

平面に接触した実物体の特徴および接触圧を反映した デジタルペイントシステムの評価

小坂 真美^{1,a)} 藤波 香織^{2,b)}

概要：絵を描く方法は本来様々あるが、近年普及しているデジタルペイントの入力はスタイラスペンやマウスなどの専用装置に限定されている。しかし、物体そのものを描画に用いることで、創造性を発揮する多様な入力の実現が期待できる。我々は、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、物体の形状、色や模様、描画面にかかる圧力を反映した描画体験を提供するシステム UnicrePaint を開発してきた。本論文では、主要機能の評価と自由創作実験を通じた UnicrePaint が提供し得る創造性支援の体験について述べる。

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

1. はじめに

実世界において絵を描くという表現方法は、鉛筆や絵筆のような絵を描くための専用道具を使ったものに限らず多様である。押し花を貼り合わせたり、スタンプを組み合わせたり、道路にチョークを擦り付けたり、その手法や道具は工夫の次第によって多岐にわたる。一方、近年普及しているデジタルペイントはペンタブレットなどの専用入力デバイスが用いられる。これらの入力デバイスによる筆圧感知に加え、画像処理により水彩画や油彩画のような様々な表現もソフトウェアで仮想的に再現されている。デジタルペイントは作品の編集や保存・共有は容易である一方、ユーザが触れる描画のための道具はスタイラスペンやマウスなど専用デバイスに限定され、創作過程においてユーザは画一的な触感しか体験できない。触覚フィードバック技術の発展により、単一のデバイスでも実世界の描画動作に伴う触覚を疑似的に再現し提供するものもある。それでもなお、創作においてユーザが発想のきっかけを掴み、その都度創作過程を楽しめるような多様な体験の提供においては、実物を用いた創作に及ばないと考えている。

このような考えをもとに、任意の実物体を描画入力に用いるデジタルペイントシステム UnicrePaint を逐次発展的に開発してきた [14][15]。UnicrePaint は、物体の形状、色や模様、入力時に加わった力を取得して描画に反映する。これによってユーザは、特定のデバイスによる入力では得られないような手に取った物体の質感や重量を感じながら、直接描画面をなぞったりスタンプのように押し付けたりして描画する。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、実物体ならではの使い方の模索や試行錯誤を通して、ユニークで自由度の高い表現を可能にし、ユーザの創造性発揮の支援を目指す。本論文ではこれまで開発してきた UnicrePaint の機能評価と物体を用いた創作に関するユーザ評価を中心に述べる。

以下、第2章では実物体の特徴を用いる創作支援システムや平面への接触物体の特徴取得に関する研究を紹介し、UnicrePaint の位置づけを示す。また、創造性を扱った研究も紹介する。つづく第3章では UnicrePaint の機能の概略と実行環境を説明する。なお、詳細は既報 [14][15] を参照されたい。処理速度に加えて入力の時間的および空間的な限界把握を目的とした実験と、接触色の取得性能評価については第4章にて述べる。第5章では、UnicrePaint を用いたユーザ評価について既報 [15] から被験者を増員して実施し、第6章にて性能評価も踏まえた多角的な考察を試みる。そして、課題と今後の展望を第7章で述べ、第8章で結論を述べる。なお本研究は、東京農工大学 ヒトを対象とする研究計画等の研究倫理審査を受けた (No.28-31)。

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

2. 関連研究

2.1 実物体情報を用いる創作支援システム

創作支援を目指すシステムにも物体の特徴を取得利用するものには様々な例がある。子供向けモデリングツール kidCAD[1] は物体そのものを入力に用いる。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取り込み、立体的な CG モデルを作成する。kidCAD は、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た。一方、I/O Brush[3] はブラシ型デバイスで物体に触れて色を取得し、タブレット上をなぞるとその色で描画される。実物体の色で絵を描くという実世界情報の描画反映が、子供たちに周囲探索を促し創造力を支援したと示している。

これらの研究は、実物体の特徴を用いることがユニークな体験を生み、創造性を支援すると示唆している。一方でこれらは物体の形状、および色といった単一の要素しか取得反映しない。これに対し UnicePaint は、物体そのものを入力に用いて形状と色、描画時の圧力といった複数の要素を同時に取得しリアルタイムに反映する点が特徴である。

2.2 平面接触した物体情報の取得

平面への接触部分の形状や位置の取得、認識の手法は様々ある。このうち可視光に頑健な手法として赤外線漏れ全反射 (Frustrated Total Internal Reflection, 以下 FTIR) [4] を利用する創作支援システム例として、浦らのサンドアニメーションやレインボーアートの生成シミュレーションが挙げられる [5][6]。これらは平面に接触した部分の形状を認識、追跡してユーザの動作を識別し、対応するシミュレーション結果をフィードバックする。また、Weiss らは透明な物体の裏にマーカを付けて事前の登録に応じた識別を行い [7]、や Bränzel らも床上の物体認識のためにマーカを付与している [8]。Hennecke らはこれに加えて、マーカの形状変化による圧力の検出を行っている [9]。また、Vandoren らの FluidPaint[10] は実際の筆を使って入力するペイントシステムであり、FTIR を用いて接触した筆の形状を取得し、描画に反映する。このシステムにおいては筆の形状取得のため、濡れた筆による入力が前提である。

