

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

大槻 麻衣^{*1} 杉原 賢次^{*1} 中嶋 友美^{*2} 木村 朝子^{*1} 柴田 史久^{*1} 田村 秀行^{*1}

A Mixed Reality Painting System and Its Interaction Device That Realizes the Taste of Real Painting Brush

Mai Otsuki^{*1}, Kenji Sugihara^{*1}, Tomomi Nakajima^{*2},
Asako Kimura^{*1}, Fumihisa Shibata^{*1}, and Hideyuki Tamura^{*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, the operational feeling is different from that of real painting tools because of its rigid nib. In addition, many users want "direct manipulation" and want to see the moving of the brush tip while painting. Therefore, we realized a digital painting system which has three requirements to solve these problems: (1) It realizes the taste of actual painting brush using tip bending and interactivity with computer, (2) Users can paint both 2D and 3D, (3) Users can hold a real object and paint its surface directly. In this study, we developed BrushDevice for (1), and proposed a painting model that realises a bending tips and stroke effects. In addition, we developed mixed reality (MR) painting system for (2)(3).

Keywords: Painting simulation, Input device, Brush device, Mixed Reality.

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タッチのツールが充実し、今やグラフィックデザイナー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。

そうした流れの中で、与えられた写真画像を絵画調に加工する non-photorealistic rendering が提案され、CG の一分野を形成した [1]。さらには、より積極的に水彩画や油彩画調の描画を対話型でコンピュータ上に実現しようとする研究も活発に行われている [2-6]。結果として得られた画像を観る限り、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いる。

問題は、そうした絵画調画像の描く手段と道具である。優れた絵画調ペインティングを実現する先行

研究では、入力デバイスとしてペンタブレットを利用するものが大多数である。この場合、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る。即ち、手元のペン先を見ずに、画面を見ながらブラインド操作で絵を描く訳である。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、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」を求める人が少なくない。また、筆圧しか制御できない硬質なペンタブレットの触感を嫌い、もっと実際の絵筆に近い感触と描き味を望む声もある。本当に絵を描く場合には、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感じながら描画を行うからである。

I/O Brush [7] は、液晶ディスプレイがタブレットと一体となった「液晶タブレット」を用いることで直接操作を可能にした開発事例である。タブレット面に直接絵を描く感覚は得られたが、大きな刷毛での色塗りのタッチに留まっている。IntuPaint [8] は、穂先部を多数の光ファイバー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

*1 立命館大学大学院理工学研究科

*1 Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

*2 現在、(株)日新システムズ

*2 Nissin systems Co. Ltd.

している. ThermoPainter [9] の場合は, 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なので, 触感や穂先のしなり具合は絵筆そのものである. しかし, 両システムとも, 背面投影型のスクリーン面をなぞるので, 直接操作ではあるが, 描画対象が限定されるという制約がある.

以上のような先行研究の状況を踏まえた上で, 我々は, 以下のような要件を満たす汎用性・拡張性のある電子描画システムを研究開発することにした.

- (1) 穂先のしなりを積極的に利用した描き味とコンピュータと対話性を両立させる
- (2) 平面・立体を問わず直接描画可能とする
- (3) 実物体を手に持ちながら, その表面に描画することも可能とする

本研究では, (1) の要件を満たす新しい筆型対話デバイス (以下, 単に「筆型デバイス」と呼ぶ) を設計・開発し, 穂先のしなりや描線の掠れを実現する描画モデルを再構築する. また, 要件 (2)(3) の実現方法として, 複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術を利用した電子描画システムを考え, プロジェクタを利用した2次元平面への描画は, そのサブセットであるものとした.

以降, 2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設計・開発した筆型デバイス, 複合現実型描画システムについて述べる. 3章では絵筆が描く線をモデル化し, システムを用いた絵筆らしい描線の生成手順について述べる. 4章では, 3章で生成した描線に実世界と同様の効果を付与する手法について述べ, 5章ではトータルな電子描画システムとしての構成と運用から得られた知見について述べる.

2. 絵筆感覚の対話デバイス

2.1 絵筆によるフットプリントとストローク

実世界における絵筆を用いた描画では, 絵筆の穂先と描画対象への接触方法を変えることで, 多様で表現力豊かな線を描画可能である. 通常, 穂先が接触することにより描画対象に残る絵具の跡は「フットプリント」, それが連続的に並んだ軌跡としての線は「ストローク」と呼ばれている (図1). 対話型の電子描画システムでは, 対話デバイスで如何にしてフットプリントの位置と形状を入力し, 絵筆の動きを模したストロークを構成するかが鍵となる.

2.1.1 フットプリントの形状と制御

先行研究のほとんどは, フットプリントの概念を積極的に導入しているか, 明示的に記述されていなくても, その概念に基づく描画モデルを採用していると考えられる. フットプリントの形状は, 単純な円や楕円を用いるものから, 仮想的に筆の3次元幾

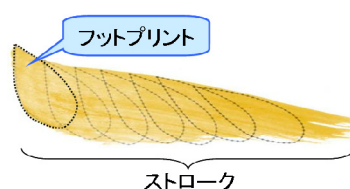


図1 フットプリントとストローク

Fig. 1 Footprint and stroke

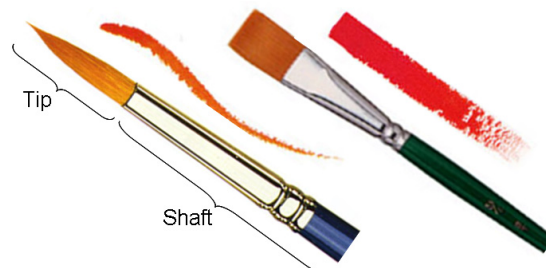


図2 実際の絵筆: 丸筆と平筆

Fig. 2 Actual paint brush: Round brush and flat Brush

何形状をもってフットプリントを動的に計算するものまで多岐にわたる. ただし, いかに精密なモデルを有していても, ペン先の圧力と位置しか取れないシステムでは, フットプリントの形状を絵筆感覚で制御することは難しく, 何らかの方法で穂先に仮想的な挙動を与え, 模擬的に形状を変化させているに過ぎない.

