポイントの認識が行えないため、現段階においては、手をテーブルに接地させて入力の指示を行う。このとき、接地した領域が前章で示した処理によりポイントとして認識され、それぞれのポイントが各技法における処理の対象となる。また、各モードの選択は図4-2に示すように、シミュレーション時に表示される画面右のアイコンを指で触れるなどして選択することによって行う。「put」、「sprinkle」、「shave」の各アイコンはそれぞれモード「置く」、「撒く」、「削る」に対応し、「clear」は画面を初期化する際に用いる。



図4-2. シミュレーション時の画面例.

### 4.2.1 置く

砂を置く操作では入力を得られた場合に、図4-3で示すように、ポイントの中心点 $p$ を中心とする半径 $r$ の円の内側に砂を式①で定める量だけ追加する。

$$h \cdot (r-l) + e \quad \dots \quad \textcircled{1}$$

ここで、 $h$ は制御定数、 $l$ は対象画素と $p$ との距離、 $e$ は $\pm T/100$ の範囲をとる一様乱数とする。これにより砂を置いた際に、砂が崩落し山状に配置される様子を表現する。また、追加する砂量をランダムに微小に増減させることで、山状を保ったまま一様でない自然な描画が得られる。また、連続する2フレーム間でポイントの移動距離が大きい場合、その間を一定間隔で補充しながら砂を置く処理を繰り返す。図4-4に点状および線状に配置した結果を示す。

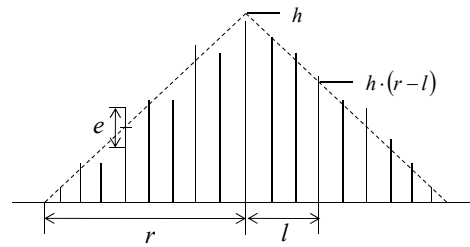


図4-3. 「置く」の処理.

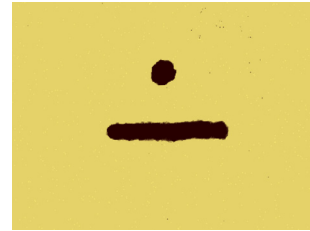


図4-4. 「置く」の実行結果.

### 4.2.2 撒く

砂を一定の高さから落とす際、手の移動により発生する慣性力の大小により飛び散る範囲が確定する。このため、「撒く・飛ばす」の2技法は、入力の移動量を考慮した同一の処理により扱う。まず、現在のフレームのポイントの中心点 $p$ と、1フレーム前のポイントの中心点 $q$ との距離 $d$ を求める。「撒く」と「飛ばす」の処理の境界となる閾値 $t$ を設定し、 $d$ がその範囲内に収まった場合には慣性力がないものとし、「撒く」処理を実施する。実際の砂により試行すると、「撒く」は「置く」と比較して、同一量の砂を用いた場合に半径が3倍程度大きくなる。このため、「置く」と「撒く」とで円錐の体積が同一となるよう、式①の $r$ を $3r$ 、 $h$ を $h/9$ に置き換えた式を用いる。これにより、「置く」より広範囲に薄く砂を配置することが可能となる。また、フレーム間の距離が大きければ補充処理を行う。

一方で、 $d$ が閾値 $t$ を超えた場合に飛ばす処理を実行する。この処理では、図4-5で示すように、線分 $qp$ の延長線上の点 $p' = p + s_1 \cdot \vec{qp}$  ( $s_1$ は制御定数)を求め、点 $p'$ を中心とする円内に数個の点 $p'_i$ をランダムに生成し、点 $q$ と $p'_i$ による線分上に等間隔に点を取り、それぞれの点に「撒く」処理を実行する。これにより、図4-6左図のように撒いたり、右図のように飛ばす技法の表現が可能となる。

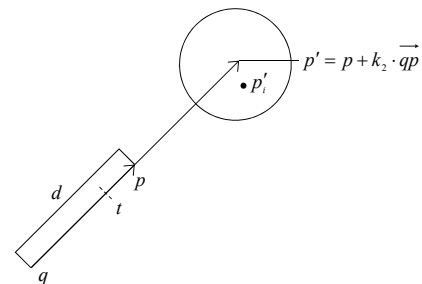


図4-5. 「撒く」の処理.

