

任意物体を用いたデジタルペイントシステム UnicrePaint における入出力パネルの改良とユーザ評価

小坂 真美^{1,a)} 藤波 香織^{2,b)}

概要: 近年普及しているデジタルペイントの入力は、ペンやマウスなどの専用デバイスに限定されている。しかし、タンジブルユーザインタフェースの概念に基づき実物体を用いることで、多様な入力による創造性発揮が期待できる。我々は、赤外線漏れ全反射 (FTIR) を用いて、任意の物体で描画面をなぞったり押し付けたりすることで入力して描画するデジタルペイントシステム UnicrePaint を提案している。本論文では、UnicrePaint の初期プロトタイプシステムの問題を解決するため、再設計した FTIR 方式の入出力パネルの評価と、物体を用いた自由創作を通したコンセプト評価について述べる。

Improvement of I/O Panel of Physical Object-based Digital Paint System and a User Study on Freestyle Painting Experiences

KOSAKA MAMI^{1,a)} FUJINAMI KAORI^{2,b)}

Abstract: In real world, a number of methods exist to draw or paint figures on paper, which includes not only paint brush but also with various objects. By contrast, digital painting has advantages of editing painting image; however it limits input methods to a few devices. In this paper, we improve a digital painting system, UnicrePaint, that utilizes physical objects as a tool of expression. We redesign the function of contact shape acquisition and collocated feedback, and discuss about the user study of freestyle painting.

1. はじめに

絵を描くという表現の方法は、筆を使ったものに限らず多様である。例えば、押し花を貼り合わせたり、道路にチョークを擦り付けたり、歯ブラシや箸を使ったり、その手法や道具は多岐にわたる。それに対して、近年普及してきているデジタルペイントは編集や保存が容易である一方、ペンタブレットなどの専用入力デバイスにより入力方法が限定的である。また、常に同じデバイスによる入力であるため、発想のきっかけとなったり、その都度異なる創作過程を楽しめるような触感的なフィードバックを得ること

とができない。

一方で、実世界情報や実物体を用いてコンピュータ操作を行うインタフェースを研究する分野として、タンジブルユーザインタフェース (Tangible User Interface. 以下, TUI) が注目されている。我々は、TUI の持つ物理的実体に直接触れて操作する概念を適用し、実物体を描画入力に用いることでデジタルペイントにおける多様な入力の実現を考え、任意の実物体を描画に用いることができるデジタルペイントシステム UnicrePaint を提案している [9]。UnicrePaint は、実物体で描画面をなぞりスタンプのような利用が可能であり、実物体そのもので絵を描いている感覚を提供する。そして、編集や保存などが容易であるというデジタルペイントの特性を活かしつつ、思い入れのある物体を使ったり、どのように物体を用いるかという実物体ならではの試行錯誤を通して、幅広い表現を可能にすることを狙っている。

既報 [9] において、赤外線漏れ全反射 (Frustrated Total

¹ 東京農工大学大学院 工学府 情報工学専攻
Department of Computer and Information Sciences, Tokyo
University of Agriculture and Technology

² 東京農工大学大学院 工学研究院 先端情報科学部門
Department of Computer and Information Sciences, Tokyo
University of Agriculture and Technology

a) kmkt3b@gmail.com

b) fujinami@cc.tuat.ac.jp

Internal Reflection. 以下, FTIR) [3][5] を応用した物体の接触形状取得機能と透過型リアプロジェクションフィルムを用いた同一水平面への入出力機能を備えたプロトタイプシステム開発を述べた. その中で, 前述のコンセプトは受け入れられたものの, 自然な描画を妨げるハードウェア面の2つの問題点と実験方法の問題を確認した. 本論文では, 以下のような構成でハードウェア面の改良を行い, 方法を見直した実験により再評価を行った結果について述べる. 2章では, TUI にもとづく創作支援の関連研究を述べる. つづく3章では, 既報 [9] で述べた UnicrePaint の初期プロトタイプシステムとユーザ評価について紹介する. 4章では問題点をふまえた新たな入出力パネルの設計について述べ, 5章ではそれを用いた評価実験について述べる. 6章では全体を通じた考察を述べ, 7章で本論文のまとめと今後の課題を述べる.