これらの研究においては、事前に接触する物体や形状および動作、対応するマーカを登録するか、特定の物体を用いた入力を前提として、接触時に判定と認識を行った上で様々なフィードバックに繋げている。一方 UnicePaint では事前登録の手間は創作に用いる物体に制約を作ってしまう。多様な物体による多様な入力動作反映を実現するため、本システムでは平面に接触する形状を常にリアルタイムで取得し、反映し続ける。これにより、本システムでは物体や動作の事前登録を必要とせず、ユーザが手に持った任意の物体を入力に用いることができる。

2.3 創造性の評価

創作支援システムの評価において創造性に着目する先行研究として、Cherry らの Creativity Support Index (CSI)[11] が挙げられる。CSI は、ユーザの創造性を支援するデジタルツールの評価項目として「共同作業ができるか」「楽しさ」「様々な試行が可能か」「様々な表現ができるか」「作業に没頭できるか」「成果物への満足度」という 6 つの指標を挙げている。また kidCAD[1] の評価では、「用いる物体の探索」「作品における表現」「多様な入力方法」が実現されたかを評価項目としている。入力の多様性からユーザの創造性を評価する試みは SandCanvas[12] でもなされている。豊富な種類の入力ジェスチャに対応している自由度や、一つのタスクに対して複数の解決方法が観察されたことなどがこれに含まれている。その他、子どものためのロボットプログラミングによる物語創作 [13] に関する Ryokai らの研究でも、ロボットの動作をプログラムする道具を子供たちが様々な方法で用いている様子について、創造的だとして評価している。

創造性支援ツールの評価方法としては成果物の評価や被験者からのアンケート回答だけでなく、実験における被験者の様子を仔細に述べることで創造性を示すことや [3][13]、実験時の様子をビデオ記録し分析するなど [1]、創作の過程が着目されている。

3. UnicePaint

UnicePaint の概要を述べる。詳細な設計背景や実装方法については文献 [14] および [15] を参照されたい。

3.1 システム概要

UnicePaint はユーザ任意の実物体で描画面をなぞったりスタンプのように押し付けることで創作を行う。物体そのもので描いている感覚を提供し、かつデジタルペイントにおける表現の自由度を提供するために、

- (1) 入力に用いる物体の平面に接触する形状の取得と反映
 - (2) 入力に用いる物体の平面に接触する色の取得と反映
 - (3) 入力時に平面にかかる力の取得と反映
 - (4) 入力箇所と同一場所への即時的描画出力
 - (5) デジタルペイント特性としての編集機能付与
- の 5 つの機能要件を定義した。1) から 3) は描画に反映する入力物体の特徴およびユーザの描画動作であり、平面に接触した実物体の特徴を表す。

1) では、赤外線を用いたマルチタッチセンシング手法で透明な接触面を利用可能である FTIR 方式 [4] を用いて物体のうちで描画平面に接している部分のみの取得を行う。ただし、物体の材質やユーザの入力動作によって密着が弱くなるとパネルと接触しているにもかかわらず FTIR が反応しないために、FTIR 方式では反応していないが実際には接触している部分を「軽度接触形状」として補助的

に取得する方法を考案した。この手法では、パネル表面から漏れ出した赤外線が物体に反射してパネル表面に映る性質を利用し、赤外線画像の二値化の際の閾値を調整する。実現にあたっては、画像を用いることが出来ないために、入力面の四隅に配置した感圧センサから取得したパネル全体にかかる圧力をもとに検知する。

2)の実現に際して、描画フィードバックに背面投影を使用するために、そのまま撮影するとRGBカメラに4)で必要となるプロジェクタからの投影光が映り込んでしまうことが問題であった。投影と撮影の干渉抑制をフリッカレスで実現するために、接触している部分のみ投影情報がない単一光の状態にして投影したものを撮影する「選択的投影撮影法」を開発した。この手法は、赤外線カメラにより取得される接触形状画像(B)をマスクのように用いて、前フレームの描画結果画像(A)から接触形状部分をくり抜いた画像(D)を作成して投影する。くり抜かれた部分には描画結果画像の投影光が重ならないため、取得カラー画像(E)のように接触面の接触部分の色がRGBカメラにより撮影できる。また、ユーザには物体の接触部分は見えないため、くり抜き画像投影によって描画結果フィードバックが阻害されることがない。色調整画像(C)は投影面上におけるプロジェクタ投影による反射光強度と物体自体の影による取得画像の明度の低下を抑えるために用いる。