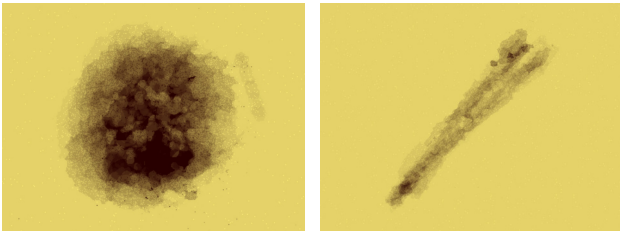


図4-6. 「撒く」の実行結果.

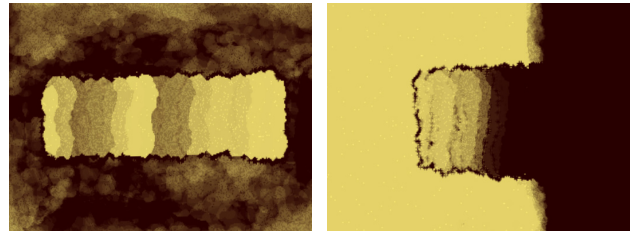


図4-8. 「削る」の実行結果.

### 4.2.3 削る

「削る・拭う・拡げる」の3技法は、配置済みの砂が手の進行方向へ移動するため、ポインタ領域画素上の砂をポインタ輪郭画素に移動させるという処理により、これら技法のシミュレートを実現する。このとき、砂量が多い箇所ほど手による上からの圧力の影響を受け、また、その領域の砂は高低差が小さくなるため、これを考慮した処理を行う。

まず、(i)ポインタの領域リスト *area* に格納された各画素 *i* の砂量  $a_i$  を  $s_2 \cdot a_i (0 < s_2 < 1)$  に変更し、(ii)さらにその砂量から  $v$  だけ減少させる。このとき、減算結果が0より小さければ砂量を0とする。つぎに、(iii)すべての *i* について上記(i), (ii)により減少させた砂量の総和  $S$  を求め、各画素 *i* に  $S \cdot s_3 / n (0 < s_3 < 1)$  の量の砂を追加することにより、*area* 内の高低差を小さくする。ここで  $n$  は、*area* 内の画素数である。つぎに、(iv)  $S \cdot (1 - s_3)$  の量の砂を輪郭の画素に移動させるが、その際に崩落を考慮し、輪郭を構成する *outline* の各画素 *j* を中心として「置く」と同様の処理を行う。このとき、式①の  $r$  を3(画素)、 $h$  を  $S \cdot (1 - s_3) / (3\pi m)$  に置き換えた式を用いる。ここで  $m$  は輪郭画素数である。図4-7は処理の様子である。崩落の際に、砂は実際には右図の点線のように斜面になるが、シミュレーションでは実線のように断崖が出現する。しかし、近似的に山状になっているといえ、これにより崩落が表現されているといえる。

また、移動量大きい場合には、「置く」や「撒く」と同様に始点と終点の間にも同一処理を実施して補完するが、このとき、各処理で輪郭に砂が移動されるため、処理ごとに進行方向と反対側の輪郭に砂が発生してしまう。このため補完処理時に、処理中のポインタの輪郭画素が1つ前の補完点におけるポインタ領域と重複する場合には、その輪郭画素に砂の分配を行わないことにより、輪郭の出現を回避する。結果、入力領域の砂の量や、入力時間により、図4-8左図のように砂を拭う、右図のように砂を拡げるシミュレーションが実現可能となる。

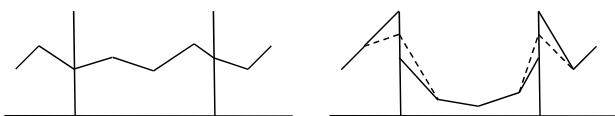


図4-7. 「削る」の処理.