2. 関連研究

TUI の概念に基づいた創作支援には様々な例がある. Follmer, et al. は, 明快な動作で物体の立体形状を取得し編集できる, 子供向けモデリングツール kidCAD[1] を開発した. これは, ジェル状の入力面をもつ入力デバイス deForm[2] に押し付けた物体の形状をコピーし, CG モデルを作成できるシステムである. マウスやキーボードに依存し専門的な知識を要する従来のデジタルモデリングツールに対して, 子供にも理解しやすい操作性と, 多様な入力への対応を実現している. 一方, Ryokai, et al. は触れた物の色や映像をインクとして描画に用いる I/O Brush[4] を開発し, ブラシ型デバイスで触れた実物体の色で絵を描くという, 実世界情報の反映が子供たちの創造性を支援した. Vandren, et al. が開発した FluidPaint[6] は, 実際の絵筆を用いて入力描画できるデジタルペイントシステムである. 濡れた筆がパネルに接触した形状を描画に反映することができ, 従来のペン型デバイスやマウスにはできない, 絵筆を用いて描いた時の触感をユーザに提供できる. これらの研究によって実物体情報や実物体そのものを入力に用いることが, 独創的創作を支援することが示されている. UnicrePaint は, 物体そのものを入力に用い, 形状と色の両方を同時に取得・反映させる点が特徴である.

3. UnicrePaint 初期プロトタイプシステム

UnicrePaint の概要を述べる. 詳細な設計背景や実装方法, 実験内容については文献 [9] を参照されたい.

3.1 システム概要

UnicrePaint ではユーザが手に持った物体で絵を描いているかのような感覚を提供するために, 1) 描画入力位置と同一場所への描画結果フィードバック, 2) 物体の形状や色の取得と描画への反映, 3) 入力時に加わる力の取得

と描画への反映, の3つの機能要件を定義した.

システムは図1のようなハードウェアで構成されている. 入力パネルは, アクリル板やガラスのような空気よりも屈折率の高い透明な板と4辺に埋め込まれた赤外線 LED による FTIR を通じて, 下部の赤外線カメラで取得される. なお Smith らによれば, パネル表面にシリコンゴムを貼付することで, その取得感度を向上できるとされる [7].

入力パネルは, アクリル板内で赤外線の全反射を起こし, 表面に薄いシリコンゴムシートを敷く構成のパネル (以下, アクリル内反射型パネル) と, 厚い透明シリコンゴムに赤外線 LED を埋め込み, シリコンゴム内部で全反射を起こす構成のパネル (以下, シリコンゴム内反射型パネル) [8] の2種類を作製して評価した.

描画結果のフィードバックには, 下部に上向きに置いたプロジェクタからの背面投影を採用する. 物体の特徴取得に影響しないようにするため, 透明に近いリア透過フィルム ((株) シアターハウス製) を使用した. 入力パネルに接触した物体からの反射赤外線光を捉える赤外線カメラとして Kinect Ver. 1 (Microsoft 社) を使用した. またユーザ評価のために, デジタルペイントの代表的なツールである「戻る」「消しゴム」「色選択」をキーボードから選択可能なペイントアプリケーションを開発した.

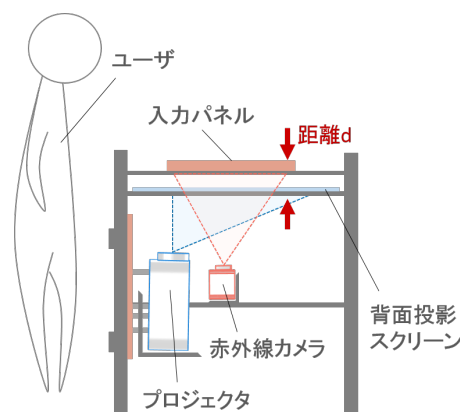


図1 構成要素の位置関係

Fig. 1 Camera and projector construction

3.2 評価実験を通じて明らかになった課題

FTIR 方式による接触形状取得手法の有用性と, 異なる構成の入力パネルの適性を評価するためのユーザ評価実験について述べ, そこで明らかになった課題を示す.

