

# 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

小坂 真美<sup>1,a)</sup> 鈴木 喜光江<sup>1</sup> 藤波 香織<sup>2,b)</sup>

**概要:** 近年普及しているデジタルペイントでは、その入力にはペンやマウスといった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た入力を可能とすることで、多様な入力による創造性発揮が期待できる。そこで、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、その物体の形や色、入力にかかる力によって描画するデジタルペイントシステム UnicrePaint を提案する。本論文では、この UnicrePaint 実現のため、描画に用いた物体の形状を取得する手法を取り上げる。描画面に接触した物体の形状取得手法として、漏れ全反射方式 (FTIR: Frustrated Total Internal Reflection) を採用した。この FTIR 方式を適用し、アクリル板とシリコンゴムを用いて構成の異なる種類の入力パネルを作成した。加えて描画結果フィードバック、ペイントアプリケーションを備えたプロトタイプシステムを用い、手法の有効性およびパネルの差異を評価した。

**キーワード:** デジタルペイント, タンジブルユーザインタフェース, FTIR

## 1. はじめに

コンピュータの普及と画像処理技術の進展によりデジタルペイントが普及し、デジタルペイントに特化した専用の入力デバイスとしてペンタブレットが開発されている。紙に絵を描くためには従来から多様な道具が存在するのに対し、デジタルペイントはペン型デバイスやスタイラスペン、マウスといった入力方法に限定される。また、ユーザがいかに多様な描画表現をしようと、常に同じデバイスによる入力であるため、触感的な違いはない。

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。TUI は、物理的実体を持った情報に直接触れることで情報を感知したり操作したりするユーザインタフェースを提供する。この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を可能にすると考えた。そこで、任意の実物体

を入力に用いるデジタルペイントシステム UnicrePaint を開発し、描画時の創造性発揮の支援を目指す。UnicrePaint は、実物体で描画面をなぞり、スタンプのように用いることで入力し、実物体そのもので絵を描いている感覚を提供する。これらを実現し、多様な物体を用いた入力による、自由な描画が可能なペイントシステムを開発する。UnicrePaint を通し、物体を用いた描画がユーザの創造性を支援し、唯一無二の作品制作に貢献し得るかを探る。本論文では、描画に反映させる物体の情報のうち、入力に用いられた物体の形状を扱う。描画面に接触する物体形状取得方法として、赤外線漏れ全反射方式 (Frustrated Total Internal Reflection. 以下, FTIR) に着目し、その有用性について明らかにする。

本論文の構成を説明する。2 節で関連研究について述べ、UnicrePaint の概要について 3 節で述べる。つづく、4 節では赤外線漏れ全反射方式について説明する。また、5 節では開発されたプロトタイプシステムについて述べ、6 節ではそのプロトタイプシステムを用いたユーザ評価実験について述べる。そして、7 節において実験結果から FTIR 方式の有効性について検証し、最後に 8 節で本論文のまとめを行う。

## 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。

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 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

Follmer, et al. は、簡単な動作で立体な物体の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。デジタルモデリングツールの多くは入力がマウスやキーボードに依存しており、専門的な知識がなければ使用が難しい。しかし、物体をジェルに押し付ける動作で複雑なモデルの作成を可能にしたことで、子供にも理解しやすい操作性と、多様な入力に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力を支援した。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

#### 3.1 システムの要件

任意物体を入力に用いるペイントシステム UnicrePaint の実現には次の3つの機能が必要と考えた。

- (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、描画への反映
- (3) 入力時に加わる力の取得、描画への反映

前節で挙げた FluidPaint の開発者である Vandren, et al. は、デジタルペイントにおいて入力場所と描画結果出力場所の不一致による視差が、明快な操作性を妨げると述べている [6]。実際の紙に鉛筆で描く時、描画の軌跡は鉛筆で触れた場所に現れる。ユーザにとって触れた場所に結果が残ることは自然であり、受け入れやすいと考えられる。これらのことから、描画結果フィードバックは入力位置と同一場所に行う必要があり、第1の機能要件となる。

UnicrePaint は、任意の物体で描画面をなぞり、スタンプのように押し付けることでシステムに入力する。その形状や色で描画された画像を出力することで、物体そのもので描いている感覚を提供することを目指すため、入力に使用される物体の形状と色を取得する必要がある。ここで、形状とは描画面に接触する部分の物体形状をさし、色とは描画面に接触する部分の物体の色および模様をさす。物体で描画面をなぞる、押し付けるという動作に伴い、描画面に接触する物体の形状や色は連続的に変化する。そのため、

