

複合現実型描画システムにおける筆型対話デバイスの描画感の向上

戸田 梓^{*1} 大槻 麻衣^{*2} 柴田 史久^{*1} 木村 朝子^{*1}

Improving Tactile Feedback Model of BrushDevice for Virtual Painting

Azusa Toda ^{*1}, Mai Otsuki ^{*2}, Fumihisa Shibata ^{*1} and Asako Kimura ^{*1}

Abstract - Many digital painting systems have proposed, and its quality is improving. Graphics tablets are the widely used as input device with 2D display for these system. However, some users prefer direct manipulation to the indirect manipulation of a graphics tablet and want to see the moving of the brush tip while painting. Therefore, we have developed BrushDevice for realizing the feeling of real painting using tip bending and interactivity with real objects. On the other hand, this device is not appropriate for painting on virtual objects because the tip does not bend and the users can not feel the reaction and friction between the brush and the virtual painting target while painting on the target. Therefore, we had implemented new BrushDevice which has a visual and tactile feedback model to solve these problems. BrushDevice had represented tactile feedback depending on the level of pressure when the user paints on the target. In this paper, we propose the improved models that provide tactile feedback according to the materials of targets, the amount water in a brush, and the hardness of a brush. We also conducted experiments to confirm the usability of our proposed models.

Keywords: BrushDevice, ToolDevice, Mixed Reality, Painting, and Haptic Feedback

1. はじめに

我々はこれまでに、仮想物体を描画対象とした場合の穂先のしなり表現と反力を提示可能な筆型デバイスの開発を行い、立体形状の表面に直接、仮想の描画を行い、それを視認できる複合現実型描画システムを提案した [1][2] (図 1)。

コンピュータを用いた描画支援に関する研究は、これまでに多数行われている [3-7]。しかし、その多くはマウスやペンタブレットを入力デバイスとして使い、2D ディスプレイ上で描画作業を行うものであった。近年では、絵筆を模した入力デバイスの導入や触覚ディスプレイを利用することで、描画結果のみならず、描画感をもより現実に近づけようとする試みが行われている。

絵筆を模した入力デバイスの例として、I/OBrush[8]は、絵筆の中にカメラを内蔵した特殊な入力デバイスで液晶タブレットに描画を行うことで、直接筆で描く感覚を実現している。IntuPaint[9]は、穂先部を多数の光ファイバで構成した絵筆形状の入力デバイスを導入し、絵筆の触覚や描き味に挑戦している。ThermoPainter[10]は、本物の絵筆を温水に浸して熱画像として筆の動きを捉える描画システムであり、触覚や穂先のしなり具合は絵筆そのものである。しかし、これらの研究では、我々の先行研究 [11][12]同様、実体のない仮想物体に対して直接描画することは想定していない。

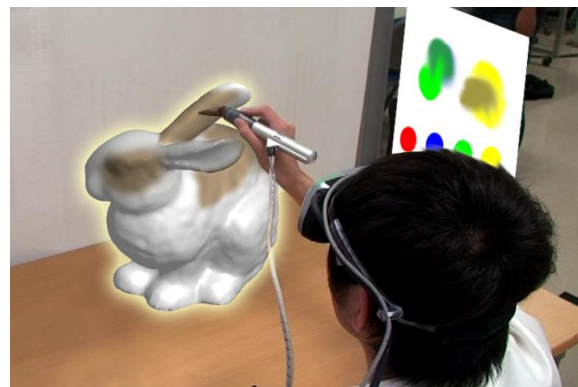


図 1 触覚提示機構を備えた複合現実型描画システム
Fig.1 Concept image of our system
with visual and tactile feedback mechanisms

一方、触覚ディスプレイを利用し、仮想物体に対して描画する例として、Foskey らの ArtNova[13]、Sandor らの Visuo-Haptic Systems[14]が挙げられる。これらは、PHANToM と呼ばれる触覚ディスプレイを用いて、VR/MR 空間における描画時の筆の触感を再現している。PHANToM は、モータ駆動のリンク機構によってペン型のインタフェース部の動きを制御する触覚ディスプレイで、ユーザへの詳細な力触覚提示が可能となる。しかし、ユーザの動きが反力提示装置の可動範囲に制限されるため、描画対象が大きくなるに従って装置の規模が大きくなるという問題がある。

非拘束型の反力提示機構を有するデバイスとして、家室らの Pen de Touch[15][16]が挙げられる。これは、リンク機構を用いず、モータを使用することで把持部を稼働させ、連続的な力覚の提示を実現するポータブルな把持型デバイスを提案しており、高い力覚提示能力と使い勝

*1: 立命館大学大学院 情報理工学研究科

*2: 総合科学技術研究機構

*1: Graduate School of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University

*2: Research Organization of Science and Engineering

手の良さを両立している。仮想物体における触覚提示という点で同研究から学ぶところは多く、本研究でも、ユーザの動きを極力制限せず、様々な大きさ、形状の仮想物体に描画できる入力デバイスを目指す。しかし、Pen de Touch とは異なり、本研究が目指すのは仮想物体に「触れた」感覚を含めた「絵筆で描いている」感覚の実現であり、穂先の動きを制御するための手掛かりとしては仮想物体への接触に応じた触力覚だけでなく、穂先の動きを含めた描画感提示機構が必要となる。