実験は, 10 人の被験者がアクリル内反射型パネルとシリコンゴム内反射型パネルを用いて課題画像透写と自由創作の2つの作業を行った. 入力の実験者側で予め用意したコップ, ビニールテープ, タオルなど11種類の物体を用いた. なお自由創作では, 被験者は予め用意してきた下絵を用いて絵を描いた. 実験で明らかになった問題は以下の3点である.

(1) 入力パネルと出力パネルの距離による顕著な入出力簡

所の不一致。

- (2) パネル表面の破損による透写精度や描画感覚の悪化。
- (3) パネル表面の過度の軟らかさによる描画抵抗感。
- (4) 自由創作実験時の条件設定により創造性が制限された可能性の存在。

(1) は、実験全体を通して被験者 10 人のうち 9 人が「入力した場所と異なる場所に描画されることが気になる」、「思った場所と違う箇所に描画される」という、描画結果のフィードバックのずれについて言及したことによる。入力パネルの厚みとスクリーンまでの距離から、図 1 の距離 d で表される入出力面の差異は計約 55 mm ある。より自然に物体を用いた描画感を提供するためには、入力パネルの厚み削減およびスクリーンまでの距離短縮により、このフィードバックのずれをできる限り削減する必要がある。

また (2) は、内部全反射を起こしているシリコーンゴムの損傷箇所でも赤外線が反射してしまい、ノイズのように描画結果に影響することに起因している。アクリル内反射型パネルのシリコーンゴムの方が損傷が激しかったため、画像透写精度の低下やユーザの描画感の悪化を招いたと考えられる。シリコーンゴム層が厚く描画時の摩擦が分散しやすいシリコーンゴム内反射型パネルに対し、シリコーンゴム層が薄いアクリル内反射型パネルは力が分散しきれず断裂してしまったと考えられる。よって入力パネルの表面に用いる素材にはある程度の強度が必要である。液体シリコーンゴムは LED をパネル中に埋め込むために用いたが強度が低いため、シリコーンゴム内反射型パネルの構成では耐久性の問題を解決できない。よって次節で再設計する入出力パネルはアクリル板内反射型パネルの構成をとる。

(3) は、シリコーンゴム内反射型パネルは物体を押し付ける動作に適しているがなぞる動作には向いていない、という被験者からの意見による。シリコーンゴム層が厚いシリコーンゴム内反射型パネルは、アクリル内反射型パネルと比べて表面が軟らかい。この軟らかさによって接触時に物体が押し込まれてしまい、なぞる際に大きな抵抗感を生じると考えられる。よって、表面に貼付する素材は適度な硬度の物を選定する必要がある。

(4) は、自由創作においては被験者に予め下絵を用意してもらったうえでそれを描くという条件設定から生じている。実際に複数の被験者からは制約を感じたという意見があったように、下絵があることで彼らはその再現がしやすい物体を選ばざるを得なくなり、その場にある物体を用いて試行錯誤しながら作品を作りあげるといった体験を阻害してしまった可能性があった。

4. 入出力パネル再設計

4.1 入出力パネルの構成再検討

再設計入出力パネルの要件は 3 つである。

- (1) パネル構成物の厚み削減
- (2) 強度および硬度を考慮したパネル表面透明シートの選定
- (3) 入力パネルと投影スクリーン間距離の短縮

まずアクリル板の厚さを検討する。今回の設計ではアクリル板はできるだけ薄い必要がある一方で、過剰な薄さでは入力の際に撓む可能性がある。ある程度の強度を有するものとして 3mm 厚のアクリル板で、砲弾型赤外線 LED (TSHG8400, 830nm) を用いた FTIR で検証したところ、問題なく接触部分が反射した。よって、再設計入出力パネルでは厚さ 3mm の透明アクリル板を使用する。

FTIR を起こすアクリル板を 3mm 厚としたため、断面から赤外線を投射する LED も小型である必要がある。よって再設計入出力パネルにおいてはチップ LED を使用する。