## 5. 実験

各技法のシミュレーションにかかる処理速度を計測する。また、同一の描画物をシミュレーションと実際に砂を用いた環境でそれぞれ制作し、制作時間と制作方法の比較を行う。これらにより、提案手法の有効性を確認する。実験は、表5-1で示す環境により実施する。また、4章で示した計算式における変数の値は表5-2に示すように設定する。

表5-1. 実験環境.

OS	Windows Vista Business
CPU	Intel Core 2 Duo E6400 2.13GHz
Memory	4GB
Graphic Card	ATI Radeon HD 4800 (RV770)
Camera	FPS: 30fps Resolution: 640x480 pixel

表5-2. 実験における変数値.

変数	$T$	$h$	$t$	$s_1$	$s_2$	$v$	$s_3$
値	1.0	0.2	30	2.0	0.25	0.2	0.5

### 5.1 処理速度

手を接地させてから、それをポインタとして認識するまでの時間を撮影映像から、また、「置く・撒く・削る」の3動作のフレーム単位での処理時間をプログラム中のタイマにより計測する。計測は、指先1本、指先10本、片手の掌、両手の掌の接地の各条件で実施する。結果、ポインタの認識までに必要な時間は平均で0.5秒程度であり、これは、Webカメラが取得画像を表示する際に発生する遅延と同等であったため、ポインタ認識の処理時間は十分小さいといえる。また、表5-3に示すように、いずれの操作時も30fpsでのフレームの更新間隔である1/30sより実行時間が小さくなったため、処理落ちのないシミュレーションが実現できているといえる。

表5-3. 計測結果.

条件	面積 (px)	処理時間 (ms)		
		置く	撒く	削る
指1本	300	1	1	3
指5本	1700	1	1	3
手側面	3500	2	2	5
片手	13000	3	4	9
両手	27000	5	5	10

## 5.2 実行例

シミュレーションによる制作と、実際の砂による制作について、描画結果、制作速度、制作方法を比較することにより、その再現性を確認する。制作する作品は、Ferenc Cako氏の作品を参考に作成した図5-1の絵コンテを基にしたものとし、シミュレーションと実際の砂の双方とも、絵コンテの説明にある技法を用いて制作する。このとき、絵コンテは上から順にシーン1, 2...とする。実験では、この絵コンテを被験者10名に提示し、実際の砂とシミュレータの双方で作品制作を行ってもらい、制作技法実施時の動作と、各シーンで制作にかかった時間を比較する。なお、実験の実施にあたり、各被験者には事前にそれぞれの環境で一通り制作技法を実施してもらい、操作に慣れた状態で実験を行う。また、制作の慣れが計測結果に反映されないよう、被験者A~Eについては実際の砂による制作を先に行い、F~Jについてはシミュレーションによる制作を先に行うことで、平等な比較を行う。

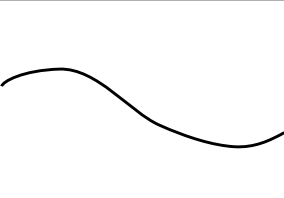
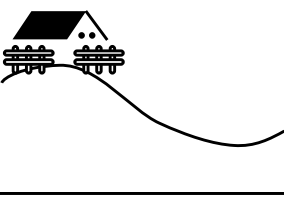
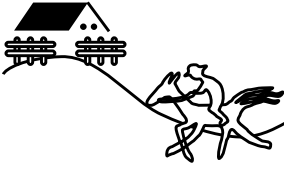
<b>Sand Animation</b>	<p><b>下地の作成：</b> 右の砂山を「払げる」ことで砂を敷き「撒く」ことで隙間を埋める</p> <p><b>文字の描画：</b> 下地を「削る」ことで文字を描画</p> <p><b>キャンパスのクリア：</b> 「拭う」ことで画面をクリア</p>
	<p><b>丘の描画：</b> 「置く」ことで丘を描画</p>
	<p><b>家の描画：</b> 「置く」ことで屋根を描画</p> <p><b>柵の描画：</b> 「撒く」ことで下地を作成 「削る」ことで柵を描画</p>
	<p><b>馬の描画：</b> 「撒く」により下地を作成 「削る」により馬を描画</p> <p><b>人の描画：</b> 「撒く」により下地を作成 「削る」により人を描画</p>

