

推薦研究論文

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^{2,a)}

受付日 2015年1月15日, 採録日 2015年5月29日

概要:「不思議なスケッチブック」は、スケッチブックに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が可能であり、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。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。そして拡張した映像ツールを用いたワークショップを実施して有効性を検証する。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、エンタテインメント分野での活用が期待できる。

キーワード：スケッチブック, お絵描き, 三次元 CG, インタラクション

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

NANAKO KONDO¹ SHINJI MIZUNO^{2,a)}

Received: January 15, 2015, Accepted: May 29, 2015

Abstract: “Amazing Sketchbook” is a digital tool where it is possible to create 3DCG just only by drawing a picture on a physical sketchbook with physical color pens. It is also possible not only to create 3DCG from a picture, but also to interact with 3DCG by touching the picture on a physical sketchbook. In this tool, the user can contact with digital data through analog interface and operation in the real space, thus it could be useful for new media tool which any users from children to older use. In this paper, we extend “Amazing Sketchbook” with new method of modeling and interaction. We developed a new method to create a 3D shape from an object drawn on the sketchbook, and developed a method to decide the way creating 3D shapes automatically. We also developed a method to interact with 3DCG objects by shaking a physical sketchbook. We held a workshop with our extended “Amazing Sketchbook”, and verified effectiveness of our tool. The extended “Amazing Sketchbook” have more various expression and interaction, and it could be useful for education, art, and entertainment.

Keywords: sketchbook, drawing, 3DCG, interaction

¹ 株式会社 CBC クリエイション
CBC Creation, Ltd., Toyota, Aichi 470-0392, Japan

² 愛知工業大学大学院経営情報科学研究科
Graduate School of Business Administration and Computer
Science, Aichi Institute of Technology, Toyota, Aichi 470-
0392, Japan

a) s_mizuno@aitech.ac.jp

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1つである。そのためコンピュータでのお絵描きともいえ

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やすいものにすると考えられる。そのため、デジタル技術を用いてスケッチを発展させたような 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。たとえば、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]、スケッチ中の絵を分析して内容に応じた陰影を提示してスケッチをアシストするシステム [5] 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。さらに、魚の塗り絵から水族館をつくるコンテンツ [6] や、型紙に色を塗ることで実物と CG のペーパークラフトを制作して操作するコンテンツ [7] など、エンタテインメント分野への応用例も増えてきている。

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「不思議なスケッチブック」を開発してきた [8], [9]。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。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。

著者らは小学校で「不思議なスケッチブック」のプロトタイプを用いた実験を行い、多くの子供たちがツールによって拡張されたお絵描きを楽しみ、お絵描きに対する興味もより大きくなることを確認した。この実験で子供たちがすぐにツールを楽しめたのは、いつも使っている実世界のスケッチブックとペンをいつもどおりに使うというインタフェースでデジタル空間の CG と触れ合うことができるからである。そしてアンケートでは、自分の描いた絵が立体的な CG になることと、スケッチブックの絵に触れると CG が変形することが、特に楽しいという意見が多く得

られた。また、絵からのサウンド生成に興味を持つ子供も見受けられた。このことから、従来の「不思議なスケッチブック」のインタフェースをそのままにしながら、生成される三次元 CG の形状のバラエティを増やしたり、インタラクションの方法やその反応を増やしたりすることは、よりいっそう子供たちにとって魅力的なコンテンツとなる可能性を持つ。そして、大規模な実証実験を行うことでツールの特性を検証して教育やエンタテインメント分野で実用化する手がかりが得られると考えられる。

本論文では実物のスケッチブックとペンだけをいつもどおりに用いるという「不思議なスケッチブック」の特徴はそのままにしながら、三次元形状生成技法およびインタラクションに関する拡張を行った。三次元形状生成手法については、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した。またスケッチブックに触ることに加えて揺らすというインタラクション手法を開発することで、実物のスケッチブックのシンプルな操作を通じた三次元 CG 物体とのインタラクションを実現した。

そして拡張した「不思議なスケッチブック」をワークショップに出展して大規模な実証実験を行った。このワークショップでは PC を複数台用意して、子供たちにお絵描きをしながら三次元 CG を対話的に生成することを体験してもらった。子供たちには体験後にアンケートを実施してツールの有効性を検証した。

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メディア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。

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。



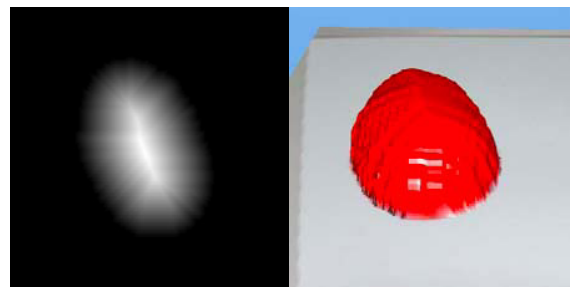
図 1 「不思議なスケッチブック」のシステム構成
 Fig. 1 The components of “Amazing Sketchbook”.