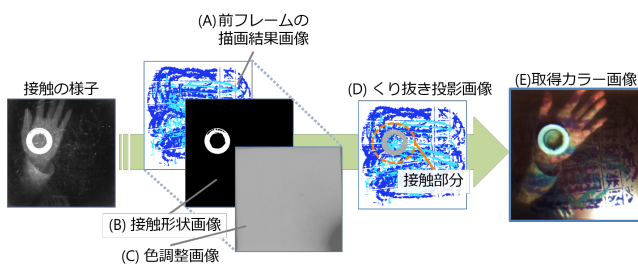


図1 接触色取得手法の流れ

3)では、描画色の濃淡に反映するために、平面への入力時に加わる力の違いを感圧センサで取得する。感圧センサから取得した圧力を対応させる色の濃淡は、色画像のHSV色空間における彩度、HLS色空間における彩度、明度、および輝度のいずれかの反映要素に割り当てる。4つの反映要素それぞれに対し、圧力が強くなるほど値が上昇する場合と下降する場合の2通りの反映、計8種類の圧力反映を用意し、ユーザが選択する。

4)については明快な操作性実現のために液晶タブレットのような入力位置と同一箇所にリアルタイムに描画結果の出力を行う。ただし、1)および2)のように入力平面への接触部分に関する情報取得のためには、平面の下側からのカメラ撮影が必要であるため、出力面として液晶を用いることはできない。よってプロジェクタによる投影を用いた。更に、手や物体によるオクルージョン回避のため入力平面の下側からの背面投影を行う。

5)では、様々な処理が可能なデジタル画像の特性を活かし、描画過程をやり直せるなど実世界での創作では行えない編集を可能にし、表現の自由度を提供する。

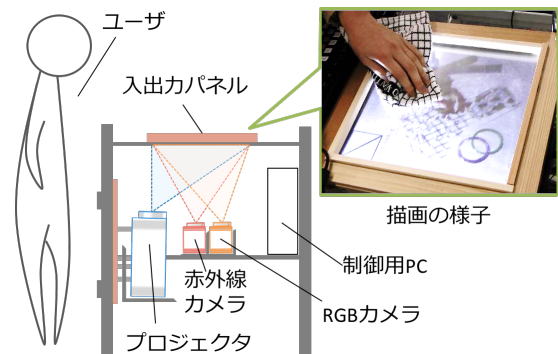


図2 システム構成要素の位置関係

3.2 実装

図2に見られるように、UnicrePaintは入出力パネル、接触形状取得のための赤外線カメラ、接触面の色取得のためのRGBカメラ、描画フィードバック投影のためのプロジェクタ、制御用PCで構成されている。また入出力パネルは、FTIRパネル(30cm四方)、背面投影スクリーン、および感圧センサで構成される(図3)。感圧センサの計測値はマイコンボードで集約されたのちに、制御用PCに提供される。表1に使用した機材の情報を示す。なお、OpenCV3.1で提供されているT-API(Transparent API)を用いてCPUとGPUを透過的に利用した高速計算を行わない、OpenGLによる高速な画像描画出力を行っている。

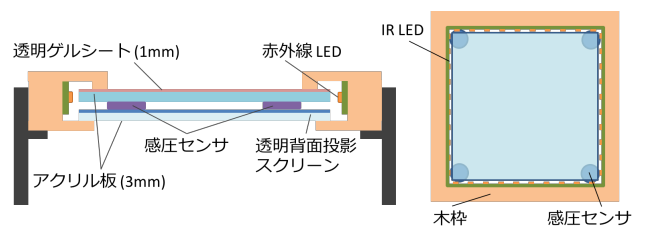


図3 入出力パネル構成図

表1 開発・実行環境

| 装置, ソフトウェア | 製品名, バージョン |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|
| RGB/赤外線カメラ | PointGrey Flea3 FL3-U3-13S2CS/M |
| 赤外線フィルタ | 富士フィルム IR78 |
| カメラ SDK | PointGrey FlyCapture2.9.3.43 |
| 短焦点プロジェクタ | BenQ MW820ST |
| 画像処理ライブラリ | OpenCV3.1.0, OpenGL freeglut3.0.0 |
| 制御用 PC | CPU: Intel Core i7-3600, メモリ 16.0GB GPU: Radeon R9 370, OS: Windows 10 |
| マイコンボード | Arduino UNO |

4. システム性能評価

4.1 ペイントアプリケーション処理速度

取得した形状、色、圧力を反映した描画結果画像を作成するペイントアプリケーションを実装した。図4は赤外線カメラ画像取得から描画結果画像が作成されるまでの流れと、それぞれにかかる平均処理時間を示している。赤外線画像取得から描画結果画像作成完了までにかかる時間は1フレームあたり約25msとなり、約40fpsの描画処理速度を達成した。なお、この描画処理速度はT-APIを通してGPUを利用した場合である。同様のアプリケーション内容をCPUのみで実行した場合、描画処理時間は1フレームあたり約144msとなり約7fpsとなった。主に、カメラからの赤外線画像およびカラー画像取得、画像の結合とサイズ調整の時間が多くを占めていることがわかる。