図5-1. 絵コンテ.

絵コンテに基づいて被験者が制作したサンドアニメーションの一例を図5-2に示す。左がシミュレーションによって、右が実際に砂を用いて制作したものである。ディスプレイのキャプチャと実物の撮影写真であるため背景色に差異がみられるが、様々な技法を用いた作品が、ほぼ同一の描画物として描かれていることが確認できる。図5-3はインタフェース上で「削る」の操作を実施している様子である。

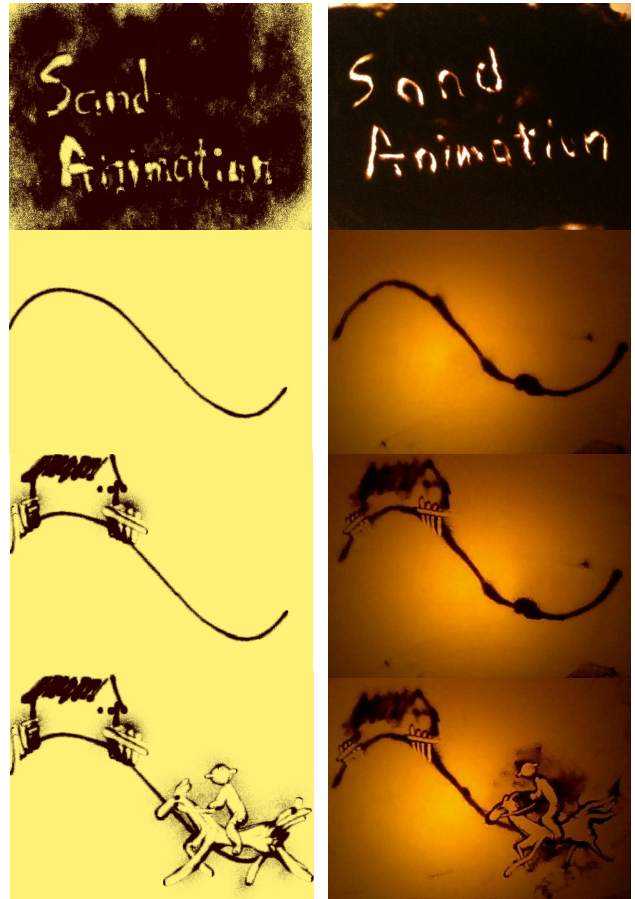


図5-2. 絵コンテに基づいて制作したサンドアニメーション.

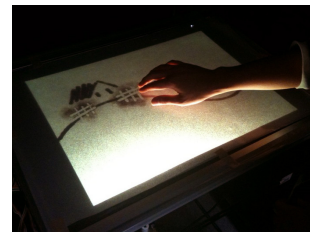


図5-3. インタフェース使用例.

つぎに、それぞれのシーンについて被験者が制作に要した時間を表5-4に示す。

表5-4. 制作時間 (単位: 秒).