先行研究[1][2]において開発した筆型デバイスには、描画方向と押しつけ量から描画感を表現することができる描画感提示機構が搭載されている。

本研究では、描画感のさらなる向上を目指し、絵筆に含まれた絵具の量や描画対象の材質に応じて描画中の触覚を変化させるといった、絵筆での描画特有の要素を考慮した描画感提示機構を提案する。また、提案した描画感提示機構の有用性の確認を目的とした評価実験を行う。

2. 複合現実型描画システム

2.1 システム構成

【ハードウェア】

仮想物体を描画対象とする MR 型描画システムを実現するハードウェア構成を図 2 に示す。

MR 空間管理・デバイス制御には、Windows XP OS, Intel Core i7-2600 CPU を搭載する PC を用いた。

MR 空間の映像提示に、両眼立体視が可能なビデオスルー型 HMD である Canon 社製 VH-2002 を用いた。HMD に搭載されたカメラからの映像は、ビデオキャプチャカードである ViewCast 社製 Osprey-440 を用いて PC へ取り込む。また、ビデオカードからの 2 出力を HMD の右目、左目ディスプレイの入力に用いる。

HMD、デバイスの位置姿勢推定には磁気ベースの 3 次元位置姿勢測定装置である Polhemus 社製 LIBERTY を用いる。トランスミッタを任意の位置に固定し、HMD、デバイスに取り付けられたレシーバで、トランスミッタとレシーバ間の相対的な位置姿勢を連続的に取得している。なお、PC との接続は USB 端子を介して行う。

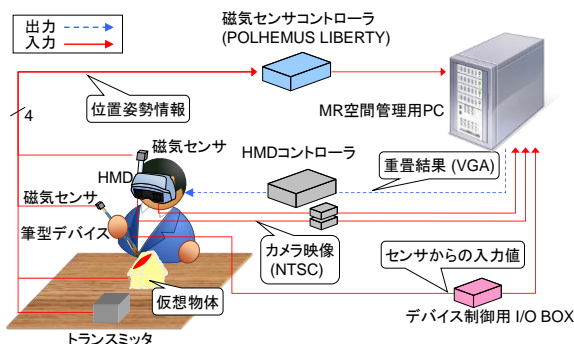


図 2 システム構成
Fig.2 System configuration

【ソフトウェア】

開発環境として言語に C++, グラフィックス API に OpenGL, GLUT (OpenGL Utility Toolkit) を用いて実装した。

次に MR 空間を実現する処理の流れについて述べる。MR 空間の生成のためには、まず PC 上で OpenGL を用いた仮想空間の構築・レンダリングを行う必要がある。本システムにおける MR 空間の提示には両眼立体視可能な HMD を用いるため、左右の視差を考慮した 2 つの視点からのレンダリング画像をそれぞれ生成する。また、レンダリング時のカメラ位置姿勢に、LIBERTY から得られた値を用いることで、HMD の位置姿勢に合わせたレンダリング画像をリアルタイムに生成する。

HMD カメラからの映像はビデオキャプチャカードを介し、DirectShow, DSVL (DirectShow Video Processing Library) を利用することで取得する。取得した映像を OpenGL 背景に配置した四角ポリゴンにテクスチャマッピングすることで、リアルタイム映像への CG の重畳描画を実現している。

2.2 筆型デバイス

HMD 同様、筆型デバイスの位置姿勢検出用に磁気センサを内蔵する。反力提示を行う把持部は、1 つの円筒状のパーツ (以降、シリンダと呼称) で構成する。また、穂先はしなりを表現するために、円柱状の樹脂パーツ 8 個を 3 本のワイヤで連結させた軸を内蔵する。アクチュエータには DC モータ (Maxon 社, RE10, 1.5 W, gear ratio = 4.7:1) を 3 機使用し、シリンダと穂先の軸を同時に制御する。筆型デバイスの構造と外観を図 3, 図 4 に

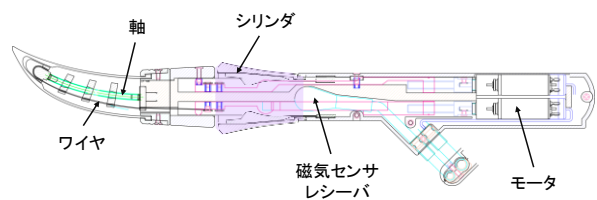


図 3 筆型デバイスの構造
Fig.3 Structure of BrushDevice



図 4 筆型デバイスの外観
Fig.4 Appearance of BrushDevice

示す.

2.3 描画感提示の基本モデル

2.3.1 設計指針

描画感提示機構を制御するために、本研究では実世界における絵筆による描画時の穂先のしなり方、絵筆から手指への力の加わり方を観察・分析し、物理的な穂先のしなりと手指に加わる触力覚の制御モデルを考案する。

まず、穂先のしなりに注目すると、穂先の向きは、絵筆の移動方向（描画方向）の逆向きとなり、穂先のしなり量は、描画面へ強く押しつけるほど大きくなる。つまり、絵筆を動かす方向と描画面への押しつけ量の2つの要素が影響している。同様に、描画中に手指に加わる力についても、穂先と描画面の摩擦力によって描画方向と逆向きの力が働く。また絵筆を描画面に強く押しつけるほど、絵筆が押し返される力や摩擦力も大きくなる。

このことから、描画中に描画対象から穂先に加わる力と絵筆を通じて手に加わる力は、共通の要素によって生じており、これらの力は同じベクトルで表現できると考えられる。このベクトルを「反力ベクトル」と定義する。

