

仮想物体への描画感を実現する筆型デバイスの開発

杉原 賢次 大槻 麻衣 木村 朝子 柴田 史久 田村 秀行

Developing of BrushDevice with Visual and Haptic Feedback Mechanisms for Virtual Painting

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

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 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 painting target while painting on the target. In this research, we implement new BrushDevice which has visual and haptic feedback mechanisms to solve these problems. This paper describes that the design, mechanism and the pilot test.

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

1. はじめに

コンピュータを用いた描画支援に関する研究は、これまでも多数行われている。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。我々は、実世界での描画作業をモデル化し、絵筆の触感と描き味を実現する筆型デバイスを開発、それを用いて実物体へ直接描画することが可能なMR描画システム^[1]を実現した(図1)。この筆型デバイスでは、実物体に対する押し付け量を、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し、現実に近い描画感を再現している。

一方、MR技術には、実物体と仮想物体の両方を取り扱うことができるという特徴がある。しかし上記システムでは、仮想物体を描画対象とした場合、穂先を押しつける実対象が存在しないため、描画対象に接触したという感覚を得ることができない。そこで、本研究では仮想物体を描画対象とした新たな筆型デバイスの開発を行い、仮想物体に対する、よりリアルな描画感を追及する。

仮想物体を描画対象とした既存研究の中には、触覚ディスプレイを利用することで、より現実に近い描画感を再現しようとする試みがある。ArtNova^[2]、Visuo-Haptic Systems^[3]は、VR、MR空間における描画操作に、触覚ディスプレイである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デバイスで、ユーザへの詳細な力覚提示が可能となる。しかし、こうした拘束型の反力提示機構は、ユーザの動きを制限してしま



図1 筆型デバイスを用いた複合現実型描画システム

うという問題があり、より自由度の高い入力デバイスが求められている。

非拘束型の反力提示機構を有する描画デバイスとしては、Pen de Touch^[4]が挙げられる。この研究ではリンク機構を用いず、モータを使用することで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。しかし、このデバイスは画面上に表示された仮想物体に触れる、動かすなどのインタラクションを目的としており、描画を目的としたものではない。そのため、絵筆として用いるには描画感の表現に乏しいと考えられる。

本研究では、実世界での描画時に得られる反力、摩擦力に加え、筆自体の穂先形状の変形にも着目し、視覚・触覚の両方から仮想物体と穂先の接触感を提示する機構を検討する。そして、ユーザの腕を拘束することなく、高い描画感を表現可能な筆型デバイスの開発を目指す。

2. 描画感提示手法の提案と検討

2.1 手法の提案

筆型デバイスに穂先形状の変形機構、および手指に感じる反力、摩擦力の提示機構を内蔵することで、仮想物体に接触した際の描画感を再現する。本研究では、これらを実現する機構として、穂先の変形を実現するバンド式、反力、摩擦力を提示するフラップ式、スライド式、ベルト式の計4方式を考案した(表1)。各方式の詳細を以下に記す。

【穂先形状の変形機構】

バンド式: 樹脂パーツを連結させた軸を穂先に内蔵し、これを4本のワイヤを用いて引くことで、描画時の動きに応じて穂先を任意方向に湾曲させる。

【反力、摩擦力の提示機構】

フラップ式: 把持部を構成する3枚のフラップを開閉することによって反力を提示する。各フラップの開閉度合いを変化させることで描画中の穂先の動きに合わせた任意方向の反力を表現する。

スライド式: 把持部と穂先の間にはスライダを取り付け、これを軸に沿って動かすことでデバイスを把持している指先に仮想物体との衝突感を提示する。

ベルト式: 把持部に内蔵されたベルト部を動かすことによって、デバイスを把持している指にすべり感を提示し、絵筆を描画面に押し付けたときの反力を表現する。

2.2 試作システム

試作した筆型デバイスは、稼動部の動力源を全てソレノイドにより実現し、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。

試作した筆型デバイスを導入する描画システムのハードウェア構成を図2に示す。MR空間の管理は1台のデスクトップPCで行い、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)を用いた。また、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社製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。試作した筆型デバイスの制御は、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。

