

新たな形状生成手法とインタラクションによる “不思議なスケッチブック”の拡張

近藤 菜々子^{†1} 水野 慎士^{†1}

「不思議なスケッチブック」は、普通のスケッチブックに普通のカラーペンでお絵描きをするだけで三次元 CG を生成できるデジタル映像ツールである。この映像ツールは単にお絵描きから三次元 CG を生成するだけでなく、スケッチブック上の絵に触れることにより、生成した三次元 CG とのインタラクションも可能である。このように、現実世界のアナログ的なツールや操作を通じてデジタル空間との対話を行うことができるため、子供からお年寄りまで活用できる映像ツールへの展開が期待できる。そこで、本論文では「不思議なスケッチブック」の三次元形状生成技法およびインタラクションについての拡張を行う。ここでは、スケッチブックに描いた物体からの三次元形状生成手法を追加するとともに、物体形状に適した三次元形状生成手法を自動的に適用する手法を開発する。また、スケッチブックの絵に触れるだけでなく、スケッチブックを揺らすことなどによるインタラクションを新たに実現する。この拡張により「不思議なスケッチブック」による表現とインタラクションがより多彩になり、教育、芸術、エンターテインメント分野での活用が期待できる。

Extension of “Amazing Sketchbook” with New Methods of Modeling and Interaction

KONDO NANAKO^{†1} MIZUNO SHINJI^{†1}

1. はじめに

スケッチブックへのお絵描きはペンがあればいつでもどこでも始められ、多くの人にとって最も身近な芸術制作の一つである。そのためコンピュータでのお絵描きとも言える CG 制作について、スケッチブックへお絵描きするような感覚のインタフェースを取り入れることは、CG 制作をより多くの人々にとって扱い易いものにすると考えられる。そのため、スケッチベースの CG 制作アプリケーションがいくつも提案され開発されている。これらは、OS 付属のアプリケーションのようにスケッチを簡易的に再現するものだけでなく、デジタル技術を用いてスケッチを発展させたものもある。例えば、二次元スケッチを三次元 CG に変換するアプリケーション [1]、彫刻や版画と同様な操作感覚で二次元/三次元 CG を生成する手法 [2]、スケッチをアニ

メーションで動かすことができるアプリケーション [3]、空中へお絵描きができるアプリケーション [4] など、CG や画像処理の技術などを用いてお絵描き表現の拡張を試みている例も少なくない。

そのような背景の中、筆者らは主に子供を対象とした新しい三次元 CG アニメーション制作手法を提案して、映像ツール「不思議なスケッチブック」を開発してきた。この映像ツールでは二次元の絵をスケッチ感覚で描くだけで三次元 CG アニメーションを生成するが、このときにインタフェースとして本物のスケッチブックとカラーペンを用いる。すなわち、スケッチブックに描かれた絵を Web カメラで撮影して画像処理を行い、CG 生成を施すことで、通常のお絵描きを拡張する映像ツールである [5][6]。本映像ツールでユーザは市販のスケッチブックとカラーペンを用いて自由にお絵描きをするだけである。そしてお絵描き中やお絵描き終了後に映像ツールを通してスケッチブックの絵を眺めると、描いた絵がスケッチブックから盛り上がったような三次元 CG が生成されている。さらに、スケッチ

^{†1} 愛知工業大学大学院 経営情報科学研究科
Presently with Graduate School of Business Administration
Presently with and Computer Science, Aichi Institute of
Technology

ブック上の絵に触れることで三次元 CG を変形させるインタラクションも可能である。物体からサウンドを生成することもできる。提案映像ツールによって生成される三次元 CG はユーザのお絵描きによって逐次変化するため、ユーザは自分が描いている絵がどのように変化するかを確認しながら、自由にスケッチブックへのお絵描きを楽しむことができる。

筆者らは「不思議なスケッチブック」を用いた実験を小学校で行い、体験後にアンケートを取った。アンケートの結果から大部分の子供たちが楽しむことができ、お絵描きに対する興味もより大きくすることができることを確認した。提案ツールの気に入った点については、自分の描いた絵が三次元に浮き上がることや、その絵を手で触って変形できること、絵を描き進めていくと様々なサウンドが生成されていくことなどが特に多く挙げられた。また、他にどんな機能が欲しいかという質問に対しては、描いた絵がもっと動いて欲しいという意見が得られた。