2.3.2 反力ベクトルの方向推定

まず、筆型デバイスに取り付けた磁気センサの位置姿勢 $\mathbf{P}_{\text{sensor}}$ とデバイスの実測から得られるセンサから穂先の根本位置までの距離 l_{handle} 、穂先の長さ l_{tip} を基に穂先の根元位置 \mathbf{O} 、および先端位置 \mathbf{P}_{tip} を求めることができ

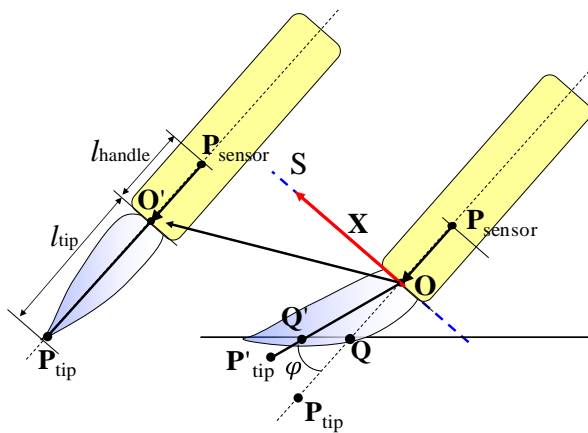


図 5 (a) 反力ベクトルの算出モデル
Fig.5 (a) Calculation model of reaction force vector

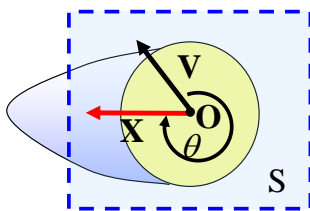


図 5 (b) デバイス軸と垂直な平面 S への反力ベクトルの写像
Fig.5 (b) Map of vector in vertical flat S to axis of BrushDevice

る（図 5 (a)）。この 2 点を結ぶ線分 \mathbf{OP}_{tip} と描画面を構成するポリゴンが交差している場合に、デバイスが描画対象に接触していると判定する。ただし、このままでは穂先のしなりによって生じる穂先の先端位置の移動が考慮されていない。そこで先行研究[4][5]にて構築した、押しつけ方に応じた穂先の動きのモデルを利用し、 \mathbf{P}_{tip} から \mathbf{P}'_{tip} を求める。その結果から穂先の動きを考慮した描画面点 \mathbf{Q}' を算出することで、この問題を解決する。

次に、 \mathbf{O} から前フレームの穂先の根元位置 \mathbf{O}' へ向かうベクトル \mathbf{OO}' の向きを、デバイスの軸となる $\mathbf{OP}_{\text{sensor}}$ と垂直である平面 S 上に射影すると、反力ベクトル \mathbf{X} の方向が求まる（図 5 (b)）。平面 S 上における基準ベクトル \mathbf{V} と \mathbf{X} のなす角度 θ が、穂先のしなり方向となる。

2.3.3 反力ベクトルの大きさ推定

線分 \mathbf{OP}_{tip} （穂先がしなっている場合は $\mathbf{OP}'_{\text{tip}}$ ）が描画対象のポリゴンと交差しているとき、線分とそのポリゴンを含む平面との交点 \mathbf{Q} （穂先がしなっている場合は \mathbf{Q}' ）を求め、 \mathbf{QO} （穂先がしなっている場合は $\mathbf{Q'O}$ ）の距離を算出する。実世界での描画では、強く押しつけるほどこの描画位置と絵筆の根本位置の距離が小さくなり、穂先のしなり量や絵筆から手指への力が大きくなる。このことから、反力ベクトルの大きさ w は次式で算出できる。

$$w = \frac{l_{\text{tip}} - |\mathbf{OQ}|}{l_{\text{tip}}} \times \alpha \quad (2.1)$$

ここで、 α は反力機構およびアクチュエータの種類によって異なる定数となる。また、この時の穂先の傾き φ は以下の式により算出できる。穂先の最大しなり角度を φ_{MAX} とする。

$$\varphi = \frac{w}{\alpha} \varphi_{\text{MAX}} \quad (2.2)$$

これらの処理を適用することにより、描画対象への押しつけ量や方向に応じた反力の提示を行うことができる。

3. 描画感提示の拡張モデル

3.1 描画感提示の基本モデルの拡張

前述の描画感提示の基本モデルは、描画方向と押しつけ量から描画感を表現するモデルである。本章では、描画方向や押しつけ量だけでなく、穂先の硬さや水分量、描画対象の材質に応じた描画感を表現するために構築した描画感提示の拡張モデルである「摩擦力の変化モデル」「穂先の撥ねモデル」について述べる。

3.2 摩擦力の変化モデル

以下の 4 項目のパラメータを用いて摩擦力の変化を表現するモデルである。

(1) 描画の速さ

描画の速さが遅いほど摩擦力の変化を感じやすい。

(2) 絵筆の押しつけ量

絵筆の押しつけ量が大きいほど摩擦力は大きい。

(3) 穂先の水分量

穂先の水分量が少ないほど摩擦力は大きい。

(4) 描画対象の材質

摩擦力の大きさと穂先の水分の吸収量が材質によって異なり、水分量が少なくなると特に材質の違いが分かりやすい。

摩擦は擦れあうもの同士の細かな凹凸の引っかかりによって生じる。本システムでは描画対象と絵筆の表面が、凹凸になっていると考え摩擦を表現する(図6)。図7に示すように凹凸に引っかかっているとき物体は摩擦力を受けているが、引っかかりが外れた瞬間は摩擦力を受けていない。摩擦力を最大に受けている場合の摩擦力 F は滑りにくさを表す摩擦係数 μ と垂直抗力 N から式(3.1)で求めることができる