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。

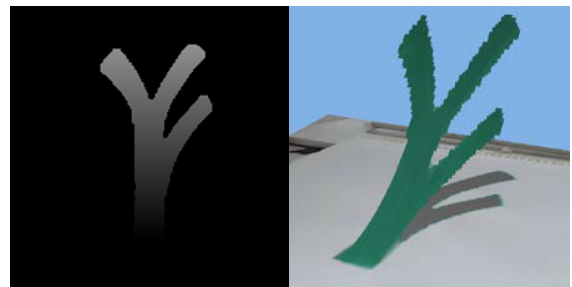
従来のツールでは、色に基づいて分割した各領域内の濃度値を決定するために2種類の距離画像を用いていた。1つは、各領域内における領域輪郭からの距離を濃度値に変換した輪郭距離画像である。輪郭距離画像に基づいてポリゴンメッシュを変形した場合には、丸く隆起したような三次元CG物体が生成される。もう1つの距離画像は、領域の下端点からの距離を濃度値に変換した底辺距離画像である。底辺距離画像に基づいてポリゴンメッシュを変形した場合には、飛び出る絵本のような三次元CG物体が生成される。それぞれの距離画像とその距離画像を用いて生成した三次元CGを図2に示す。

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 [10]と類似しているといえる。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



(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

Fig. 2 Examples of generating 3DCG objects based on two types of distance images.

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、描画途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」は身近なスケッチブックとペンをいつもどおりに使うだけでデジタル空間とのインタラクションが可能なツールであることが大きな特徴である。そしてスケッチブックに自由に絵を描くことによる三次元CG物体の生成と、スケッチブックの絵に触れることで三次元CG物体を変形するインタラクションを実現しており、小学生を対象にした実験で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。

この結果をふまえて、本論文では「不思議なスケッチブック」の三次元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。その中では、普通のスケッチブックとペンをいつもどおりに使ってデジタル空間を操作するという特徴を変えないことで、従来と同じように子供からお年寄りまで扱いやすいツールでありながら、より多彩な表現やインタラクションの実現を目指す。

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からの

三次元形状の生成について、輪郭距離画像に基づいて領域を膨らませたような形状の物体、および底辺距離画像に基づいて領域をそのまま立ち上げたような形状の物体を実現していた。そして、それらの物体を凹ませたり寝かせたりする変形インタラクションを実現していた。

実空間での物体の変形を考えた場合、粘土を凹ませる、飛び出す絵本の物体を寝かせる、というような従来ツールで実現している変形に加えて、コイルバネのような物体を伸び縮みさせたり飛び跳ねさせたりするような変形や運動は代表的なものであるといえる。しかし、従来ツールではコイルバネのような形状を生成することはできず、伸び縮みや飛び跳ねといったインタラクションも行っていない。

そこで本論文では新たに、細くて分岐のない領域形状に対する領域芯線距離画像と、それに基づく立ち上がった形状を実現する。これによってコイルバネのような形状を持つ物体の生成が可能となるとともに、物体を縮めるという変形や飛び跳ねといった新たなインタラクションの可能性が広がる。

また、描いた物体の領域形状に応じて適用する三次元形状を自動的に変更する手法を提案する。これにより、描いた図形に適した三次元形状が生成されたり、描いた図形に描き足すことで三次元形状を変形したりなど、より多彩な三次元 CG 物体生成が可能となる。

3.1.1 領域芯線距離画像の生成と形状生成

本論文では、曲線に沿って生成される細くて分岐のない領域形状からバネのような三次元形状を生成することを考える。生成した三次元形状を縮ませる変形も考慮する。これを実現するには、該当形状と判定した領域の芯線を抽出して、芯線に沿った距離を濃度値とする領域芯線距離画像を生成する必要がある。領域芯線の抽出は領域の細線化に基づく手法など様々な方法が開発されているが [11]、これらは文字認識や構造解析のために用いられ、領域形状を正確に細線化することはできるが、本論文の目的である領域芯線距離画像の生成には、領域形状の判定や芯線に沿った距離計算などの追加処理が必要となる。

そのため、細くて分岐のない領域形状の判定、芯線生成、芯線に沿った距離計算、距離画像生成、という一連の処理をスケッチブックへのペンでの描画中にリアルタイムで行う手法を開発する。以下に処理手順を述べる。

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する。対象領域はペンによる手描き線のため、手のぶれや掠れによる細かい枝が含まれる場合があるが、これらの部分は輪郭からの距離が小さくなるため細かい枝は削除される。また、距離変換による細線化と同様に領域が痩せるため、後述する抽出対象形状である細くて分岐のない領域の判定がしやすくなる。そして、処理後に領域輪郭を抽出する。領域輪郭は 8 近傍連結による線で抽出するが、これを長さ l の N 個の等長ベクト

