Vol.14 No.1, 2012

原著論文

# 仮想物体への描画感を達成した新筆型対話デバイスの開発

杉原 賢次　大槻 麻衣　木村 朝子　柴田 史久　田村 秀行

## Development of New BrushDevice Augmenting the Feeling of Painting on Virtual Objects

Kenji Sugihara, Mai Otsuki, Asako Kimura, Fumihisa Shibata, and Hideyuki Tamura

**Abstract** - We have developed a mixed reality (MR) painting system called the MR-based Artistic Interactive (MAI) Painting Expert, which simulates painting of physical objects in the real world. This system includes an interaction device called MAI Painting Brush, which has the characteristics of an actual paintbrush, and a painting model developed using this device. However, this system could not give the feeling of painting on virtual objects in an MR space. Therefore, we proposed and developed mechanisms that simulate the effect of touch and move when a brush device is used with a virtual painting target. In this paper, four mechanisms were proposed; the bend, slider, belt, and flap mechanisms, to provide the feeling of touching and painting a virtual object with the brush device, using visual and tactile feedback. These mechanisms were implemented and tested as prototypes, and a new brush device named MAI Painting Brush++ was designed and developed based on the result.

**Keywords**: BrushDevice, ToolDevice, Mixed Reality, Painting, Visual and Haptic Feedback.

### 1. はじめに

近年のコンピュータグラフィックス (CG) 技術の進歩は目覚ましく，新たな映像表現の世界を切り拓いている．写実的な映像を生成する CG 技術が研究されてきた一方で，ドローイングやフォトレタッチのツールが充実し，今やグラフィックデザイナやイラストレータたちがコンピュータを駆使して作品製作を行うことも日常化している．このような状況の中，水彩画や油彩画調を問わず，コンピュータを用いて優れた絵画調ペインティングを実現する先行研究も，これまでに多数行われてきており[1-5]，本物の絵画と遜色のない絵画調画像を生み出せるレベルに達してきている．

これらの研究の大多数は，入力デバイスとしてペンタブレットを利用しているが，ペン先端部が接触するタブレットと生成される画像のモニタ画面が別になるので，間接的な描画操作となってしまう．十分使い慣れれば，見事な描画を実現できる方法ではあっても，この種の「間接操作」を好まず，現実の描画作業と同様に，絵筆の先端部の移動を視認でき，直接絵を描いていると感じられる「直接操作」を求める人も少なくない．また，硬質なペンタブレットの触感を嫌い，実際の絵筆に近い感触と描き味を望む声もある．実世界で絵を描く場合には，絵筆の穂先のしなり具合を見たり，描画対象と絵筆間の摩擦力や反力などを手がかりに描画を行うからである．

このような背景から，我々はこれまでに実物体の描画対象に接触することで実際に穂先がしなり，そのしなり具合が計測できる筆型デバイス「MAI Painting Brush」の開発と，立体形状の表面に直接操作で電子描画し，それを視認できる複合現実型 (Mixed Reality; MR) 型描画システム「MAI Painting Expert Ver.1.0」[6, 7]を提案，実現した．同デバイスでは，実物体に対する押し付け量や方向をデバイスの穂先に内蔵されたアナログスティックコントローラで検出することで，絵筆に近い感触と描き味を実現しており，同システムを運用したところ，実世界と同様の感覚で絵筆（筆型デバイス）を持って実物体に直接描画できるので自然で分かりやすい，描画したい所へ容易に描画できると好評であった．また，筆型デバイス穂先部分の材質にはまだ改良の余地があるものの，描画対象と絵筆間の摩擦力・反力や穂先の押し付け具合に応じた描線の変形が導入されたことで，感触，描き味についても絵筆らしくなっているとの意見が得られ，提案システムの操作体系，及び描画感の有効性を確認できた．

一方，実物体と同様仮想物体に対しても，現実に則した直接描画を導入することで，従来の 2D ディスプレイ内での平面的，間接的な描画と比べより直接的，直観的な操作を実現できると考えられる．上記運用の際にも，体験者から「描画対象となる実物体を準備できない場合や大きな対象に描画したいといった場合に，実物体だけでなく仮想物体にも同じように直接描画できると有効ではないか」との意見を得ている．そこで本研究では，次のステップとして，同システムにおける描画対象に仮想物体を加え，実物体への描画に近いまたは類似した感触，描き味を，仮想物体に対しても実現することを目指す．

しかし実物体とは異なり，仮想物体に描画する場合には，穂先を押し付ける実対象が存在しない．それゆえ，触力覚提示機構といった何かしらの機構がなければ，描画対象に接触したという感触すら得ることができないという問題がある．そこで本論文では，実世界で絵筆を用いて描画を行う際の絵筆，および手指に加わる力によってもたらされる感覚を「描画感」と定義し，仮想物体への描画時にこの「描画感」に近いまたは類似した感覚を

立命館大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

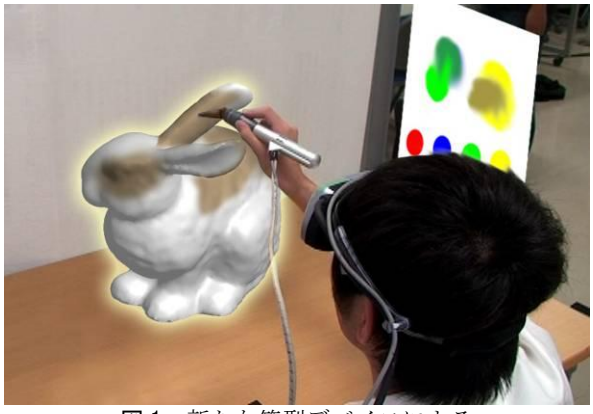


図 1　新たな筆型デバイスによる
仮想物体への描画感の実現（イメージ）
Figure 1　The new brush device which realizes
feelings of painting on virtual painting.

