

## 2D/3D 空間における描画操作に適した 筆型デバイスの開発

大槻麻衣, 塚平将司, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行

我々は、誰もが直観的に利用でき、2D/3D 空間における作業に幅広く用いることができる「道具型デバイス」の研究を行っている。道具型デバイスは、(1) 慣れ親しんだ既存の道具の形状とその道具ならではの触感・操作音を活用、(2) 目的に応じて異なった道具に持ち替えて利用できるツールセットという特徴がある。本研究では、この道具型デバイスの1つとして、描画操作に適した「筆型デバイス」を試作した。本稿ではその設計と機構、プロトタイプ、運用および実験によって得られた知見について述べる。

### Development of BrushDevice Facilitating Painting Operation in 2D/3D Space

Mai Otsuki, Masashi Tsukadaira, Asako Kimura  
Fumihisa Shibata, and Hideyuki Tamura

We have proposed novel interaction devices for various operations in spatial works such as mixed reality (MR) space; ToolDevice that uses a metaphor of existing tools which are familiar in everyday life. Such tools have good affordance, and at the same time, every user already has a mental model for their operation. These advantages not only lead users to the correct operation, but provide an intuitive operation. In the first example, we developed TweezersDevice for pick and move manipulations. In this paper, we introduce BrushDevice as a second device. We describe that its design, mechanism, prototype, pilot test, and findings from experience.

## 1. はじめに

我々は、誰もが直観的に利用でき、2D/3D 空間での作業に幅広く用いることができる「道具型デバイス」の研究を行っている[1]。道具型デバイスは、(1) 慣れ親しんだ既存の道具の形状とその道具ならではの触感・操作音を活用、(2) 目的に応じて異なった道具に持ち替えて利用できるツールセットという2つの特徴がある。これまでに選択・移動操作に適した道具型デバイスである「ピンセット型デバイス[1]」や先端部を付け替えることで多様な機能を切り替える「先端着脱式道具型デバイス[2]」を開発した。我々は次なる道具型デバイスとして、2D/3D 空間における描画操作に適した「筆型デバイス」を開発した。本稿ではその設計と機構、プロトタイプ、運用および実験によって得られた知見について述べる。

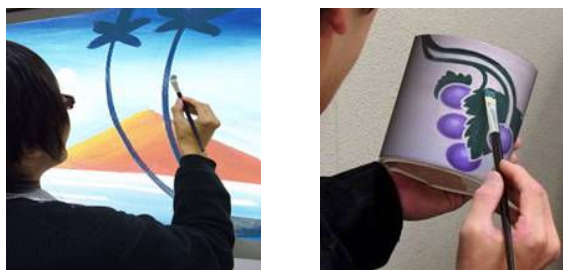
## 2. 関連研究

近年、コンピュータを用いた描画支援に関する研究が数多く行われている。例えば Curtis ら[3]や Chu ら[4]は紙にインクが吸収される挙動を物理的にシミュレートし、水彩画特有のかすれ、滲み、色の塗り重ねを実現している。Baxter ら[5]は、「IMPasTo」というインタラクティブ描画システムのためのアクリル絵具や油絵具のシミュレーション手法を提案し、キャンバス上に厚く塗り重ねる描画技法の実現や、キャンバス上の絵具のつや感を表現している。また、齋藤ら[6]は仮想の三次元筆モデルを作成し素描描画や水墨画、書道で用いられるような筆のストロークを実現している。

こうした研究では、入力デバイスとしてペンタブレットが広く利用されている[3]-[6]。しかし、その先端が硬質なスタイラスの操作感とは異なる点が多い。

そこで、実際の描画操作に用いられる道具の形状を入力デバイスに利用する研究が行われている。例えば Vandoren ら[7]は、筆の形状を利用したデバイスを開発し、そのデバイスとキャンバスとの接触面を追跡することで油彩画のシミュレーションを行う「IntuPaint」を開発した。岩井ら[8]の「Thermo-Painter」では絵具の代わりに温水や冷水を用いて描画操作を行い、温度差が生じた領域をサーモセンサで取得し、描画結果として利用している。これにより、実際に利用している絵筆やエアブラシをそのままコンピュータ上での描画操作に利用できる。その他にも、Ryokai ら[9]の「I/O Brush」では描画操作に用いる道具として実際のブラシを模した形状を採用している。