$$F = \mu N \quad (3.1)$$

式(3.1)が垂直抗力 N におけるその材質の取りうる最大の摩擦力であるとする、最小の摩擦力 F' は以下の式で表現できる(式(3.2))。なお、 ε は摩擦力が最小となる場合の、接触面積に対する非接触面積の割合であり、 $0 < \varepsilon \leq 1$ の値を取るものとする。

$$F' = (1.0 - \varepsilon) \mu N \quad (3.2)$$

本システムでは、筆型デバイスのシリンダ部分を細かく動かし、振動させることによりこの触感を表現する。この振動幅は引っかかりが外れる前後での力のかかり方の差であるので、振動幅 f は次式より求められる(β は定数)。

$$f = (F - F') \beta \quad (3.3)$$

振動間隔は凹凸の間隔であるので、描画速度によって変化する。すなわち、(1) 描画の速さに応じた摩擦の変化が表現できる。

(2) の絵筆の押しつけ量も摩擦の変化に影響する。式(3.1), (3.2) より、摩擦力 F , F' は垂直抗力 N の増加に伴い線形に大きくなる。絵筆での描画において、垂直抗力は絵筆の押しつけ量の大きさと考えられる。また、本描画システムでは、押しつけ量の大きさを 2.3.3 項で述べた反力ベクトルの大きさ w で表している。よって、押しつけ量を考慮した場合の摩擦力 F , F' はそれぞれ式(3.4), (3.5) で示される。これを式(3.3)に当てはめることで振動幅が算出できる。

$$F = \mu w \quad (3.4)$$

$$F' = (1.0 - \varepsilon) \mu w \quad (3.5)$$

次に、(3) 穂先の水分量が摩擦係数に与える影響について

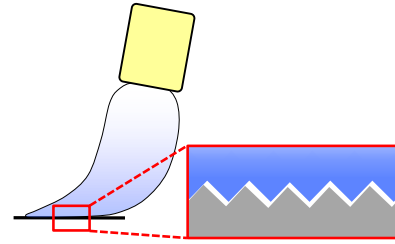


図6 描画対象と絵筆の表面
Fig.6 Surface of a drawing object and a brush

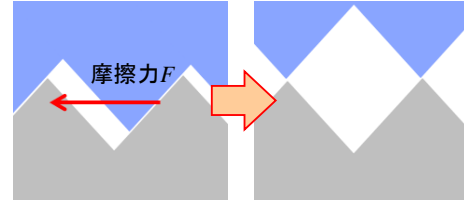


図7 描画対象の凹凸と絵筆が接触している場合と接触が外れた場合

Fig.7 Cases when a brush touches a drawing object and when it doesn't touch.

て検討する。穂先が水分を多く含んでいるほどなめらかに筆を動かせることから、穂先の水分量が多い時に摩擦係数は小さくなると考えられる。そこで、穂先が乾いた状態の時に摩擦力が最大になると考え、この最大の時の摩擦係数 μ に現在の穂先の水分量 v_n による重み関数 $g(v_n)$ をかけることで水分量に応じた摩擦力を求める。また、穂先の水分量が最大の時には、摩擦が全くないわけではないが、すべての材質において同じような触感が得られることから、すべての要素に共通する最小の摩擦係数 μ_{\min} が存在すると考えられる。以上のことから、式(3.2)より穂先の水分量に応じた摩擦係数 μ' は

$$\mu' = (\mu - \mu_{\min}) g(v) + \mu_{\min} \quad (3.6)$$

$$g(v_n) = 1 - (v_n / V_{\text{MAX}}) \quad (3.7)$$

により求められ、これを式(3.4), (3.5)の μ に代入することで振動幅が算出できる。 $g(v)$ は式(3.7)であり、 V_{MAX} は水分量の最大値とする。式(3.6)を用いて穂先の水分量に応じた摩擦係数を決定することにより摩擦力 F の変化を実現する。

実世界ではこれに加えて、(4) 材質ごとに吸水率が存在する。材質の吸水率を考慮する場合の n フレーム目の穂先の水分量 v_n は

$$v_n = v_{n-1} - \frac{w_n}{W_{\text{MAX}} \times w_{\text{abs}}} \quad (3.8)$$

により求められる。 w_n は n フレーム目の絵筆の押しつけ量、 w_{max} は押しつけ量の最大値であり、 w_{abs} は材質の吸水率を表している。

吸水率自体は摩擦力に関係しないが、穂先の水分量が低下することで触感が変化するため、掠れやすさとして

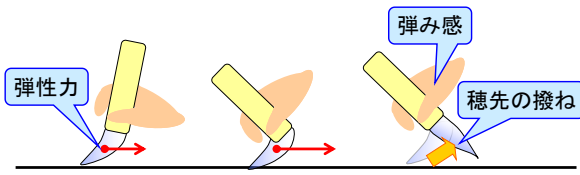


図8 描画感提示モデルと描画面の傾きとの関係
Fig.8 Relation between proposed model and the slope of a drawing surface