第2の機能要件として、ユーザが描画している間に形状と色を常に取得し反映することを挙げる。

同じ道具と同じ色を用いた描画でも、入力時の力によって描画結果が変わることがある。例えば鉛筆で絵を描く場合、同じ鉛筆でも力を入れると線が太く濃くなり、弱い力で持つと細く薄くなる。実物体で描画する感覚を提供するためには、このような入力時の力の違いを取得し反映する必要があると考え、第3の機能要件とする。

#### 3.2 システムの構成

3.1 節の機能要件を満たす UnicrePaint のシステム構成を図1を用いて説明する。まず、描画結果フィードバックについて述べる。フィードバック方法としてタブレットの使用が考えられるが、多様な物体を用いて入力するため、破損の危険性がある。また、描画領域がタブレットサイズに制限されるため、描画規模に応じたシステムの拡張が困難である。そこで、プロジェクトによる背面投影によって実現する。背面投影により、入力時に生じるユーザや入力物体の影による投影光の遮断を避けることができる。

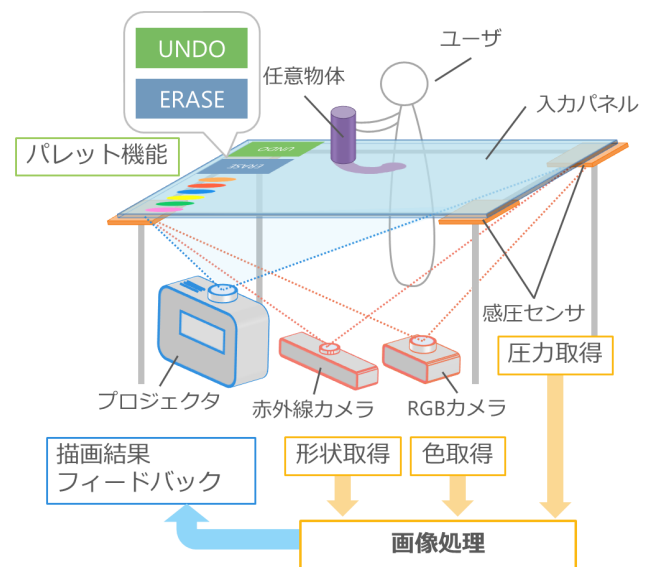


図1 システム概念図

物体形状の取得方法は、赤外線を用いた手法を採用する。これは、描画結果提示にプロジェクタを用いるため、プロジェクタ光の影響に頑健でなくてはならないためである。赤外線を用いた接触形状及び接触座標の取得方法は複数存在する。一つは、パネルごとに赤外線を投射し、パネルに近づいた手に反射した赤外線をカメラで取得する Diffused Illumination (以下、DI) 方式 [5] と呼ばれるものである。本システムでは物体色の取得を妨げてしまうため、不透明物で描画面を覆うことができない。一方、Han によって提案された赤外線漏れ全反射方式 (Frustrated Total Internal Reflection, 以下 FTIR) [3][5] は透明なパネルとの併用が

可能である。FTIR 方式は、アクリル板のような透明なパネルの断面から赤外線を投射して全反射させ、接触した場所で乱反射する赤外線をカメラで取得する方法である。DI 方式はパネル表面が不透明なシートで覆われている必要があり、次に述べる物体色取得が困難である。このため、UnicrePaint では FTIR 方式を採用する。

本論文の範疇外であるが、物体色の取得は RGB カメラの使用を検討している。しかし先に述べたようにプロジェクタの投影光の影響を考慮する必要があることから、投影と RGB カメラの取得を交互に切り替える方法が有効だと考えている。入力時の圧力の取得は、感圧センサの使用を検討する。入力する描画面中央部は物体形状と色の取得のため、遮蔽物を置くことはできない。そのため、感圧センサはパネルの四隅への設置を検討している。

また、デジタルペイントはツール機能による編集が容易、という特徴がある。そこで本システムでは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、パレット機能として選択可能にする。

## 4. 赤外線漏れ全反射方式

### 4.1 原理

UnicrePaint では赤外線漏れ全反射方式 (FTIR) を用いて物体接触形状を取得する。FTIR 方式は、透明なアクリル樹脂やガラスでできたパネルの断面から赤外線 LED を投射し、内部で全反射を起こすことを利用する (図 2)。アクリル板は屈折率が約 1.5 であるため、断面から角度  $45^\circ$  以下で照射された光が全反射する。照射角度が  $45^\circ$  を超えると、光は反射せずにアクリル板を透過する。内部全反射を起こしているアクリル板に、指など光を透過しない物質が接触すると、アクリル板面で光が乱反射する。乱反射した光のうち、アクリル板を透過した光を赤外線カメラが取得する。これにより、アクリル板に接触した部分の形状のみを取得することができる。接触部分で光を乱反射させるためには、接触の際に密着する必要がある。このため、シリコーンゴムシートをパネルの表面に貼付することで密着しやすくなり、取得感度があがる。