極論すれば, フットプリント形状に全く自由度はなくても, 絵具を置く感覚で点描画や印象派風の絵を描くことはできる. しかしながら, 一般性のある電子描画システムを目指すのであれば, 実際の絵筆を模した穂先をもち, その穂先のしなり量に応じてフットプリントの形状が変化し, 穂先の方向に応じて描線にひねりを与える方法を実現することが望ましい. 絵筆の種類は多数あるが [10], 一般に, 穂先の形状から, 丸筆と平筆に大別できる (図2). 丸筆は主に強弱をつけた線や細かい模様を描く時に用いられ, 平筆は広い面を塗る時に用いられる. さらに, それぞれの中で, 用途に応じて様々な太さや柔らかさのものを使い分ける. 本研究では, こうした穂先を物理的に選択できる筆型デバイスを導入することを第一義とした.

絵筆のしなりに関しては, 既存研究 [8, 9] では押し付けられ, しまった状態の穂先を画像として観察する方法を採っていたが, 本研究では, 絵筆の位置姿勢に加え, 対話デバイス内部にしなりの状態 (しなり量・方向) を検出できる機構をもたせることにした.

2.1.2 ストロークの形成と質感

絵筆に近い感覚の対話デバイスを導入し, その位置姿勢やしなり状態が実時間取得できるならば, 本物と同じ感覚で運筆するだけで, フットプリントの



図 3 本物の絵筆で描いたストローク

Fig. 3 Strokes by an actual paint brush

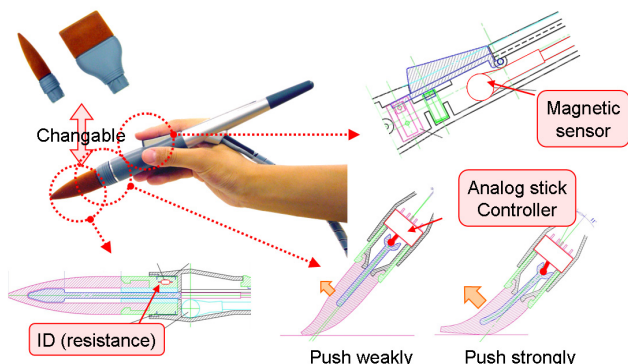


図 4 筆型デバイスの内部機構

Fig. 4 BrushDevice and its mechanism

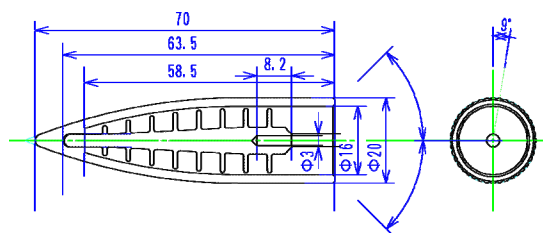


図 5 穂先(丸筆)の寸法

Fig. 5 size of BrushDevice's tip (round)

軌跡は形成できる。そのストロークに絵画らしい質感を与えるには、穂先に含まれる絵具の属性と分量とをシミュレートすればよい。

本研究では、ストロークに与える絵画らしい効果として、以下の3つを考える。

【濃淡】絵具は顔料などの着色成分に油や糊などの固着成分を加えたもので、配合する固着成分の割合が絵具そのものの濃度を決め、これに混ぜる溶剤の量によって幅広い濃淡が表現できる [11]。穂先全体で濃度の違う絵具が移流し混合することにより生じる現象である。特に水彩画では、穂先に十分水を含ませてから絵具を馴染ませるため、根元は水の割合が多く、毛先では濃度の高い絵具が直接付着し、中間部分では重力で毛先に流れ落ちる水と毛管現象で根元に吸い上げられる絵具が混合する。その結果、穂先全体では毛先が濃く根元が淡いグラデーションが形成される (図 3 (a))。

【刷毛目】穂先の繊維の流れに沿ってストロークを描いたときに、穂先の各繊維束が保持する絵具の濃度差に起因して、縞模様が出現する現象である (同図 (b))。この濃度差は、毛管現象による絵具の吸引

力が繊維束ごとに異なるために発生する。

【掠れ】穂先で保持する絵具がなくなった場合、または絵筆の移動速度が速く穂先表面への絵具の移流が間に合わない場合に生じる現象である。描画面に絵筆が接触しているにもかかわらず、絵具が描画面に付着する箇所とそうでない箇所が発生する (同図 (c))。

先行研究でも、結果的にこうした効果を生み出しているものは存在するが、本研究では、絵具量の保持と移流を積極的かつ統一的に扱う計算モデルを導入する。我々の筆型デバイスに適したモデルとして、Zhang ら [12] の絵具の蓄積・移流モデルに、Baxter ら [13] のタンク & パイプ構造という考え方を結合・発展させることで、濃淡・刷毛目・掠れの表現が可能なモデルを提案する。

2.2 筆型デバイス

上記の設計思想に基づき、下記のような機構をもつ筆型デバイスを設計・開発した (図 4)。本体の長さは 22 cm、グリップ部の最大の太さは直径 25 mm である。

(1) 穂先の種類の切り替え

様々な種類の絵筆に対応するため、本研究で開発する筆型デバイスでは先端部を付け替えることで、筆の種類を切り替える。具体的には丸筆、平筆、および丸筆の一種であり、より細い線を描画するための面相筆を用意した。先端部には抵抗値の異なる固定抵抗を内蔵しており、抵抗値を読み取ることによって現在接続されている穂先の種類を判別する。

今回作成した穂先は、厚さ約 2 mm のシリコンで作成された表面に凹凸をつけ、さらに静電植毛技術を用いて加工を施しており、描画時における描画対象との摩擦を抑えている。代表例として、丸筆の寸法を図 5 に示す。