パネル表面に貼付したシリコーンゴム損傷が描画に悪影響を及ぼしたことから、要件 (2) に挙げるようにパネル表面に貼付するシートには強度が求められる。また、パネルの表面が過度に軟らかいと抵抗感が大きく描画を阻害するため、適度な硬度が必要である。パネル再設計にあたり表面に貼付する透明シートの硬度を検証したところ、硬度が高すぎても FTIR が反応しにくいことがわかった。このことから、以前用いたシリコーンゴムの硬度 (ショア A, 20) より硬く、検証時に反応しづらかった硬度 (ショア A, 50) よりも軟らかい硬度を選択する。以上より、パネル表面に貼付する FTIR の感度を上げるためのシートは、硬度 50 (アスカー C) の透明なゲルシートを用いる。また 3.1 節要件 1) より、透明ゲルシートもアクリル板と同様にできるだけ薄いことが望ましい。

初期プロトタイプシステムでは、投影スクリーンと入力パネルが分離していたが、新型では入力パネルとスクリーン間の距離を短縮するために、投影スクリーンを貼付したアクリル板をパネルの枠内に設置する。このため、入力と出力を一つのパネル上で行うこととなる。以上を踏まえた再設計入出力パネルの構成を図 2 に示す。

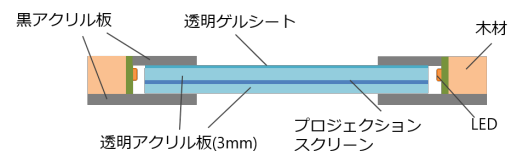


図 2 再設計入出力パネルの構成

Fig. 2 Construction of redesign input panel

4.2 実装情報

上記の設計をもとに入出力パネルを作製した。この入出力パネルは 3mm 厚の透明アクリル板、1mm 厚の透明ゲルシート (エクシールコーポレーション (株)、ハイパーゲルシート硬度 50[10])、赤外線チップ LED (VISHAY 社 VSMG2700, 830 nm)、木枠で構成される。赤外線 LED

は1辺につき14個、4辺合わせて合計64個設置した。初期のパネルでは入出力場所の距離が約55mmであったのに対し、再設計入出力パネルでは約4mmに短縮した。

5. ユーザ評価実験

プロトタイプシステムと再設計入出力パネルを用い、次の2つの評価実験を行った。

- 再設計入出力パネル（以下、新パネル）と初期プロトタイプにおけるアクリル板内反射型パネル（以下、旧パネル）を用いた画像透写精度比較
- 任意の物体を用いた自由創作

5.1 実験内容

3.2節で上げた問題点(1)に対する新パネル構成の有効性を検証する。5人の被験者が新パネルと旧パネルをそれぞれ用いて提示された画像を透写する。旧パネル表面のシリコーンゴムは損傷が激しかったため、傷が少ない部分を用いて行う。透写を行うパネルの描画領域を図3に示すように、被験者から見て手前(図3①、以下①)と(図3②、以下②)の2種類設定する。これは、3章の実験時にユーザーから遠い描画領域ほどずれが大きい、といった意見が得られたためである。透写する課題画像は図4に示す2つである。課題1の画像は綿棒を用いてなぞり、課題2の画像はコップの底をスタンプのように押し付けて描画する。

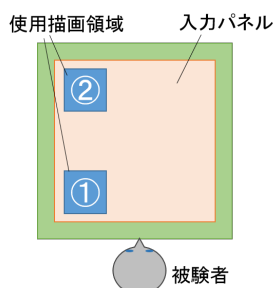


図3 画像透写描画領域
Fig. 3 Drawing area

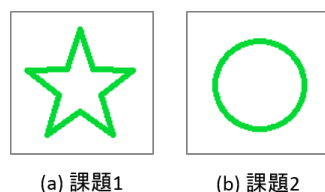


図4 課題画像
Fig. 4 Task images

次に被験者は新パネルを用いたUnicrePaintを使って自由創作をする。3節の項目(3)で指摘した問題点を踏まえ、実験を行う空間(研究室)内の物体を自由に使用できるという条件のもとで描画した。実験者は物体選出の過程や使用された物体の種類、創作過程をビデオ録画して観察する。

5.2 実験結果

5.2.1 透写精度比較

作成された透写画像の描画部分の画素数と、元の課題画像の透写対象部分の画素数、および両画像中の描画部分と透写対象部分が重なる一致画素数より、精度F値を式(1)のように定義する。