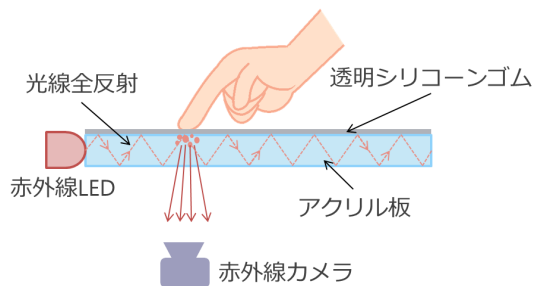


図 2 FTIR 原理図

### 4.2 2種類の FTIR パネル構成

FTIR 方式を実現するパネル構成は二つある。一つはア

クリル板内で赤外線の全反射を起こし、表面に薄いシリコーンゴムシートを敷く構成のパネル (以下、薄膜シリコーンパネル) を用いるものである (図 3 (a))。もう一方は、坂本ら [7] によって提案された手法で、厚い透明シリコーンゴムに赤外線 LED を埋め込み、シリコーンゴム内で全反射を起こす構成のパネル (以下、LED 埋め込みパネル) を用いる (図 3 (b))。薄膜シリコーンパネルは、シリコーンゴムが薄いため押し込んだ時に凹みにくい一方で、LED 埋め込みパネルは、表面に弾力があるため硬い物体の検知に優れるとされる。

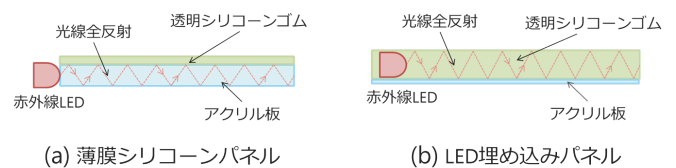


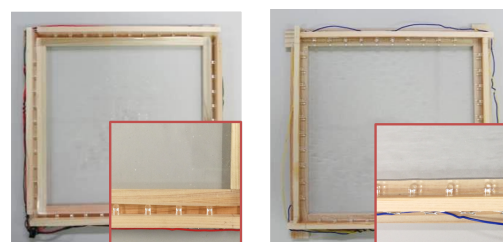
図 3 2種類の入力パネルにおける FTIR 原理

## 5. プロトタイプシステム

### 5.1 入力パネル

FTIR 方式の採用に伴い、形状取得に用いる入力パネルを試作した。入力パネルの実現には 4.2 節で述べた、二種類の構成が考えられる。特徴が異なる入力パネルの比較により、任意の物体による描画に適したパネルを評価する。

入力パネルは、透明アクリル板、透明シリコーンゴム (旭化成ワッカーシリコーン (株) RTV-2 SLJ3220)、赤外線 LED (TSHG8400, 830nm)、木枠から構成される。赤外線 LED の波長は 5.2 節で述べる赤外線カメラの仕様で決定した。パネルは、描画面  $280\text{mm} \times 280\text{mm}$  と  $10\text{mm}$  幅の木枠からなる  $300\text{mm} \times 300\text{mm}$  とした。パネルの厚みを統一するため、薄膜シリコーンパネルは  $10\text{mm}$  のアクリル板に  $3\text{mm}$  の透明シリコーンゴム、LED 埋め込みパネルは  $3\text{mm}$  のアクリル板に  $10\text{mm}$  のシリコーンゴムとした。両パネルとも断面に赤外線 LED を投射するため、木枠に小さな穴をあけて LED の足を通し、パネル平面に対して LED が垂直になるよう固定した。製作した入力パネルを図 4 に示す。



(a) 薄膜シリコーンパネル (b) LED埋め込みパネル

図 4 製作した入力パネルの外観

赤外線 LED は当初、指向角 35° のものでパネルを試作したところ、パネルに触れずに赤外線が強く反射する箇所があった。これは、図 5 に示すように指向角 35° の LED の照射角度は約 70° あり、アクリル板での内部全反射条件である 45° を超えてしまった光が漏れた結果、対象に反射したことによると考えられる。このことから、照射角度が約 44° である指向角 22° の LED をパネル 1 辺につき 10 個、4 辺で 40 個設置し、12V の電源を供給した。



(a) 指向角35°LEDの照射角度 (b) 指向角22°LEDの照射角度

図 5 赤外線 LED 照射角度の比較

## 5.2 カメラとプロジェクタの設置

3.2 節で述べたとおり、描画結果フィードバックをプロジェクタの背面投影によって行う。背面投影のスクリーンは、物体の特徴取得に影響しないようにするため、ほぼ透明に近いスクリーンであるリア透過フィルム半透明タイプ（株式会社シアターハウス）を使用した。また、赤外線カメラとして Kinect Ver. 1 (Microsoft 社) を使用する。図 6 のように、ユーザは立ってシステムを使うものとする。プロジェクタと赤外線カメラは垂直に固定し、スクリーンは入力パネルの下方に設置した。スクリーンに傷がつかないように、パネルと接触しないように設置した。