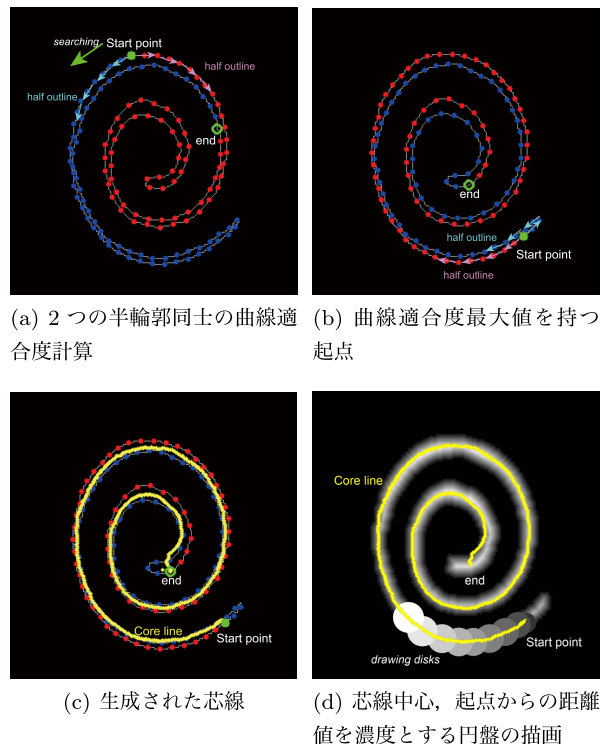


図 3 領域芯線距離画像の生成手法
 Fig. 3 The process of generating a distance image along a core line.

ル列 $L = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ に変換する。

次に、ある起点を中心にして領域輪郭を同じ長さの 2 つの半輪郭小ベクトル列 $L_A = \{v_{A_1}, v_{A_2}, \dots, v_{A_{N/2}}\}$ と $L_B = \{-v_{B_1}, -v_{B_2}, \dots, -v_{B_{N/2}}\}$ に分割する。そして、起点を動かしながら 2 つの半輪郭どうしの曲線適合度 m を内積に基づく次式で計算する (図 3(a))。

$$m = \frac{1}{l^2} \sum_{k=1}^{N/2} v_{A_k} \cdot (-v_{B_k}) \quad (1)$$

曲線適合度 m は 2 つの半輪郭が完全に一致するとき最大値 1 となる。そして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、 m が大きくなることが予想される (図 3(b))。そこで、各領域の半輪郭間の曲線適合度 m の最大値を求めて、その値がしきい値 m_t 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、 m が最大となる 2 つの半輪郭の中心線を領域の芯線とする (図 3(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、対象領域に対して起点から芯線に沿って濃度値が徐々に大きくなるような距離画像が生成される (図 3(d))。

提案手法によって得られた領域芯線距離画像に基づいて生成された三次元 CG 物体生成例を図 4 に示す。このよ

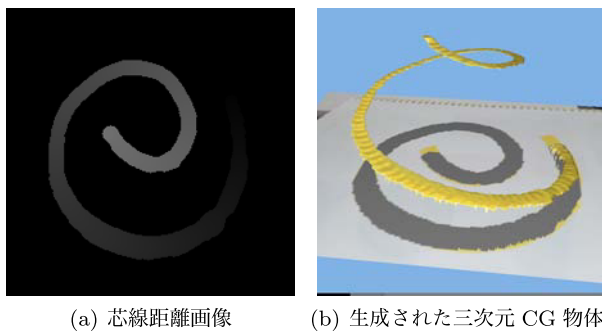


図 4 領域の芯線に沿った距離画像に基づくポリゴンメッシュ変形例
Fig. 4 Deformation of a polygon mesh based on a distance image along a core line.

うにスケッチブックにうずまき形状の図を描くことで、従来手法では不可能であった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。なお、 m_t は 0.8 としており、この値は実験的に決定した。

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 CG 生成時間に対して十分に小さく、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。濃淡画像の選択は生成される三次元形状を考慮して決定した。たとえば、領域形状が細い場合には輪郭距離画像の濃度値は全般的に低くなり、生成される三次元形状は十分な膨らみが得られない。また、四角形領域からはビルのような四角ブロック形状が生成されるのが感覚に合っていることが考えられる。そこで、本論文では以下の手順で適用する濃淡画像を選択する。

まず、3.1.1 項で述べた手法で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。領域の輪郭長が L 、面積が S の場合、円形度 c は次式で求められる。

$$c = \frac{4\pi S}{L^2} \quad (2)$$

c の値は領域形状が円形の場合は 1、正方形の場合は 0.785 となり、複雑な形状ほど小さな値となる。複雑な形状の場合には樹木のような細い部位を多く持つ形状の可能性が高い。そこで、 $c < c_{t1}$ の場合、領域は細い部位を多く持つ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、これにより、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。また、 $0.785 - c_{t2} < c < 0.785 + c_{t3}$ の場合、領域は四角形



(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 5 各領域の形状に応じた変形の違い

Fig. 5 Differences of deformations according to the shape of each region.