そこで、本論文では「不思議なスケッチブック」の特徴をより活かすことを目的として、三次元形状生成技法およびインタラクションについての拡張を行う。スケッチブックに描いた物体からの三次元形状生成手法を追加するとともに、物体形状に適した三次元形状生成手法を自動的に適用する手法を開発する。また、スケッチブックの絵に触れるだけでなく、スケッチブックを揺らすことなどによるインタラクションを新たに実現する。この拡張により「不思議なスケッチブック」による表現とインタラクションがより多彩になり、子供たちにとってより魅力的な映像ツールになると期待できる。また、教育だけでなく、芸術やエンターテインメント分野での活用も可能となる。

2. 不思議なスケッチブックの概要

本論文で提案するお絵描き拡張映像ツール「不思議なスケッチブック」は、通常のお絵描きで使用するスケッチブックとカラーペンに加えて、スケッチブックを撮影する Web カメラと処理用 PC、スピーカーで構成される。図 1 にシステムの構成を示す。

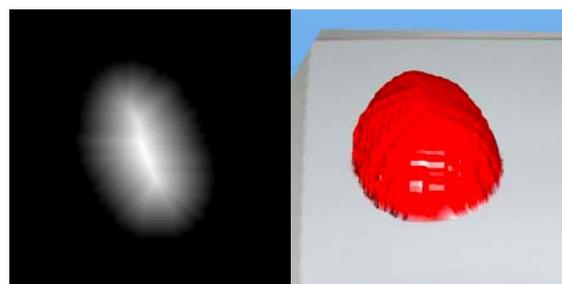


図 1 「不思議なスケッチブック」のシステム構成

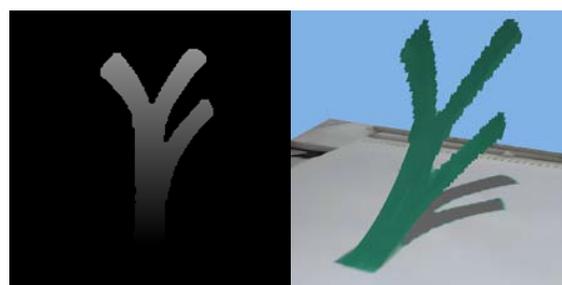
ユーザが使用できるカラーペンの色は、赤色、ピンク色、緑色、青色、水色、黄色、および黒色の 7 種類で、各色の色相、彩度、明度の情報は事前にシステムに与えている。そして、ユーザがペンでスケッチブックにお絵描きするとき、ツールはスケッチブック上の絵を Web カメラで撮影して、そのフレーム映像を三角形パッチで構成されたポリゴンメッシュにマッピングする。さらにツールは各フレーム映像を分析しながら、ポリゴンメッシュをリアルタイムに変形して三次元 CG 物体を生成する。そして三次元 CG 物体から個別にサウンドを生成させることもできる。

ポリゴンメッシュの三次元的な変形方法は、Web カメラの各フレーム映像から生成される濃淡画像に基づく。まず、ツールはフレーム映像を各色別の領域に分割する。そして、各領域において色ごとに異なる手法でグレースケールの濃度値を決定することで、フレーム映像に基づく濃淡画像を生成する。このとき、濃淡画像の各画素の濃度値がポリゴンメッシュの対応する点の垂直方向の移動量の決定に用いられる。

従来のツールでは、色に基づいて分割した各領域内の濃度値を決定するために 2 種類の距離画像を用いていた。一つは、各領域内における領域輪郭からの距離を濃度値に変換した輪郭距離画像である。輪郭距離画像に基づいてポリゴンメッシュを変形した場合には、丸く隆起したような三次元 CG 物体が生成される。もう一つの距離画像は、領域の下端点からの距離を濃度値に変換した底辺距離画像である。底辺距離画像に基づいてポリゴンメッシュを変形した場合には、飛び出る絵本のような三次元 CG 物体が生成される。それぞれの距離画像とその距離画像を用いて生成した三次元 CG を図 2 に示す。



(a) 輪郭距離画像に基づく三次元 CG 物体の生成



(b) 底辺距離画像に基づく三次元 CG 物体の生成

図 2 2 種類の距離画像による三次元 CG 物体の生成例

映像ツールでは、領域の抽出、距離画像の生成、ポリゴンメッシュの変形をリアルタイムで行っている。そのため、ユーザがお絵描きすることで、三次元 CG 物体がリアルタイムで生成されていく。また、描いた絵を手で触れることで領域形状が変形するため、生成される三次元 CG 物体もリアルタイムで変形する。その結果、「不思議なスケッチブック」ではユーザは描くだけでなく変形もできる特別なペンを使っているような感覚が得られる。