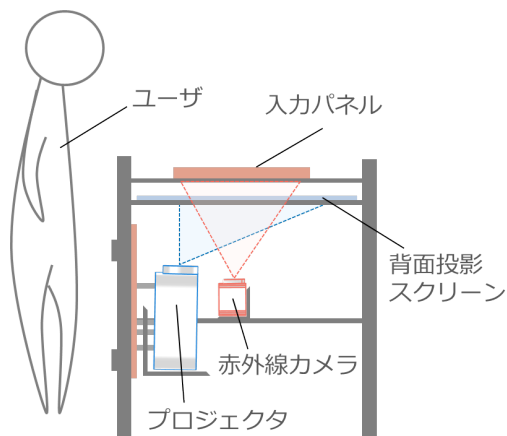


図 6 構成要素の位置関係

## 5.3 ペイントアプリケーション

描画を行うためのペイントアプリケーションは、取得したカメラ画像から物体形状を描画に反映させ、描画画像を作成する。描画結果画像作成の流れを図 7 に示す。FTIR 方式の入力パネルは触れると赤外線が反射され、カメラ画像では接触部分が白く見える。これを二値化してマスク画像を作成して着色した後、描画結果画像にフレーム取得毎に

重畳して結果画像とする。また、ペイントアプリケーションには「戻る」「消しゴム」「初期化」「色選択」のツール機能がある。「戻る」は一つ前のストローク描画前の状態に戻る。「消しゴム」は触れた部分の描画を消し、「初期化」は白紙状態に戻る。「色選択」は描画色の変更である。ツール選択はキーボード操作によって行う。プロトタイプシステム使用の様子を図 8 に示す。

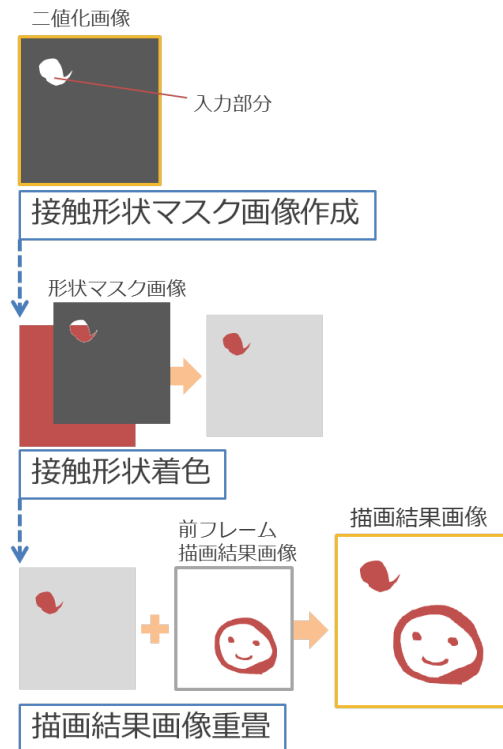


図 7 描画結果画像作成フロー

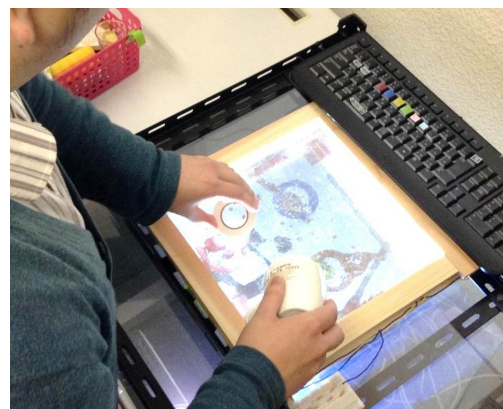


図 8 システム使用の様子

## 6. ユーザ評価実験

本研究で開発したプロトタイプシステムを用いてユーザ評価実験を行った。FTIR 方式による接触形状取得手法の有用性と、薄膜シリコンパネル、LED 埋め込みパネルの 2 種類の入力パネルにおける描画感覚の差異を評価する。



## 6.1 実験方法

被験者 10 人が薄膜シリコンパネルと LED 埋め込みパネルを用いて次の (1) と (2) の作業を行った。

- (1) 指定された物体を用いた課題画像の透写
- (2) 任意の物体を用いた自由創作

作業 (1) では、実験者側で予め用意した物体を入力に用いた。物体は、事前調査で選定した FTIR 方式が検知しやすい物体、やわらかい物、硬い物を選んだ。一方、作業 (2) では被験者に事前にシステムの概要を説明した上で、本システムを用いた描画に使用したい物体を調査した。これらの物体のうち FTIR が検知しない物体、シリコンゴムを傷つける可能性がある物体を除外し、同様に用意した。用意された物体は次の通りである。