提示する機構を検討する．そしてこの検討結果を踏まえた新型デバイス「MAI Painting Brush++」および MR 型描画システム「MAI Painting Expert Ver.2.0」（図 1）を提案，実装する．

以降，2 章では関連研究について述べ，3 章では実世界における絵筆を用いた描画の分析，およびその結果を基に提案・試作した描画感の提示機構について述べる．4 章では描画時の穂先のしなりと手指に提示される反力をモデル化し，システムを用いた絵筆らしい描画感の提示方法について述べる．5 章では，3 章で試作した 4 つの機構を運用し，どの機構が仮想物体への描画感を表現するのに適しているかを確認し，6 章ではその知見を基に開発した新しい筆型デバイス，トータルな MR 描画システムと，運用の結果得られた知見について述べる．

## 2.　関連研究

既存研究の中にも，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，絵筆の触感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，触感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[6, 7]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．

一方，触覚ディスプレイを利用した描画システムの例として，Baxter ら[3]は 2D ディスプレイ内の仮想キャンバスに対して描画する際の筆の触感を，触覚ディスプレイである PHANToM によって再現している．また Foskey らの ArtNova[11], Sandor らの Visuo-Haptic Systems[12]もまた，VR/MR 空間における仮想物体への描画操作に PHANToM を導入している．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，PHANToM のような接地型の反力提示装置の場合，ユーザの動きが反力提示装置の可動範囲に制限され，描画範囲が制限される．そのため，描画対象が大きくなるにしたがい装置の規模が大きくなるという問題がある．一方平田らは，触れようとした位置に実対象を移動・配置することで実際に接触させ，触力覚の提示を実現する遭遇型の触覚ディスプレイ AED[13]を提案・実現している．しかし同方式でも，接地型と同様の問題が残る．

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[14, 15]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手の良さを両立している．具体的には仮想物体表面から押し返される力，摩擦によって生じた反力を表現することで仮想物体に「触れた感覚」や「硬さ」を提示でき，これを利用した 3D モデリングシステム[16]の開発も行っている．仮想物体における触覚提示という点では，同研究から学ぶところは多く，本研究においても，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，我々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．

以上のことから，本研究では実世界での描画時に得られる描画対象に触れ，表面をなぞる感覚を，絵筆自体の穂先形状の変形にも着目し，視覚・触覚の両面から提示する機構を提案する．そして，ユーザの腕を拘束することなく，仮想物体への描画感を表現可能な筆型デバイスの開発を目指す．

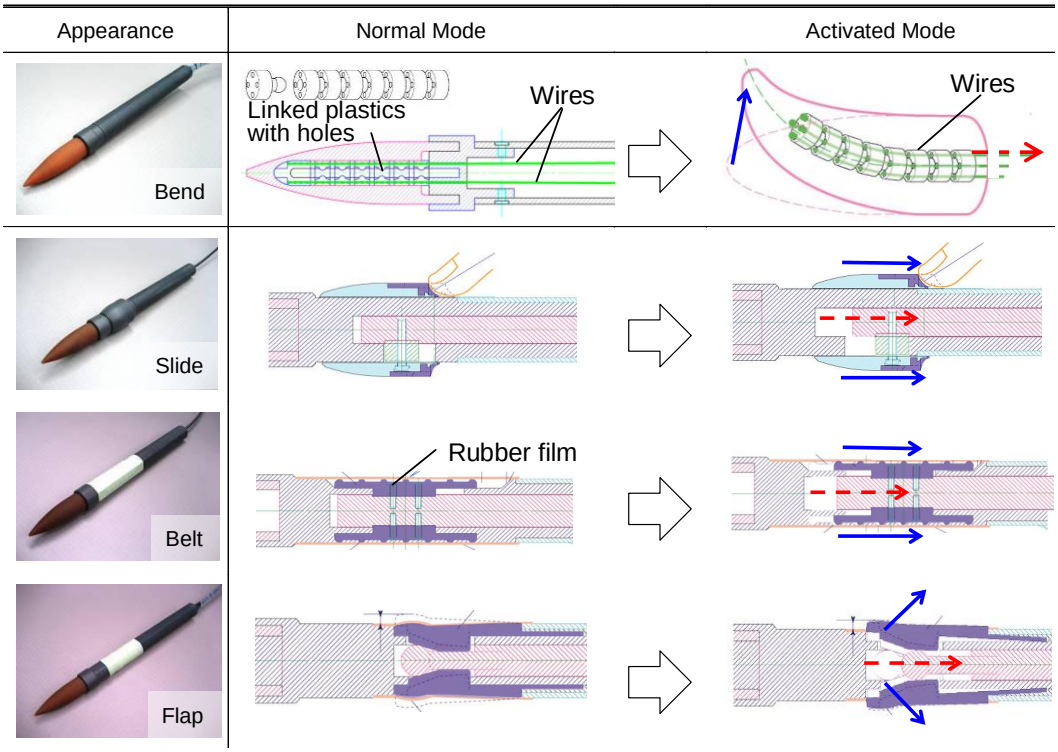
## 3.　仮想物体への描画感提示機構

### 3.1　絵筆における描画感の分析

絵筆による描画では，穂先のしなりや絵筆から手に伝わる反力，摩擦力などから，線の太さや形状，穂先の動きの予測，描画対象の凹凸など様々な手掛かりを得ることができる．本研究ではこのような，絵筆を用いて描画を行う際の絵筆，および手指に加わる力によってもたらされる感覚を「描画感」と定義している．

一般的な描画操作は，「描画面に押し付ける」「描画面をなぞる」という 2 つの操作に分解できる．描画中には

表 1　描画時の絵筆の見た目・触力覚変化を再現する 4 つの描画感提示機構
Table 1　Four mechanisms that realize the visual and tactile changes of a paintbrush while painting.




これらの操作から得られる「押し付け感」「なぞり感」によって描画している感覚，すなわち描画感を得ていると考えられる．

「押し付け感」は絵筆を描画面に押し付けた際の (i) 穂先のしなりや (ii) 描画面から押し返される力の変化から知覚される．「なぞり感」は描画面をなぞることで，進行方向に応じて摩擦が生じ，(i) 穂先のしなり方向，および (iii) 手に加わる力の方向が変化することで知覚される．この際，描画対象の材質や，穂先の乾き具合によっては摩擦力が変化し，絵筆が引っかかる感覚や掠れた感覚が提示されることもあるが，本論文ではこれらの摩擦により生じる感覚をまとめて「なぞり感」と呼ぶ．

以上のことから

(i) 穂先のしなり

(ii) 描画面から押し返される力

(iii) 描画面と絵筆の摩擦により発生する力

の 3 つの要素を描画状態に応じて変えることで押し付け感なぞり感すなわち描画感を再現できると考えた．

押し付け感，なぞり感は，主に描画面への絵筆の「押し付け具合」「描画方向」によって変化する．そこで本研究では，まず描画面への押し付け具合，描画方向に応じて (i) ～ (iii) の要素を提示可能な筆型デバイス，およびその制御モデルを作成し，非拘束型の機構という制限の中で押し付け感，なぞり感に近い感覚を提示することを目指す．

その他にも，押し付け感，なぞり感に影響を及ぼすパラメータとして，穂先の「硬さ」「乾き」，絵筆の「重さ」「重心位置」，描画対象の「材質」などが考えられる．我々は，これらのパラメータによる押し付け感，なぞり感の変化も (i) ～ (iii) により表現できると考えているが，本論文では，まず押し付け具合，描画方向により (i) ～ (iii) の 3 要素を制御する基本モデルを構築し，残るパラメータについては今後の課題とする．