(2) 位置姿勢・しなり状態の検出

筆型デバイスの位置姿勢を取得するために、磁気センサを内蔵させる。さらに本研究では実際の絵筆を模した入力デバイスで実物体に直接描画を行うことを利用し、筆型デバイスを実際に描画対象に接触させた時に生じる穂先の動きを直接取得可能な機構を備える。具体的には、穂先のしなり量・方向を取得するためにアナログスティックコントローラを内蔵するものとした。本研究で用いた穂先では約 200 段階の分解能で x, y 各軸におけるアナログスティックの変化量が取得可能である。

3. 絵筆のしなりによる描画モデル

3.1 ストローク生成処理の流れ

本研究で提案する描画モデルでは、以下の処理を毎フレーム繰り返すことにより、絵筆らしいストロ

ークを生成すると考える。

- (i) 筆型デバイスの穂先のしなり量・方向に応じたフットプリントの生成
- (ii) 筆型デバイスの位置姿勢，穂先のしなり量・方向に基づく描画点の算出
- (iii) 描画点を中心とした，描画対象ポリゴンへのフットプリントのマッピング

3.2 フットプリントの生成

【フットプリントの基本形状】

本研究では実際の絵筆による描画結果を基に，フットプリントの基本形状として，丸筆と面相筆には滴形，平筆には長方形を割り当てる（図6）．滴形の形状に関しては，島田ら [14] の形状を採用した．

【フットプリントの大きさ・形状】

実際の絵筆による描画では，穂先のしなり量に比例して穂先と描画面との接触面積が広がる．また，描画面に対して絵筆を傾け，穂先を寝かせるようにして描画した場合にも接触面積は広がるが，この場合フットプリントの横幅はほとんど変わらず，縦に長く伸びた形状となる．

よって，本研究ではフットプリントの基本形状に対し，デバイスから得られるしなり量 θ および描画面に対する穂先の傾き ϕ を考慮したスケールリングを行い，フットプリントを生成する．具体的には，生成するフットプリントの横幅を θ ，縦幅を ϕ に応じて変化させる．図7に筆型デバイスのパラメータを示す．まず， θ はアナログスティックコントローラの軸が初期状態からどれだけ傾いたかとし，以下の式で算出される．

$$\theta = \frac{|\mathbf{V}_{bend}|}{bend_{max}} \cdot \theta_{max} \quad (1)$$

ここで， \mathbf{V}_{bend} はアナログスティックコントローラから得られる穂先のしなり量・方向をあらわすベクトル， $bend_{max}$ は事前に計測した最大しなり量， θ_{max} はその時の穂先の傾き量である．

また，描画面に対する穂先の傾き ϕ ($0 \leq \phi \leq \pi/2$ ，アナログスティックコントローラの軸と描画対象のなす角度が0度に近いときに大)は，磁気センサから得られる描画面に対する筆型デバイスの傾き $\phi_{brush2canvas}$ と式(1)で求めた θ より式(2)によって算出される．

$$\phi = \phi_{brush2canvas} - \theta \quad (2)$$

ここで，実際に丸筆・面相筆と平筆の絵筆のフットプリントを比較すると，平筆の横幅は，しなり量が大きく変化しても丸筆・面相筆ほど大きく変化せず，最小の横幅も0になることはない．

よって，丸筆・面相筆における基本形状に対する横方向の拡大率 $scale_w$ と縦方向の拡大率 $scale_h$ は次

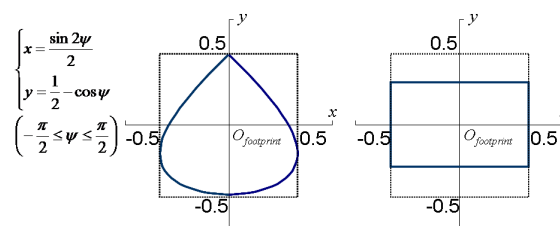


図6 フットプリントの基本形状 (左：丸筆・面相筆，右：平筆)

Fig. 6 The basic shape of footprint in our system (Left: Round and liner brush, Right: Flat)

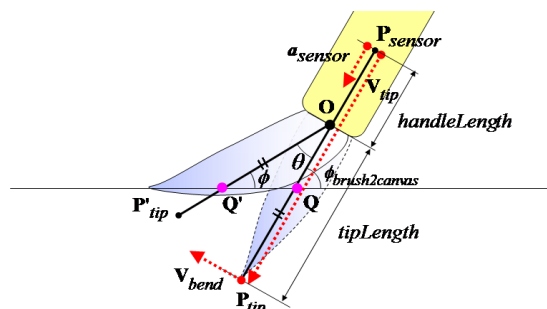


図7 筆型デバイスのパラメータ

Fig. 7 Parameters of BrushDevice

式のように設定した．

$$scale_w = \frac{\theta}{\theta_{max}} \cdot scale_{w_{max}} \quad (3)$$

$$scale_h = \left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \cdot \frac{2}{\pi} \cdot scale_{h_{max}} \quad (4)$$

ここで， $scale_{w_{max}}$ ， $scale_{h_{max}}$ は穂先の種類ごとに定められた，生成されるフットプリントが取りうる最大の拡大率である．

一方，平筆の横方向の拡大率については式(5)のように設定した．

$$scale_w = \alpha \cdot scale_{w_{max}} + (1.0 - \alpha) \cdot \frac{\theta}{\theta_{max}} \cdot scale_{w_{max}} \quad (5)$$

ここで α は $scale_{w_{max}}$ に対して保障される最小の拡大率を決定するための係数 ($0 < \alpha \leq 1.0$) であり，今回は0.8に設定した．なお，縦方向の拡大率については丸筆・面相筆と同様，式(4)によって算出する．

【フットプリントの向き】

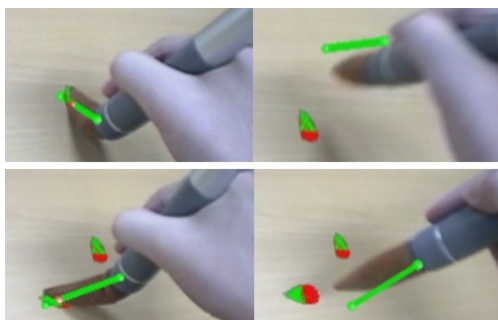
絵筆による描画では，穂先のしなり方向に沿って筆跡が残る．これに倣い，前述の処理で変形させたフットプリントをしなり方向に合わせて回転する．