本研究でも、これらの事例に倣い、描画操作で用いられる既存の道具の特徴を利用したデバイスを作成する。実際に描画操作で用いられる道具には、筆やエアブラシのほか、パステル、色鉛筆など様々なものがあるが、今回は、誰でも使用したことがあり、初心者からプロの画家まで幅広く用いられる筆の形状を利用した筆型デバイスを提案・実現する。



(a) 広い平面への描画 (b) 実物体への描画  
図 1 目標とする描画操作例

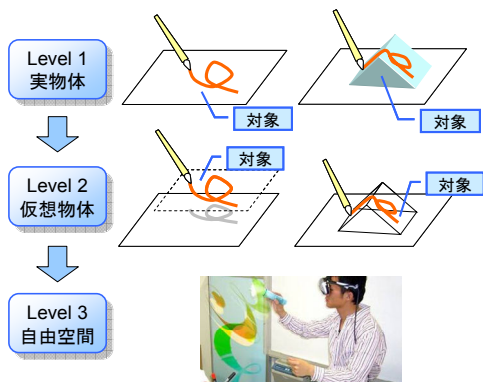


図 2 想定する描画対象

一方、描画対象に注目してみると、既存研究の多くが実物の平面を描画対象としている[3]-[9]。Thermo-Painter[8]ではドーム状の実物体も対象としているが、描画結果をプロジェクタによって実物体に投影しているため、複雑な形状の立体物や仮想物体への描画は対象としていない。その他、3次元空間を描画対象とした研究には、椎尾ら[10]による空中に手書きのメモを残すことができる空気ペンや、Schkolneら[11]による手のひらを用いて3次元空間に3次元曲面を描画できる「Surface Drawing」があるが、これらのシステムでは実物体や仮想物体を描画対象とはしていない。入力デバイスに関しても、空気ペンはジャイロセンサや加速度センサを内蔵したマウスのようなデバ

イス、Surface Drawingでは磁気センサを取り付けた手袋を装着し描画を行っている。本研究では、従来研究で対象としてきた実物体の広い平面に加え、2Dディスプレイとマウスが苦手としていた立体物、さらに実物体のみでなく仮想物も対象とする(図1)。また、従来の描画操作を拡張し表現の自由度を向上させるため、自由空間も描画対象とする。

### 3. 筆型デバイスの設計と試作

#### 3.1 想定する描画対象

先述の通り、本研究では従来の描画操作で対象としてきた実物体の広い平面に加え、立体物、仮想物、自由空間も描画対象とする。提案する筆型デバイスはこれらの描画対象について図2に示すような段階を踏んで開発を進めていく。

#### 3.2 筆によって描画される線の特徴

実世界の描画操作において、筆を用いて描く線には太さ、色の濃淡、かすれ、凹凸などの特徴がある。これらの中で筆の形状や、ユーザが筆を操作することによって明確に変化するの線は線の太さであると考えられる。よって、本研究ではまず、線の太さに着目する。

実世界の描画操作において、線の太さを変えるためには筆を傾ける、描画対象に筆を押し付けるといった操作を行う。しかし、本研究では実物体のみでなく仮想物体や自由空間も描画対象としているため、描画対象に筆を押し付けることができない場合もある。従って、本研究では先に述べた描画対象を想定し、以下の6種類の入力方式を提案する。

- (a) デバイスを動かす速度
- (b) 描画対象に対するデバイスの傾き
- (c) デバイスから描画対象までの距離
- (d) 描画対象へのデバイスの押し付け量
- (e) デバイスを把持する力
- (f) デバイスに取り付けたスティックの押し下げ量