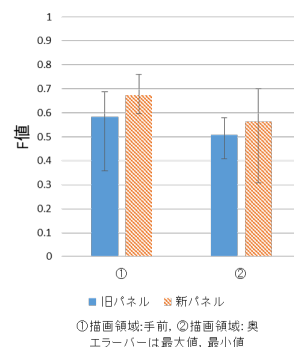


図5 透写精度(課題1)
Fig. 5 F-measure of task1

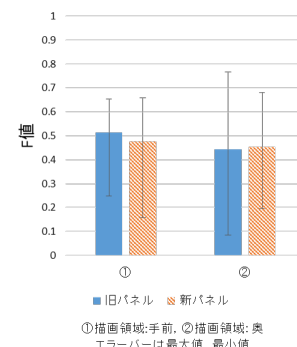


図6 透写精度(課題2)
Fig. 6 F-measure of task2

$$\text{適合率} = \frac{\text{一致画素数}}{\text{描画画素数}} \quad \text{再現率} = \frac{\text{一致画素数}}{\text{透写対象画素数}}$$

$$F \text{ 値} = \frac{2 \times \text{適合率} \times \text{再現率}}{\text{適合率} + \text{再現率}} \quad (1)$$

それぞれの課題につき、描画領域①、②の旧パネルと新パネルの透写精度結果を図5および図6に示す。課題1では新パネルの方がF値が高い画像が多かった一方で、課題2では被験者によって精度にばらつきが見られた。

実験後のインタビューでは被験者に対し、描きやすい印象を持ったパネルを調査した。その結果5人中3人が新パネルと答え、主な理由として出力された描画結果が見やすいことを挙げた。一方旧パネルと答えた2人は、新パネルよりも旧パネルの表面の方が滑らかで抵抗感がないことを理由に挙げると同時に、パネル間において見やすさにあまり差異を感じなかったと答えた。

5.2.2 自由創作

図7に自由創作で作成された画像の一部を示す。自由創作において、被験者は室内の物体を自由に使用した。全体で21種類の物体が用いられた。被験者ごとの創作に用いられた物体の数と、望んだ描画がされなかったなどの理由から別の物体に持ち替えた回数を表1に示す。



図7 自由創作画像
Fig. 7 Result of free painting

持ち替えが発生した時の様子を観察し、分析した結果、持ち替えには大きく分けて以下の3つの要因があった。

- (1) 物体を接触させても反応がなかった。
(2) 接触には反応があったが、形状が不明瞭だった。
(3) 作成中の絵に大きさや形が不釣り合いだった。
- (1) が確認されたのは主に黒い物体や金属素材の物体使用時であった。(2) は主に、大きい物や柔らかい物の使用時や線を引こうとする時などに発生した。また、(3) は作成中の絵に対して物体が想定以上に大きい時などであった。
- また、自由創作中に観察された被験者の様子を次に示す。
- O1** 絵を作成している最中も室内を歩いて描画に適した物体を探していた。
O2 物体を探して歩き回る間に、描くものが浮かんた。
O3 普段よく使う物体を中心に選んだ。
O4 すぐ近くの机上にあった物体を選んだ。
O5 欲しい形状の物体を探していた。
O6 目的を定めず、視界に入った物や手に取った物などで描画方法を思索していた。
O7 接触部分を変えるなど、一つの物体に対しても様々な方法で描画しようとしていた。

表 1 自由創作に用いられた物体
(a) 使用物体数 (b) 物体の種類 (c) 持ち替え回数

Table 1 Objects used in free creation

被験者	(a)	(b)	(c)
A	13	テストター, スマートフォン, ペン ホチキス芯の箱, 木の棒, つまみ部品 USB, フルカラー LED, マグネット トイレットペーパー, フィルムケース	6
B	5	木工ボンド容器, マスキングテープ コップ, スマートフォン, 木板, 綿棒	1
C	5	マスキングテープ, 水のり容器 コップ, 綿棒	0
D	6	ガムテープ, スマートフォン, 木棒 マスキングテープ, ビニールテープ, 指	2
E	2	はさみの柄, マスキングテープ	1