実際に，上記アルゴリズムを丸筆に適用し，フットプリントを描画した結果を図8に示す．穂先のしなり量・方向，穂先の傾きに応じてフットプリントが回転・変形していることが分かる．

なお，図8(a)では穂先の形状と実際に描画されるフットプリントの形状を比較するため，穂先の上にフットプリントを描画している（実体験時には，これは表示されない）．



(a) しなり量・デバイスの傾きに応じた拡大・縮小
(a) Changing the shape of footprint depending on an amount of bending and tilt



(b) しなり方向に応じたフットプリントの回転
(b) Rotating the shape of footprint depending on a direction of bending

図 8 フットプリントの生成
Fig. 8 Generating footprints

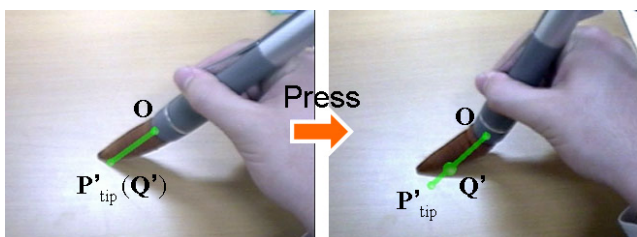


図 9 しなり量・方向に応じた描画点の移動
Fig. 9 Moving P'tip and Q depending on the tip bending

3.3 描画点の算出

このフットプリントを実際に描画するためには、描画対象面上でフットプリントの中心となる点を算出する必要がある。本研究では、この点を「描画点」と定義する。

まず、磁気センサから得られた値を用いて穂先の先端位置 \mathbf{P}_{tip} を求める。図 7 に示すとおり、実測から得られる $handleLength$ (筆型デバイスに内蔵された磁気センサの位置 \mathbf{P}_{sensor} から穂先の根元 \mathbf{O} までの長さ)、 $tipLength$ (\mathbf{O} から穂先の先端 \mathbf{P}_{tip} までの長さ)、磁気センサから得られる \mathbf{a}_{sensor} (筆型デバイスの姿勢をあらわす単位ベクトル) を用いてベクトル \mathbf{V}_{tip} (式 (6)) を算出し、 \mathbf{P}_{sensor} に加算することで穂先の先端位置 \mathbf{P}_{tip} が求められる (式 (7))。

$$\mathbf{V}_{tip} = (handleLength + tipLength) \cdot \mathbf{a}_{sensor} \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_{tip} = \mathbf{P}_{sensor} + \mathbf{V}_{tip} \quad (7)$$

これより、穂先のしなりを考慮しない場合は、

\mathbf{OP}_{tip} と描画対象の衝突点 \mathbf{Q} が描画点となる。しかし、穂先がしなっている場合、描画点の位置は、図 7 に示すように \mathbf{Q} ではなく \mathbf{Q}' となる。そこで、次に穂先のしなりを考慮した描画点 \mathbf{Q}' を求める。具体的には、まず式 (1) で算出した θ を用いて穂先の回転行列 \mathbf{R} を算出する。そして、式 (8) より、しなりを考慮した穂先先端の位置 \mathbf{P}'_{tip} を算出し、 \mathbf{OP}'_{tip} とポリゴンの衝突点を描画点として \mathbf{Q}' を求める。

$$\mathbf{P}'_{tip} = \mathbf{R} \cdot (tipLength \cdot \mathbf{a}_{sensor}) + \mathbf{O} \quad (8)$$

図 9 に、穂先のしなり量・方向に応じて描画点 \mathbf{Q}' が移動する様子を示す。

4. ストロークへの絵画的効果の付与

4.1 絵筆における絵具の移流

濃淡・刷毛目・掠れを統一的に扱うために、穂先に絵具をつけてから、キャンバスに描くまでに起こる一連の絵具の移流を類型化し、穂先が保持する絵具の濃度・量を管理する計算モデルを考える。

本研究では、絵筆における絵具の移流現象は、

- (a) 穂先と描画対象 (パレットやキャンバスなど絵具を塗ることができる領域) 間での移流
- (b) 穂先における移流

- (b-1) 穂先表面から穂先内部への移流
- (b-2) 穂先内部から穂先表面への移流
- (b-3) 穂先表面での移流

のように大別して考える。

この他に、描画対象であるキャンバス内の移流が考えられ、対象の材質によって「滲み」や「溜まり」が、表面の凹凸によって「掠れ」が生じる。水彩画・アクリル画などの場合には、絵画形成にはこれらの効果も考慮すべき要因であるが、刷毛目や掠れとは独立して考えることができ、かつ既存のモデルで十分表現できる。よって、絵筆における移流のモデルのみ、以下のように独自の「タンク&パイプ構造モデル」を考案した。

4.2 タンク&パイプ構造による絵具の移流モデル

4.2.1 基本モデル

Baxter らの手法 [13] では、絵具を蓄える穂先内部を Reservoir、描画対象と直接絵具のやり取りを行う穂先表面を Surface とし、絵具は Reservoir と Surface、Surface と描画面を双方向に移動するというモデルを提案している。しかし、このモデルでは、Surface 上における移流を考慮していないため、刷毛目の効果が表現できないという問題点がある。

その解決策として、本研究では、この Reservoir・Surface の概念は残しつつ、インクタンクがパイプで接続された構造による移流を考える。図 10 がその構造で、これを「タンク&パイプ構造」と呼ぶもの