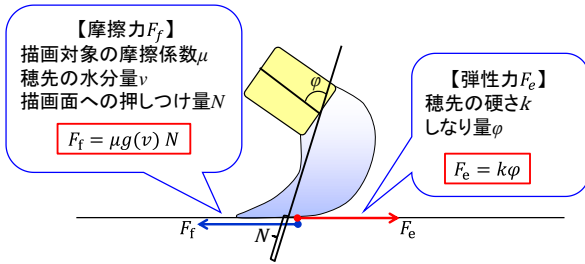


図9 描画感提示モデルと描画面の傾きとの関係
Fig.9 Relation between proposed model and the slope of a drawing surface

この要素を導入することで、実世界に則した摩擦力の変化を実現する。

3.3 穂先の撥ねモデル

絵筆を描画面に強く押しつけ、穂先をしならせたときの穂先の撥ねを表現するモデルである。穂先の撥ねは、穂先を強くしならせた際に起こり、同時に手に弾力を感じる(図8)。しかし、これはどのような絵筆でも同様に起こるものではなく、穂先の柔らかい絵筆に関しては穂先の撥ねが起こりにくいといえる。これは穂先がしなった状態に、穂先の硬さとしなり具合に応じて生じる「元に戻ろうとする力(=弾性力)」によって、撥ねが引き起こされるためだと考えられる。以上のことから、穂先の撥ねは、以下の式により求められる弾性力 F_e によって制御される。

$$F_e = k\phi \quad (3.9)$$

ここで、 k は穂先の硬さ、 ϕ は穂先のしなり角度である。しかし、穂先がしなっている状態に関わらず、穂先は一定以上しなるまでは撥ねずにしなり状態を保つ。これは、穂先に弾性力と同時に描画面との摩擦力が働いているためだと考えられる。このことから、穂先にかかる摩擦力を F_f とすると、穂先のしなっている状態は

$$F_f = F_e \quad (3.10)$$

と表現することができる(図9)。また、 F_f は摩擦力であることから、描画対象の摩擦係数 μ 、および押しつけ量 N を用いて式(3.4)より求められる。しかし3.2項で述べたとおり、絵筆による描画では、摩擦力は穂先の水分量の影響を受ける(式(3.8))。ここで、穂先を強くしならせることによって撥ねが発生することから、穂先のしなり

量が大きくなることが発生の条件に関係しているといえる。具体的には式(3.8)より、弾性力が摩擦力を上回ることが、穂先の撥ねの発生条件と考えられる。よって、式(3.8)～(3.10)より

$$\mu'g(v)N \leq k\phi \quad (3.11)$$

となる。ここで穂先の撥ねが発生してからを考える。穂先の撥ねが発生すると、穂先は平常状態へ遷移するため描画面をスライドしていくが、ここで穂先のしなり量は徐々に小さくなっていく。しなり量が小さくなれば、再度摩擦力と弾性力が釣り合うと考えられるが、実世界では穂先の撥ねは止まることなく、最後まで一気に撥ねる。これは穂先が描画面をスライドし始めたことによって、穂先に加わる摩擦力が静止摩擦から動摩擦に切り替わり、急激に小さくなるためだと考えられる。そのため、静止摩擦係数を μ_s 、動摩擦係数を μ_d とすると、穂先の撥ね発生前の発生条件は式(3.11)より、

$$\mu_s g(v)N \leq k\phi \quad (3.12)$$

であるが、穂先の撥ねの継続条件としては

$$\mu_d g(v)N \leq k\phi \quad (3.13)$$

であると考えられる。以上のことから、穂先の撥ねが発生した状態では弾性力 F_e が加わっており、穂先の撥ね方向に触感を感じることから、弾力もこの力に起因するものであると考えられる。そこで F_e に応じた触覚提示を行うことで、穂先の撥ねによる弾力を表現できると考えられる。

以上のことから、式(3.13)を発生条件として、 F_e を反力ベクトルとすることにより、描画感提示の基本モデルに穂先の撥ねモデルを適用することができる。

4. 描画感提示機構の評価

4.1 実験の概要

3章で述べた描画感提示の基本モデル、描画感提示の拡張モデル(摩擦力の変化モデル、穂先の撥ねモデル)の有用性を確認するための評価実験を行った。被験者数は各実験10名ずつで、各実験で被験者の重複はないものとする。被験者には、図4と同様の持ち方で筆型デバイスを持たせる。

4.2 実験1: 描画感提示の基本モデル

図4の筆型デバイスに描画感提示の基本モデルを適用し、描画感が向上したかを確認する。被験者には、図10に示す4種類の操作((a)描画対象への押しつけ、(b)直線の描画、(c)曲線の描画、(d)エッジを跨ぐ描画)を描画感提示の基本モデル適用前と適用後で体験させ、適用前後の描画感を比較させる。試行は被験者が納得するまで繰り返させる(以降の実験についても同様)。評価方法は、描画感提示の基本モデル適用前の描画感を基準(=4)

として、適用後の描画感を7段階（1: 低, 7: 高）で評価させる。各被験者で描画感提示の基本モデル適用前と適用後の体験順序はランダムとし、さらに4種類の操作も体験順序をランダムとする。

被験者10名の4種類の操作全体の評価の平均とそれぞれの評価の平均を図11に示す。結果より、いずれの操作においても、描画感提示の基本モデルにより描画感が向上したことが分かった。その一方で、(a) 描画対象への押しつけ、(b) 直線の描画の評価が、全体の平均よりも低いという結果が得られた。(a) の評価が低い理由に関しては、筆型デバイスを描画面に押しつけていても、穂先が静止せず動いていたからであると被験者は回答した。これは、反力提示に遅延が生じた、もしくは位置姿勢センサの精度の問題で、筆型デバイスが動いている状態だとシステムが誤認識したためだと考えられる。(b) に関しては、曲線の描画では逐次描画方向に応じて穂先のしなり方向や反力提示方向が変化するのに対し、直線の描画は押しつけ量が変化しない限り触感が変化しない。実世界での描画では、描画対象の材質に応じたなぞり感により、押しつけ量が一定でも逐次触感が変化するため、違和感が生