実物の紙とペンを使用したお絵描きから三次元 CG を生成するという点で、本研究の目的は ColAR Mix[7] と類似している。ColAR Mix は決められたいくつかの塗り絵のテンプレートを使用したお絵描きを事前に作成した三次元モデルにテクスチャとして貼り付けることで実現している。これに対して「不思議なスケッチブック」では、テンプレートは使用せず、ユーザが自由に描いた二次元スケッチから三次元 CG を生成することができる。また、描画した領域の形状と色を用いて三次元形状を生成するため、描画中でも領域の形状や色の変化に応じて逐次三次元 CG が生成される。そして絵に触れることで三次元 CG を変化させることができるため、スケッチブック上の絵とのインタラクションという従来にはない体験を楽しむこともできる。

3. 不思議なスケッチブックの拡張

前章で述べたように、「不思議なスケッチブック」の最も大きな特徴はスケッチブックに自由に絵を描くことで三次元 CG 物体が生成できることと、スケッチブックの絵を通じて生成した三次元 CG 物体とのインタラクションを実現している点である。そして、小学生を対象にした実験では、子供たちにとってもこれらの特徴に非常に大きな興味を持っていることが確認できた。そこで、本論文では三次元 CG 物体の形状生成手法、およびインタラクションについて拡張を行う。

3.1 形状生成手法の拡張

従来のツールでは、スケッチブックに描いた図形の各領域からの三次元形状の生成について、輪郭距離画像、および底辺距離画像という 2 種類の濃淡画像を使用してポリゴンメッシュを変形していた。そして本論文では新たに、細くて分岐のない形状の領域に対する領域芯線距離画像を生成して、三次元 CG 物体生成に適用することを提案する。また、領域形状に応じてポリゴンメッシュ変形に用いる濃淡画像を自動的に変更する手法を提案する。

3.1.1 領域芯線距離画像の生成と形状生成

領域芯線に沿った距離画像は、例えば渦巻き形状など、曲線によって生成される細くて分岐のない形状の領域に対して適用することを想定している。そのため、初めに領域が細くて分岐がない形状に該当しているかどうかを判定する。まず各領域に対して輪郭距離画像を生成して、しきい

値以下の距離を持つ部分を削除して領域を痩せさせて、細かい枝の除去を行う (図 3)。

次に、領域形状の分析のため、ある起点を中心にして領域輪郭を 2 つの半輪郭に分割する。そして、起点を動かしながら 2 つの半輪郭同士の曲線適合度を小成分の内積に基づいて計算する (図 4(a))。このとき、もしも領域が細くて分岐のない形状であれば、起点が細長い形状の端点にあるとき、2 つの半輪郭が類似した形状となるため、曲線適合度が大きくなることが予想される (図 4(b))。そこで、各領域の半輪郭の曲線適合度の最大値を求めて、その値がしきい値以上の場合に対象領域は細くて分岐のない形状であると判定する。

領域が細くて分岐のない形状であると判定された場合には、曲線適合度が最大値を持つ 2 つの半輪郭の中心線を領域の芯線とする (図 4(c))。そして、芯線上に中心を持つグレースケール円盤を起点から順次描画していく。このとき、各円盤の半径は中心から痩せさせる前の輪郭までの距離で、濃度値は起点から芯線に沿った距離とする。その結果、その領域に対して起点から芯線に沿って濃度値が徐々