であると判断して、領域内を一律な濃度値にする。これにより、四角形の領域からはビルやブロックのような三次元 CG 物体が生成される。そして、すべてに該当しない場合には、輪郭形状は円形であるか、ある程度複雑な形状で輪郭までの距離が十分大きい太い部位を持つと考えられるため、三次元形状生成に輪郭距離画像を用いる。これにより、ドームや山のような膨らんだ三次元 CG 物体が生成される。なお、 c_{t1} 、 c_{t2} 、 c_{t3} はそれぞれ 0.25、0.185、0.015 としている。現時点で本研究の目的は正確な領域形状認識と三次元形状生成ではないため、これらの値は著者らの感覚に基づき実験的に決定した。

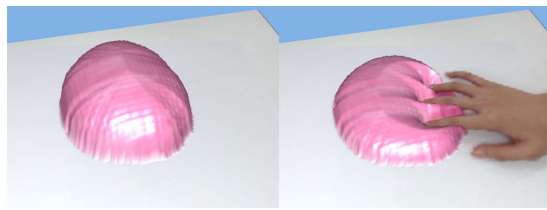
図 5 に各領域の形状に応じた、異なるポリゴンメッシュ変形手法が適用された例を示す。なお、色によって適用する濃淡画像を指定することも可能である。ユーザはスケッチブックに様々なカラーペンで様々な形を描くことで、多彩な形状の三次元 CG 物体を生成することができる。

3.2 インタラクションの拡張

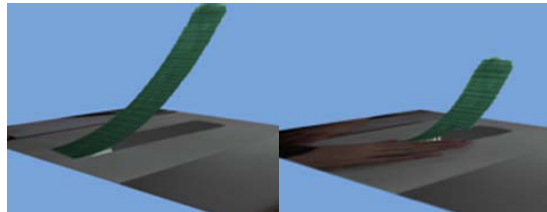
「不思議なスケッチブック」の大きな特徴の 1 つが、実物のスケッチブックを通じた三次元 CG 物体とのインタラクションである。実空間の物体に対する最も基本的な操作の 1 つは物体に触れることであり、従来ツールでは手でスケッチブックに触れることで、膨らんだ三次元 CG 物体を凹ませる変形と立ち上がった三次元 CG 物体を寝かせる変形を実現していた。そして本論文では、新たに追加した芯線に沿って立ち上がる三次元 CG 形状に対して、手で押さえつけて縮めるような変形を実現する。

また、実空間の物体を揺らすことも最も基本的な操作の 1 つといえる。そこで、本論文ではスケッチブックを揺らすことで三次元 CG 物体を変形させたり飛び跳ねさせたりするインタラクションを実現する。加えて、インタラクションを強調するため追加物体の発生も行う。

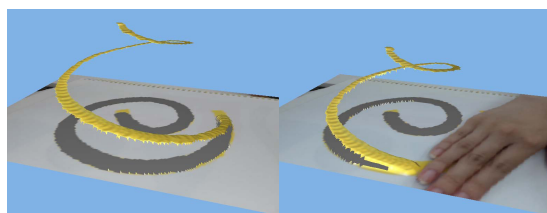
以上の拡張により、実物のスケッチブックをいつでもおりに用いながら、三次元 CG 物体とのより多彩なインタラクションが可能となり、子供などのお絵描きに対する興味をより向上させることが期待できる。



(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 6 手による三次元 CG の対話的変形

Fig. 6 Interactive deformations of 3DCG objects by a hand.

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 6 (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て寝かせるような変形が可能であった (図 6 (b)).

そして、本論文の 3.1.1 項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、手で押さえつけて縮めるような変形を新たに実現した。たとえば、スケッチブックにうずま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、うずまきの端を手で押さえることで領域芯線の長さが減少するため、領域芯線距離画像の最大濃度値も小さくなる。そのため、生成されるコイルバネ形状の高さも低くなり、コイルバネを手で押さえて縮めたような変形となる。図 6 (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。領域芯線距離画像も他の距離画像と同様にリアルタイムで更新されるため、まるでコイルバネを手で押さえつけて縮めるような感覚が得られる。

3.2.2 スケッチブックの揺れの検出

本論文では、実空間での最も基本的な操作である物体を揺らすという行為に着目して、スケッチブックを揺らすこ

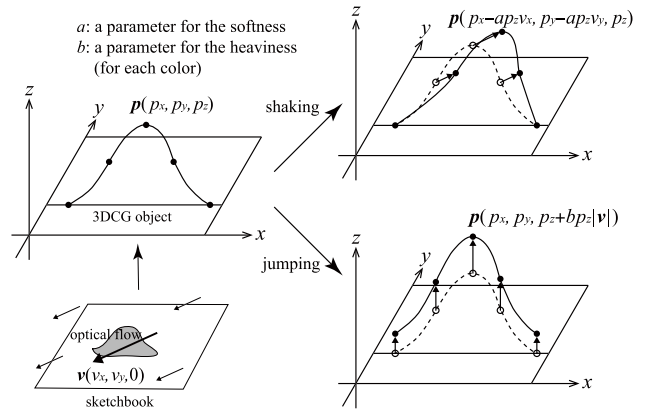


図 7 スケッチブックの動きに応じた三次元 CG 物体の頂点移動
Fig. 7 Movements of vertexes of a 3DCG object according to the movement of a sketchbook.