以降、これらの方式を順に、「速度」「傾き」「距離」「押し付け」「把持力」「押し下げ」と呼称する。

#### 3.3 入力取得方式の検討

前述の6種類の入力方式を実現するために、筆型デバイスを4種類試作した(図3)。デバイスの本体には、実世界の描画操作に用いられる市販の絵筆(丸筆)を採用した。



図3 試作デバイス

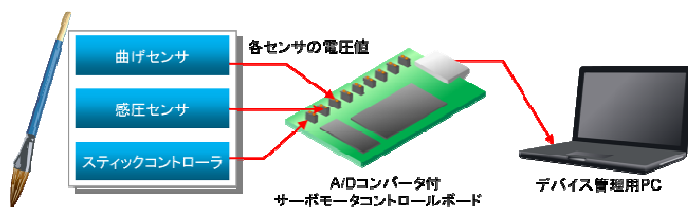


図4 各センサからの電圧値の取得

それぞれの絵筆の柄尻には位置姿勢を取得するための磁気センサ (Polhemus 社製 FASTRAK のレシーバ) を取り付けた。速度、傾き、距離はこの磁気センサを利用して取得する (図 3 (a))。押し付けは絵筆の穂先に沿うように取り付けた曲げセンサによって取得する (図 3 (b))。把持力についてはユーザがデバイスを把持する位置に取り付けた感圧センサを利用する (図 3 (c))。押し下げについては、感圧センサと同様に、ユーザがデバイスを把持する位置に取り付けた市販のゲームパッドのスティックコントローラを利用する (図 3 (d))。把持力と押し下げについては、把持しやすいよう軸に市販の三角グリップを取り付け、その上にセンサを設置した。

曲げセンサ、感圧センサ、スティックコントローラは A/D コンバータ付のサーボモータコントロールボードに接続する。そして、各センサの抵抗にかかる電圧値を取得

表 1 各入力方式において太い線を描画する操作

速度 1	デバイスを速く動かす
速度 2	デバイスを遅く動かす
傾き 1	描画対象に対してデバイスを立てる
傾き 2	描画対象に対してデバイスを寝かせる
距離 1	デバイスを描画対象に近づける
距離 2	デバイスを描画対象から遠ざける
押し付け 1	デバイスを描画対象に強く押し付ける
押し付け 2	デバイスを描画対象に軽く押し付ける
把持力 1	デバイスを強く握る
把持力 2	デバイスを握る力を弱める
押し下げ 1	スティックを押し下げる
押し下げ 2	スティックを元の位置に戻す

し、入力値とする。曲げセンサには Jameco Electronics 社製 FLX-01、感圧センサにはニッタ社製 Flexiforce、スティックコントローラにはアルプス電気社製 RKJXK122400Y を使用した。サーボモータコントロールボードには、共立電子産業株式会社の RBIO-6A を用いた。

また、デバイス管理用 PC にはパナソニック製 Let'snote R5 を用いた。各センサからの電圧値はシリアル通信によってデバイス管理用 PC に送られる (図 4)。

各方式について、(i) センサから得られる入力の最大値  $Input_{MAX}$  を線の太さの最大値  $Weight_{MAX}$  にマッピングする場合と、(ii) 入力の最小値  $Input_{min}$  をマッピングする場合の 2 種類に細分化したものを表 1 に示す。センサから得られる入力値  $Input$  を線の太さ  $Weight$  へマッピングするための変換式は (i) の場合は式 (1)、(ii) の場合は式 (2) で表される。

$$Weight = \frac{Input - Input_{min}}{Input_{MAX} - Input_{min}} * Weight_{MAX} \quad (1)$$

$$Weight = \left( 1 - \frac{Input - Input_{min}}{Input_{MAX} - Input_{min}} \right) * Weight_{MAX} \quad (2)$$