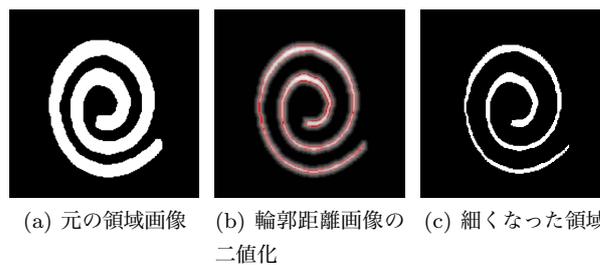


図 3 領域芯線距離画像のための前処理

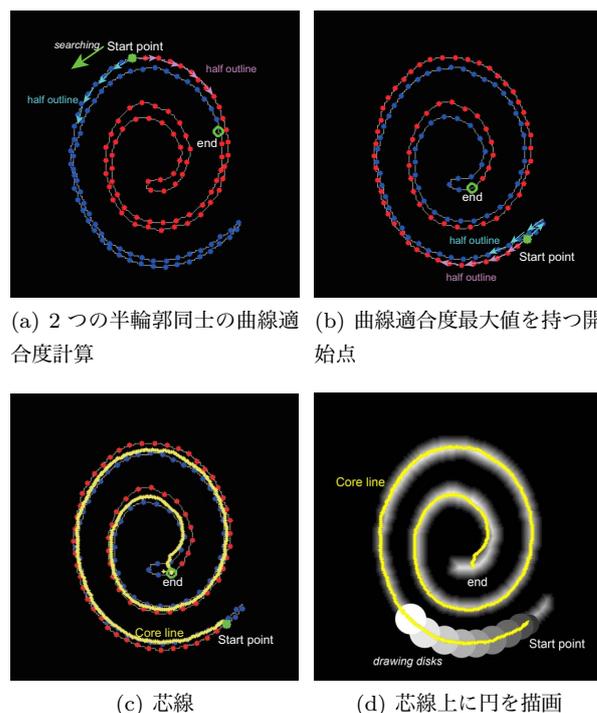


図 4 領域芯線距離画像の生成手法

に大きくなるような距離画像が生成される(図4(d)).

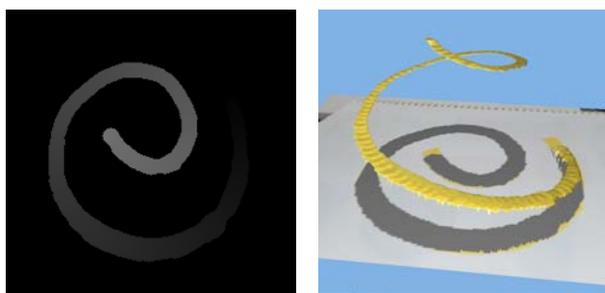
図5に細くて分岐のない領域形状の芯線に基づく三次元CG物体生成例を示す。図に示すように、スケッチブックに渦巻き形状の図を描くことでコイルバネのような三次元CG物体を生成することができる。

提案した手法による領域形状の判定と芯線に沿った距離画像の生成は他の距離画像と同様にリアルタイムで行うことができる。そのため、従来用いた距離画像と同様に三次元CG物体とのインタラクションにも対応可能である。

3.1.2 領域形状に応じた三次元化手法の自動選択

従来のツールでは、スケッチブックに描いた各図形領域に適用する濃淡画像はその領域を描いたカラーペンの色に基づいていた。本論文では、色に加えて領域の形状に基づいて適用する濃淡画像を自動的に選択することができるような拡張を行った。

まず、3.1.1節で述べた手法により、領域が細くて分岐のない形状であると判定された場合には、三次元形状生成に領域芯線距離画像を用いる。そうでない場合には、領域の円形度 c に応じて使用する距離画像を変更する。円形度 c がしきい値 c_{t1} よりも小さい場合、領域は複雑な形状であると判断して、三次元形状生成には底辺距離画像を用いる、そのため、複雑な形状を持つ領域からは飛び出す絵本のような三次元CG物体が生成される。円形度 c がしきい値 c_{t2} と c_{t3} の間に存在する場合、領域は正方形であると判断して、領域内を一様な濃度値にする。このとき、生成される形状は四角いブロックのような三次元物体となる。そして、すべてに該当しない場合には、三次元形状生成に輪郭



(a) 領域の芯線に沿った距離画像 (b) 生成された三次元CG物体

図5 領域の芯線に沿った距離画像に基づくポリゴンメッシュ変形例



(a) スケッチブック上の絵 (b) 領域形状によって異なる手法に基づく三次元形状生成

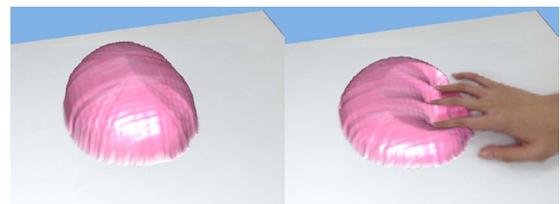
図6 各領域の形状に応じた変形の違い

距離画像を用いる。図6に各領域の形状に応じた、異なるポリゴンメッシュ変形手法が適用された例を示す。なお、色によって適用する濃淡画像を指定することも可能である。このように、ユーザはスケッチブックに様々なカラーペンで様々な形を描くことで、多彩な形状の三次元CG物体を生成することができる。