### 3.2　描画感提示機構の提案と試作

前節で述べた (i) ～ (iii) を再現する機構を提案・試作し，仮想物体への描画時にこれらの要素を提示することによって，描画感を得ることができるかどうか確認する．具体的には (i) 穂先のしなりを視覚的に実現する機構としてベンド式，(ii) 描画面から押し返される力を再現する機構としてスライド式，ベルト式，(ii) だけでなく (iii) 描画面と絵筆の摩擦によって発生する力を同時に実現する機構としてフラップ式を考案した．

以下に各機構について説明する（**表 1**）．

**ベンド式**：筆型デバイスの穂先に，円柱状の樹脂パーツ 8 個を 4 本のワイヤで連結させた軸を内蔵し，このワイヤを引くことで穂先のしなりを実現する．描画時の動きに応じて 4 本のワイヤを引いたり緩めたりすることによって，穂先を任意方向に湾曲させることが可能である．

**スライド式**：把持部と穂先の間に円筒状のスライダを取り付け，スライダでデバイスを把持している指先を押すことで指先に反力を提示する．デバイスの動きと連動させ，穂先が仮想の描画面に接したときにスライダを動かすことで，絵筆が描画面に接触した感覚を擬似的に表現する．

**ベルト式**：把持部に内蔵された 3 本のベルトを動かすことで，デバイスを把持している指にすべり覚を提示する．スライド式と同様，穂先を描画面に押し付けた際，指の腹と絵筆の把持部の間に発生する触感を再現する．

**フラップ式**：把持部に 3 枚のフラップを内蔵し，各フラップを独立に開閉することで，親指，人差し指，中指の腹に反力を提示する．描画面と接触した際にフラップを駆動することで，描画面から押し返される力を表現するとともに，描画方向に応じて開閉するフラップを制御することで，擬似的に描画面と絵筆の摩擦によって発生する力も表現できると考えられる．

本研究では，以上の 4 つの機構を内蔵する筆型デバイスを各々試作し，これらを比較することで，仮想物体への描画感を表現するのにどの機構が適しているかを確認する．

試作した筆型デバイスを表 1 に示す．各デバイスには，6 自由度の磁気式の位置姿勢センサを利用し，デバイスの位置・姿勢を取得する．また，試作デバイスでは，それぞれの機構の基本特性や有用性を確認することを目的としているため，各機構の稼動部のアクチュエータには，機構の簡便なソレノイドを利用し，デバイス外部からワイヤを通じて動力を伝える機構とした．

## 4.　描画感提示モデル

### 4.1　設計指針

試作デバイスでは，アクチュエータにソレノイドを用いているため「駆動」「停止」の 2 つの状態遷移を制御するのみであるが，ここでは最終的に構築する新型デバイスに応用できるように，より詳細な描画感提示モデルを作成し，それを各機構の特性に合わせて適用する．

描画感提示機構を制御するために，我々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・分析した上で，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した．

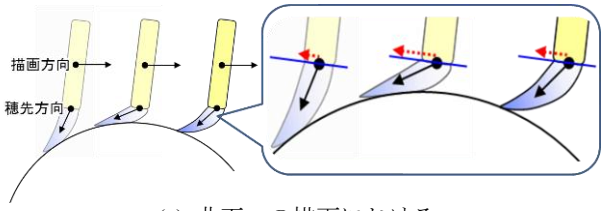
まず穂先のしなりに注目すると，穂先の向きは，絵筆の移動方向（描画方向）の逆向きとなり，穂先のしなり量は，描画面へ強く押し付けるほど大きくなる．つまり，絵筆を動かす方向と描画面への押し付け量の 2 つの要素が影響している．同様に，描画中に手指に加わる力についても，穂先と描画面の摩擦力によって描画方向と逆向きの力が働く．また絵筆を描画面に強く押し付けるほど，絵筆が押し返される力や摩擦力も大きくなる．

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，我々はこれらの力を同じベクトルで表現できると考えた．このベクトルを「反力ベクトル」と定義し，しなりと触力覚の表現に各々異なるモデルを当てはめるのではなく，共通のモデルを利用することにした．

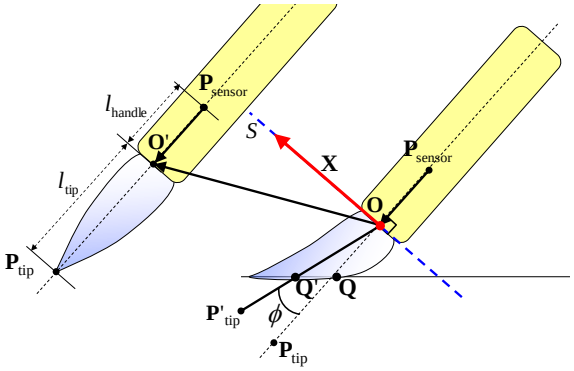
ここで描画方向と穂先の向きの関係に着目すると，たとえ描画方向が一定であったとしても，その 3 次元的な方向が描画対象面と平行でなければ，穂先の向きは単純に描画方向の逆向きとはならない（**図 2 (a) 左図**）．ただし，この穂先の向きを，絵筆の軸に垂直な平面上のベクトルと，絵筆の軸に平行な成分に分解すると，前者は描画方向に影響を受け，その逆ベクトルとなる（**図 2 (a) 右図**）．これに対して，後者は描画面と絵筆がなす角度，および描画面に対する筆の押し付け量に影響を受ける．このことから，3 次元的な穂先の向きは単純に描画方向の逆向きとするのではなく，押し付け具合に応じた穂先のしなり量も考慮して算出する必要がある．

そこで本研究では，デバイスの描画方向と描画面と穂先がなす角度，描画面に対する押し付け量によって反力ベクトルを生成する「描画感提示モデル」を構築し，3.1 節で述べた，描画感を構成する (i) ～ (iii) の 3 つの要素を実現する．

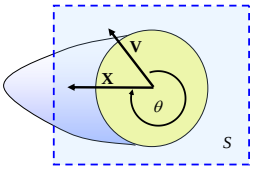
ただし，穂先をしならせると穂先の位置が変化し，描画面への接触位置自体も変化する．このように，穂先の




(a) 曲面への描画における
描画方向と穂先の向きの変化




(b) 前フレームの情報を用いた反力ベクトルの算出




(c) デバイス軸と垂直な平面 S への反力ベクトルの写像

**図 2**　反力ベクトルの算出モデル
Figure 2　The model representing visual and tactile change of a paintbrush while painting.

しなりは描画アルゴリズムにも影響してくる重要な要素であり，ここで構築する描画感提示モデルは描画モデルと連動するものでなくてはならない．描画モデルに関しては MAI Painting Expert Ver1.0[6, 7] に対応した描画感提示モデルとする．また図 2 (a) に示すように，現実世界ではしなった穂先は描画面上をトレースすることから，生成される反力ベクトルは描画面の傾きに応じて変化させる必要がある．