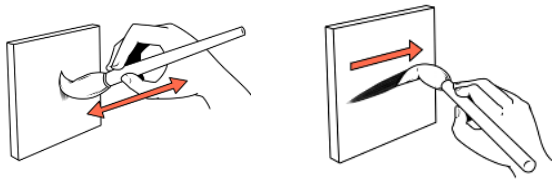


図10 (a) 押しつけ
Fig.10 (a) Press against a drawing object

図10 (b) 直線の描画
Fig.10 (b) Draw a line

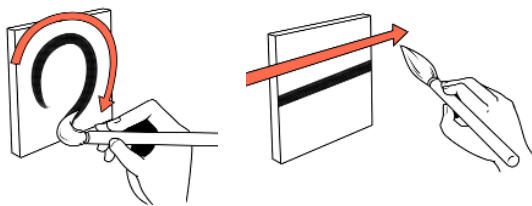


図10 (c) 曲線の描画
Fig.10 (c) Draw a curve

図10 (d) エッジを跨ぐ
Fig.10 (d) Draw stride over edges

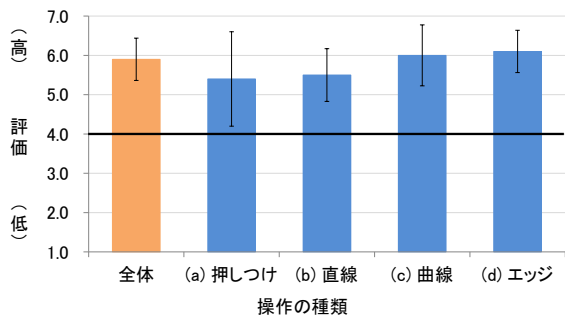


図11 実験1の結果
Fig.11 Result of experiment 1

じたのではないかと考えられる。

4.3 実験2：摩擦力の変化モデル

4.3.1 実験準備：摩擦係数・吸水率の測定

実験2-1, 2-2では描画対象の材質として、キャンバス生地、上質紙、陶器の3種類を用意する。これらの材質の摩擦係数と吸水率には実際に計測した値を用いる。その計測方法を以下に述べる。

(a) 摩擦係数

摩擦係数には静止摩擦係数と動摩擦係数があるが、本システムでは絵筆が描画対象をなぞっている最中の摩擦を表現するため、動摩擦係数の計測を行う。また、材質は乾いた状態である。

図12のように水平面から角度 ψ だけ持ち上げ固定した斜面上において、物体が距離 s （メートル）を時間 t （秒）で滑ったとき、動摩擦係数 μ_{dry} は式(4.1)で求まる。

$$\mu_{dry} = \tan \psi - \frac{2s}{g \cdot t^2 \cdot \cos \psi} \quad (4.1)$$

板の上にキャンバス生地を敷いた斜面・紙を敷いた斜面・陶器を傾けた斜面のそれぞれの斜面上を、底面に紙を貼った物体を滑らせることで動摩擦係数を求める。この方法は実際の絵筆ではなく、紙との動摩擦係数を求めることになる。しかし、材質ごとの違いを表現するためのものであるため、各材質間での相対的な値で問題ないとする。

(b) 吸水率

吸水率は材質ごとのインクの減り方を示す。実際に各材質に絵筆での描画を行い、吸水率を測定する。材質以外は条件を統一するため、乾いた状態の同じ筆に、スポイトで一定量の絵具と水を含ませる。その状態で各材質に直線を描き、掠れ始めるまでの長さを測定し比較する。(a)と同様、相対的な値を求める。

動摩擦係数と吸水率の測定結果を表1に記す。吸水率については紙の吸水率を1.0としたときの値を算出している。

4.3.2 実験2-1：モデル導入前後のなぞり感の比較

描画感提示の基本モデルに、3.2項で述べた描画感提示の拡張モデルである摩擦力の変化モデルを適用し、なぞり感が向上したかを確認する。被験者には、平面に直線を描画させ、摩擦力の変化モデル適用前後のなぞり感を

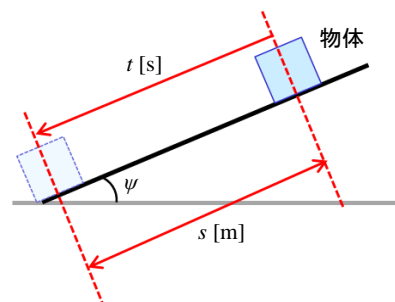


図12 動摩擦係数の測定
Fig.12 Measure of dynamic friction factor

表 1 動摩擦係数と吸水率の計測結果

Table 1 Measured result		
	動摩擦係数	吸水率
キャンバス生地	0.410	6.2
上質紙	0.287	1.0
陶器	0.116	0.62