方法	砂				シミュレーション			
	1	2	3	4	1	2	3	4
被験者 A	24.6	8.7	26.8	25.3	37.5	11.5	31.5	29.0
B	22.6	5.3	16.6	27.6	38.8	7.9	26.0	35.4
C	18.8	13.2	32.3	43.4	35.9	14.4	38.9	45.5
D	12.8	5.6	10.3	14.0	22.8	9.1	16.4	23.3
E	26.1	11.4	24.2	34.4	40.9	12.3	31.5	46.9
F	22.4	7.6	20.7	36.4	37.9	11.4	34.2	40.6
G	31.5	11.9	24.1	29.9	51.3	14.6	41.0	43.5
H	19.8	8.2	10.7	22.1	30.7	12.0	18.4	26.4
I	22.3	9.0	17.6	30.1	44.4	9.2	21.2	31.9
J	23.6	6.1	14.1	27.9	45.2	10.1	32.6	33.9
平均	22.5	8.7	19.7	29.1	38.5	11.3	29.2	35.6

表より、いずれの被験者も実際の砂とシミュレーションとで各シーン1.1～1.9倍程度の制作時間の差が表れた。実際の環境では「撒く」や「置く」はテーブルに接地する必要がないが、提案インタフェースでは接地を維持しながら手を移動する必要があり、摩擦が発生するなど空中での移動に比べて移動量が制限される。また、実際の砂との接触の感覚がないため、「置く・撒く」では配置された量を、「削る」では削られる量を画面を確認しつつ操作する必要がある。加えて、5.1で示したように、ハードウェアの制約上、ポインタの認識に時間を要する。これらのことが制作時間の差の原因と考えられる。つぎに、各シーンにおける所要時間をみてみると、砂ではAとC以外の被験者および全体の平均では $2<3<4$ の順となっている。一方で、シミュレーションではC以外の被験者および全体の平均は、 $2<3<4<1$ の順となっており、時間比でみたときにC以外の被験者はシーン1の順位が一致していない。これは、シーン1が砂をキャンバス全域に敷き詰めて、かつ、キャンバス全域を拭うという画面全域を対象とした作業を行う必要があり、その際に画面のみからキャンバスが意図した状況となっているか確認する必要があるためであると考えられる。一方でシーン2～4については、いずれの被験者においても実際の砂とシミュレーションの双方で制作時間の大小関係が一致しており、このことから、シーン1のようにキャンバスの全域を対象とするような制作では若干の時間を要するものの、全体でみればシミュレーションにおいてアニメーションという一連の流れが再現できているといえる。

また、制作中における技法の利用状況を調査したところ、いずれの被験者も実際の砂とシミュレーションとで、各シーンとも同一の技法・手順によりアニメーションを制作していることが確認できた。しかしながら、制作技法実施時の操作については相違もみられた。「削る」は、手に砂が触れないものの、実際のサンドアニメーション同様に描画物に接地したインタラクションとなるため、実際の砂においてもシミュレーションにおいても、すべての被験者が同様の操作により行っていた。一方で、「置く」と「撒く」は手で砂を掴む必要が無いため、人差指や掌で操作するなど、実際の入力形態と異なった形が見受けられた。しかしながら、シミュレーションにおいて、被験者は操作時に「置く・撒く・削る」を事前を選択する必要があるため、どの技法を用いるかの明確な意思表示がなされているといえる。つまり、たとえ実際の砂とシミュレーションとで技法実施時の操作が異なる場合においても、被験者は同一の技法を用いていると認識しているといえ、これは、いずれの被験者も実際の砂とシミュレーションとで、同一の技法の組み立てによりアニメーションを構成していたことから確認できる。

このように、シミュレーションでは実際の砂の場合と同様の技法を組み立てることによりアニメーションが構成でき、また、それにより得られる描画結果も確認できる。このことから、提案手法によるサンドアニメーションのシミュレーションが、試行錯誤を要する作品構想の場として機能していると考えられる。図5-4は実験とは異なるアニメーションを制作した結果であるが、図5-2同様に、実際の砂とシミュレーションとで、同等の結果が得られている。