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 $v(v_x, v_y, 0)$ を求める。なお、 v_x と v_y はスケッチブックに平行な成分であり、 v_z はスケッチブックに垂直な成分で現時点では取得しておらず値は 0 としている、そして、 $|v|$ 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 $p(p_x, p_y, p_z)$ を $v(v_x, v_y, 0)$ 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 7 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、 $|v|$ 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振幅を減衰させて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 物体の揺れとそれともな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 $(p_x, p_y, p_z + bp_z |v|)$ 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、 $|v|$ がしきい値を下回っ

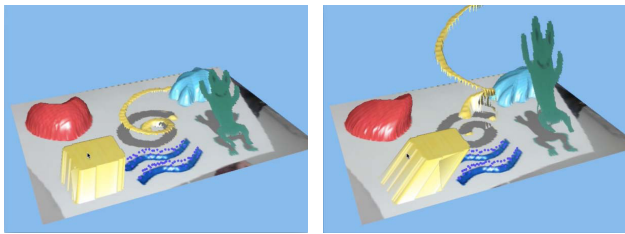


図 8 スケッチブックを揺らすことによる三次元 CG 物体の揺れと跳ね

Fig. 8 Swinging and jumping of 3DCG objects according to the movement of a sketchbook.

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減衰させて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 8 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、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り入れた。これは三次元 CG 物体とのインタラクションを強調させて、本ツールが想定するユーザの 1 つである子供たちにより興味を持ってもらうことを意図したものである。

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。

従来から緑色領域から生成される三次元 CG 物体には追加オブジェクトとして花が生成されているため、花びらを表現するピンクの微小四角面を生成させる。そしてそれ以外の色から生成される三次元 CG 物体から、その三次元

CG 物体の頂点の色を受け継いだ微小四角面を発生させる。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。これにより花びらがヒラヒラと舞うような三次元 CG が生成される。そして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乘せしたテクスチャに更新して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. 実装実験

4.1 実装方法

3章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 153,600 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ションを行う実験を行った。

図 9 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 9(a)~(c) では、黄色で描いたうずまき図形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。この形状は従来ツールでは実現できない形状である。図 9(d)~(f) 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 9(g)~(i) 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、木の枝を揺らすと枝から花吹雪が舞うような映像が生成された。



図 9 「不思議なスケッチブック」による三次元 CG 生成とインタラクションの例
Fig. 9 Examples of generating 3DCG objects and interaction with them on the “Amazing Sketchbook”.

5. ワークショップでの実証実験

5.1 ワークショップの概要

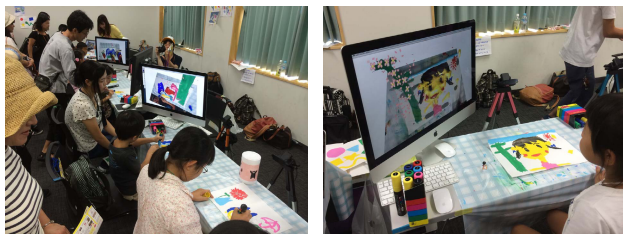
3章および4章で述べた手法を用いて拡張した「不思議なスケッチブック」を2014年8月29日と30日に東京・青山学院大学で開催された“ワークショップコレクション10”に出展した。ワークショップコレクションはNPO法人CANVASが主催する世界最大級の子供向けワークショップに特化した博覧会イベントである[12]。10回目の開催となるワークショップコレクション10では100種類以上のワークショップに約5万7千人の参加者があった。

筆者らは6台のPCによる「不思議なスケッチブック」ワークショップブースを用意した。そして体験者1人に対して1台ずつPCを使用して、B4サイズのスケッチブッ

クにカラーペンでお絵描きをしながら、三次元CGの対話的な作成や変形インタラクションを体験した。本論文で実現した領域芯線距離画像と領域形状による三次元手法自動選択は黄色の領域に適用している。

なお、子供たちには、お絵描きをすると三次元CGができあがること、色や形でCGの形が変わること、スケッチブックに触ったり揺らしたりすると何かが起こること、については事前に説明しているが、生成形状やインタラクション、追加物体発生などの具体的な説明は行っていない。

図10に「不思議なスケッチブック」ブースの様子を示す。ブースには2日間で220人以上の子供が訪れて「不思議なスケッチブック」によるお絵描きを楽しんだ。1人あたりの体験時間は15分程度を想定していたが、実際の平均体験時間は約20分であった。スケッチブックに触った



(a) ツールでお絵描きする子供 (1) (b) ツールでお絵描きする子供 (2)



(c) ブース内の様子 (d) 体験を待つための行列

図 10 ワークショップコレクション 10 での「不思議なスケッチブック」ブースの様子

Fig. 10 The booth of “Amazing Sketchbook” in Workshop Collection 10.