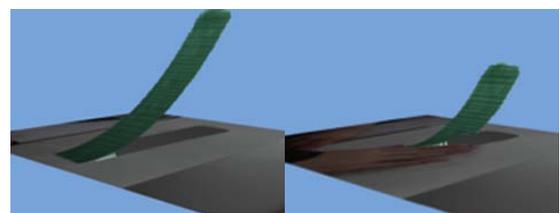
3.2 インタラクションの拡張

3.2.1 手による物体の変形

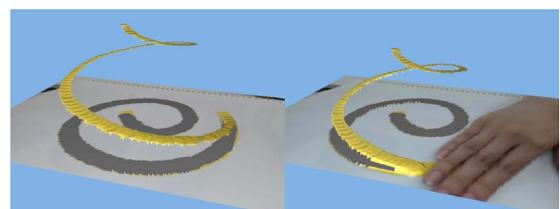
不思議なスケッチブックでは、スケッチブックに描いた絵に手で触れることで各領域の濃淡画像をリアルタイムで更新して、生成された三次元CG物体とのインタラクションを行うことが可能である。従来のツールでは、輪郭距離画像に基づく三次元CG物体は手で凹ませるような変形を行うことが可能であり(図7(a))、底辺距離画像に基づく三次元CG物体は手で押さえつけるような変形が可能であった(図7(b))。そして、3.1.1節で新たに追加した領域芯線距離画像に基づいて生成された三次元CG物体に対しても、手で押さえつけるような変形が可能である。例えば、スケッチブックに渦巻きを描いた場合にはコイルバネのような形状が生成されるが、渦巻きの端を手で押さえることで領域芯線の長さが減少して、生成されるコイルバネ形状の高さも低くなる。その結果、コイルバネを手で押さえたような変形となる。図7(c)に領域芯線距離画像に基づいて生成された三次元CG物体を手で変形している様子を示す。



(a) 輪郭距離画像に基づく三次元形状の変形



(b) 底辺距離画像に基づく三次元形状の変形



(c) 領域芯線距離画像に基づく三次元形状の変形

図7 手による三次元CGの対話的変形

3.2.2 スケッチブックの揺れの検出

本論文では、スケッチブックを揺らすことによるインタラクションを新たに追加した。まず、スケッチブックの揺れを検出するため、スケッチブックを撮影しているビデオ映像のオプティカルフローを逐次計算して、画面全体のオプティカルフローの平均値 $\mathbf{v}(v_x, v_y, 0)$ を求めている。このとき、 $|\mathbf{v}|$ があらかじめ設定したしきい値を超えた場合、スケッチブックが揺れていると判定する。そして、スケッチブックの揺れに応じて、生成している三次元 CG 物体の変形や移動、および追加物体の描画を行う。

3.2.3 スケッチブックの揺れに基づく三次元 CG 物体の揺れ・飛び跳ね

スケッチブックが揺れていると判定された場合、三次元 CG 物体の頂点座標 $\mathbf{p}(p_x, p_y, p_z)$ を $\mathbf{v}(v_x, v_y, 0)$ に応じて移動することで、物体の揺れによる変形や飛び跳ねを実現する。図 8 にスケッチブックの揺れに基づく三次元 CG 物体の頂点の移動の様子を示す。

三次元 CG 物体を揺らす場合には、三次元物体の頂点座標を $(p_x - ap_z v_x, p_y - ap_z v_y, p_z)$ に移動する。なお、 a は物体の固さを表すパラメータである。これにより、三次元 CG 物体の高い位置にある頂点ほど、スケッチブックの揺れと反対の方向に大きく移動することになる。そして、 $|\mathbf{v}|$ がしきい値を下回った場合には、移動した頂点を三角関数に基づいて振動させながら元の座標に戻していく。これにより、スケッチブックの揺れに基づく三次元 CG 物体の揺れとそれに伴う変形を擬似的に表現することが可能である。

三次元 CG 物体を飛び跳ねさせる場合には、三次元物体の頂点座標を $(p_x, p_y, p_z + bp_z |\mathbf{v}|)$ に移動する。なお、 b は物体の重さやバネ定数を表すパラメータである。これにより、三次元 CG 物体の高い位置にある頂点ほど、スケッチブックの揺れの大きさに比例して鉛直上向き方向に大きく移動することになる。そして、 $|\mathbf{v}|$ がしきい値を下回った場合には、移動した頂点を自由落下運動および跳ね返り運動をさせながら元の座標に戻していく。これにより、スケッチブックの揺れに応じた三次元 CG 物体の飛び跳ねを