以上のことから，我々は前システムの描画モデルをベースとし，前述の要件を満たす描画感提示モデルを構築する．次節では，反力ベクトルの方向と大きさを算出するアルゴリズムについて述べ，その後描画感提示モデルと描画モデル，描画面の傾きとの関係についてそれぞれ述べる．

### 4.2 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 $\mathbf{P}_{sensor}$ 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 **O**，および先端位置 $\mathbf{P}_{tip}$ を求めることができる（**図 2（b）左図**）．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 Ver1.0 にて構築した，押し付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点 **Q'**を算出することで，この問題を解決する．

次に，**O** から前フレームの穂先の根元位置 **O'**へ向かうベクトル **OO'**の向き（図 2 (b)）を，デバイスの軸となる $\mathbf{OP}_{sensor}$ と垂直である平面 S 上に射影すると，反力ベクトル **X** の方向が求まる．平面 S 上における基準ベクトル **V** と **X** のなす角度 $\theta$ が，穂先のしなり方向となる（**図 2（c）**）．

### 4.3 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 $\mathbf{OP'}_{tip}$）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 **Q**（穂先がしなっている場合は **Q'**）を求め，**QO**（穂先がしなっている場合は **Q'O**）の距離を算出する．実世界での描画では，強く押し付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．

$$w = \frac{l_{tip} - |\mathbf{OQ}|}{l_{tip}} \times \alpha \quad (\alpha : \text{定数}) \tag{1}$$

ここで，$\alpha$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．

### 4.4 描画感提示モデルと描画モデルの関係

本システムにおける描画処理は，MAI Painting Expert Ver.1.0 [6, 7] と同様であり，描画面上のデバイスの軌跡に沿ってフットプリントを連続的に並べることによりストロークを生成する（**図 3**）．MAI Painting Brush では穂先に内蔵するベンドセンサにより，実物体へ押し付けた際の穂先の状態（しなり方向・量）を取得していた．本システムではセンサから穂先のしなり状態を取得できないため，穂先に加わる反力ベクトルの向きと大きさをこの描画モデルに当てはめる．具体的には描画モデルにおけるしなり方向を$\theta$，しなり量を$\phi$とする．ここで穂先の最大しなり角度を$\theta_{MAX}$とすると，$\phi$ は次式により算出できる．

$$\phi = \frac{w}{\alpha}\theta_{MAX} \quad (\theta_{MAX} : \text{定数}) \tag{2}$$

### 4.5 描画感提示モデルと描画面の傾きの関係

先述の通り，本研究で提案する描画感提示モデルでは描画面の傾きに応じて反力ベクトルを変化させる．そのため，穂先は描画面上をトレースするようにしなり量を変化させる必要がある．ここで，この描画感提示モデルを**図 4** のように傾きの異なる描画面に適用した場合を考える．実世界では (i) 描画方向が描画面と平行の場合（図 4 左図）に比べ，(ii) 平行でない場合（図 4 右図）の方が穂先のしなり量が大きくなる．描画感提示モデルにおいても，(i) の場合より (ii) の方がベクトル **OQ'**の距離が短くなり，しなり量が大きくなる（式(1)(2)）．これにより，描画面の各方向が異なる立体物への描画においても適切な反力ベクトルを算出することができる．

### 4.6 試作デバイスへの描画感提示モデルの適応

アクチュエータを 3 機以上備える機構（ベンド式，フラップ式）においては，それぞれの駆動量を調整するこ

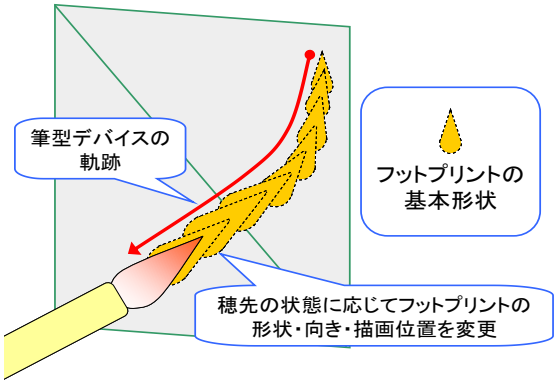
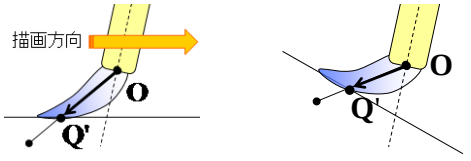



**図 3** 描画アルゴリズム
Figure 3 Painting algorithm.




描画面が
描画方向と平行

描画面と描画方向が
平行でない

**図 4** 描画感提示モデルと描画面の傾きとの関係
Figure 4 Relationship between feedback model and tilt of painting surface.

とにより，反力ベクトルの方向を制御する事ができる．アクチュエータ数 $N$ の試作デバイスにおいて，$n$ 番目のアクチュエータの駆動量 $d_n$ は反力ベクトルの方向 $\theta$ と大きさ $w$ を用いて以下の式で表される．

$$d_n = \cos(\theta - 2(n-1)\pi / N)w \qquad (3)$$

なお，方式ごとのアクチュエータ数 $N$ は，ベンド式：4，スライド式・ベルト式：1，フラップ式：3 である．

ただし，試作デバイスではアクチュエータにソレノイドを用いているため，駆動量ではなく，「駆動」と「停止」の 2 つの状態遷移を制御する．そこで，$d_n$ が 0 より大きいアクチュエータのみを駆動させ，0 以下のアクチュエータを停止させることによって描画方向に応じた描画感の提示を実現する．

アクチュエータが 2 機以下の機構（スライド式，ベルト式）に関しては，反力ベクトルの大きさ $w$ を全てのアクチュエータの駆動量 $d_n$ に適用する．

## 5.　試作デバイスの運用

### 5.1　システム構成

3.2 節で試作した筆型デバイスを導入する描画システムの構成を**図 5** に示す. MR 空間の管理は Core i7 3.33GHz CPU, 3G メモリを搭載したデスクトップ PC で行う．MR 空間の映像提示には両眼立体視が可能なビデオシースルー型 HMD (Head Mounted Display) である Canon 製 VH-2002 を用いた．