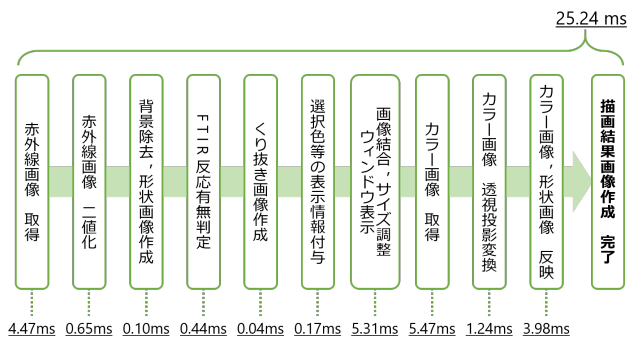


図4 描画結果作成部 各処理部分の速度

4.2 入力可能速度

入力された物体の接触形状と接触色を取得反映する描画処理速度において、接触形状が連続的に反映される描画を実現可能な入力速度を測定した。ここでの入力速度とは、ユーザが描画面上に物体を接地した状態で移動させる速度とする。赤外線画像取得（形状取得）から描画結果作成までの一連の処理時間よりも入力速度が速い場合、点描のように断続的な描画になる。同じ処理速度でもより接地面積の大きな物体による描画であるほど連続的な描画に見え、接地面積が小さければ断続的な描画になりやすい。今回は接地面積が広くならない円形の物体としてビニールテープを用いて測定する。ビニールテープを描画面上に接地し転がして線を描き、描画中の経過時間をms単位で表示しながら15cm分描画するまで計測する。その線が、形状的な要因による場合を除いて、途切れずに描画されることを連続的な描画とする。このような計測の結果、接触形状取得反映においては約18cm/秒程度までの速度で物体を移動すれば、連続的な描画がされることを確認した。

接触色取得反映における投影光の影響を受けない描画の実現には、形状取得からくり抜き画像作成投影、カラー画像取得までの処理時間が短いことが重要である。接触形状

取得時と同様に、投影光の影響を受けない描画が可能な入力速度を計測した。予め描かれた下地絵の上を白いビニールテープを描画面上に接地し15cm転がして線を描き、描き切るまでの時間を計測する。形状的な要因による場合を除いて、下地絵の上から白が描画され色が見えなくなった場合を、投影光の影響を受けない接触色取得反映とする。形状取得からくり抜き画像作成投影、カラー画像取得までの処理時間よりも入力速度が速い場合、くり抜き画像投影が描画動作に追い付かず下地絵の色が残る。計測の結果、約4cm/秒程度の移動速度であれば投影光の影響を受けない描画が可能であると確認された。

4.3 接触形状の分解能

本システムで実現した接触形状取得の分解能として、描画面に接触する物体のうち形状取得できる最小の大きさを計測した。まず、赤外線カメラ取得画像からの1画素が表す大きさを求めた。描画面上で距離が既知の物体を置いて赤外線画像を取得したのち、視認によって両端に点を描画し2点間の画素数と既知の距離を比較する。2点を描画した画像を10枚用意し、算出した結果の平均を取った結果、赤外線カメラ画像における計測値は約0.343mm/pixelとなった。さらに、直径約2mmの筆の柄、0.5mmと0.3mmのシャープペンシルの芯を用いて線を描画した様子を観察した結果、最も細いシャープペンシルの芯(0.3mm)でも線の描画が確認できた。同物体において点描画によって検出された画素数が2であったことや、上記の計測値に近い細さであることから、直径0.3mmの物体による接触が検出可能な大きさとしてほぼ限界値といえる。

4.4 接触色取得性能

接触色取得機能により取得された色を、実際の色と比較し評価する。評価には対象物体の色が理論的に既知である必要がある。よってPCCS201系に基づいた新配色カード199a[16]を用いる。PCCSの色をRGB値に近似した値[17]を理想値とする。描画面にカードを接触させ、くり抜き画像投影を経て取得・描画された画像から対象領域を切り出し、その平均RGB値を取得色とする。PCCSのv1~24のカードを接触色として描画し、RGBそれぞれ値において理想値と実測値を比較した。

計測と比較の結果、濃い色は誤差が大きくなる傾向があった。これは色が濃いほど光を吸収しやすいことから色調整画像の輝度が影響しにくくなり、結果的にRGBカメラに映る色が暗くなり、実測値が理想値よりも低くなったと考えられる。一方、色自体が明るいものは光を反射しやすいため、投影光の影響を受けて実測値が理想値より大きな値を検出しやすいと考えられる。より実際に近い色を取得するためには、色調整画像を作成する際にプロジェクタ投影光の影響を厳密に考慮する必要がある。

5. ユーザ評価実験

5.1 実験内容

物体を使う創作というコンセプトの妥当性と、システム機能の創作への有効性評価のため、ユーザ評価実験を行った。2.3節で述べた創造性評価に関する研究をふまえ、UnicrePaint が提供し支援する創造性を、1) 創作における楽しさの提供、2) 探索行動、および試行錯誤の促進、3) 入力に用いられる物体の多様性、4) 多様な入力方法の試行・実行の促進、5) 創作中に感じられる表現方法の自由度、の5点で定義する。

20代の学生および社会人15名(女性12名, 男性3名)が物体を用いて作画した。被験者は実験者が用意した物体、室内にある物体、および被験者自身が所有する物体を自由に使用した。事前に用意した物体は、身の回りがあると想定される「生活空間にある物体」、「事務的な空間にある物体」、「インテリアに用いる物体」の3属性35種類である。また、被験者は圧力反映方法に関して事前に3.1節で述べた8通りの描画反映から一つを選択した。創作の過程はビデオ記録し、インタビュー回答とともに分析を行う。