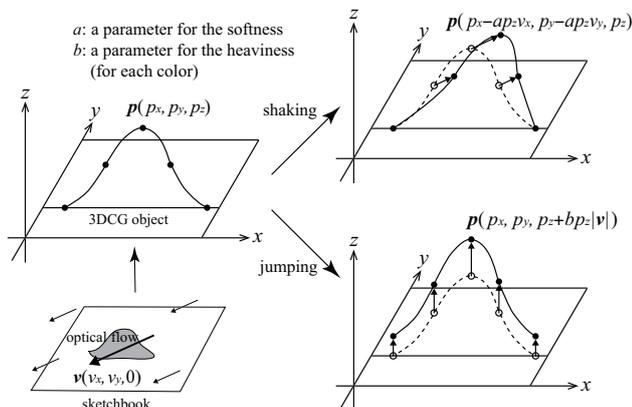


図 8 スケッチブックの動きに応じた三次元 CG 物体の頂点移動

擬似的に表現することが可能である。

なお、揺れまたは飛び跳ねの動作選択は、それぞれの三次元 CG 物体を生成している濃淡画像に応じて選択される。すなわち、輪郭距離画像と一様濃淡画像に基づく三次元 CG 物体は揺れ動作を行い、領域芯線距離画像に基づく三次元 CG 物体は飛び跳ね動作を行う。また、底辺距離画像に基づく三次元 CG 物体は揺れ動作と飛び跳ね動作をユーザが選択することが可能である。図 9 にスケッチブックを揺らすことによる三次元 CG 物体の揺れや飛び跳ね動作の例を示す。

オプティカルフローはスケッチブック上で手を揺らすことでも検出されるため、スケッチブックを揺らすだけでなく絵の上で手を動かすことで、三次元 CG 物体を揺らしたり飛び跳ねさせたりするインタラクションを行うことができる。

3.2.4 スケッチブックの揺れに基づく追加物体の発生

本論文では、より明確なインタラクションの表現として、スケッチブックが揺れていると判定されると、揺れる三次元 CG 物体から小物体を発生させるという効果を新たに取入れた。

スケッチブックの動きに応じて三次元 CG 物体が揺れたとき、フレーム間の移動量に基づいて各頂点の移動速度を計算している。そして、あらかじめ定めた高さより高い位置にある頂点について、速度の大きさがしきい値を超えた場合にはある確率で頂点から小物体を発生させる。発生条件の高さや速度の大きさ、および発生する小物体の種類は、頂点が属する三次元物体のカラーペンの色や形状生成手法によって異なる。現状は緑色からはピンクの微小四面体、それ以外からは発生する頂点の色を受け継いだ微小四面体が発生する。発生した小物体にはランダムで初期速度と回転運動が与えられており、初めに鉛直上向きの初期速度によって発生した頂点座標から少し舞い上がり、その後は放物線運動で落下していく。小物体に回転運動を施すことで、花びらがヒラヒラと舞うような三次元 CG が生成される。落下する小物体がポリゴンメッシュ面に到達したとき、その位置に小物体の色を上乗せしたテクスチャに更新することで小物体の跡を残してから、実際の小物体は消去する。これを繰り返すことで、小物体が徐々に積もっていくような雰囲気が再現される。

提案した手法により、スケッチブック揺らしたり手を

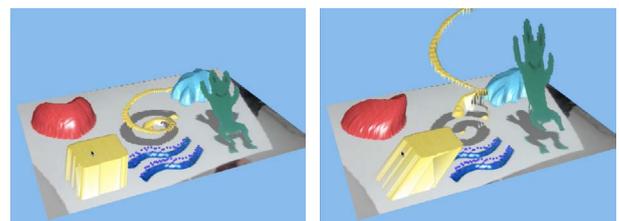


図 9 スケッチブックの振動による三次元 CG 物体の揺れと跳ね

振ったりすることで、桜の木から花びらが散り積もったり、火山が噴火したりするようなインタラクティブな演出を施すことができる。

4. 実験

4.1 ツールの実装

本論文で提案したお絵描き拡張映像ツールを PC 上に実装して実験を行った。使用した PC は iMac (MacOSX 10.8.5, 3.4GHz Core i7, 16GB メモリ) で、C++を用いて開発した。なお、画像の解析のために OpenCV ライブラリ、三次元 CG 映像生成のために OpenGL ライブラリ、サウンドの生成に OpenAL ライブラリを使用している。

Web カメラの映像は 640 × 480(ピクセル) で入力しており、スケッチブック上の絵を貼り付けるためのポリゴンメッシュ面は 153600 個 (320 × 240 × 2) の三角形パッチで構成している。生成される映像は約 10(フレーム/秒) であった。