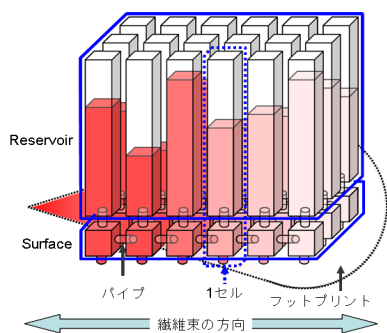


図 10 タンク & パイプ構造
Fig. 10 Tank and pipe structure

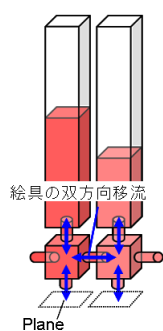
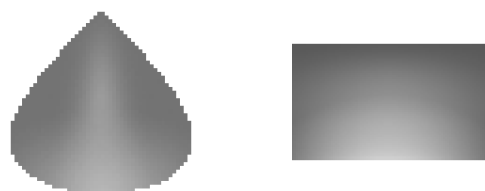


図 11 パイプを介した移流
Fig. 11 Advection via pipes



(a) 丸筆・面相筆 (b) 平筆
(a) Round and liner brush (b) Flat brush

図 12 Surface の吸引力 (濃い部分ほど吸引力小)

Fig. 12 The attraction force in Surface

とする。1セルのタンクは Reservoir に対応するタンク (大) と Surface に対応するタンク (小) で構成され、これが基本形状のセルの数だけ用意されている。図 11 にパイプによる移流を図示する。各タンクに蓄えられた絵具を双方向に移流させるために、実際の絵筆同様、Reservoir と Surface、繊維束の方向に沿って隣接する Surface 同士、そして Surface と対応する描画面 (Plane) をパイプで連結している。

4.2.2 穂先と描画対象間での移流

上記の基本モデルで、穂先と描画対象間での絵具の移流は、Surface と Plane 間の、パイプを介した双方向移流として実現される。

まず、Plane と Surface が接触する 1 つのセルに注目すると、このセルにかかる力 f は、式 (9) のように表わすことができ、 $f > 0$ ならば Surface から Plane へ (描画対象への描画)、 $f < 0$ ならば Plane から Surface へ (パレットからの絵具の取得) 絵具が移流する。

$$f = f_{plane} - f_{surface} + f_{pigment} \quad (9)$$

ここで、 f_{plane} は Plane における描画対象の吸引力で、描画対象ごとに設定している。 $f_{surface}$ は穂先の毛管現象によって生じる Surface の吸引力で、繊維が密集している穂先の中心部分と根元部分に大きい値を設定している (図 12)。 $f_{pigment}$ は Surface のタンクに蓄えられている絵具の量に応じて決定するセルにかかる重力である。

次に、Surface と Plane 間のパイプに流れる絵具の移流量を求めるために、絵具の単位時間当たりの移流量 $u_{surface-plane}$ を式 (10)(11) から算出する。

$$\eta = \frac{\eta_{max} - \eta_{min}}{X_{max} - X_{min}} \cdot (X - X_{min}) + \eta_{min} \quad (10)$$

$$u_{surface-plane} = (\beta \cdot |f|) \cdot \frac{2\pi \cdot r_{surface-plane}}{\eta} \quad (11)$$

式 (10) では、絵具の濃度 X から粘度 η を求め、求めた粘度に応じた絵具の単位時間当たりの移流量 $u_{surface-plane}$ を式 (11) から算出する。式 (10) の X_{max} は上限濃度、 X_{min} は下限濃度、 η_{max} は濃度 X_{max} における粘度、 η_{min} は濃度 X_{min} における粘度であり、絵具の濃度は粘度に比例する。式 (11) の $r_{surface-plane}$ は Surface-Plane 間のパイプの半径、 β は引力を正規化するための定数である。絵具の単位時間当たりの移流量は引力に比例、粘度に反比例し、パイプの半径が大きいかほど流量が大きいかを示している。

$u_{surface-plane}$ が求まると、時間 Δt の間に移流する絵具量 $\Delta v_{surface-plane}$ (Surface から Plane への移流をプラスとする) は、次式で表される。

$$\begin{aligned} & \text{if } (f > 0) \\ & \Delta v_{surface-plane} \\ & = \min(w_{surface \rightarrow planes}, \\ & \quad \min(v_{surface}, \Delta t \cdot u_{surface-plane})) \\ & \text{else if } (f < 0) \\ & \Delta v_{surface-plane} \\ & = -\min(w_{plane \rightarrow surface}, \Delta t \cdot u_{surface-plane}) \\ & \text{else} \\ & \Delta v_{surface-plane} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

式 (12) の $w_{surface-plane}$ は Surface から Plane への流出、 $w_{plane-surface}$ は Plane から Surface への流入可能量で、Plane の性質によって決まる。 $v_{surface}$ は Surface のタンクが保持する絵具量である。

ここで、Plane から Surface へ絵具が移流するときに、もともと Surface にあった絵具と新たに移流した絵具間で混色が生じる。この移流後の Surface の絵具の色 C_{mix} (RGBA で表されるベクトル) は、もともと Surface が保持していた絵具の色 C と Plane から Surface へ移流した絵具の色 C_{in} から次式のようになる。

$$C_{mix} = \frac{v_{surface} \cdot C + \Delta v_{surface-plane} \cdot C_{in}}{v_{surface} + \Delta v_{surface-plane}} \quad (13)$$