- 検知しやすい物体 … 綿棒、ビニールテープ、本
- やわらかい物体 … タオル、スポンジ
- 固い物体 … コップ、箸
- 調査回答から用意した物体  
 … 歯ブラシ、ボタン、スーパーボール、筆

まず、(1) の課題画像の透写について述べる。課題画像は図 9 に示す 3 つである。これらの課題画像は、絵を描く時に行われると推測される動作要素（点、曲線、直線、円、四角形の描画、塗りつぶし、複雑な図形の描画）を含むように作成された。課題 1 と課題 2 はそれぞれ箸、綿棒、コップを用いて、課題 3 は綿棒のみを用いて、表示された課題画像を上からなぞり透写する。課題 3 の透写は、描画結果のフィードバックを提示する場合としない場合の 2 回を行う。これらは透写終了までのツール使用回数、作業時間、課題画像透写精度から二種類のパネル間差異を評価する。



図 9 3 種類の課題画像

次に (2) の自由創作を行う。被験者には事前に下絵を用意してもらい、用意された物体を自由に用いて絵を描いてもらった。但し、描画は物体を用いてのみ行われ、手を使用しないものとした。課題画像透写の時と同様に、自由創作においても薄膜シリコンパネルと LED 埋め込みパネルをそれぞれ用いた。

実験終了後、被験者に口頭インタビューを行った。パネル間の描画感覚の違いや、描画結果に対する違和感の有無などについて調査した。同じ課題を複数回行うことによる慣れの影響を防ぐため、被験者 10 人を初めに薄膜シリコンパネルを使用する 5 人のグループと、初めに LED 埋め込みパネルを使用する 5 人のグループに分けた。

## 6.2 実験結果：課題画像透写

課題画像透写実験では、被験者により図 10 のような画像がそれぞれの課題で作成された。

被験者D	箸	綿棒	コップ
薄膜シリコン			
LED埋め込み			

図 10 課題 1 結果画像

### 6.2.1 課題画像透写時のツール使用回数

図 11 に、それぞれのパネル使用時における被験者別の消しゴム合計使用回数を示す。この図は、描画ツールのうち「消しゴム」が使用された回数を表している。また、「初期化」は実験全体を通して合計 3 回しか使われなかった。なお、シリコンゴムについての赤外線反射によって画像が誤認識され、「戻る」が正常に動作しなくなったため、「戻る」の使用回数は含めない。また、各課題作業において使用された「消しゴム」と「初期化」それぞれの回数において、薄膜シリコンパネルと LED 埋め込みパネルの間に違いはないことを帰無仮説として t 検定を行ったが、いずれも有意水準 5% で有意差は見られなかった。

### 6.2.2 作業所要時間

課題作業を開始してから終了するまでの作業時間についても、同様に比較を行った。箸を使った課題 1 (図 9 (a) 参照) の透写作業における作業時間を図 12 に示す。各課題作業における作業時間について、薄膜シリコンパネルと LED 埋め込みパネルの間に違いはないことを帰無仮説とした有意水準 5% の t 検定の結果、有意差は見られなかった。

### 6.2.3 課題画像の透写精度

課題画像透写精度は、被験者が描画した画像と課題画像の一致画素数を用いて比較する。描画画像内の描画された画素数に対する適合率 (式 (1)) と課題画像の透写対象部分の画素のうち描画された画素の再現率 (式 (2)) を用い

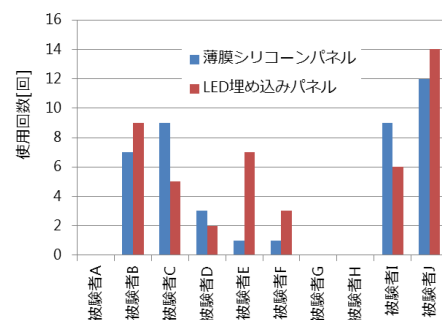


図 11 被験者別消しゴム合計使用回数グラフ

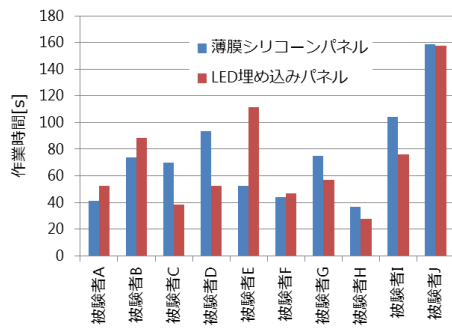


図 12 課題 1 (箸) における被験者別作業時間グラフ



図 13 評価に用いた画像

て精度 F 値を式 (3) で定義する。ここで、式 (1) における描画画素数は図 13-(a) の白領域の画素数、式 (2) における透写対象画素数は図 13-(b) の白領域の画素数である。一致画素数は、描画画像における描画画素の中で、課題画像の透写対象部分の画素と重複している数を指し、図 13-(c) の白領域の画素数である。