4.2 映像生成実験

スケッチブック上にカラーペンで絵を描いて、提案ツールに適用させて三次元 CG 物体映像を生成するとともに、それらとのインタラククションを行う実験を行った。

図 10~12 にスケッチブック上の絵と、その絵に提案ツールを適用して生成された映像を示す。図 10 では、黄色で描いた渦巻きからは領域芯線距離画像が生成され、それに基づいてバネのような三次元 CG 物体が生成された。緑色で描いた形状からは、従来手法に基づいて底辺距離画像に基づいた三次元 CG 物体が生成され、高い位置には花のオブジェクトが追加された。図 11 はスケッチブックを揺らすことにより、赤色で描いた太陽が飛び跳ねており、水色や黄色で描いた雲や月は左右に揺れていることが確認できた。図 12 は木と川の絵が描かれており、スケッチブックを揺らしたり、絵の上で手を揺らしたりすることで木の枝と花が左右に動いているのが確認できた。また、三次元 CG が揺れ動くと同時に追加物体が舞うため、木の枝を揺らすとそこから花吹雪が舞うような映像が生成された。

提案ツールを少人数の中学生に体験してもらった。中学生らは、自分の描いた絵が三次元 CG に変換され、スケッチブックを揺らしたり絵に触れたりすることで三次元 CG が変化する様子を非常に楽しんでた。今後は小学校の生徒など対象人数を増やした実験を行いたい。

5. まとめ

本論文では、筆者らが開発してきたお絵描きを拡張する映像ツール「不思議なスケッチブック」の三次元 CG 物体生成手法、および三次元 CG 物体とのインタラククション方法の拡張を行った。三次元 CG 生成手法については、新たに領域芯線距離画像の生成とそれに基づく三次元 CG 物体

生成手法を提案した。そして、スケッチブックに描いた図形に基づいて三次元形状生成に用いる濃淡画像を自動的に選択する手法を提案した。また、三次元 CG 物体とのインタラククションについては、従来のツールで実現していた、手で触れることによる三次元 CG 物体の変形に加えて、スケッチブックの動きを検出することで、三次元 CG 物体に揺れ動作や飛び跳ね動作をさせる手法を提案した。更に、大きな動作を行う物体から新たな物体を発生させるインタラククションを追加した。

今後の課題としては、タブレット端末やスマートフォンのアプリへの対応などの実現が挙げられる。また、触覚などへの対応、立体形状に対するお絵描きなど、様々な手法によるお絵描きの拡張方法の提案を行っていくつもりである。そして、提案映像ツールを学校や児童館など子供たちが多く集まる場所で使用してもらうことで、本映像ツールによる子供たちの芸術創造意欲の向上に関するより詳細な検証を行うつもりである。

なお、本研究の一部は JSPS 科研費 26330420, 25280131 の助成を受けた。

参考文献

- [1] T. Igarashi, S. Matsuoka, H. Tanaka, Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design, proc. of ACM SIGGRAPH'99, pp. 409-416, 1999.
- [2] S. Mizuno, M. Okada, J. Toriwaki, An Interactive Designing System with Virtual Sculpting and Virtual Woodcut Printing, Computer Graphics Forum - J. of the European Association for Computer Graphics, Vol. 18, No. 3, pp. 183-193, p. 409, 1999.
- [3] T. Igarashi, T. Moscovich, J. F. Hughes, Spatial Keyframing for Performance-driven Animation, proc. of ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation, 2005, pp. 107-115, 2005.
- [4] 石川大, 采原克美, 富澤功, 「フローティングインターフェース」の開発, PIONEER R&D, Vol. 16, No. 2, pp. 50-61, 2006.
- [5] 近藤菜々子, 水野慎士, “スケッチブックでのお絵描きを三次元 CG で拡張する映像ツールの提案とその実現方法”, 情報処理学会論文誌 デジタルコンテンツ, Vol. 1, No. 1, pp. 1-9, No. 20, 2013.
- [6] 近藤菜々子, 水野慎士, CG と音でスケッチブックのお絵描きを拡張する映像ツール, 芸術科学会論文誌, Vol. 12, No. 3, pp. 114-123, 2013.
- [7] A. Clark, A. Dunser, R. Grasset, “An Interactive Augmented Reality Coloring Book”, SIGGRAPH Asia 2011 Emerging Technology, 2011.