り揺らしたりすることで三次元 CG が変形したり飛び跳ねたりすることを見つけると、非常に喜んで親に見せている様子が何度も見られた。なかにはスケッチブックの余白がなくなるまで色を塗り続けたり、様々な色や形の物体を少しずつ描きながら生成される三次元 CG 物体の形状の変化を確かめたりするなど、30 分以上絵を描き続ける子供もいた。そのため「不思議なスケッチブック」を体験するための長い列ができて、待ち時間は最大 1 時間 30 分となった。

5.2 子供たちによる作品例

図 11 にワークショップ中に子供たちが制作した作品例を示す。うずまきの描画によるコイルバネ形状を用いた作品がいくつも見られ、領域芯線距離画像に基づく三次元形状は 214 人中 77 人の子供たちの作品に含まれていた。このことから、本論文で実現した新しい形状が子供たちの作品制作に受け入れられたことが確認できた。また、様々な色と形状でどのような三次元形状が生成されるかを試しているような作品もいくつか見られた。

作品例は子供たちがツールを使いながら印刷したいシーンを選択したスクリーンショットだが、半数以上がスケッチブックを揺らした状態で撮られていた。このことは、本論文で新たに開発したスケッチブックを揺らして三次元形状を変形させたり飛び跳ねさせたり、また追加オブジェクトを発生させたりするインタラクションが、子供たちの興味を引き付けていることを示しているといえる。

5.3 アンケート調査

ワークショップでの「不思議なスケッチブック」の体験



図 11 ワークショップでの子供たちの作品

Fig. 11 Works created by children in the workshop.

者に対してアンケートを実施して、214 人（男性 61 人、女性 150 人、不明 3 人）から回答があった。回答者の年齢は 6 歳以下 69 人、7～9 歳 110 人、10～12 歳 32 人、13 歳以上 3 人であった。アンケート内容とそれに対する回答を以下に示す。また図 12 にグラフ化したアンケート結果を示す。

問 1 絵を描くことは好きですか？ (図 12(a))

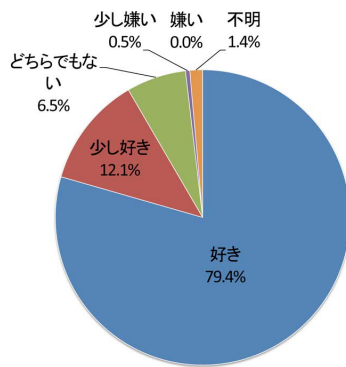
- 好き：170 人
- 少し好き：26 人
- どちらでもない：15 人
- 少し嫌い：1 人
- 嫌い：0 人

問 2 「不思議なスケッチブック」のお絵描きは楽しかったですか？ (図 12(b))

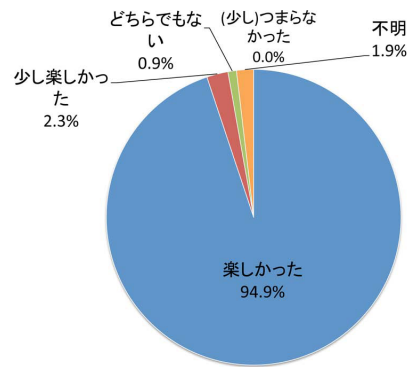
- 楽しかった：203 人
- 少し楽しかった：5 人
- どちらでもない：2 人
- 少しつまらなかった：0 人
- つまらなかった：0 人

問 3 普通のお絵描きと「不思議なスケッチブック」のお絵描きはどちらが楽しかったですか？ (図 12(c))

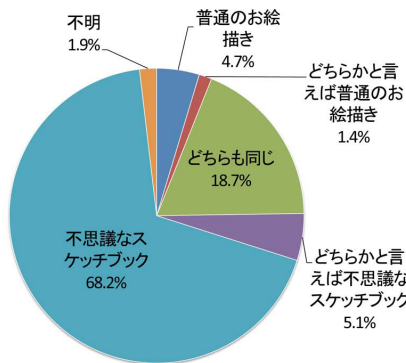
- 不思議なスケッチブック：146 人
- どちらかといえば不思議なスケッチブック：12 人
- どちらも同じ：40 人
- どちらかといえば普通のお絵描き：3 人
- 普通のお絵描き：9 人



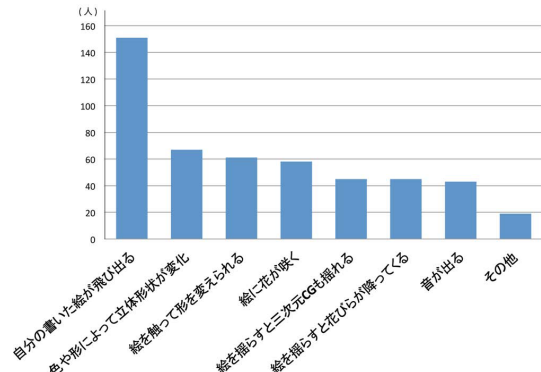
(a) 絵を描くことは好きですか？



(b) 「不思議なスケッチブック」は楽しかったですか？



(c) 普通のお絵描きと「不思議なスケッチブック」はどちらが楽しかったですか？



(d) 「不思議なスケッチブック」はどこが楽しかったですか？

図 12 アンケート結果

Fig. 12 Questionnaire results.