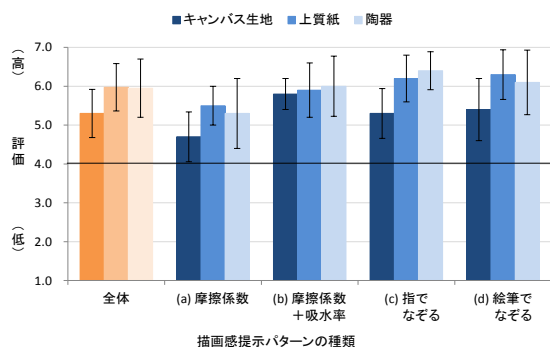


図 13 実験 2 の結果
Fig.13 Result of experiment 2

比較させる。評価方法は、摩擦力の変化モデル適用前（基本モデルは適用済）のなぞり感を基準 (=4) として、7段階 (1: 低, 7: 高) で適用後のなぞり感を評価させる。

描画対象の材質は前節で述べた 3 種類（キャンバス生地、上質紙、陶器）とする。なお、被験者には、描画対象からイメージする摩擦力の大きさを統一するために、各描画対象の材質が何であるかを事前に説明しておく。

摩擦力の変化モデル適用後の描画感提示パターンとして、以下の 4 パターンを順に体験・評価させる。

- (a) 摩擦係数のみを考慮する
- (b) 摩擦係数と吸水率の両方を考慮する
- (c) 使用した材質（実物）を指でなぞらせた後に摩擦力の変化モデル適用後 (b) を体験させる
- (d) 使用した材質（実物）を実物の絵筆でなぞらせた後に摩擦力の変化モデル適用後 (b) を体験させる

被験者 10 名の評価の平均を図 13 に示す。結果より、いずれの描画感提示パターン、材質においても、摩擦力の変化モデル適用によりなぞり感が向上したことが分かった。3 種類の材質の中で、キャンバス生地の評価が最も低い理由として、被験者がキャンバス生地に馴染みがなく、材質に適切なイメージを持てなかったことが挙げられる。上質紙と陶器に関しては、触感が概ね被験者のイメージ通りだったため、高い評価となったと考えられる。実物を指または筆で触らせた (c), (d) については (b) よりも評価が向上した被験者が 3 名おり、描画対象の材質がイメージしやすくなったというコメントが得られたことから、このような結果になったと考えられる。その一方で、実物のなぞり感を表現しきれていないという理

表 2 設定した標準刺激
Table 2 Setup standard inducement

標準刺激	
摩擦係数	0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
吸水率	0.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0

由から、(b) よりも評価を下げた被験者が 4 名いた。

4.3.3 実験 2-2：摩擦力の弁別閾計測

本描画システムにおいて、描画対象の材質に依存する摩擦係数や吸水率にどの程度違いがあれば、摩擦力の違いを知覚できるのかを実験する。基準となる摩擦力（標準刺激）と比較する摩擦力（比較刺激）を交互に提示し、その 2 つを比較し、違いを感じるかどうかを回答させる。設定した摩擦係数、吸水率の標準刺激を表 2 に示す。ただし、標準刺激の提示順はランダムとする。比較刺激は、摩擦係数を変化させる場合は 0.1、吸水率を変化させる場合は 1.0 ずつ、標準刺激を基準として + 方向もしくは一方向に値を変化させる。一方向についての試行終了後、逆方向についても同様に試行する。ただし、方向は標準刺激ごとにランダムとする。

被験者 10 名の弁別閾の平均を図 14 および図 15 に示す。結果より、本描画システムでは、今回用いた標準刺激の範囲内では、摩擦係数 0.2、吸水率 2.0 程度の差があれば、標準刺激の大きさに依らず、摩擦力の違いを知覚できるということが分かった。今後はこれら 2 つの要素を組み合わせ合わせた場合についての実験を行うことを予定している。

4.4 実験 3：穂先の撥ねモデル

描画感提示の基本モデルに、3.3 項で述べた描画感提示の拡張モデルである穂先の撥ねモデルを適用し、穂先の撥ねの表現力が向上したかを確認する。体験者には、手首を返す操作を行わせ（図 16）、穂先の撥ねモデル適用後、穂先の撥ねた感覚が得られたかどうかを評価させる。評価方法は、穂先の撥ねモデル適用前（基本モデルは適用済）の穂先の撥ね感を基準 (=3) として、5 段階 (1: 低, 5: 高) で適用後の穂先の撥ね感を評価させる。適用前の穂先の硬さは、強く押しつけてもまったく弾力を感じないような非常に柔らかい穂先を想定しており、このときの穂先の硬さを表す値を 0 とする。適用後の穂先の硬さは、強く押しつけたときに弾力を感じるようなある程度硬い穂先を想定しており、このときの穂先の硬さの値は 35 である。

被験者 10 名の評価の平均を図 17 に示す。結果より、穂先の撥ねモデル適用により穂先の撥ねの表現力が向上したことが分かった。しかし、「適用前後で変化は感じられたが、それが穂先の撥ねと言えるかは分からない」というコメントが 3 名の被験者から得られた。このことから、穂先の撥ねを表現する描画感提示モデルとしては不十分な点があり、今後改良が必要である。

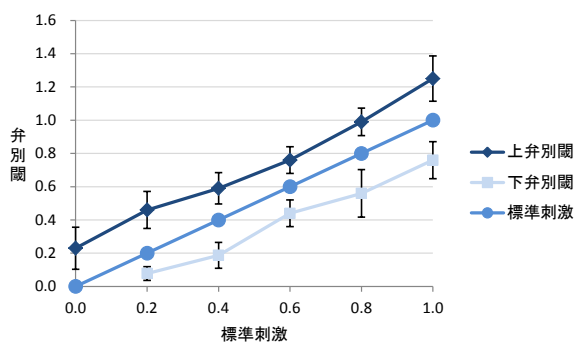


図 14 摩擦係数を変化させる場合の実験結果
Fig.14 Result of experiment in changing dynamic friction factor