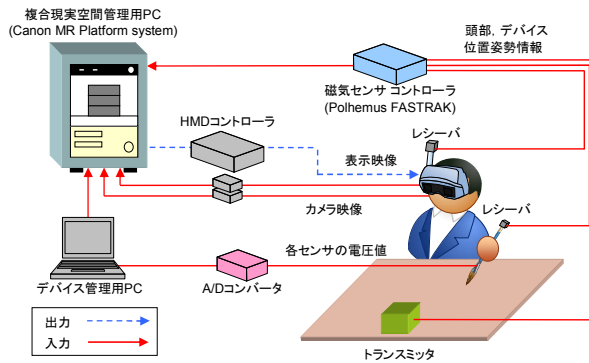


図5 システム構成

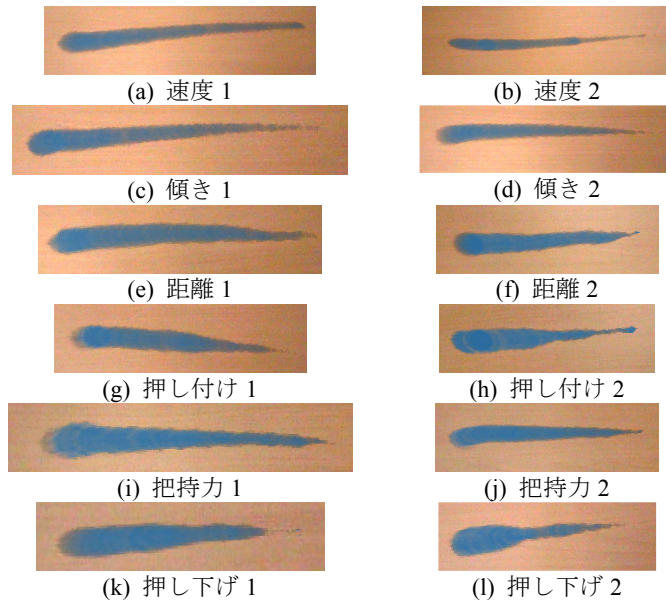


図6 各方式を用いて描画した線

### 3.4 複合現実空間での描画システム

試作したデバイスを用いて複合現実 (Mixed Reality; MR) 空間で描画操作を行うシ



図7 運用結果 (距離 1 を利用)



図8 操作風景 (距離 1 を利用)

システムを構築した (図 5)。MR 空間の提示は、キャノン製の MR プラットフォーム・システムを用い、ユーザはビデオシースルー型 HMD (Canon VH-2002) を装着することで、現実世界の光景と筆型デバイスによる描画 (CG) の実時間合成結果を確認することができる。

図 6 に、今回試作した筆型デバイスを用いて強弱をつけた線を描画した結果を示す。図より、押し付け、把持力、押し下げについては多少ブレがあるものの、どの方式でも線の太さを変更することができていることが分かる。

## 4. 試作デバイスの運用

### 4.1 運用方法

今回は想定する描画対象のうち、実物体 (Level 1) に限定し運用を行った (図 7)。操作内容としては、8 名の体験者に実物体の平面・立体物に対して、各入力方式を用いて自由に描画させる (図 8)。体験後、操作感について意見を得た。



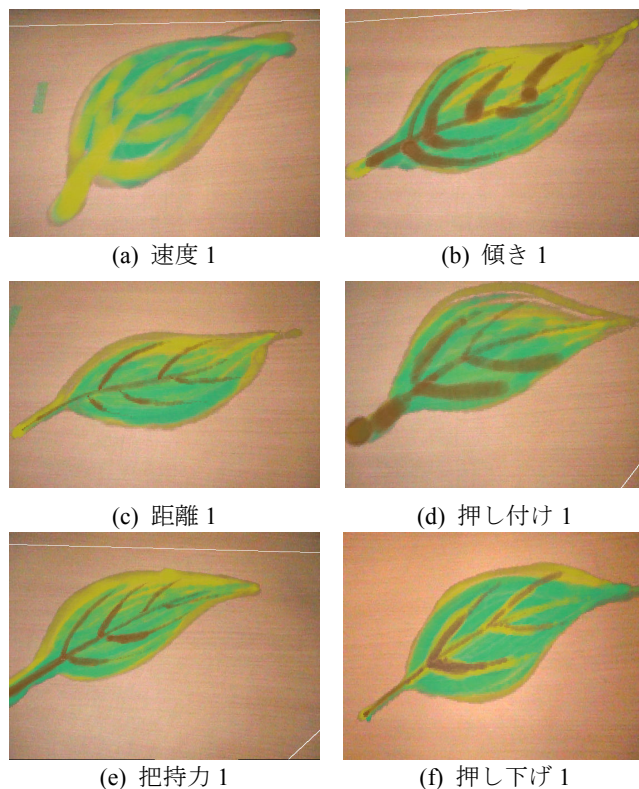


図 9 各方式を用いて同じモチーフを描いた例 (描画対象: 実物体平面)