また、パレットから絵具を取得する際には、刷毛目と濃淡を表現するために、Surface の各セルで取得する絵具の濃度がランダムとなり、かつ先端に近い

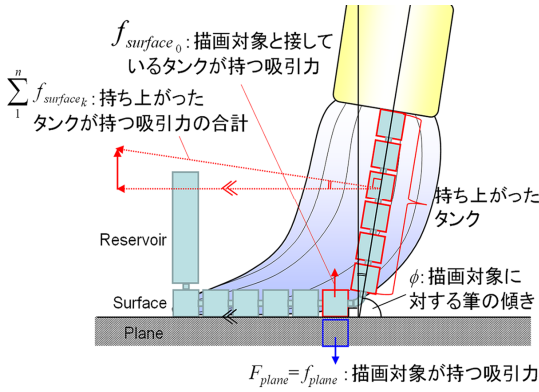


図 13 Surface における移流

Fig. 13 Advection in Surface

ほど絵具そのまま、根元に近くなるほどその淡色となるように設定する。これにより、水を含ませた穂先でパレットから絵具を取ったときと同様の効果を再現する。

4.2.3 穂先における移流

穂先における穂先表面および穂先内部での絵具の移流は、Surface と Reservoir および Surface 間のパイプを介した双方向移流として実現する。

(1) 穂先表面から穂先内部への移流

Surface のタンクが、保持可能な絵具量 ($v_{surface_max}$) を超えると、その絵具は Reservoir へ移流し、蓄えられる。このとき Surface から Reservoir へ移流する絵具量 $\Delta v_{surface \rightarrow reservoir}$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta v_{surface \rightarrow reservoir} &= v_{surface} - \Delta v_{surface \rightarrow plane} \\ &\quad + \Delta v_{reservoir \rightarrow surface} \\ &\quad + \Delta v_{surface \rightarrow surface} - v_{surface_max} \end{aligned} \quad (14)$$

$\Delta v_{reservoir \rightarrow surface}$ は、Reservoir から Surface への、 $\Delta v_{surface \rightarrow surface}$ は Surface 間（穂先表面）の絵具の移流量で、詳細はそれぞれ (2)(3) で説明する。また、Reservoir のタンクでは保持可能な絵具量がセル毎に設定されており（図 12 の吸引力と比例する）、これを超えると Surface から Reservoir への移流は起こらない。

(2) 穂先内部から穂先表面への移流

Reservoir から Surface へは、定常的に絵具が送り込まれ、時間 Δt の間に移流する絵具量 $\Delta v_{reservoir \rightarrow surface}$ は、絵具の粘度と Reservoir-Surface 間のパイプの半径 $r_{reservoir \rightarrow surface}$ から次式のように求められる (γ は定数)。

$$\Delta v_{reservoir \rightarrow surface} = \Delta t \cdot \gamma \cdot \frac{2\pi \cdot r_{reservoir \rightarrow surface}}{\eta} \quad (15)$$

ここで、Reservoir, Surface の両タンクが空になると掠れが発生するが、Reservoir から Surface への絵具の移流が間に合わず、一時的に Surface のタンク

の絵具量が空になった場合にも、同様に掠れが生じると考えられる。

そこで、筆運びが速い場合に生じる掠れを表現するために、筆型デバイスの移動速度 s に応じて $r_{reservoir \rightarrow surface}$ ($0 < R_{min} \leq r \leq R_{max} \leq 1$) を変化させ、Surface に送り込まれる絵具の量を制限する。具体的には、次式に示すとおり、筆の移動速度 s が $S_{min} \leq s \leq S_{max}$ のとき $r_{reservoir \rightarrow surface}$ は s に反比例し、筆型デバイスの移動速度が速くなるほど送り込まれる絵具量が小さくなる。

if ($s < S_{min}$)

$$r_{reservoir \rightarrow surface} = R_{max}$$

else if ($S_{min} \leq s \leq S_{max}$)

$$\begin{aligned} r_{reservoir \rightarrow surface} &= \frac{R_{min} - R_{max}}{(S_{max} - S_{min}) \cdot (s - S_{min})} + R_{max} \end{aligned} \quad (16)$$

else

$$r_{reservoir \rightarrow surface} = R_{min}$$

(3) 穂先表面での移流

穂先表面では、刷毛目を表現するために繊維束に沿った移流を考える。

4.2.1 で述べたように、Surface では繊維束の方向に沿って隣接するタンク同士がパイプでつながれており、絵具はこの間でのみ移流する。ここで、穂先がある角度で描画面に接地しているとき（図 13）、接地している Surface のタンクでは、描画面の吸引力の影響が大きく、4.2.2 で述べた穂先と描画対象間での移流は発生するが、隣接するタンク間での移流はほとんど起こらないと考えられる。これに対して、持ち上がった Surface のタンクでは、絵具の重さ、毛管現象、表面張力の影響により繊維束に沿った移流が発生すると考えられる。そこで、この持ち上がった Surface タンク間での移流方向および移流量を求める必要がある。これらを求めるために、持ち上がった各タンクにかかる力 F を算出する。

まず、持ち上がった Surface のタンクと隣接し、描画面と接地しているタンクを $surface_0$ 、その吸引力を $f_{surface_0}$ 、持ち上がった n 個のタンク $surface_k$ （描画面に近い方から $k = 1, 2, \dots, n$ ）がそれぞれ持つ吸引力を $f_{surface_k}$ とする。

持ち上がったタンク群の吸引力を合計し、穂先と描画面がなす角度 ϕ から描画面に対して垂直な引力を求め、これに $surface_0$ の吸引力を足し合わせ、 $F_{surface}$ を求める。さらに、 $surface_l$ ($l = 0, 1, \dots, n$) が保持する絵具にかかる重力 $f_{pigment_l}$ の合計 $F_{pigment}$ 、 $surface_0$ が接地する Plane の吸引力 F_{plane} を算出し、それらの和から F を求める（式 (17) - (20)）。

なお、本研究では卓上および皿やカップを手に持

って描画することを想定している. このような場合, 描画対象を極端に立てた状態で描くことはほとんどない. よって, ここでは描画対象の法線方向を鉛直上向きとみなして実装した.

$$F_{surface} = f_{surface_0} + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \cdot \sum_1^n f_{surface_k} \quad (17)$$

$$F_{pigment} = \sum_0^n f_{pigment_l} \quad (18)$$

$$F_{plane} = f_{plane} \quad (19)$$

$$F = F_{plane} - F_{surface} + F_{pigment} \quad (20)$$

Plane と $surface_0$, $surface_k$ と $surface_{k+1}$, ..., ($k=0, 1, \dots, n-1$) というように 2 つの連結するタンクに対して $F > 0$ ならば Surface の根元から Plane へ, $F < 0$ ならば Plane から Surface の根元へ絵具を移流させる. 連結するタンク間で移流処理を行う際には次式で F を更新する.

$$\begin{aligned} \text{if } (F > 0) \quad & F = F - \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \cdot f_{surface_k} \\ \text{else if } & \\ (F < 0) \quad & F = F + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \cdot f_{surface_k} \end{aligned} \quad (21)$$

$k=n$ になるまで, あるいは F の符号が反転するまで (即ち, $F > 0$ においては $F < 0$ になるまで, $F < 0$ においては $F > 0$ になるまで) k を増加させ, タンク間の移流処理を繰り返すことで, 1 繊維束内での移流処理を行う. この 1 繊維束内での移流処理はフットプリントのマッピング 1 回に対して 1 回行われる.