5.2.3 インタビュー回答

実験後の被験者へのインタビューでは描きやすいパネルの他に、物体を使って創作した際の印象やその他にシステムについて気になったところなどを調査した。「物体を用いた創作についてどのように感じたか」という質問に対する回答の一部を次に示す。

- A1-1** 欲しい形を探したり、思った形が出なかったり、どう描こうかと考えたりするのが楽しい。
A1-2 物体を押したときの弾力ある触感が楽しめた。
A1-3 「描く」とは異なる、「作る」「デザインする」といった創作感覚がある。
A1-4 望む形の物体がないと描きたいものが描けない。
A1-5 道具を使って大雑把に作るイメージである。
また、「システム UnicarePaint について気になるところがあ

るか」という質問に対する回答の一部を次に示す。

- A2-1** 線を引く時の抵抗感により、点描になってしまうなどうまく描けない。
A2-2 描画面と出力面が同じなので描きやすい。
A2-3 厳密に接触した部分しか反映されず、物体の見た目と描画結果が合わない。
A2-4 繊細なタッチでは描画できない。
A2-5 色が見えづらい。
A2-6 「戻る」機能が重宝した。
A2-7 遠くの描画領域においては未だずれが見られる。

6. 考察

6.1 物体を用いた創作

被験者が自由創作で楽しめた要因の一つとして挙げたものは、5.2.3 節 A1-1 のような試行錯誤の過程である。その様子は実際に 5.2.2 節 O7 にも表れている。実験中も O1 や O5, O6 のように室内を探し歩きながら模索する被験者の様子が見られた。また、O2 ように物体を探す過程で発想のきっかけを掴んだ場合もあった。使用する物体の選び方は被験者によって異なり、O3 や O4, O5 のように様々であった。物体を用いることに加え、ユーザが使いたい物体を自由に探すことも、試行錯誤を促し発想豊かな創作を支援したと考えられる。

UnicarePaint を通し物体を用いた創作を体験した被験者からは、A1-3 のような意見が多く聞かれた。そのおもな理由は線を描くのが難しく、物体を押し付けたり転がすなどの入力方法によって絵を作成したという経緯による。創作過程の試行錯誤の末に「線を引く」ことが難しいと分かった被験者は、「線を引く」だけではない入力方法を用いて絵を完成させた。これにより、従来の「絵を描く」動作は「線を引く」「細かい部分を描き込む」といった動作の要素を多く含んでいることがわかる。A2-1, A2-4 のような意見が挙がったことから、物体を用いることが可能なだけでなく、物体を用いて線を引くなど細かな入力を可能にすることで、より多様な入力を実現できると考える。

FTIR ではパネルに密着し、赤外線が反射した部分のみを取得する。一見接触するように見える部分でも、少し窪むだけで描画に反映されない。それに対する A2-3 のような意見によって、描画に用いる時に期待される出力は、必ずしも厳密な接触部分だけではないことが判明した。

以上より、物体を用いる創作は入力の多様性から創造性を支援し得る。一方で、線を引くなど繊細な入力への対応など、より幅広い入力方法を可能とすることが求められる。

6.2 新パネルと旧パネルの構成

透写精度比較において、綿棒でなぞる課題 1 の透写精度は新パネルの方が高い人が多かった。また、新パネルと旧

パネルの透写精度の差は、課題1の描画領域②の結果で確認できた。これは、入出力場所の距離差が大きい旧パネル使用時は、ユーザから遠い程視差が大きいことに起因すると思われる。被験者からは、旧パネルの描画領域②上での描画は、実際の接触部分と表示部分間の距離が気になる、という意見も挙がった。これより、新パネルの構成が旧パネルよりも入出力場所のずれを軽減したと考える。

一方、コップを一度押し付ける課題2の透写精度は、描画領域①、②でもばらつきがあった。理由の一つと思われるのは、物体近接時の映り込みである。図8のように、パネル内アクリル板の表面に接近物体が映り込み、表示画像が見えなくなる。これにより、入出力場所ずれの有無に関わらず、画像が見えずに接触箇所がずれた可能性がある。

新パネルよりも旧パネルの方が描きやすいという被験者もいたが、その理由は新パネル表面のなぞる際の抵抗感である。また同時に、両パネル間の見やすさには違いを感じていなかった。このように「描きやすい」と感じる要因は、個人ごとに異なることがわかる。