$$\text{適合率} = \frac{\text{一致画素数}}{\text{描画画素数}} \quad (1)$$

$$\text{再現率} = \frac{\text{一致画素数}}{\text{透写対象画素数}} \quad (2)$$

$$F \text{ 値} = \frac{2 \times \text{適合率} \times \text{再現率}}{\text{適合率} + \text{再現率}} \quad (3)$$

箸を使った課題 2 (図 9 (b) 参照) の透写精度の F 値を比較したグラフを図 14 に示す。両パネルにおける全課題透

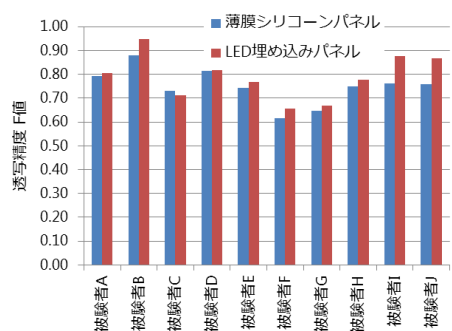


図 14 課題 2 (箸) における被験者別透写精度グラフ

写画像の F 値で有意水準 5% の t 検定を行った結果、LED 埋め込みパネルの方が F 値が有意に高いことが分かった。そこで各課題の透写画像の F 値で有意水準 5% の t 検定を行ったところ、課題 2 における F 値について LED 埋め込みパネルの方が有意に高かった。

### 6.3 実験結果：自由創作

自由創作では、被験者 10 人には予め用意してもらった下絵と同じ絵を、薄膜シリコンパネルと LED 埋め込みパネルでそれぞれ 1 回ずつ描いてもらった。実際に作成された画像を図 15 に示す。



図 15 自由創作の下絵と結果画像

全ての課題画像透写と自由創作を終了後のインタビューでは、LED 埋め込みパネルの方が描きやすいという被験者の方が多かった。それらは薄膜シリコンパネルと比べて、「反応しやすい」「滑らかに感じる」「固い物体で描きやすかった」などの意見であった。一方で、入力パネル間での違いを感じなかったという意見もあった。また、被験者ごとに描きやすい・描きにくいと感じる要因が異なった。例えば、入力パネルの表面すべりやすさが描きやすいと感じる人と描きにくいという人がそれぞれいた。

一方、自由創作については 6 人の被験者が「概ね思ったように描けた」と答えた。他の被験者が思い通りに描けなかったと感じた理由としては、「細い部分が描きにくい」などに加えて「入力箇所と描画結果フィードバック場所のずれが気になった」という意見があった。

実験後に被験者に対して実物体を用いた描画についての感想を調査した。プロトタイプシステムを使用した描画が楽しめたかどうかを 5 段階評価で聞いたところ、「楽しめた」が 3 人、「気になるところはあったが、楽しめた」が 5 人、「どちらともいえない」が 1 人、「あまり楽しめなかった」と「楽しめなかった」は 0 人だった。「楽しめた」、「気になるところはあったが、楽しめた」と答えた被験者からは、「色々な物を組み合わせる創作が楽しい」「何を使いどのように入力するかという試行錯誤が楽しかった」という意見が挙がった。自由創作において、望む描画結果にならなかったために一度手にした物体を持ち替えた回数を見ると、全実験を通して 11 回の持ち替えが発生していた。物体を繰り返し持ち替え、描き方を模索する被験者の様子も見受けられた。なお、入力パネルの違いによる持ち替え回数の有意な差異はなかった。

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、描画結果フィードバックのずれについて言及した。入力パネルよりも、このずれによる描きづらさを訴える被験者もいた。

## 7. 考察

### 7.1 物体を用いた描画というコンセプト

実験後のインタビュー、物体を用いた描画に対して「楽しめた」と評価した被験者は半数を超えた。また、用意された物体はすべて一度以上使用されたことや持ち替えが発生していることから、被験者が物体を使った描画に興味を持って臨んだことがうかがえる。このことから、実物体を使う描画がユーザを楽しませる創作であることが示唆される。また、物体の組み合わせ方の試行錯誤に対して楽しみを感じた被験者がいたことから、実物体を描画に用いることが創造性を支援しているといえる。一方、楽しめたかどうかという質問に「どちらともいえない」と答えた被験者からは「下絵の通りに描かなければならないことに制約を感じた」とした上で、「もっと自由に描いてよければより楽しかった」という意見が寄せられた。