5.2 実験結果

自由創作において被験者が使用した物体は、実験者が用意した物や被験者の所持品を含め、全体で94個の物体に上った。このうち物体の色や模様が使われたのは76個だった。使用された物体の一部を表2に示す。実際に自由創作の時間中に描画に用いられた物体数は一人当たり6~36個、描画には用いなかった物を含め探索の過程で被験者が触れた物体数は7~42個、描画に用いる物体を持ち替えた回数は一人当たり12~48回であった。

表2 自由創作に用いられた物体の例 ((a):使用人数, (b):物体)

| (a) | (b) |
|-----|-----------------------------|
| 11 | 筆, 指・手のひら |
| 8 | 木工用ボンド, ボール, マスキングテープ |
| 7 | ラッピングバッグ, スポンジ |
| 6 | ポテトチップスの箱, ラフランス, 赤ペン, コップ |
| 5 | ビニールテープ, 消しゴム, リンゴ, 付箋 |
| 4 | ぬいぐるみ, しゃもじ, クッキーの型抜き, オレンジ |

実験後のインタビューでは、物体を用いた創作の印象や物体探索で重要視したこと、機能に対する評価などを調査した。「物体を用いた創作を楽しめたか(5点満点)」に対しては、被験者全員が4以上で「楽しかった」と答えた。楽しさの理由としては次のものが挙げられた。

- A1 物体による描画結果を予想しながら試すという試行錯誤が楽しかった。(7人)
- A2 模様が接触部分に現れる面白みを感じた。(5人)
- A3 普段絵を描く道具でない物で絵を描くという意外性があった。(4人)

A4 自分の操作が反映されている感覚が得られた。(3人)
 質問「物体探索の際に何を重視していたか」に対して、「物体の形状を重視していた」と答えたのが3人、「色・模様を重視していた」のが6人、「形状と色の両方に着目していた」としたのが6人であった。

また、入力に用いる物体を探し選ぶ過程が創作に及ぼした影響についての質問に対する回答、および創作手順の分析から、絵のモチーフの発想や作品の創作過程には大きく次の3つのタイプに分類された。

- T1 描く前に決めたモチーフに沿って絵を描く(5人)
- T2 探索や試行の過程で浮かんだモチーフを描く(6人)
- T3 明確なモチーフを決めず興味をひく物体を次々試しながら作品にする(4人)

被験者が自由創作で作成した画像の一部を図5示す。このうち上記T1の被験者の作品は左列に、T2の被験者の作品を中央列に、T3の被験者の作品を右列に示す。



図5 自由創作画像(左列:T1, 中央列:T2, 右列:T3)

6. 考察

6.1 物体を用いた創作について

6.1.1 楽しさの要因

物体を用いた創作における楽しさの理由として、物体を用いることによる試行錯誤の体験、押し付けた物体の模様や絵柄がそのまま表れるという実世界にない体験への驚き、絵を描く道具ではない物体で絵を描く新鮮さや意外性、自分自身の操作が反映される実感といった要素の影響がインタビュー回答からわかる。試行錯誤の様子は、創作中の持ち替え回数や接触した物体数からも見て取れる。また、色・模様の取得反映が楽しさ提供へ大きな効果があると示されている。その他、接触場所への描画表示や圧力の濃淡反映による操作感提供の重要性が見て取れる。

6.1.2 多様な入力の実現

自由創作においては表2からわかるように多様な物体が用いられた。大半の被験者が半数以上の物体で物体色を用いたり、色違いの物体を複数選ぶなど、物体色取得反映によって創作に用いる物体の多様性が実現されたといえる。

物体を用いた入力動作の多様さも観察できた。例えばボールを用いる時、上から描画面上に落としたり、転がしたり、手で押さえながら転がすといった複数の動作がなされた。図6のように物体形状の特徴を活かしたり、様々な角度から入力に用いる他、図7に示すように物体を道具のように用いるなど多様な方法が観察された。物体を入力に用いることが創作において多様な入力動作を促し、入力方法の幅を広げたことから試行錯誤を促進したと考えられる。

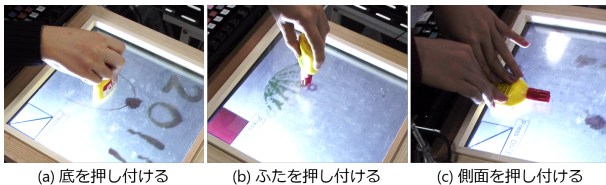


図6 同一物体による様々な入力動作

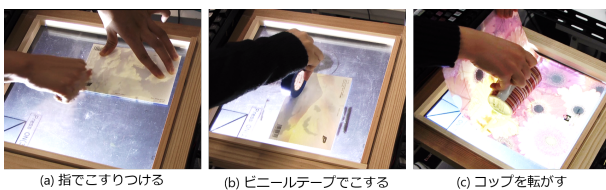


図7 薄い物体の多様な押し付け方

6.1.3 物体探索の影響

物体探索の過程は、物体を手にとって吟味し試行する被験者の様子が確認されたことに加え、T1からT3に分類される創作手順からモチーフや作品への影響が見られる。T1の被験者はモチーフに沿いながら構図や色、描き方は物体から発想を得ていた。T2の被験者は偶然うまくいった描画を活かしたり、描きやすい物体の色でモチーフを決める様子が観察された。T3は色を重視して探索していた傾向があり、絵や模様から興味を引く物体を試し積み重ねて制作していた。「物体からインスピレーションを受けた」と言及する被験者もあり、物体を創作に用いることによる探索の促進や、モチーフや発想への影響が示唆される。