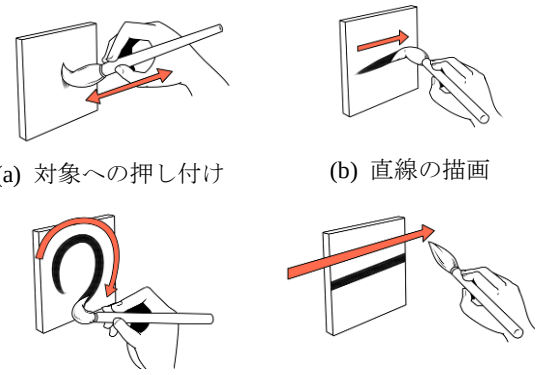
HMD およびデバイスの位置姿勢情報の検出には磁気ベースの 3 次元位置姿勢測定装置である Polhemus LIBERTY を利用し，任意の位置に固定したトランスミッタと，HMD とデバイスに取り付けられたレシーバとの相対位置を連続的に取得している．本システムでは描画対象となる仮想物体の位置姿勢をあらかじめ設定しておくこともできるが，レシーバを追加し，これを，筆型デバイスを把持していない非利き手で持ち，移動・回転することにより，描画対象の位置姿勢をユーザ自身が制御することも可能である．

MR 空間の生成・提示には，HMD に内蔵された左目，右目用のカメラを利用する．各カメラから実風景をビデオキャプチャカード (ViewCast Osprey 440) を介して PC へ取り込み，HMD の位置姿勢に合わせた CG をそれぞれの画像に重畳描画した後，グラフィックカード (NVIDIA GeForce GTX 480) から HMD の左目，右目用の各ディスプレイへ出力することでユーザに提示する．

筆型デバイスの制御は，4 章で述べたモデルに従い，デバイス制御用 I/O BOX を介して PC からシリアル通信で行う．

### 5.2　ユーザスタディ

提案した 4 種類の描画感提示機構が仮想物体への描画感を表現するのに適しているかどうかを確認するため，学生 4 名に，試作した筆型デバイスと比較のため描画感提示機構を搭載しない筆型デバイスを用いて，立方体への描画を体験させた．また，3.1 節で述べた，本研究の目標である描画面への「押し付け感」および「なぞり感」が提示できているかを確認すべく，(a) 描画面に押し付ける，(b) 直線を描く，(c) 曲線を描く，(d) エッジを跨いで描画する，という 4 種類の操作（**図 6**）において，適切な描画感を提示できているかを確認させた. (a) は押し付け感を，(b)(c) はなぞり感を，(d) は押し付け量が急激に変化した際に押し付け感となぞり感が提示できるかを確認するための操作である．実験は操作 (a)~(d) を順に，被験者が納得するまで行わせた．



(a) 対象への押し付け　(b) 直線の描画

(c) 曲線の描画　(d) エッジを跨ぐ描画

**図 6**　絵筆の描画感が顕著に現れる操作

Figure 6　Operations which express sensations of brush painting clearly

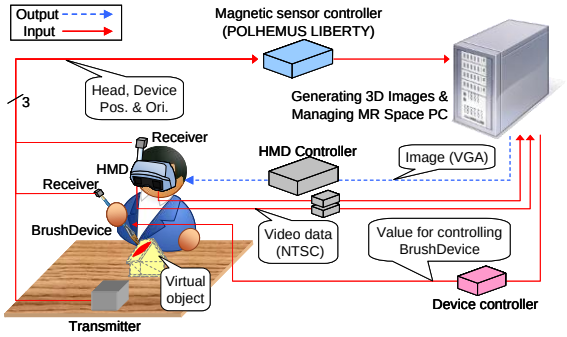



**図 5**　システム構成

Figure 5　System configuration.

**表 2**　試作デバイスにおける 4 人のユーザの評価平均（各項目で最も評価の高かった方式を灰色で示す）

Table 2　Average of evaluation of four mechanisms from four users (Gray cells show the highest value in each mechanism)

| | (a) | (b) | (c) | (d) | average |
|---|---|---|---|---|---|
| ベンド | 4.00 | 3.75 | 4.25 | 4.75 | 4.19 |
| スライド | 3.25 | 3.25 | 3.00 | 3.75 | 3.31 |
| ベルト | 4.25 | 3.50 | 3.50 | 3.25 | 3.63 |
| フラップ | 4.50 | 3.75 | 3.50 | 4.25 | 4.00 |

体験後，各デバイスを，描画感提示機構を搭載しないデバイスを基準 (= 3) として，5 段階（1: 低，5: 高）で描画感があるかを回答させた．4 人の体験者の各項目における評価の平均を**表 2** に示す．この結果から，ベンド式，フラップ式は全体的に高評価であることがわかる．ただし，フラップ式の (c) における評価については，一部の体験者から反力方向の解像度が不十分として低評価を受けた影響により，他項目に比べて低い値となっている．これは，試作デバイスでは簡便な機構であるソレノイドを用いたことで，各フラップを「開く」「閉じる」の 2 状態しか制御できないために，反力を 6 方向しか提示できないことが原因であると考えられる．よって本項目については，アクチュエータを駆動量の調整が可能なものにすることで，評価の向上が期待できる．

また各項目における描画感について自由にコメントさせた結果を以下に列挙する．

**ベンド式**：描画中，デバイスの動きに合わせて穂先がしなることで，4 種類の描画操作全てにおいて，描画面に押し付けた際，またなぞった際の穂先の動きを表現できていると好評であり，描画感が向上することが確認できた．また，視覚的な変化は非常に明確であり，描画感を再現する上で大変有効であることが確認できた．

**スライド式**：指先にスライド部があたることで，描画面と穂先との衝突感を表現できることが確認できたが，指先に反力が提示されるのは実際の描画感覚とは異なる，デバイスを把持している指の腹に力が加わる方が自然である，というコメントを得た．描画面から押し返される力を表現する機構として期待していたが，他の機構に比べてその有効性が確認できなかった．

**ベルト式**：スライド式と同様，描画面から押し返される力を表現する機構であり，把持部の下でベルトが動くことで，スライド式よりも描画面へ押し付けた感覚をよりリアルに表現できた．しかし，本機構では操作 (b) 〜 (d) においてはなぞっている感覚がしない，違和感があるなど，否定的なコメントが多くを占め，なぞり感については表現に適さないことが確認できた．またこの結果から描画面から押し返される力だけでは，描画感として乏しい事が確認できた．

**フラップ式**：描画方向に応じて反力提示の方向が変わることが確認された．ベンド式と同様，4 種類の操作全て描画感が向上し，描画面に触れた感覚や，なぞった感覚を表現できると好意的なコメントが得られた．また，描画対象への押し付け感を評価する操作 (a) においては，スライド式やベルト式とは異なり，提示する反力方向が軸に沿った方向ではないため，低評価になるのではとの懸念があったが，結果としては最も高い評価を得ており，描画面にデバイスをおいたときに感じる衝突感の表現は十分可能であった．実世界において絵筆が描画面に対して傾いている場合，描画面からの反力方向は絵筆の軸に沿わないが，フラップ式では，そのような軸方向に沿わない反力を提示可能なため，結果として高評価になったものと思われる．