問 4 「不思議なスケッチブック」はどこが楽しかったですか？（選択回答・複数選択可能）(図 12(d))

- 自分の描いた絵が飛び出る：151 人
- 絵の色や形によって三次元形状が変わる：67 人
- 絵を触って形を変えられる：61 人
- 絵に花が咲く：58 人
- 絵を揺らすと三次元 CG も揺れる：45 人
- 絵を揺らすと花びらが降ってくる：45 人
- 音が出る：43 人
- その他：19 人

問 5 「不思議なスケッチブック」でこんなことができたらいいな、ということはあるですか？（自由記述・主な回答）

- “変形方法を選択したい”
- “追加描画されるものの種類を増やしてほしい”
- “使用できる色や音源の追加”
- “細かい線や黒色にも対応してほしい”
- “お花がもっと出てほしい”

問 6 パソコン・タブレット・スマートフォンは使っていますか？

- パソコン：74 人
- タブレット：73 人
- スマートフォン：59 人

- ほとんど使わない：54 人

5.4 考察

アンケートの結果から、99%以上の体験者が「不思議なスケッチブック」でのお絵描きを楽しんでおり、非常に好評であったといえる。体験者の大部分は元々絵を描くことが好きな子供たちであったが、約 73%の子供が“「不思議なスケッチブック」によって拡張されたお絵描きは通常のお絵描きよりも楽しい”と答えた。約 6%の子供が“(どちらかといえば) 普通のお絵描きの方が楽しい”と答えているが、全員が“不思議なスケッチブックが楽しかった”と答えており、ツールへの否定的な意見は見られなかった。

特に楽しかった点として最も多かった回答は“自分の描いた絵が飛び出ること”であり、「不思議なスケッチブック」の基本コンセプトが多くの子供に受け入れられたことが分かる。また、“絵の色や形によって三次元形状が変わること”、“絵に触ると三次元 CG が変形すること”、“絵を揺らすと三次元 CG が揺れたり飛び跳ねたりすること”も多くの子供が特に楽しかった点としてあげた。これらの回答から、本論文で開発した新しい三次元形状生成、描画形状による三次元形状生成手法の変更、スケッチブックを揺らすことによるインタラクションという点が評価されており、「不思議なスケッチブック」の拡張が子供たちの満足度

表 1 普通のお絵描きが好きな子供の比較

Table 1 A comparison in children who like drawing.

	ツールが楽しい	ツールが楽しくない
従来ツール	142	2
拡張ツール	196	0

表 2 普通のお絵描きが好きでも嫌いでもない子供の比較

Table 2 A comparison in children who don't like or hate drawing.

	ツールが楽しい	ツールが楽しくない
従来ツール	14	4
拡張ツール	13	1

表 3 普通のお絵描きが嫌いな子供の比較

Table 3 A comparison in children who don't like drawing.

	ツールが楽しい	ツールが楽しくない
従来ツール	5	6
拡張ツール	1	0

を上げていると考えられる。

また、パソコン・タブレット・スマートフォンをふだんから使用している子供だけでなく、ふだんはほとんどデジタル機器を使用しない子供も「不思議なスケッチブック」を楽しむことができたことが分かった。これは「不思議なスケッチブック」が通常のスケッチブックとカラーペンを用いてお絵描きしたり、スケッチブックに触ったり揺らしたりするといったきわめてアナログ的な道具と操作を用いたインターフェースによってデジタルデータを扱っており、この点が多くの子供たちに受け入れられたということが考えられる。

なお、不思議なスケッチブックに対する不満は、具体的には“ハートが猫になってほしかった”と“星が出てほしかった”という2つの意見が出ており、どちらも描きたいものが明確にありながら、そのとおりの三次元CGが生成されなかったものであった。現時点のツールは描き方によっては意図しない形状が生成される場合があり、それがツールの面白さを生んでいる側面も見受けられるが、明確に描きたいものがあるユーザへの課題は今後の課題である。

最後に、本論文の実験でのアンケートと、文献 [9] の従来ツールを用いた実験について、アンケート結果の比較を行った。表 1、表 2、表 3 に、普通のお絵描きが好きな子供、好きでも嫌いでもない子供、嫌いな子供について、「不思議なスケッチブック」を用いたお絵描きに対する感想のアンケート結果を示す。