図5-4. インタフェース使用例。

## 6. おわりに

本研究では、サンドアニメーションのシミュレーションを実現した。アーティストの作品映像からサンドアニメーションの制作環境・技法を調査し、テーブルに接地した手の形状をそのまま入力とするマルチタッチ式のテーブルトップインタフェースを開発することで、各技法の動作に対応する、砂のふるまいを再現した。また、シミュレーションの処理速度を計測するとともに、被験者実験による実際の砂とシミュレーション双方の作品制作を通して、その有効性と再現性を確認した。

提案手法では、実際のサンドアニメーションと同様の制作技法の組み立てによりアニメーションの構成が行え、また、実際の描画結果に近い画像によるアニメーションが制作できる。一方で、実際にはテーブルから手を離して行う技法も、このインタフェースではポインティングのために接地する必要があるため、制作操作において相違がある。また、手で砂の感触が得られないために画面を確認しながらの制作となることも実際の環境と異なる。したがって、今後は砂の感触が得られるインタフェースについて検討する必要がある。また、現状では、利用者は無地のキャンバスに作品を描いていくこととなる。そこで、絵コンテを与えることで、そこから描画の手順を自動的に生成・提示できるようにするなど、今後は、作品制作を支援する環境を整えていきたいと考えている。



## 謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金, 財団法人栢森情報科学振興財団研究助成, 財団法人人工知能研究振興財団研究助成, 財団法人堀情報科学振興財団研究助成, 財団法人JKA補助金による。

## 参考文献

[1] Hertzmann A.: A Survey of Stroke-Based Rendering, IEEE Computer Graphics and Applications, vol.23, no.4, pp.70-81 (2003)

[2] 寺井良太, 中村徳裕, 西尾孝治, 小堀研一: Haptic Deviceを用いた仮想水墨画システムの提案, 2005年電子情報通信学会総合大会講演論文集 情報・システム2, D-12-141, p.291 (2005.3)

[3] 相原健人, 濱本和彦: Virtual Realityを用いた教育コンテンツの開発:VR版画シミュレータの開発, 第36回可視化情報シンポジウム講演論文集, vol.28, no.1, pp.317-318 (2008.7)

[4] 遠藤守ほか: 人工知能技術に関する調査等研究委員会報告書, 財団法人人工知能研究振興財団 (2009)

[5] 昼間行雄: ファンタスティックアニメーションメイキングガイド, マガジンファイブ (2006.2)

[6] Ferenc Cako: Sand Animation, <http://www.sandanimation.com/>

[7] Ilana Yahav: SandFantasy, <http://www.sandfantasy.com/>

[8] David Myriam: The moving sand, <http://www.tramage.com/>

[9] Joe Castillo: A Sand Story, <http://www.sandstory.com/>

[10] Aleksandra Konofalskaya: Главная страница, <http://www.artsand.org/>

[11] 原健輔, 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美: FTIRテーブルによる圧力センシングのためのフレームワークの構築とアートシミュレーションへの応用, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.109, no.466, pp.135-140 (2010.3).

[12] Masahiro Ura, Masashi Yamada, Mamoru Endo, Shinya Miyazaki, Takami Yasuda: A Framework of FTIR Table Pressure Sensing for Simulation of Art Performances, Proc. of NICOGRAPH International 2010, S6-4, pp.118-123 (2010.06).

[13] Jefferson Y. Han: Low-Cost Multi-Touch Sensing through Frustrated Total Internal Reflection, In Proceedings of the 18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.115-118 (2005)

[14] David Wallin: Touchlib: an opensource multi-touch framework, <http://www.whitenoiseaudio.com/touchlib/>

[15] J. David Smith, T.C. Nicholas Graham: Low-Cost Malleable Surfaces with Multi-Touch Pressure Sensitivity, Second Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-computer System (Tabletop 2007), pp.205-208 (2007.10)

[16] 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美: サンドアニメーション風の画像生成のためのペイントツールの開発, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.109, no.75, pp.7-12 (2009.06)

[17] 原健輔, 浦正広, 山田雅之, 遠藤守, 宮崎慎也, 安田孝美: サンドアニメーションの制作技法とそのシミュレーション, 第25回NICOGRAPH論文コンテスト論文集, I-3 (2009.10)