### 7.2 FTIR 方式の有効性

実験から得られた知見から、FTIR 方式の有効性について分析する。結果からはいくつかの問題が浮上した。

一つにはシリコンゴムの問題である。FTIR 方式においてあらゆる物体による入力には、密着を促し感度を上げるシリコンゴムが必要である。しかし実験では、シリコンゴムが物体による入力の摩擦に耐えきれずに損傷し、それによるノイズや破片が描画結果や触感に大きく影響した。FTIR 方式を適用するにはシリコンゴムの耐久性を考慮しなくてはならない。シリコンゴムの損傷による影響については7.4節で詳しく述べる。

また、シリコンゴムの摩擦による抵抗感が気になるという意見が多数寄せられた。摩擦が大きいために、なぞるよりも押し付けたり、スタンプのように使ったりする方がよい、という被験者もいた。自由創作で使いやすかった物体を被験者に聞いたところ、ビニールテープやボタンなど転がすことのできる物体が選ばれた。これは、転がすことで摩擦が少なく滑らかに描けることに起因する。シリコンゴムの摩擦により、FTIR 方式が表面をなぞるという描画法には適応しにくいことを示唆する。

実験後のインタビューでは、多くの被験者が入力場所と描画結果出力場所ずれについて言及した。このような描画結果フィードバックのずれは、入力パネルと投影スクリーンの位置の差異が原因である。FTIR 方式では入力パネルに厚みが存在するため、この視差をなくすためにはアクリル板やシリコンゴムの厚みをなるべく薄くし、スクリーンの位置をできる限りパネルに近づける必要がある。描画結果フィードバックずれについては7.5節で詳しく述べる。

このような問題を含みつつも、被験者の中には「スタンプのような形が決まっている物を使ってみたい」と5人が

言及し、「形状を組み合わせる創作に向いている」などの意見があがったことから、描画における物体の形状取得はユーザにとって十分に機能していたと思われる。よって、描画に用いる物体の接触形状の取得と反映という観点からはFTIR方式は有効と見なせる。

### 7.3 2種類の入力パネル間の差異

ユーザ評価実験を通して、薄膜シリコンパネルとLED埋め込みパネルの描画感覚の差異について評価を行った。どちらかの入力パネルが描きづらい場合、そのパネルにおけるツール使用回数と作業時間は大きくなると推測していた。しかし、薄膜シリコンパネルとLED埋め込みパネルの間ではこれらに大きな差異は見られず、ツール使用回数や時間に影響する程の違いはないと考えられる。一方、課題画像透写精度においてはLED埋め込みパネルの方が有意に精度が高い結果となった。また実験後インタビューでは、薄膜シリコンパネルよりもLED埋め込みパネルに対して肯定的な意見の方が多かった。これらは、パネル表面のシリコンゴムの損傷が強く影響していると考えられる。薄膜シリコンパネルのシリコンゴムの方が損傷が激しく、触感悪化や描画ノイズの原因となったことが、透写精度の低下や描画阻害を引き起こしたと考えられる。シリコンゴム損傷の具体的な影響は7.4節で述べる。

これらを踏まえて、実験で得られた2種類の入力パネルに関する知見を述べる。被験者からの意見では、LED埋め込みパネルは「なめらかに感じる」「押し込みやすい」ことから描きやすいと評された。一方で、シリコンゴムの層が厚くやわらかいことから入力の際に凹んでしまい、なぞる動作が難しいという側面がある。実際に、LED埋め込みパネルについて「円滑な描画ができない」「引っかかるような抵抗感がある」と言及した被験者がいた。この観点から、シリコンゴムの耐久性を考慮しなければ、薄膜シリコンパネルは入力に際して変形が少ないため、なぞる動作には向いているといえる。被験者からも、薄膜シリコンパネルは「引っかからない」ため描きやすいといった意見が得られた。以上より、2種類の入力パネルを比較すると、薄膜シリコンパネルは引っかかるような抵抗感が比較的少ないことから、物体を使ってなぞる描画方法に適している。一方LED埋め込みパネルは、物体を押し付けて形状を描画する方法に適しているといえる。

### 7.4 シリコンゴムの損傷の影響

入力パネル内では赤外線の内全反射が起きているため、表面がわずかでも傷つくと反射して光が漏れる。図16はパネルに何も接触していない状態の赤外線カメラ画像を二値化したものである。白く写っているのはシリコンゴムの傷に赤外線が反射している部分である。特に薄膜シリコンパネルの損傷が激しいことがわかる。これは、薄膜