2.3 制御アルゴリズム

実世界での絵筆による描画を観察してみると、穂先の変形と実世界での描画時における穂先のしなりは、絵筆がどの程度描画面に押し付けられているかによって変化し、その際、一般には穂先は絵筆の移動方向と逆の方向を向く。そこで、本システムでは筆型デバイスの位置姿勢、および移動の軌跡と描画対象の位置姿勢から、穂先の向きと湾曲(しなり)量を算出する(図3)。

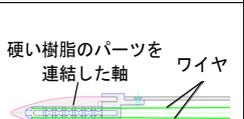
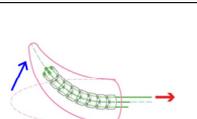
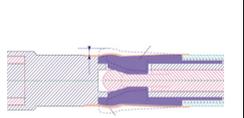
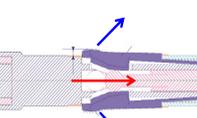
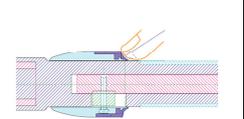
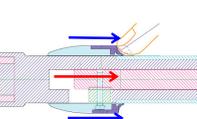
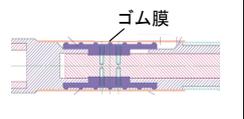
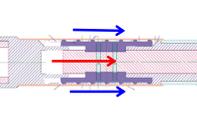
一方、穂先のしなりと把持部に加わる反力に着目する

と、実世界では絵筆を描画面に強く押し付けるほど手に加わる反力も大きくなる。このことから、穂先がしなる方向・量と、反力の方向・大きさの間には、ある程度の相関関係があると考えられる。そこで、今回は穂先のしなる方向・大きさに応じて反力を算出し、提示することとした。

(1) 穂先と反力の向き

まず筆型デバイスに取り付けた磁気センサの位置 P_{sensor} とデバイスの実測から得られる $handleLength$, $tipLength$ を基に穂先の根元位置 O 、及び先端位置 P_{tip} をそれぞれ求める。そして、この2点を結ぶベクトル OP_{tip} とポリゴンが交わっているとき、 O から前フレームにおける穂先の根元位置 O' へ向かうベクトル $O'O$ の向きを反力方向とする(図3(a))。しかし、デバイスの穂先の向きを求めるにはデバイスの軸となる OP_{tip} と垂直である平面 S 上における基準ベクトル V からの角度 θ を算出する必要がある。そこで、 O , O' , P_{sensor} の属する平面上

表1 各種フィードバック機構

外観	通常時	動作時
 バンド式		
 フラップ式		
 スライド式		
 ベルト式		

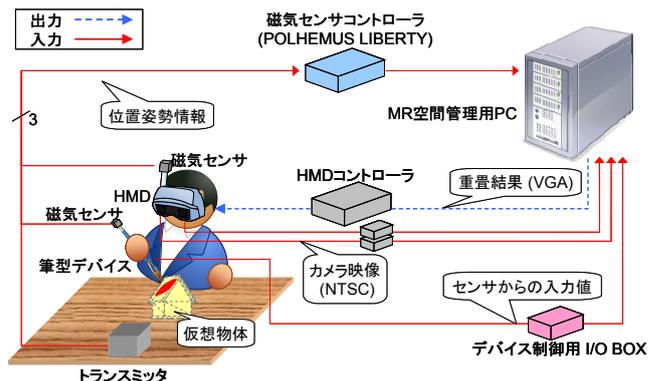
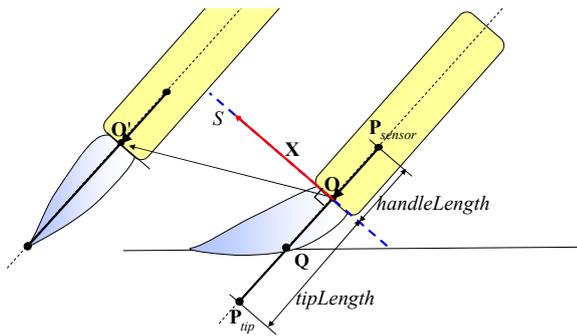
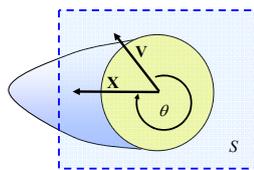


図2 システム構成



(a) 前フレームの位置情報を用いた反力方向の算出



(b) 平面 S における反力方向

図 3 反力算出アルゴリズム

で O を中心として P_{tip} を O' の方向へ $\pi/2$ 傾けたベクトル X を求めることで θ を算出する (図 3 (b)).