6.1.4 物体で描いている感覚の提供

自由創作後のインタビューにおいて、「物体で描いている感覚」があったかという質問に対して、多くの被験者が「実感があった」と答えた。その理由として被験者からは物体の凹凸感や質感、見た目と同じ色や模様がそのまま反映されることの影響が大きいという意見が多かった。圧力が濃淡に反映されることで自分が描画しているという実感につながるといった被験者もいた。これによって物体の形状と色、接触圧力の3つの要素が同時に取得反映されることが示されている。これらが接触した場所に描画反映されることも挙げられた。場所によって色が異なるリングの転がし方によって反映される形や色が変わるなど、同じ物体でも入力方法やユーザの操作によって描画結果がその都度異なることが、実感に影響しているとわかる。ある被験者は即時的な物体特徴反映の必要性について、「たとえ入力に物

体を使ったとしても、現れる形状が予め設定されたものであれば、物体を使っているという実感にはつながらない」と答えた。単一デバイスによる入力において「色を採る」「キャンバスに触れる」という2つの工程を必要とするI/O Brush[3]と比べ、手に持った物体をその場で用いることで即時的で複雑な要素が絡んだ描画ができることが、「物体を使っている」という強い感覚を提供したといえる。これに加えて、「事前に登録するのではなく手に持った物体を使うことで、創作に何を使っても良いという幅広い自由度を感じた」という意見があった。物体の特徴や圧力がリアルタイムに反映されることが重要であることを示している。

以上のことから、「物体で描いている感覚」提供には物体の形状、色・模様、描画面上にかかる力の3つの要素が揃うことが必要だといえる。これらのリアルタイムな取得と、入力箇所と同一の場所へのフィードバックという本システムの機構が有効であることが示された。よって単一の実世界情報の反映よりも、本システムのような複数の情報の取得、反映がユーザに対して実世界を体感しながら創作を楽しめる体験を提供できると考える。また、複数要素の描画反映が本システムがユーザに提供する創造性としての「表現の自由度」を実現したといえる。

6.1.5 創造性支援の実現

2.3節で定義した本システムが支援する創造性について、ユーザ評価実験の結果と6.1.1節から6.1.4節までの考察から分析した。その結果、UnicrePaintによる創作について次のことがわかった。

- 物体を用いる創作はユーザに楽しさを提供できた。
- 創作においてユーザは探索や試行を体験できた。
- 入力に用いられる物体の多様性が確認された。
- 多様な入力方法が試され、また描画に用いられた。
- 創作における自由度の高い表現方法を提供した。

これらから、本システムによる創作は定義された創造性を支援し得る創作体験をユーザに提供できると示されている。

6.2 システム機能の性能について

6.2.1 接触形状取得反映機能

ユーザ評価実験において被験者にイメージ通りの形状反映がされた物体について尋ねたところ、凹凸がはっきりしている物体、接地部分が密着しやすい素材の物体、または接地面積が小さく密着しやすい物体が挙げられた。逆にイメージ通りの形状反映がされなかった物体は、微妙な歪みや反りがある物体、空気を含みやすく密着しにくい物体、動作によって接触形状が変わりやすい物体である傾向があった。これは物体の形状や材質による密着のしやすさが影響していることが考えられる。本研究で採用しているFTIR方式は、パネルに物体が密着することで接触部分を取得できる。そのため、密着しづらいスポンジやぬいぐるみなど空気を含みやすい物体は、接触部分を取得しにくい。対し

て、圧力がかかりやすい接地面積の小さい物体や薄くて押し付けやすい物体は密着しやすいため、イメージ通りの反映がされた物体に挙げられたと考えられる。

6.2.2 接触色取得反映機能

多くの被験者が物体の模様や絵柄が反映される様子を楽しんでいたことから、接触色の取得反映機能は有効に作用したといえる。一方で、実験時インタビューにてイメージ通りの色反映がされなかった物体として挙げられた物体の中には、淡く薄い色合いの物体、色が濃く黒っぽい物体が多く含まれていた。淡く彩度の低い色 (PCCS における ltg や p+) (図 8(a)) は彩度の高い同色相の色 (図 8(b)) と見比べると、取得画素の色味にばらつきが見られる。原因としてはプロジェクタ投影時に起こるちらつきが、くり抜き部分において画素単位で表れている可能性があり、本来の色が視認しづらかったと考えられる。これはより解像度の高いプロジェクタやカメラにより解消すると思われる。