[18] K. Nakakoji, K. Jo, Y. Yamamoto, Y. Nishinaka, M. Asada: Reproducing and Re-experiencing the Writing Process in Japanese Calligraphy, Second Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-computer System (Tabletop 2007), Newport, RI, pp.75-78, (2007.10)

[19] Andres Lucero, Jean-Bernard Marten: Supporting the creation of Mood Boards: Industrial Design in Mixed Reality, Proceedings of the First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (TABLETOP '06), pp. 127-128 (2006)

[20] Lang, D., Findlater, L., and Shaver, M.: Coolpaint: Direct Interaction Painting. In Proceedings of Human Interface Technologies Conference (2003)

[21] P. Vandoren, T. V. Laerhoven, L. Claesen, J. Taelman, C. Raymaekers, and F. V. Reeth.: IntuPaint: Bridging the gap between physical and digital painting, Proceedings of TABLETOP 2008, pp.71-78 (2008)

[22] Philip Tuddenham, Peter Robinson: T3: Rapid Prototyping of High-Resolution and Mixed-Presence Tabletop Applications, Second Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-computer System (Tabletop 2007), Newport, RI, pp.11-18, (2007.10)

[23] Matthew Tobiasz, Petra Isenberg, Sheelagh Carpendale: Lark: Coordinating Co-located Collaboration with Information Visualization, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol.15, no.6, pp.1065-1072 (2009)

[24] Paul Lapidés EHUD Sharlin Mario Costa Sousa Lisa Streit: The 3D Tractus: A Three-Dimensional Drawing Board, Proceedings of the First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (TABLETOP '06), pp.169-176 (2006)

[25] Robert W. Sumner James F. O'Brien Jessica K. Hodgins: Animating Sand, Mud, and snow, Computer Graphics Forum, vol.18, no.1, pp.17-26 (1999)

[26] Yongning Zhu, Robert Bridson: Animating Sand as a Fluid, ACM Trans. Graphics, vol. 24, no. 3, pp. 965-972 (2005)

[27] Ya-Lun Zeng et al.: A momentum-based deformation system for granular material. Journal of Visualization and Computer Animation, vol.18, no.4-5, 289-300 (2007)

[28] Alvin W. Lawl, et al.: A Multi-modal Floor-space for Experiencing Material Deformation Underfoot in Virtual Reality, IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Games (2008)

**浦 正広**



2007年中京大学大学院情報科学研究科修士課程修了。同年名古屋大学大学院博士課程入学，現在に至る。アート，エンタテインメントと科学との融合に関する研究に従事。修士（メディア科学）。

**宮崎 慎也**



1994年名古屋大学大学院工学研究科修了。93年より中京大学情報科学部助手，97年同講師，99年同助教授，07年中京大学情報理工学部教授，現在に至る。CG，VRの特にソフトウェアによる仮想環境構築，空間操作に関する研究に従事。博士（工学）。

**山田 雅之**



1994年名古屋工業大学大学院工学研究科修了。同年同大学知能情報システム学科助手，98年中京大学情報科学部助手，99年同講師，07年中京大学情報理工学部准教授，現在に至る。人工知能とメディア技術を融合利用した応用研究に従事。博士（工学）。

**安田 孝美**



1987年名古屋大学大学院博士課程修了。同年同大学助手，1993年同大学情報文化学部助教授，2003年同大学大学院情報科学研究科教授，現在に至る。ネットワークを利用したマルチメディアにCG，VRの新たな可能性に関する研究に従事。博士（工学）。

**遠藤 守**



2003年名古屋大学大学院人間情報学研究科修了。同年中京大学情報科学部講師，08年中京大学情報理工学部准教授，現在に至る。仮想空間とネットワークの融合利用に関する研究，およびオープンソースの社会利用に関する研究に従事。博士（学術）。