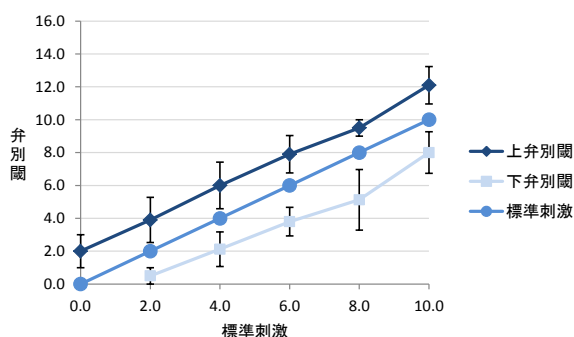


図 15 吸水率を変化させる場合の実験結果
Fig.15 Result of experiment in changing intake rate

5. むすび

既開発の描画システムでは、仮想物体を描画対象とした場合の描画感を表現するために、穂先のしなり表現と反力の提示が可能な描画感提示機構を持つ筆型デバイスを開発、導入した。本研究では、これに、絵筆の状態や描画対象によって異なる描画時の触感を表現可能な描画感提示モデルを導入し、有用性を評価するための評価実験を行った。評価実験を通して、前研究で構築した描画感提示モデルが描画感の表現に有用であることが確認できた。また、今回新たに構築した摩擦力の変化モデル、穂先の撥ねモデルによって、描画感が向上したことも確認できた。

今後は、実世界において実物の絵筆を用いて描画を行った場合に得られる描画感との比較実験を行うことを検討している。また、新たな手法による描画感の表現を提案し、さらなる描画感の向上を目指す。

参考文献

[1] 杉原他: 仮想物体への描画感を実現する筆型デバイスの開発; ヒューマンインタフェースシンポジウム 2010 予稿集, pp. 473-476 (2010).

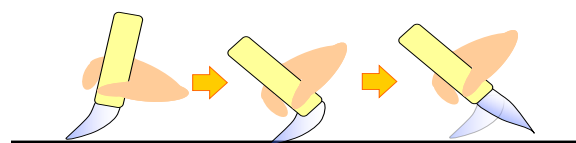


図 16 手首を返す操作

Fig.16 Movement of wrist

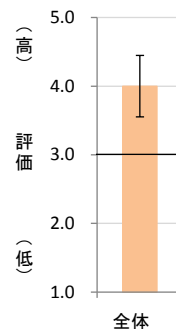


図 17 実験 3 の結果

Fig.17 Result of experiment 3

- [2] Sugihara, K., *et al.*: MAI Painting Brush++: Augmenting the feeling of painting with new visual and tactile feedback mechanisms; Proc. UIST 2012, pp. 13-14 (2011).
- [3] Curtis, C. J., *et al.*: Computer-generated watercolor; Proc. SIGGRAPH 1997, pp. 421-430 (1997).
- [4] Chu, N., *et al.*: MoXi: Real-time ink dispersion in absorbent paper; Trans. Graph, **Vol.24**, No. 3, pp. 504-511 (2005).
- [5] Baxter, W., *et al.*: IMPaSTo: A realistic, interactive model for paint; Proc. Symp. NPAR 2004, pp. 145-148 (2004).
- [6] 齋藤他: インタラクティブペインティングのための力学的三次元筆モデル; 情報処理学会論文誌, No. 41, **Vol. 3**, pp. 608-615 (2000).
- [7] 岡部他: 油絵シミュレータ上での 3 次元筆モデル; 第 70 回情報処理学会全国大会予稿集, 1F-6 (2008).
- [8] Ryokai, K., *et al.*: I/O Brush: Drawing with everyday object as ink; Proc. CHI 2004, pp. 303-310 (2004).
- [9] Vandoren, P., *et al.*: IntuPaint: Bridging the gap between physical and digital painting; Proc. TABLETOP 2008, pp. 71-78 (2008).
- [10] 岩井他: ThermoPainter: 熱画像を用いたタブレット型入力装置とそのインタラクティブ描画システム; 情報処理学会論文誌, **Vol.46**, No.7, pp. 1582-1593 (2005).
- [11] Otsuki, M., *et al.*: MAI Painting Brush: An interactive device that realizes the feeling of real painting; Proc. UIST 2010, pp. 97-100 (2010).
- [12] 大槻他: 絵筆の描き味を活かした複合現実型描画システムと筆型対話デバイス; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **Vol.15**, No.3, pp. 357-367 (2010).
- [13] Foskey, M., *et al.*: ArtNova: Touch-enabled 3D model design; Proc. IEEE VR 2002, pp. 119-126 (2002).
- [14] Sandor, C., *et al.*: Visuo-Haptic Systems: Half-mirrors considered harmful; Proc. World Haptics Conference, pp. 292-297 (2007).
- [15] 家室他: ポータブルペン型力覚ディスプレイを用いたバーチャル物体との触覚インタラクション; 第 14 回日本バーチャルリアリティ学会大会予稿集, 1A2-4 (2009).
- [16] Kamuro, S., *et al.*: Ungrounded kinesthetic pen for haptic interaction with virtual environments; Proc. Symp. Ro-Man, pp. 436-441 (2009).