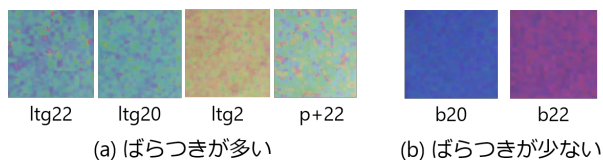


図 8 取得画素における色のばらつき

また、同じ場所に何度も描画すると色が黒くなると言及した被験者がいた。これは 4.1 節で述べた処理速度が関係する。現状の接触色取得において投影光の影響を受けないためには入力速度が 4cm/秒以下である必要がある。これを超えると投影光が重なった部分が取得描画されてしまい、実際の外見と異なる色が描画反映され、色の濃い物体を用いた場合段々黒くなってきてしまう。より柔軟な入力に対応するためには、プロジェクタ出力の速度を含め接触色取得および反映の処理速度のさらなる高速化が望まれる。

6.2.3 濃淡反映機能

圧力による濃淡反映に関しては、「イメージ通りの自然な反映だった」という被験者が大半であった。一方でより細かい反応や接触中最も強い圧力のみでの反映など、繊細な反映を求める声もあった。被験者の中には創作において、望む色を反映するために圧力による濃淡反映を試し利用した人もいたことから、繊細な圧力反映による入力の多様性への効果が期待できる。また、圧力が強いほど色が薄くなる反映種類を選んだ被験者の中には、逆の効果を錯覚している場合があった。これは描画動作中のフレーム毎に圧力を取得しその度に濃淡を変更するため、強い接触の後パネルから物体が離れる瞬間の弱い圧力反映が上書きされ、強い圧力の反映が見えにくいためである。また、描画面全体にかかる圧力を取得するため小さな物体の入力時に強い圧力と認識されない場合が多い。繊細な圧力取得を可能にし、ユーザにとってより自然な濃淡反映の実現が課題である。

6.2.4 軽度接触形状取得の有用性

「軽度接触形状取得と反映によってイメージ通りの形状が反映されたか」という質問に対して「自分で切り替えて使用したい」という意見が聞かれた。これは、細かい線を描こうとする時に広い面積の形状が反映されるなど、意図しないタイミングで機能したことへの戸惑いが理由であった。一方で「望ましい形状で反映された」という声もあるため、軽度接触形状の取得反映は形状反映の補助的役割として貢献したといえる。よって、軽度接触形状取得反映機能は常時起動するのではなく、ユーザ操作によって切り替え可能とすることでより効果的に用いられると考えられる。

6.2.5 入出力機構について

入出力機構において描画フィードバック位置のずれを感じた被験者はほとんどいなかったため、現状の入出力パネル構成は有用であるといえる。入出力パネルの表面素材についてはすべりにくさを感じた被験者が多く、創作において線が引きにくいという制約の要因にもなった。一方で物体を押し付けるには適度な軟らかさと粘性であるという意見もあり、滑らかになぞる動作と押し付ける動作を両立する表面素材によって表現方法の広がり期待できる。

背面投影による描画フィードバックについて、色が見えづらかったり暗く見えるという意見がああった。これは接触部分の色や模様を取得するため透明に近いスクリーンを用いることによる。描画結果をモニターで確認する被験者もあり、より鮮明なフィードバックの実現のためにプロジェクタや描画面角度など構成の再検討が有効と考える。

7. 課題と展望

7.1 物体の特徴取得精度の向上

接触形状取得について、本システムが採用している FTIR 方式はパネルに物体が密着することで接触部分を取得できる。そのため、空気を含む物体は密着しづらく接触部分を取得しにくい。これは軽度接触形状取得の精度向上によってある程度の解決が期待される。一方で、FTIR 方式では赤外線を用いるため黒色を含む物体や透明な物体による接触を取得できない。被験者からは黒い物体が使用できればなお良いという声もあった。よって、物体の材質によって表現の自由度を狭めることがないよう、FTIR 方式では検出できない物体への対応が課題として挙げられる。

接触色取得については、淡く薄い色合いの物体や色が濃く黒っぽい物体について、より実際の外見に近い色取得が望まれる。淡い色のものはプロジェクタの投影光によって光ってしまい、全体的に白っぽくなってしまふことが原因と考えられる。一方、色が濃い物体や黒っぽい物体は赤外線を吸収してしまい、形状取得反映されないことから色が出ず、ユーザには色が反映されていないと感じられる、と考えられる。これらをより詳細に考慮した色調整画像の検討が課題である。また 6.2.2 節で述べた通り、より多様な入力に対応するためには接触色取得の高速化が必要である。

7.2 繊細な圧力取得反映と接触検知精度の向上

6.2.3節で挙げたような、実際とは異なる誤った解釈を招く濃淡反映について改善する必要がある。これは描画結果作成における濃淡反映部分の見直しと、より繊細な圧力取得により改善できると考える。またこれに伴い、より細かな粒度の濃淡反映が有用であると考えられる。

また、本システムでは平面への接触検知を行ったが、描画動作におけるその精度は適合率0.407であった。感圧センサ値が小さい区間における接触が検知できていないことから、安定して精密な変動を検出できる手法の検討が必要である。一方、画像では確認できない接触を検知している部分も確認できたため、感圧センサによる接触検知は今後もその有用性を期待できるといえる。