単位時間当たりの移流量 $u_{surface-surface}$ については次式で求められる (ε : 定数).

$$u_{surface-surface} = \beta \cdot \varepsilon \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \cdot \frac{2\pi r}{\eta} \quad (22)$$

以上から, 各場合の移流量は式 (23)(24) で求められる.

$$\begin{aligned} \Delta v_{surface_{k+1} \rightarrow surface_k} \\ \text{if } (F > 0) \quad & = \min(v_{surface_k_max} - v_{surface_k}, \\ & \min(v_{surface_{k+1}}, \Delta t \cdot u_{surface-surface})) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \Delta v_{surface_k \rightarrow surface_{k+1}} \\ \text{else if } & \\ (F < 0) \quad & = \min(v_{surface_{k+1}_max} - v_{surface_{k+1}}, \\ & \min(v_{surface_k}, \Delta t \cdot u_{surface-surface})) \end{aligned} \quad (24)$$

さらに, 求めた絵具の移流量 $\Delta v_{surface-surface}$ を式 (13) の $\Delta v_{surface-plane}$ に代入することでタンク内の混色を行う. これにより, フットプリント内の各セルの濃度に変化が生じ, 穂先の部位, および繊維束ごとに異なった濃淡として現れる.

5. 複合現実型描画システムの実現

5.1 システム構成

前章までに述べた筆型デバイスとそれに適した描画モデルを実装した電子描画システムを実現した. 従来の類似研究と比べた大きな特長は, 2次元平面だけでなく, 自由曲面で構成される実物体表面にも電子描画が行えるよう, ビデオシースルー方式の MR システムとして実現している点である. 筆型デバイスが視認でき, 穂先から絵具が出るかのような直接操作に適した方式である. ここから, このシステムを「MAI (MR-based Artistic Interactive) Painting Expert」と呼んでいる.

そのシステム構成の最も簡便な例を図 14 に示す. MR 空間の管理・構築には Windows XP OS, Intel Core2 Duo E4300 CPU を搭載する PC を用いた. MR 空間の映像提示にカメラ内蔵型の HMD (Head Mounted Display) である Canon VH-2002 もしくは VH-2007 を用いる. また, HMD, 筆型デバイス, および持ち運び可能な描画対象には磁気センサ Polhemus LIBERTY のレシーバを内蔵し, 3次元位置姿勢を取得する.

MR 空間の生成・提示には, HMD に内蔵された 2 台のカメラからビデオキャプチャカード (ViewCast Osprey 440) を介して実風景を PC へ取り込み, HMD の位置姿勢に合わせた CG を重畳描画した後, グラフィックカード (NVIDIA Quadro FX 1700) からそれぞれ HMD の右目, 左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.

本システムでは, 描画対象となる実物体と同形状の 3D-CG モデルを実物体と重なるよう MR 空間中に配置し, 筆型デバイスによる入力を基に計算された描画結果をその 3DCG モデル上にテクスチャマッピングし, 実物体に重畳描画することで, 実物体への仮想的な描画を実現している (図 15).

なお, MAI Painting Expert のソフトウェアは, 単眼で 2次元面に投影すれば, 平面的な絵画のシステムとしてそのまま利用できる汎用性を有している.

5.2 ペインティング操作

MAI Painting Expert では, 以下の手順で電子的なペインティングが行える.

(i) **絵筆の選択**: 丸筆・平筆・面相筆の穂先の中から, 描画したいストロークに応じて筆型デバイスの先端部 (実物) を付け替える.

(ii) **色の選択・混色**: 卓上に表示された仮想のカラーパレットに穂先を接触させることで, 所望の色を選択できる (図 16 (a)). パレット上部の領域では, 複数の色を混色することも可能である (同図 (b)). 絵具量は, 穂先がパレット上の任意の色に触れていた時間に比例して増加し, 現在の絵具量は柄に沿っ

て表示された仮想のゲージによって確認できる。

- (iii) 水による薄め：卓上には（実物体であるが空の）カップ（水入れ）が配置されており，その中に筆型デバイスを入れ，絵具を薄めることができる（同図(c)）．薄めた色は再度パレット上で混色可能である．
- (iv) 描画と消去：あとは，筆型デバイスを描画対象に押し付け移動させることで，絵を描くことができる．また，描画対象に布で触れることによって消すこともできる（同図(d)）．

5.3 描画結果と作品例

図17はMAI Painting Expert Ver.1.0によるストロークの例で，アクリル絵具を用いて陶器に描画したものである．実物に実際に絵具で描いた場合と遜色ないレベルの絵画的効果（濃淡・刷毛目・掠れ）を実現できていると評価できる．

提案システムでは絵具の時間経過による乾燥は考慮していないため，描いた線に対して水を塗り，ぼかす，といった表現は実現していない．また，4.1節で述べたように描画面の材質に依存する効果（例：表面の凹凸による掠れ，溜まりなど）は対象外と考えている．一方，絵の具の濃度について考慮しているため，筆に同じ量の絵の具を含ませた場合でもより濃度の低い絵具を含ませた場合の方が長いストロークが描画できる．また，穂先の部位に応じて絵具の量や濃度が異なるため，実際の描画と同様に，絵具の少ない穂先から掠れが生じるといった実際の描画と同様の効果も実現している．