以上のことから，本機構では，描画面への押し付け感，およびなぞり感が提示可能であることが確認できた．しかし，3 枚のフラップが確実に親指，人差し指，中指に触れている必要があり，持ち方が制限されることが問題点として指摘された．

以上のことから，今回提案した描画感提示機構の中ではベンド式とフラップ式が特に有効であり，ベンド式が 3.1 節で述べた (i) 穂先のしなり，フラップ式が (ii) 描画面から押し返される力および (iii) 摩擦による反力の表現に適していることが確認できた．

## 6. 仮想物体への描画感を実現する新筆型デバイス

### 6.1 デバイスの設計と実装

前述の運用結果を基に，仮想物体への描画感を提示可能な新たな筆型デバイス MAI Painting Brush++の設計・開発を行った．再設計後のデバイスの外観，内部機構，寸法および重心位置を**図 7（a）〜（c）**に示す．またデバイス本体（コード含まず）の重量は，およそ 170g である．

以下に，再設計箇所の詳細を述べる．

・運用の結果，穂先のしなり方向が明確に提示可能であり，有効性が高いと評価されたベンド式とフラップ式を組み合わせ，これらをモータに繋ぎワイヤで同時に制御する新たな方式を考案，採用した．

・フラップ式では 3 枚のフラップを用いていたが，各フラップが確実に親指，人差し指，中指に触れている必要があり，持ち方が制限されるという問題があった．そのため，把持部を 1 つの円筒状のパーツ（以降，シリンダと呼称）で構成することにより，把持部のどの位置を持っても反力が得られるよう改良を行った．この際，シリンダが駆動することによってデバイス本体が傾き，人差し指，および親指の付け根に反力を提示するよう設計した（**図 7（d）**）．

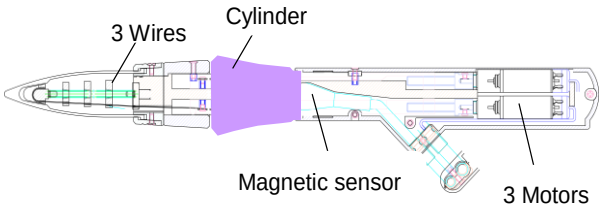
・試作デバイス同様，位置姿勢検出用に磁気センサを内蔵し，デバイスの制御には，4 章で述べた描画感提示モデルを適用した．

・試作デバイスよりも，詳細に反力を制御できるよう，アクチュエータをソレノイドから，DC モータ（Maxon 社，RE10, 1.5 W, gear ratio = 4.7:1）に変更した．DC モータを内蔵することでワイヤの引き具合を調節可能とし，提示する反力の大きさ・向きの解像度向上を実現する．

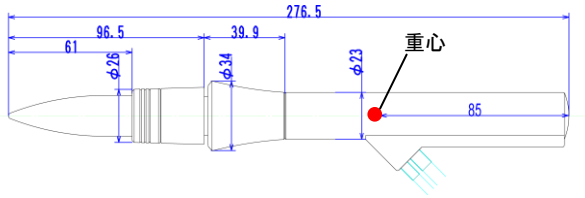
・試作デバイスにおいて，ベンド式はアクチュエータとして 4 機のソレノイドを用いていたが，3 機でも全方向に反力提示が可能なこと，モータを内蔵するために小型化，軽量化が必要なことから，搭載するモータは 3 機とした．



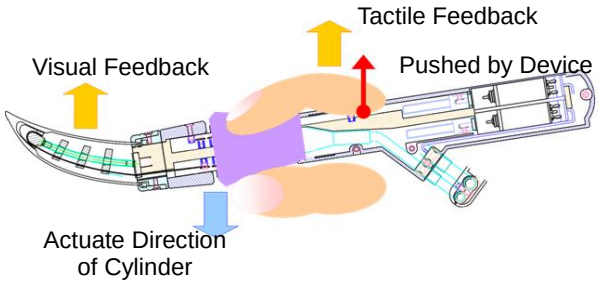
(a) 外観




(b) 内部機構




(c) 寸法




(d) 反力提示時の動作

**図 7**　仮想物体への描画感を提示する
筆型デバイス「MAI Painting Brush++」
Figure 7　MAI Painting Brush++
augmenting the feeling of painting on virtual objects.

### 6.2　描画感提示モデルの適用

4 章にて提案した描画感提示モデルは，描画方向，および描画面への押し付け量から反力ベクトルを算出し，各アクチュエータの駆動量を決定する．試作デバイスではアクチュエータにソレノイドを用いていたため，算出した各アクチュエータの駆動量 $d_n$ から「駆動」と「停止」の 2 種類の状態遷移を制御していた．しかし，MAI Painting Brush++においてはアクチュエータにモータを採用しており，駆動量が制御可能である．すなわち，$d_n$ の値をモータの駆動量として適用できるため，反力ベクトルに応じた描画感をより詳細に提示可能である．

### 6.3　複合現実型描画システム

実物体を描画対象として開発した MAI Painting Expert Ver.1.0 [6, 7] の描画対象を仮想物体とする MR 型描画システムを開発し，MAI Painting Expert Ver.2.0 と命名した（**図 8 (a)**）．システム構成は図 5 に示したものと同じである．MAI Painting Expert Ver.2.0 では，体験者は仮想物体であるパレット，および描画対象へ Mai Painting Brush++を接触させた際に描画面への押し付け量や，描画方向に応じた描画感を感じながら描画を行うことができる．また，仮想パレット，水入れ，描画対象コントローラ，布を用い，以下の 4 つの機能を利用することができる．

**仮想パレット**：空間中に表示された仮想のカラーパレットによって，所望の色の選択や混色を行うことができる（**図 8 (b)**）．パレット下部には色選択領域があり，6 色の内，所望の色に触れることでその色を取得する．パレット上部には混色領域があり，ここで複数の色を重ねて描画することにより，混色を行うことができる．絵具量はパレット上の任意の色に穂先が触れていた時間に比例して増加する．なお取得した絵具量はデバイスの柄に沿って表示された仮想のゲージによって提示する．また穂先の色に関しては，常に画面右上に表示されているフットプリント表示領域で確認できる．この領域では，右：フットプリント全体の絵具の分布，左：フットプリント中で現在描画面と接触している領域を表示している．