図 10 各方式の描画例 (描画対象: 実物体平面)

#### 4.2 運用結果

図 9 に実物体の平面を対象に各方式を用いて同じモチーフを描画した例を、図 10 に、体験者が描画操作を行った例を示す。

速度に対しては、線の太さを変更するためにデバイスの操作速度を変えなければならないので、細かい操作には向かないといった意見が多かった。また、どの程度の速度で、どの程度の太さの線が描けるかが想像できないという意見もあった。

傾きに対しては対象が平面の場合は思うように線の太さを調節できるが、立体物の場合は描画位置によっては描画面に対するデバイスの傾きが意図せずに変化してしまうため思い通りの線の太さで描画できないといった意見もあった。また、傾き 1、2 のどちらの方式が良いかについては体験者によって異なっていた。

距離 1 と押し付け 1 に対しては「筆の形状に合っている」「実世界での操作に合っている」といった好意的な意見が得られたが、距離 2 と押し付け 2 は「実世界の操作とは大きく異なるため使いづらい」といった意見が多かった。ただし、押し付け 1 に対しては、今回使用した曲げセンサが一方向の曲げ量しか取得できないことによる操作感の悪さについての意見も多く得られた。

把持力については、感圧センサにある程度力を入れないと反映されない、長時間利用すると疲れるといった意見が多かった。押し下げに対しては、スティックの操作感に慣れるために時間を必要とする体験者が多かったが、慣れると操作しやすいといった意見も多く得られた。

### 4.3 考察

試作デバイスの運用結果より、実物体への描画を行う際は傾き 1, 2, 距離 1, 押し付け 1 のような実世界と同様の入力方式が適していることを確認した。入力 of 強弱に関しては、運用結果から使用するセンサについていくつかの問題が見つかった。まず、描画対象へのデバイスの押し付け量を取得するために用いた曲げセンサに関しては、押し付け量が一方しか取得できないという問題がある。また、デバイスを把持する力を取得するための感圧センサに関しては、センサにある程度の力を加えないと入力値に反映されない、また、シート状のセンサであるため、自分がどれだけ力を加えているかが分かりづらく、疲労感につながるという問題があった。

## 5. 実験

### 5.1 実験目的

運用において得られた各方式の特徴をさらに詳細に分析するために、ユーザが線の太さを変化させる際どのように筆型デバイス进行操作しているのかを記録し、1 人の試行の中のばらつきの有無、個人差の有無について各方式を比較する。また、練習を繰り返すことで、各方式による線の太さの調節方法をユーザがどの程度学習できるかについても確認する。

### 5.2 実験内容

実験手順を以下に示す。

- (i) 被験者に手本 (図 11) を提示する。
- (ii) 方式ごとに被験者に「どのようにすれば太い線を描画できるか」を説明する。
- (iii) 被験者に、手本のような線の強弱をイメージさせながら筆型デバイスで手本を左から右へ、太い線から細い線になるように 5 回トレースさせる。なお、この際被験者には現在の線の太さや描画結果を提示しない。
- (iv) 続いて、現在描画している線の太さを被験者に提示し、被験者が「慣れた」と感じるまで描画操作を自由に行わせる。なお、この際の変換式は式 (1), (2) を利用する。
- (v) 再度、描画結果や現在描画している線の太さを被験者に提示せずに、手本を 5 回トレースさせる。
- (vi) 手順 (ii) ~ (v) を各方式について繰り返す。

対象とする方式は、表 1 にあげたもののうち、先の運用において「実世界の操作とは大きく異なるため使いづらい」という意見があった方式 (速度 2, 距離 2, 押し付け 2), 現在のセンサでは正しい値が取れないことが明らかな方式 (押し付け 1) を除いた 8 種類とする。描画中はデバイスの位置姿勢と、センサ値を毎フレーム記録する。また、本実験では描画対象として実物体の平面を用いる。被験者は筆型デバイスを触