7.3 UnicrePaint の可能性

本システムが実現した物体を用いた創作の有用性が期待される場面として、子ども向けの教育現場が挙げられる。本システムでの創作では物体を探索する過程があることから、身の回りの環境の理解や認識に効果的であると思われる。また、物体を用いることによる試行錯誤の体験は、物事に対して工夫したり、望む結果のために色々な手段を試してみる、という能動的に考える経験を提供する創作として有用であるといえる。その他、本システムによる創作は筆やペンで絵を描くような手先の器用さを必要としないため、力の弱い人でも創作を楽しめることから、高齢者施設などにおけるリハビリテーションなどへの応用も考えられる。この根底には「創作にどんな物体を使ってもよい」という本システムの特徴が見て取れる。創作にどんな物体を用いてもよい、という特徴は作品に画像以上の意味合いを持たせることができる。ユーザ評価実験の自由創作ではリングを用いてリングの絵を描く、という観念的なテーマで作品を制作した被験者がいた。ユーザが物体に意味を感じ選んで用いることで、物体の持つ概念や思い入れを作品に込めるといった創造性の広がり支援すると考える。

展望として、デジタルツールの拡充によるさらなる表現の自由度拡大が期待される。本システムではデジタルペイントの利点を活かすため「戻る」「描画色変更」などのツールを実装し、評価実験において効果的に用いられた。また、作品画像がデジタルデータであることを活かした機能の付与によって、作品を制作した後に様々なコンテンツへの活用も期待される。さらに、創作過程の記録と要約により体験そのもののコンテンツ化も考えられる。

8. おわりに

本論文では描画面に接触した実物体の形状、色・模様、入力時に加わった圧力を描画に反映するデジタルペイントシステム UnicrePaint の実現手法として、入力平面への接触物体の形状、色・模様の取得手法、および入力時の接触圧

の取得について示した。実現された本システムによる自由創作を行うユーザ評価実験により、UnicrePaintによる物体を用いた創作がユーザの創造性を支援し得る体験を提供できることが示された。また創造性支援に効果的であった「物体で描いている」感覚の提供には、ユーザが手に持っている物体の形状、色・模様の描画反映、入力にかかる圧力による濃淡反映のリアルタイムな実現といった UnicrePaint のシステム機能が有効であることが示唆された。本システムの展望として、形状や色取得精度の改善とデジタルツール拡充により、更に多様な表現方法の実現が期待される。

謝辞 本研究は中山隼雄科学技術文化財団の平成27年度研究助成を受けた。

参考文献

- [1] Follmer, S. and Ishii, H.: KidCAD: digitally remixing toys through tangible tools, *Proc. of CHI'12*, pp. 2401–2410.
- [2] Follmer, S., et al.: deForm: An interactive malleable surface for capturing 2.5 D arbitrary objects, tools and touch, *Proc. of UIST'11*, pp. 527–536.
- [3] Ryokai, K., et al.: I/O brush: drawing with everyday objects as ink, *Proc. of CHI'04*, pp. 303–310.
- [4] Han, J.: Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection, *Proc. of NICOGRAPH International*, pp. 115–118.
- [5] Ura, M.: A Framework of FTIR Table Pressure Sensing for Simulation of Art Performances, *Proc. of UIST'05*, pp. 118–123.
- [6] 浦: 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, 芸術科学会論文誌, pp. 58–67.
- [7] Weiss, M.: SLAP widgets: bridging the gap between virtual and physical controls on tabletops, *Proc. of CHI'09*, pp. 481–490.
- [8] Bränzel, A.: GravitySpace: tracking users and their poses in a smart room using a pressure-sensing floor, *Proc. of CHI'13*, pp. 725–734.
- [9] Hennecke, F.: Optical pressure sensing for tangible user interfaces, *Proc. of ITS'11*, pp. 45–48.
- [10] Vandoren, P., et al.: FluidPaint: an interactive digital painting system using real wet brushes, *Proc. of ITS'09*, pp. 53–56.
- [11] Cherry, E., et al.: Quantifying the creativity support of digital tools through the creativity support index, *Proc. of TOCHI'14*, Vol. 21, p. 21.
- [12] Kazi, R. H., et al.: SandCanvas: a multi-touch art medium inspired by sand animation, *Proc. of CHI'11*, pp.1283–1292.
- [13] Ryokai, K., et al.: Children's storytelling and programming with robotic characters, *Proc. of CSC'09*, pp.19–28.
- [14] 小坂, 藤波: 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, インタラクシオン 2016 予稿集, pp. 1016–1021.
- [15] 小坂, 藤波: 実物体の特徴ならびに接触圧を取得可能なデジタルペイントシステムによる創造的な描画体験の提供, インタラクシオン 2017 予稿集.
- [16] 日本色研事業株式会社 公式ホームページ, <http://www.sikiken.co.jp/home.html>.
- [17] 財団法人日本色彩研究所編, デジタル色彩マニュアル, 株式会社クレオ (2004).