**水入れ**：卓上に実物体の水入れ（水の入っていないカップ）が配置されており，その中に筆型デバイスを入れることにより，任意の透明度での描画が可能となる（**図 8 (c) (d)**）．また，薄めた色は再度パレット上で混色可能である．

**描画対象コントローラ**：磁気式の位置姿勢センサを用いて，描画対象を任意の位置姿勢を変更しながら描画を行うことが可能である．また，描画距離に応じて絵具量が減少し，描画結果に掠れが生じる（**図 8 (e)**）．

**布**：描画結果に対して，実物体の布でふき取ることによって，描線を削除することができる（**図 8 (f)**）．

**図 9，10** に仮想平面および曲面への描画の様子とそのときの穂先がしなる様子を示す．

### 6.4　運用

MAI Painting Brush++でも，5.2 節で述べた試作デバイスのユーザスタディ同様，(a) 描画面に押し付ける，(b) 直線を描く，(c) 曲線を描く，(d) エッジを跨いで描画する，という 4 種類の操作を体験させ，描画感提示機構を搭載しない筆型デバイスと描画感を比較させた．その結果として，5 人の評価の平均を**表 3** に示す．さらに，描画対象が曲面や複雑な形状の場合でも本デバイスが有効かどうかを確認するために，猫，ティーポット，家，皿といった CG モデルに対して描画を行わせた．描画例を**図 11** に示す．

以下に運用結果と考察を述べる．

・表 2 の結果と比較すると，体験者の評価から，4 種類のどの操作を行った場合でも，いずれの方式の試作デバイスよりも，新型デバイスの方が，描画感が向上した




(a) 操作風景　(b) 仮想パレットによる色の選択と混色

(c) 水による薄め　(d) 透明度の変更　(e) 掠れ　(f) 布による描線の消去

図 8　MAI Painting Expert 2.0
Figure 8　MAI Painting Expert 2.0

ことが確認できた．その一方で，(c) に比べ，(b) の評価が低い．これは，今回の運用では描画面をなぞっている間の「引っかかり感」の提示を行っていないことが原因として考えられる．曲線を描いている際は，逐次描画方向が変化し，視覚・触覚ともに変化するのに対し，直線を描いている際は押し付け量が変化しない限り触覚が変化しない．現実の描画では，描画対象の材質に応じた引っかかり感によって，押し付け量が一定でも逐次触感が変化するため，違和感が生じたものと分析した．

これは試作デバイスにおけるユーザスタディ時には出なかったコメントであり，基本的な描画感が表現できたため，逆により細かな部分が気になったのではないかと考えられる．なお，描画感が向上した一因として，アクチュエータをソレノイドからモータに変更したことで反力の強弱表現が改善された点も大きい．

・試作デバイスのベンド式では 4 機のソレノイドを利用していたが，新型デバイスではアクチュエータの数を 3 機に削減した．しかし，方向の解像度が重要となる (b)(c) の提示に関しても評価が向上しており，特に問題はなかった．

・曲面を含む描画対象に描画を行わせた際も，反力の強弱や方向の解像度も十分にあり，曲面の滑らかさを感じることもできた，というコメントが非常に多く得られた．このことから，MAI Painting Brush++と提案した描画感提示アルゴリズムが曲面を含む描画対象に対しても有効であることが確認できた．

・描画対象が仮想物体の場合，実際には描画対象が存在しないため，フィードバックがない状態ではデバイスを仮想物体に押し込みすぎてしまうという問題がある．しかし，MAI Painting Brush++を用いた描画作業の様子を観察すると，体験者は提示された描画感を手掛かりに，描画対象の表面をしっかりとなぞっていた．

・その一方で，フラップ部を円筒状としたことにより，反力提示状態から平常時に戻る際に，現実世界では感じることはない逆方向への反力を提示してしまうと指摘する被験者もいた（図 12）．しかし，その感覚が描画面から離れた瞬間の力の抜け具合に似ているという声もあり，より詳細な分析が必要である．

・処理速度に関しては，描画対象の詳細度に依存するが，最もポリゴン数が多いティーポット（ポリゴン数 7500 程度）のモデルにおいても画面更新速度は 30fps 以上を確保しており，体験者は特に遅延によるストレスなく描画操作を行えることを確認した．

## 7.　むすび

本研究では，MR 空間での仮想物体に対する絵筆による描画感の実現を目指し，これを実現する筆型デバイス MAI Painting Brush++ と描画感提示モデルを提案・実装し，これらを導入した MR 型描画システム MAI Painting Expert Ver.2.0 の開発を行った．提案する新しい筆型デバイスは，仮想物体に描画する際の描画対象への接触感の欠如を，絵筆の見た目，触力覚の両面から補うものであり，穂先のしなりを再現する機構としてベンド式，触力覚提示機構としてフラップ式を導入した．対話デバイス

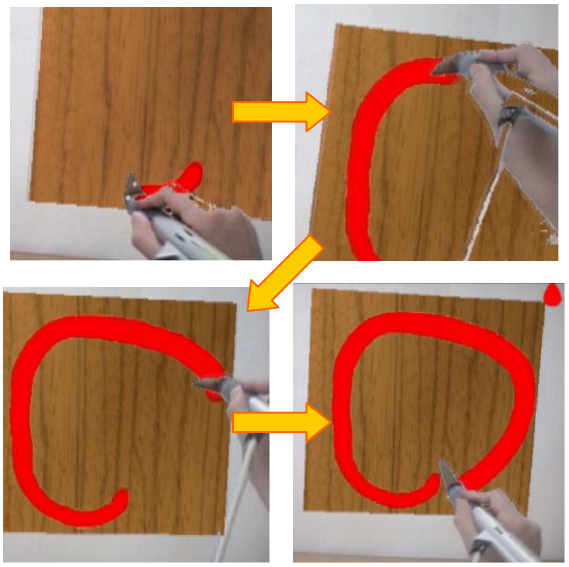
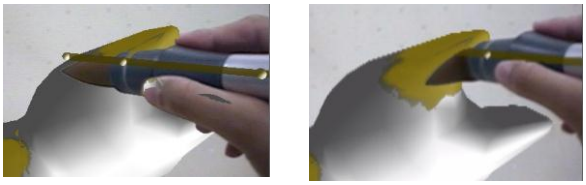


図 9　MAI Painting Brush++による
仮想平面への描画
Figure 9　Painting onto the flat virtual object
with MAI Painting Brush++.



(a) 平常時　　(b) 描画中

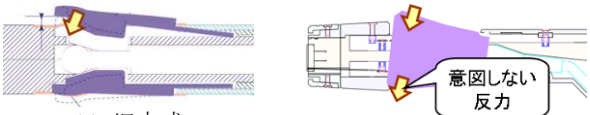
図 10　MAI Painting Brush++による
仮想曲面への描画
Figure 10　Painting onto curved virtual object
with MAI Painting Brush++.

表 3　MAI Painting Brush++における
5 人のユーザの評価平均
Table 3　Average of evaluation of MAI Painting Brush++
from five users

| | (a) | (b) | (c) | (d) | average |
|---|---|---|---|---|---|
| MAI Painting Brush++ | 4.60 | 4.00 | 4.80 | 4.60 | 4.50 |




図 11　MAI Painting Brush++による描画例.
Figure 11　Results of Painting Using MAI Painting Brush++




(a) 旧方式　　(b) 新方式

図 12　フラップ部の反力提示終了時の挙動
Figure 12　The behavior of flaps when the device
finishes to provide force feedback.