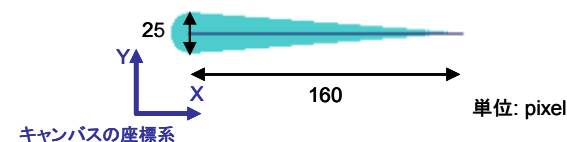


図 11 被験者に提示する図 (線の太さに変化をつけた直線)

ったことがない学生 3 名である。

### 5.3 実験結果

横軸を入力されたセンサ値、縦軸を線の太さとして全データを散布図にまとめた結果を図 12 に示す。方式ごとに「1 人の被験者の全試行における値のばらつき具合」と「個人差の有無」について分析を行った。

まず、1 人の被験者の全試行における値のばらつき具合に着目すると、ばらつきが大きい方が同じ線を描画することがより難しいと考えられる。実験結果より、学習前では、距離 1 (図 12 (g)) のばらつきが非常に小さい。これに対して、速度 1 (図 12 (a)), 傾き 1, 2 (図 12 (c), (e)), 把持力 1, 2 (図 12 (i), (k)), 押し下げ 1, 2 (図 12 (m), (o)) についてはばらつきが大きい。学習後の実験結果を見ると、傾き 1, 2 については、描き始めや中間点付近のばらつきが目立たなくなっている (図 12 (d), (f))。また、押し下げ 1, 2 についてもある程度収束するようになる (図 12 (n), (p))。逆に、速度 1 は学習後も収束が見られず終端に近づくほどばらつきが顕著に現れた (図 12 (a), (b))。

次に個人差の有無に着目すると、結果より、学習前に個人差が小さいのは距離 1 (図 12 (g)) のみであった。

### 5.4 考察

4.2 の運用結果で評価の高かった距離 1 は、学習前から 1 人の被験者の全試行における値のばらつき具合、個人差ともに少なかった。また、同様に、傾き 1, 2 も、学習前にはばらつきがあるものの、他の方式と比べて学習後のばらつきが少ない傾向があった。

次に、各方式について分析する。

**速度:** 微調整が難しく、特に最大速度が人によって異なるため、変換式の変更や学習では安定した線を描くことは困難である。そのため、速度は精密な描画ではなく、大まかな、動きのある線を描画するのに向いていると考えられる。最大速度については学習前の結果から、実験者が想定するよりも遅いことが分かったので現在設定している  $Input_{MAX}$  をより小さい値にする必要があることが分かった。また、ユーザがデバイスを動かす際の最大速度のみをシステムが学習するという方法も考えられる。