(2) 穂先のしなり量と反力の大きさ

ベクトル OP_{tip} が描画対象のポリゴンと交わっているとき、線分とポリゴンの交点 Q を求め、 O との距離を求める。実世界での描画では、強く押し付けるほどこの距離が小さくなり、しなり量及び反力が大きくなるので、これを制御するパラメータ w を以下の式により求める。

$$w = \frac{tipLength - |OQ|}{tipLength} \times s \quad (s: \text{定数})$$

2.4 運用結果

各試作デバイスを運用した結果、以下の知見を得た。

【バンド式】

描画中、筆の動きに合わせて穂先がしなることで、現実に近い描画感を表現できると好評であった。また、反力や摩擦力と比べ、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重要な要素であることが確認できた。ただし、ソレノイドでは駆動量が調整できず、穂先のしなり量を変更できないため、改善を求める声が多かった。

【フラップ式】

描画方向に応じて反力提示の方向を変えることができるため、現実の描画に近い反力を表現できた。また、描き始めなどに感じる衝突感の表現も可能であった。しかし、バンド式同様、ソレノイドの特性からフラップの開き具合を調節することができず、フラップを 2 段階 (開く・閉じる) でしか制御できないため、方向提示の解像度が十分ではなかった。また 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

制限されることも問題点として指摘された。

【スライド式】

指先にスライド部があたることで、衝突を表現できることが確認されたが、デバイスを把持している指の腹ではなく指先に反力が提示されることから、実際の感覚とは少し異なるという結果となった。

【ベルト式】

把持部の下でベルト部が動くことで、スライド式よりも現実の使用感に近い衝突感を表現できた。またフラップ式同様、ソレノイドを用いているため、衝突感の強弱を表現できないことが問題となった。

3. 描画感提示機構を内蔵した筆型デバイス

3.1 再設計

2.4 の運用結果を元に、筆型デバイスの再設計を行った (図 4)。再設計後のデバイスの内部機構を図 5 (a) に示す。運用結果で一番大きな問題となったのは、動力源としているソレノイドで駆動量が調節できなかったことである。そこで、新たな動力源として DC モータ (Maxon 社, RE10, 1.5 W, gear ratio = 4.7:1) を内蔵することで駆動量を調節可能とし、提示する反力の大きさ・向きの解像度向上を図った。

提示方式としては、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バンド式とフラップ式を組み合わせ、これらを各モータに繋がれたワイヤで同時に制御する新たな方式を考案、採用した。試作デバイスにおいて、バンド式は 4 つの動力源を用いていたが、3 つでも全方向に反力提示が可能なること、モータを内蔵するにあたり小型化、軽量化が必要なことから搭載するモータを 3 つとした。また、フラップ式は 3 枚のフラップを用いていたが、それでは 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という問題があった。そのため、把持部を円筒状のフラップで構成することにより、フラップ部のどの位置を持って反力が得られるよう改良を行った。

なお、フラップ式ではデバイスを把持している指先に直接反力を提示していたが、改良後のデバイスではフラップ部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 (図 5 (b))。

また、本デバイスでは位置姿勢検出用に、磁気センサを内蔵しており、制御アルゴリズムは 2.3 と同様である。

3.2 運用結果

仮想物を描画対象とした描画システムにて再設計後のデバイスを運用している様子を (図 6) に示す。本システムでは、実物体が CG に隠蔽されてしまうオクルージョン問題を考慮して背景を白色とし、デバイス部分をマスキング処理することでユーザに穂先がしなっている様子を提示している。

運用の結果、試作デバイスの運用時に問題となった反



図 4 視触覚提示機構内蔵筆型デバイス (再設計後)