比較結果は、普通のお絵描きに対する好き嫌いにかかわらず、従来ツールに比べて本論文の拡張ツールによるお絵描きの方が楽しいと感じる比率が高いことを示している。いずれも有意な差が見られたわけではないが、本論文で行った「不思議なスケッチブック」の拡張が子供たちのお

絵描きに対する楽しさを向上させたことは示唆される。

6. 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ション方法の拡張を行った。本論文での拡張は、カラーペンを用いたより多彩な絵の描き方への対応やスケッチブックを揺らすことへの対応など、普通のスケッチブックとカラーペンを普通に使うだけで三次元CGを生成してインタラクションを行うという「不思議なスケッチブック」の大きな特徴をいっさい変えずに実現している。

そして拡張した「不思議なスケッチブック」をワークショップに出展して大規模な実証実験を行った。ワークショップでは200人以上の子供たちが「不思議なスケッチブック」でのお絵描きを体験した。実物の紙とペンを用いる「不思議なスケッチブック」は、日常で多くの人が扱うきわめてアナログ的な道具と操作によってデジタルデータを取り扱っており、PCやスマートフォンなどの電子機器の使用に不慣れな子供でも抵抗なく楽しむことができることを確認した。そして実験中の子供の様子やアンケート結果から、子供たちは本論文で実現した三次元形状を用いた作品を制作したり、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楽しんだりすることを確認した。それらは本論文の拡張によって「不思議なスケッチブック」のコンテンツとしての魅力的が向上したことを示している。

今後は実証実験でのアンケートで得られた今後の要望や不満点に基づいて、映像生成手法の改良拡張、インタラクションの拡張を行っていくつもりである。また、デジタル絵本などとの連携を行うことで、ストーリー性を持たせるなど教育やエンタテインメントで活用できるコンテンツとして充実させることなども今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は科研費基盤研究 (C) (26330420, 25280131) による。

参考文献

- [1] Igarashi, T., Matsuoka, S. and Tanaka, T.H.: A Sketching Interface for 3D Freeform Design, *Proc. ACM SIGGRAPH'99*, pp.409-416 (1999).
- [2] Mizuno, S., Okada, M. and Toriwaki, J.: 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] Igarashi, T., Moscovich, T. and Hughes, J.F.: Spatial Keyframing for Performance-driven Animation, *Proc. 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] Lee, Y.J., Zitnick, C.L. and Cohen, M.F.: ShadowDraw:

- Real-Time User Guidance for Freehand Drawing, *Proc. ACM SIGGRAPH 2011*, pp.27:1-9 (2011).
- [6] チームラボ：お絵描き水族館，入手先 (<http://www.team-lab.net/all/products/aquarium.html>) (参照 2014-12-24).
- [7] 鈴木 浩，佐藤 尚，速水治夫：子どもを意欲的にペーパークラフト工作へと導く 3次元ゲームシステムの開発，情報処理学会研究報告，Vol.2014-DCC-6, No.18 (2014).
- [8] 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 (2013).
- [9] 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).
- [10] Clark, A., Dunser, A. and Grasset, R.: An Interactive Augmented Reality Coloring Book, *SIGGRAPH Asia 2011 Emerging Technology* (2011).
- [11] 呉 樹崎，奥村彰二：方向性距離変換に基づいた 2 値画像の高速細線化法，電子情報通信学会論文誌 D-II, 情報・システム, II-情報処理 J76-D-2(12), pp.2537-2546 (1993).
- [12] CANVAS：ワークショップコレクション，入手先 (<http://wsc.or.jp/>) (参照 2014-12-24).



近藤 菜々子 (学生会員)

平成 2 年生. 平成 25 年愛知工業大学情報科学部メディア情報専攻卒業. 平成 27 年愛知工業大学大学院経営情報科学研究科博士前期課程修了. 現在，(株) CBC クリエイションに所属. 在学中はコンピュータグラフィックスやインタラクティブアートの研究に関する従事. DICOMO 2013 優秀論文賞・野口賞, DICOMO 2014 優秀論文賞各賞受賞.



水野 慎士 (正会員)

平成 5 年名古屋大学工学部情報工学科卒業, 平成 7 年同大学大学院博士前期課程修了, 平成 10 年同大学院博士後期課程修了. 博士 (工学). 平成 11 年豊橋技術科学大学情報処理センター助手, 平成 21 年愛知工業大学情報科学部講師を経て, 平成 22 年同准教授, 平成 26 年同教授, 現在に至る. コンピュータグラフィックス, 画像処理, マルチメディア等に関する技術の開発やそれらを応用したデジタルコンテンツに関する研究に従事. 画像電子学会奨励賞, インタラクション 2005 プログラム委員特別賞, DICOMO 2013 優秀論文賞・野口賞, DICOMO 2014 優秀論文賞・野口賞各賞受賞. 画像電子学会, 芸術科学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員.