の完成度という点では，まだ改良の余地はあるものの，描画感を提示する機構とモデルの妥当性を示すことができたと考えられる．

今後は，穂先の硬さを考慮した穂先のはね・弾み感，描画対象の材質に応じた摩擦力の変化をモデル化するなど，穂先の「硬さ」「乾き」，絵筆の「重さ」「重心位置」，描画対象の「材質」といったパラメータを仮想物体への描画感算出モデルに追加し，より詳細な描画感の提示を検討する．また，本論文で提案した MAI Painting Brush++と既開発の実物体を対象とした筆型デバイスの機能を統合し，実物体，仮想物体だけでなく，実物体と仮想物体が混在する描画対象に対してもシームレスに描画感を提示することができれば，電子描画の利用用途の拡大が期待できると考えている．

## 謝辞

本研究は，特別研究員奨励費（課題番号 20･9217）「空間型作業を支援するポスト WIMP 型インタフェースの開発」による．

## 参考文献

[1] Curtis, C. J., Anderson, S. E., Seims, J. E., Fleischer, K. W., and Salesin, D. H.: Computer-generated watercolor; The Proceedings of ACM SIGGRAPH '97, pp. 421 - 430 (1997)

[2] Chu, N., and Tai, C.: MoXi: Real-time ink dispersion in absorbent paper; The ACM Transaction of Graph, Vol. 24, No. 3, pp. 504 - 511 (2005)

[3] Baxter, W., Wendt, J., and Lin, M.: IMPaSTo: A realistic, interactive model for paint; The Proceedings of the 3rd international symposium on Non-photorealistic animation and rendering (NPAR '04), pp. 45 - 148 (2004)

[4] 齋藤豪，中嶋正之：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.

[5] 岡部雄太，齋藤豪，中嶋正之：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.

[6] Otsuki, M., Sugihara, K., Kimura, A., Shibata, F., and Tamura, H.: MAI Painting Brush: An interactive device that realizes the feeling of real painting; The Proceedings of 23rd Annual ACM

Symp. on User Interface Software and Technology (UIST 2010), pp. 97 - 100 (2010)

[7] 大槻麻衣，杉原賢次，木村朝子，柴田史久，田村秀行：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)

[8] Ryokai, K., Marti, S., and Ishii, H.: I/O Brush: Drawing with everyday object as ink; Proceedings of CHI 2004, pp. 303 - 310 (2004)

[9] Vandoren, P., Laerhoven, T. V., Claesen, L., Taelman, J., Raymaekers, C., and Reeth, F. V.: IntuPaint: Bridging the gap between physical and digital painting; Proceedings of TABLETOP 2008, pp. 71 - 78 (2008)

[10] 岩井大輔，金谷一朗，日浦慎作，井口征士，佐藤宏介：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] Foskey, M., Otaduy, M., and Lin, M.: ArtNova: Touch-enabled 3D model design; The Proceedings of IEEE Virtual Reality 2002, pp. 119 - 126 (2002)

[12] Sandor, C., Uchiyama, S., and Yamamoto, H.: Visuo-Haptic Systems: Half-mirrors considered harmful; The Proceedings of World Haptics Conference (WHC 2007), pp. 292 - 297 (2007)

[13] 平田亮吉，星野洋，前田太郎，舘暲：人工現実感システムにおける物体形状を提示する力触覚ディスプレイ;日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol. 1, No. 1, pp. 23 - 32 (1996)

[14] 家室証，南瀧孝太，川上直樹，舘暲：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)

[15] Kamuro, S., Minamizawa, K., Kawakami, N., Tachi, S.: Ungrounded kinesthetic pen for haptic interaction with virtual environments; The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp. 436 - 441 (2009)

[16] Kamuro, S., Minamizawa, K., Tachi, S.: 3D Haptic modeling system using ungrounded pen-shaped kinesthetic display; IEEE Virtual Reality 2011, pp. 217 - 218 (2011)

（2011 年 8 月 7 日受付，11 月 21 日再受付）

## ［著者紹介］

**杉原 賢次**



2010 年立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒．現在，同 大学院博士前期課程在学中．卒業研究にて，筆型対話デバイスによる電子描画システムの研究開発に従事．情報処理学会・学生奨励賞，大会優秀賞を受賞．

**大槻 麻衣**（正会員）



2006 年立命館大・理工・情報卒．2011 年，同 大学院理工学研究科博士後期課程修了．2008 年より 2011 年まで学振・特別研究員．2011 年 4 月より同 大学総合理工学研究機構ポストドクトラルフェロー．博士（工学）．複合現実感，ポスト WIMP 型インタフェースの研究に従事．情報処理学会，VR 学会，ACM 各会員．2009 年 VR 学会論文賞を受賞．

**木村 朝子**（正会員）



1996 年大阪大学基礎工学部卒．1998 年同 大学院基礎工学研究科博士前期課程修了．同 大学助手，立命館大学理工学部助教授，科学技術振興機構さきがけ研究員等を経て，2009 年 4 月より立命館大学情報理工学部メディア情報学科准教授．博士（工学）．実世界指向インタフェース，複合現実感，ハプテックインタフェースの研究に従事. 電子情報通信学会, 情報処理学会, VR 学会，ACM，IEEE 各会員．VR 学会学術奨励賞・論文賞，情報処理学会山下記念研究賞等受賞．

**柴田 史久**



1996 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了．1999 年同 研究科博士後期課程修了．大阪大学産業科学研究所助手を経て，2003 年 4 月より立命館大学理工学部助教授．現在，同 情報理工学部情報コミュニケーション学科准教授．博士（工学）．モバイルコンピューティング，複合現実感等の研究に従事．VR 学会複合現実感研究委員会委員．IEEE，電子情報通信学会，日本ロボット学会，情報処理学会等の会員．VR 学会学術奨励賞・論文賞を受賞．

**田村 秀行**



1970 年京都大学工学部電気工学科卒．工業技術院電子技術総合研究所，キヤノン（株）等を経て，2003 年 4 月より立命館大学理工学部教授．現在，同 情報理工学部メディア情報学科教授．工学博士．1997 年より 2001 年まで，MR システム研究所にて「複合現実感研究プロジェクト」を率いた．VR 学会元理事，現在，評議員，複合現実感研究委員会顧問．編著書「Mixed Reality」(Ohmsha & Springer)「コンピュータ画像処理」（オーム社）など．電子情報通信学会フェロー，IEEE，ACM，情報処理学会，人工知能学会，映像情報メディア学会等の会員．VR 学会及び情報処理学会論文賞，人工知能学会功労賞等を受賞．

（C）NPO法人ヒューマンインタフェース学会