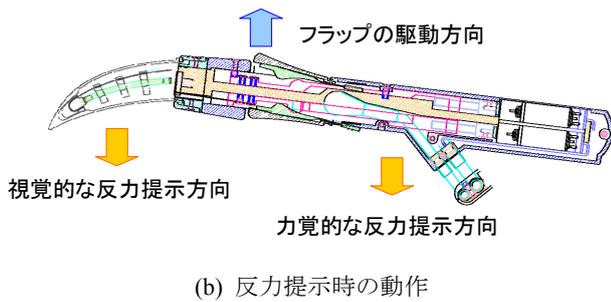
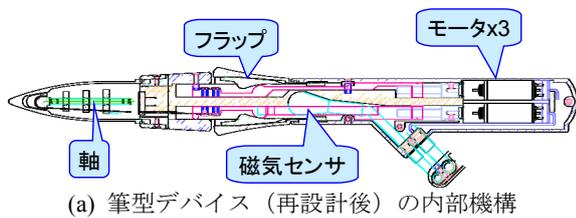


図 5 筆型デバイスの内部機構

力の大きさ・方向の解像度に関して大きな改善が確認できた。また、本システムを研究室の学生数名に体験させたところ、穂先のしなりによる視覚フィードバック、フラップの動きによる触覚フィードバックから描画感を得ることが可能であるという意見が得られた。さらに、本システムでは描画対象が実際には存在しないため、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も考えられたが、これらのフィードバックにより、描画対象の表面をなぞりやすいという意見も得られた。一方、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いう問題が確認された(図 7)。

4. むすび

本研究では、視覚・触覚の観点から描画時に得られる反力の表現手法を検討し、その結果から視覚フィードバック機構としてベンド式、触覚フィードバック機構としてフラップ式、スライド式、ベルト式の計 4 種類の試作デバイスを開発し、運用した。そして、そこから得られ

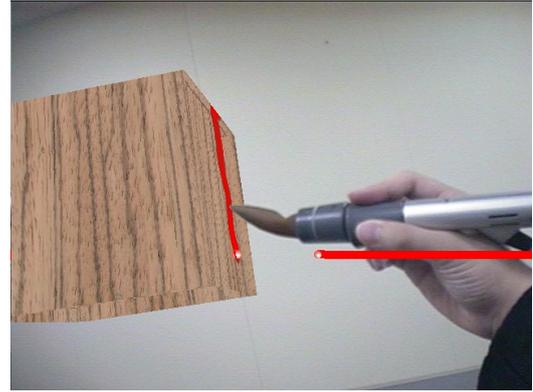


図 6 運用風景

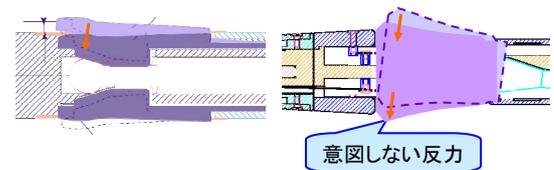


図 7 フラップ部の反力提示終了時
(左：旧方式 右：新方式)

た知見を基に、視触覚を併用した反力提示を行う機構を再度考案・開発し、仮想物体を描画対象とする新たな筆型デバイスの開発を行った。

本研究で開発した筆型デバイスは、反力提示機構搭載の筆型デバイスの第一期であり、これを運用していく中で、より詳細な評価、分析を行い、さらに発展したデバイスの開発を行うことを予定している。また最終的には、実物体と仮想物体の両方が混在する描画対象に対しても利用可能なデバイスの実現を目指す。

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」、JST 戦略的創造研究推進事業(さがりかけタイプ)「空間型メディア作品を強化する 7 つ道具型対話デバイス」による。

参考文献

- [1] 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 VR 学会論文誌, Vol. 15, No. 3, 2010. (掲載予定)
- [2] M. Foskey *et al.*: “ArtNova: Touch-enabled 3D model design,” *Proc. VR 2002*, pp. 119 - 126, 2002.
- [3] S. Christian *et al.*: “Visuo-Haptic Systems: Half-mirrors considered harmful,” *Proc. WHC 2007*, pp. 292 - 297, 2007.
- [4] 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”, 日本 VR 学会大会, 1A2-4, 2009.