シリコンパネルの方がシリコンゴムが薄いため固く、入力の摩擦に耐え切れずに割けた部分から傷が悪化したためと考えられる。透写精度分析の際、損傷によるノイズ部分は評価対象外とした上でF値を算出したが、シリコンゴムの傷に触れることで周辺のゴムが歪み、傷による反射の除去しきれないノイズが結果に影響した。課題2における透写精度に大きな差が出たのは、図17のように描画部分の大部分に損傷の激しい部分が重なったためと思われる。

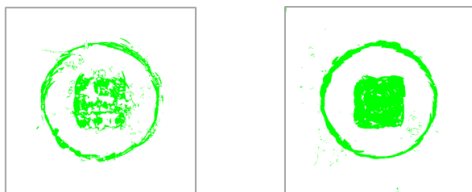
また削れたシリコンゴムの欠片がパネル表面上に残り、触感に影響したと考えられる。被験者のインタビュー回答でも、「シリコンゴムの傷やノイズが気になった」「破損を恐れて入力方法を変えた」などシリコンゴムの損傷が描画に影響したことがうかがえた。

以上のことからシリコンゴムの耐久性を考慮した、解決策が必要である。一つにはシリコンゴムの素材で耐久性の高いものを選ぶことや、密着を補助する物としての別物質の採用が考えられる。また、別の対策としてFTIR方式ではなく、密着させる必要のないDI方式の適用などが挙げられる。



(a) 薄膜シリコンパネル (b) LED埋め込みパネル

図16 シリコンゴムの損傷による反射の様子



(a) 薄膜シリコンパネル (b) LED埋め込みパネル

図17 課題2(コップ)の結果画像

### 7.5 描画結果フィードバックのずれ

実験において被験者からは、描画結果フィードバックのずれが気になるという意見が挙がった。このずれは、図18のように入力パネルと背面投影スクリーンとの距離による視差が原因と考えられる。入力パネルの厚みは約25mm、パネルとスクリーンの距離は約30mmであるため、計55mmの差異があることになる。また、図18に見られるようにフィードバック位置ずれの大きさは、ユーザの身長に依存する。これは、入力場所となるパネルと投影場所である背面投影スクリーンが同一でないことに起因する。入力場所と投影場所の視差を厳密になくすためには、入力場所と投影場所をほぼ同一にする必要がある。そのためには、入力パネルをできる限り薄くし、スクリーンと近づけられるような位置構成の再考が必要である。

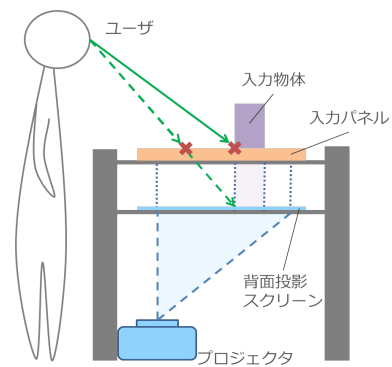


図18 入力パネルと投影スクリーンの位置関係と視差

## 8. おわりに

本論文では、任意物体で描画面をなぞりスタンプのように押し付けて描画するデジタルペイントシステム UnicrePaint のための、入力物体接触形状取得手法を検討した。FTIR方式を用いた接触形状取得手法を実装したプロトタイプシステムを作成し、FTIR方式の有効性と、二種類の異なる入力パネルの差異を検証した結果、次のような知見を得た。

- 物体を用いた描画はユーザの創作性を支援する。
- 二種類の入力パネルは適した入力方法が異なる。
- FTIR方式は物体の接触形状取得には有効である。
- シリコンゴム耐久性や描画府結果フィードバックずれなど課題改善への工夫が必要である。

現システムの課題解決後は、物体色と入力時にかかる力の取得機能を実装し、UnicrePaintの完成を目指す。

### 参考文献

- [1] Follmer, S. and Ishii, H.: KidCAD: digitally remixing toys through tangible tools, *Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 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 the 24th annual ACM symposium on User Interface Software and Technology*, ACM, pp. 527-536 (2011).
- [3] Han, J. Y.: Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection, *Proc. of the 18th annual ACM symposium on User Interface Software and Technology*, ACM, pp. 115-118 (2005).
- [4] Ryokai, K., Marti, S. and Ishii, H.: I/O brush: drawing with everyday objects as ink, *Proc. of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 303-310 (2004).
- [5] Schöning, J., et al.: Multi-touch surfaces: A technical guide, *IEEE Tabletops and Interactive Surfaces*, Vol. 2, p. 11 (2008).
- [6] Vandoren, P., et al.: FluidPaint: an interactive digital painting system using real wet brushes, *Proc. of the ACM international conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ACM, pp. 53-56 (2009).
- [7] 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*, Vol. 104, No. 124, pp. 7-12 (2004).