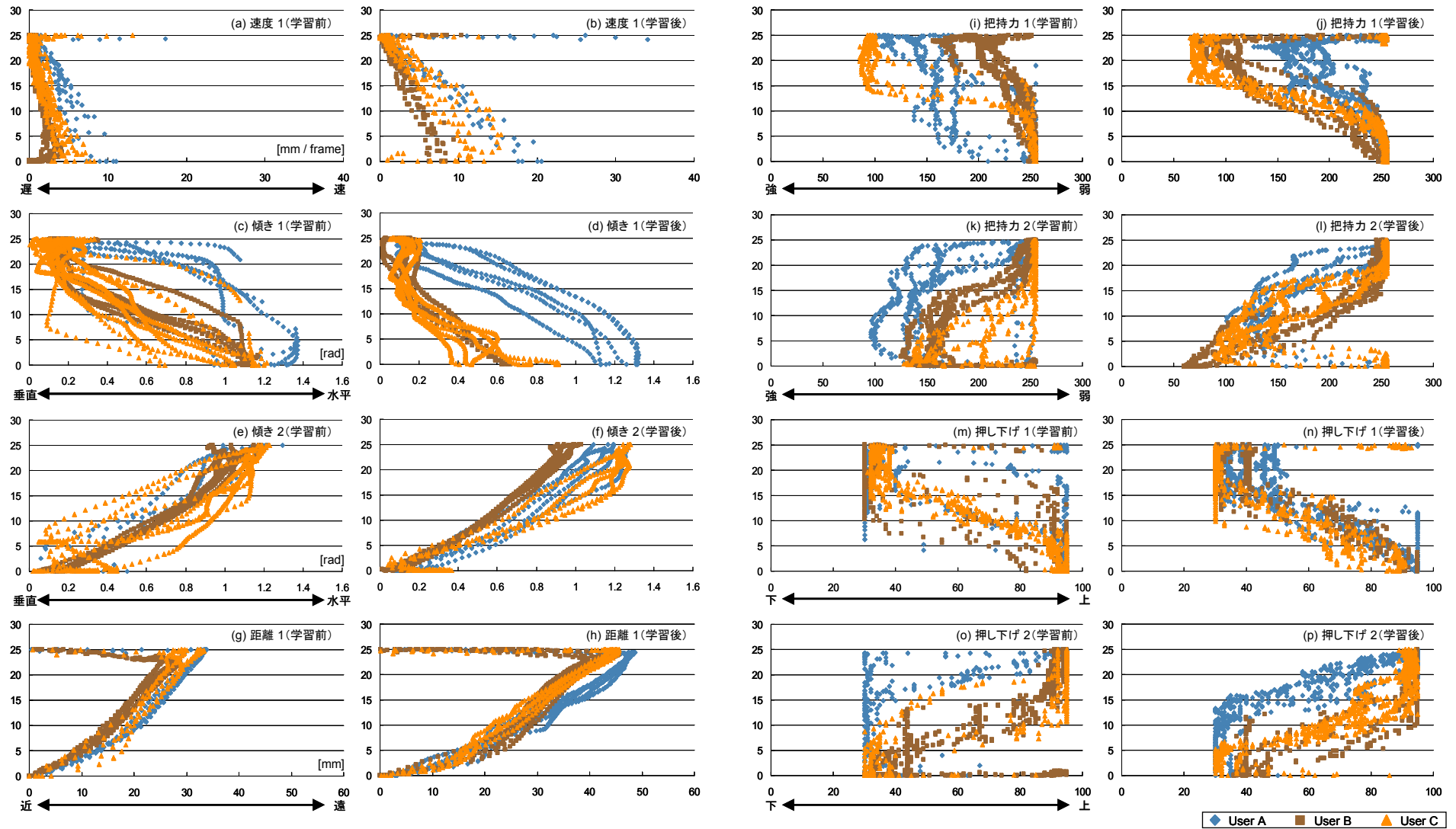


図 12 実験結果 (横軸: センサ値, 縦軸: 線の太さ [単位 pixel], 各方式とも左: 学習前, 右: 学習後)



**傾き**：学習後の傾き 1 と 2 を比較すると、傾き 2 の方が試行間でのばらつきも個人差も少なくなっている。このことから、徐々にデバイスを立てる方が被験者にとって容易であることが分かる。ただし、今回は 1 種類の図形しか描画させていないため、他の図形(曲線を含むような)でも同様の傾向があるのかどうかを確認する必要がある。

**距離**：最大距離については実験者が想定するよりも長いことが分かった。速度と同様に、 $Input_{MAX}$  の値を変更する必要がある。ただしこれについてもユーザがデバイスを動かす際の最大距離をシステムが学習する方法が考えられる。

**把持力**：学習前の把持力 1 と 2 を比較すると、2 の方が試行間でのばらつきも個人差も大きい。このことから、力を入れた状態から徐々に力を抜く方が容易であることが分かる。また、ある程度は学習によって適応可能であるものの、被験者の想定する最大把持力は実験者が想定するよりも小さい。このことが、先の運用で挙げた疲労感の原因になっていると考えられる。これについては今後、入力値の取得機構を見直すことによって改善を図る必要がある。