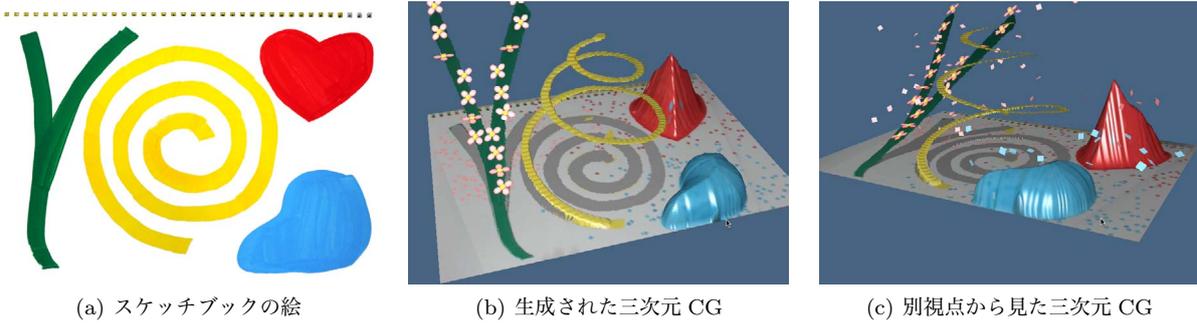


図 10 映像ツールによる三次元 CG 生成例 (1)

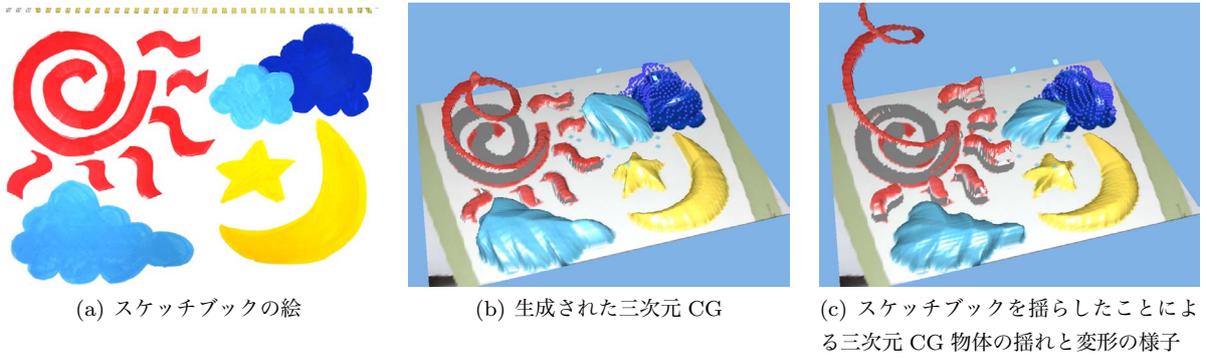


図 11 映像ツールによる三次元 CG 生成例 (2)

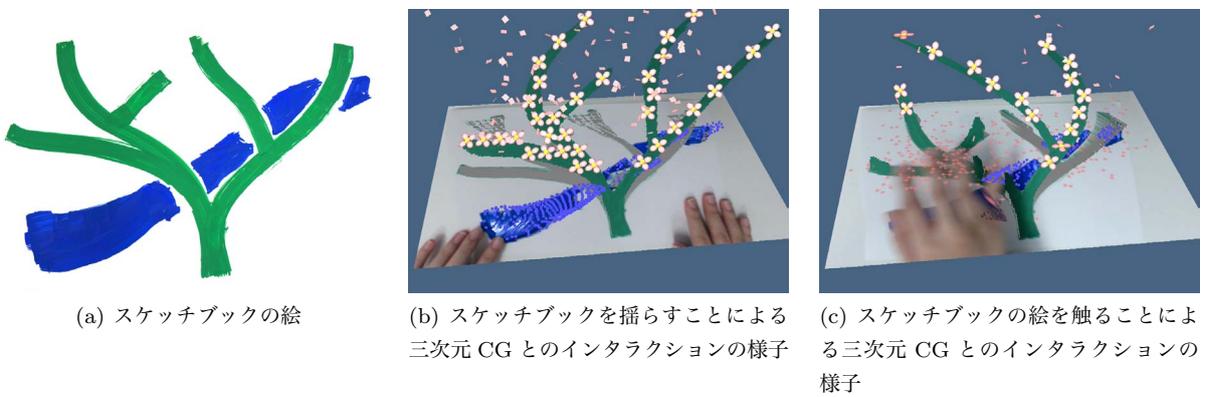


図 12 映像ツールによる三次元 CG 生成例 (3)