以上から、UnicrePaintにおける新パネル構成の有効性を、被験者を増やして検証する必要があると考える。



図 8 物体接近時の映り込み
Fig. 8 Reflection of object appearance

6.3 描きやすさの要因

6.2節で述べたように、描きやすさの要因は様々である。今回の実験やインタビューで、描きやすさや描画時の楽しさの要因として言及された項目を次にまとめた。

- 描画面に抵抗感がないこと
- 描画結果フィードバックが見やすいこと
- 入力面と出力面が同一であること
- 入力に対して出力が即時的かつ滑らかであること
- 入力時に触覚的なフィードバックがあること

ある被験者からは、処理速度が遅く描画結果の出力に遅延のあるペイントアプリケーションと、処理速度が速く描画結果の出力がスムーズであるアプリケーションを使用した場合、同じパネルでも描きやすさには差異があるという旨の発言があった。またA1-2の被験者は、パネルが硬く弾力がなければ全く異なる印象を受けると答えた。このように描きやすさの要因はパネル表面の素材や、入出力場所の

一致に限らないことがわかる。これらの要素の実現が、より自然な物体による描画感覚を提供すると考える。

7. おわりに

本論文では、任意の物体を入力に用いるデジタルペイント UnicrePaint の入出力パネルの改良とその評価について述べた。評価実験の結果、再設計した入出力パネルは初期プロトタイプシステムの問題軽減に貢献した。一方で、新パネル構成の有効性を明確にするためには、引き続き検証が必要である。また、物体を入力に用いることは創造性支援につながることもわかった。加えて、物体を入力に用いる際の描きやすさにはいくつかの要件があり、それらの実現が自然な描画感覚の提供を可能とすることが示唆された。

今後の課題を以下に挙げる。UnicrePaintにおける新パネル構成の有効性確認のため、データ数を増やし透写精度を分析する必要がある。また、パネル表面の抵抗感緩和の手法検討やペイントアプリケーション改良など、より描きやすいシステムの実現に向けた改善も求められる。

UnicrePaint は物体形状に加え、物体色と入力時に加わる力を取得することで、実物体を使っている感覚をさらに増強することを目指す。物体色の取得は、プロジェクタ投影光の影響を考慮し、投影とRGBカメラによる取得を交互に切り替える方法を検討している。また入力時に加わる力は、パネルの4隅および4辺に設置する感圧センサによる取得を検討する。

参考文献

- [1] Follmer, S., et al.: KidCAD: digitally remixing toys through tangible tools, *Proc. of CHI'12*, ACM, pp. 2401–2410 (2012).
- [2] Follmer, S., et al.: deForm: An interactive malleable surface for capturing 2.5 D arbitrary objects, tools and touch, *Proc. of UIST'11*, ACM, pp. 527–536 (2011).
- [3] Han, J. Y.: Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection, *Proc. of UIST'05*, ACM, pp. 115–118 (2005).
- [4] Ryokai, K., et al.: I/O brush: drawing with everyday objects as ink, *Proc. of CHI'04*, ACM, pp. 303–310 (2004).
- [5] Schöning, J., et al.: Multi-touch surfaces: A technical guide, *Tabletop'08*, Vol. 2, p. 11 (2008).
- [6] Vandoren, P., et al.: FluidPaint: an interactive digital painting system using real wet brushes, *Proc. ITS'09*, ACM, pp. 53–56 (2009).
- [7] Smith, J. D., et al.: Low-cost malleable surfaces with multi-touch pressure sensitivity, *Proc. of Tabletop 2007*, pp. 205–208 (2007).
- [8] 坂本 他.: 赤外線 LED 埋め込みシリコンゴムを用いたタッチパネル, *インタラクシオン 2004*, pp. 7–12 (2004).
- [9] 小坂 他. 任意の物体を用いたデジタルペイントのための漏れ全反射による接触形状取得手法の提案. 情報処理学会研究報告ユビキタスコンピューティング (UBI), 1-8(2015).
- [10] エクシールコーポレーション 株式会社:ハイパーゲルシート. https://www.exseal.jp/products/list.php?category_id=173. (2015-12-18 閲覧)