**押し下げ**：学習後の押し下げ 1 と 2 を比較すると、1 の方が試行間でのばらつきも個人差も大きい。このことから、力を入れた状態から徐々に力を抜いていく方が容易であることが分かる。これは、把持力と同じ傾向となっているが、把持力では値を上手く変化させられていなかった被験者でも押し下げでは滑らかに値を変化させることができている。これは利用したアナログスティックにばねがついており、スティック自身に初期位置に戻ろうとする力があるためだと考えられる。よって、把持力を取得するための機構を、現在利用しているシート状の感圧センサから、指を離すと元の位置に戻るようなストロークのあるボタン型センサに変更することで、ユーザが疲労を感じることなく、滑らかに強弱をつけることが可能になると考えられる。

## 6. むすび

本研究では、空間での描画操作に適した筆型デバイスを提案、試作した。運用結果から、実物体への描画を行う際は傾き、距離、押し付けのような実世界と同様の入力方式が適していることを確認した。さらに、運用において得られた各方式の特徴を実験によって詳細に分析・確認した。

今後の展開としては、以下のような方向性を計画している。

- (1) 5 章の実験では直線のみを描画させたが、曲線や角があるような場合でも同様の傾向が得られるかどうか、実験により確認する。
- (2) 実験の結果得られた特徴から、各方式について入力値を線の太さに対応付けるための変換式を求め、実際に運用・評価する。
- (3) 個人差が大きかった方式については、ユーザが事前に描画した線から、各ユーザに適応した変換式を自動生成する。

(4) (2) (3) では改善できない方式について、ユーザからの入力値を取得する機構を見直し、引き続きデバイスの改良を進める。

(5) 本稿では描画対象が実物体の場合までを検討したので、今後、仮想物体、自由空間へと拡張する。描画対象が実物体の場合、実際にデバイスが実物体に触れることによって触力覚を得ることが可能であるが、仮想物体や自由空間の場合、デバイスを描画対象に接触させることができない。そこで、描画面(仮想物)とデバイスが接触したことをユーザに分かりやすく提示する方法を検討する必要がある。

(6) 平筆、面相筆といった様々な形状の穂先についても検討する。

**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」、JST 戦略的創造研究推進事業(さきがけタイプ)「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) 上坂晃雅, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行, “複合現実空間との対話操作のための道具型デバイス”, 電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解研究会, 電子情報通信学会技術報告 PRMU 2007-170, Vol. 107, No. 427, pp. 81 - 86, 2008.
- 2) 福田健悟, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行, “Top-AttachableToolDevice: 先端部が着脱可能な新しい道具型デバイス”, 第 71 回情報処理学会全国大会講演論文集 (4), 2Y-2, pp. 163 - 164, 2009.
- 3) C. J. Curtis, S. E. Anderson, J. E. Seims, K. W. Fleischer, and D. H. Salesin, “Computer-generated watercolor,” Proc. SIGGRAPH 97, pp. 421 - 430, 1997.
- 4) N. S.-H. Chu and C.-L. Tai, “MoXi: Real-time ink dispersion in absorbent paper,” Proc. SIGGRAPH 2005, pp. 504 - 511, 2005.
- 5) W. Baxter, J. Wendt, and M. C. Lin, “IMPASTo: A realistic, interactive model for paint,” Proc. the 3rd Int. Symp. NPAR, pp. 45 - 148, 2004.
- 6) 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, 2005.
- 7) P. Vandoren, T. V. Laerhoven, L. Claesen, J. Taelman, C. Raymaekers, and F. V. Reeth, “IntuPaint: Bridging the gap between physical and digital painting,” Proc. TABLETOP 2008, pp. 71 - 78, 2008.
- 8) 岩井大輔, 金谷一郎, 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.
- 9) K. Ryokai, S. Marti, and H. Ishii, “I/O Brush: Drawing with everyday object as ink,” Proc. CHI 2004, pp. 303 - 310, 2004.
- 10) 椎尾一郎, 山本吉伸, “コミュニケーションツールのための簡易型 AR システム”, コンピュータソフトウェア, Vol. 19, No. 4, pp.246 - 253, 2002.
- 11) S. Schkolne, M. Pruet, and P. Schröder, “Surface drawing: Creating organic 3D shapes with the hand and tangible tools,” Conf. on Human Factors in Computing Systems archive, pp. 261 - 268, 2001.