筆型デバイスも描画モデルも，何度か改良することで，このレベルに到達することができた．研究開発の初期段階では，フットプリントには単純な円形を用いており，筆型デバイスの穂先に用いた素材の硬さや機構の内蔵位置が原因で，ユーザが操作可能なしなり量も，取得できるしなり量の幅も広がらなかった．しかし，フットプリントを滴形に変更し，前述の問題を解決するためにデバイスを改良した結果，描画の応答速度が向上するとともに，描き易さもストロークの質も飛躍的に向上した．このことから，今回導入した対話デバイスや描画モデルの妥当性が立証されていると考えられる．

図18の作品例もまた，立体物を手に持ちながら，その表面に電子的描画を施した結果である．作品の完成度は絵の巧拙によるので，それだけでは評価できないが，体験者からは，十分絵筆に近いしなりを感じながら描画できたという評価を得ている．この種の電子描画システムは，習熟期間を設け，ある程度使い込んだ後にその良さが理解できるものであるべきなので，何名か絵画経験のある者に意見を求めながら，モデルのパラメータを改良・調整した．

5.4 運用から得た知見と考察

本項に記したシステムのαバージョン（Ver. 0.8）

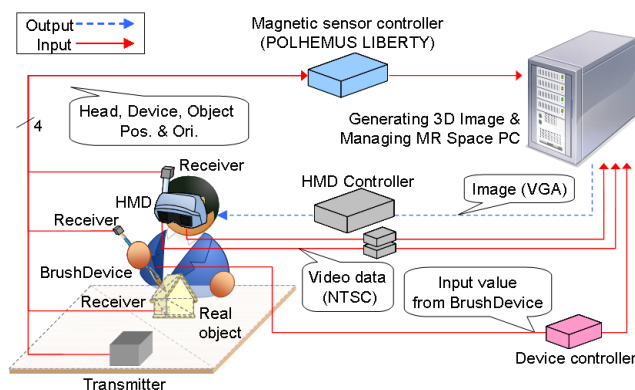
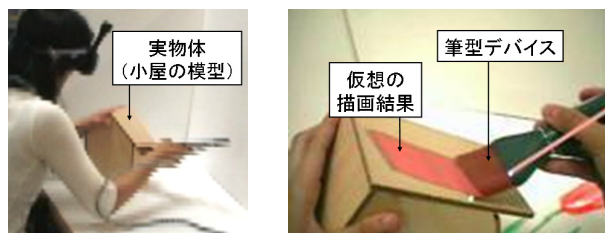


図14 システム構成

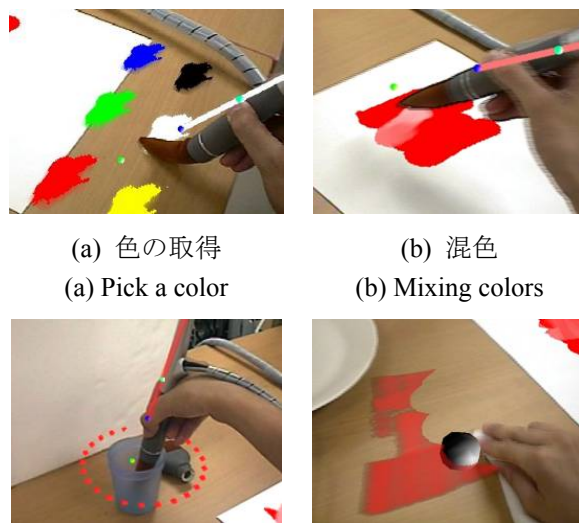
Fig. 14 System configuration



(a) 体験風景 (b) 体験者視点の映像
(a) Experience (b) User's view

図15 複合現実型描画システム

Fig. 15 Mixed Reality painting system



(a) 色の取得 (b) 混色
(a) Pick a color (b) Mixing colors
(c) 水の取得 (d) 消去
(c) Add water (d) Wipe stroke

図16 ペインティング操作

Fig. 16 Painting operation in our system

は，UIST 2009（於カナダ・ヴィクトリア市）とSIGGRAPH Asia 2009（於横浜）に，βバージョン（Ver. 0.9）はインタラクション2010（於東京）にデモ展示した．筆型デバイスのグリップ感に関しては，ほぼ全体験者から好意的な回答が得られた．初心者には簡単に描画できなかったが，経験者ほど絵筆に近い描き味を高く評価する傾向があった．用途に応じ

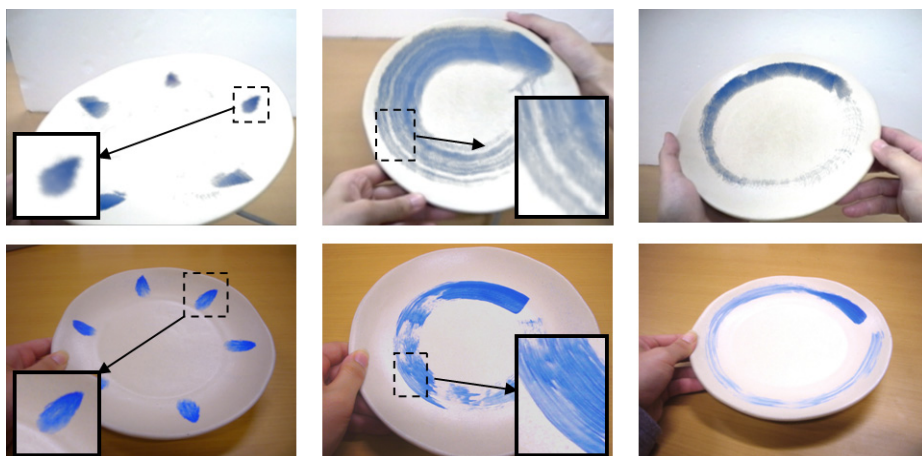


図 17 本システムでの描画結果（上段）と実際の描画結果（下段）
（左から濃淡，刷毛目，掠れ）

Fig. 17 Painting results of our system (top) and real effects (bottom)
(Left: tint and shade in footprint, center: brushmark of flat brush, right: drybrush)



図 18 作品例
Fig. 18 Painting examples

て複数の穂先を付け替えるという操作は、初心者から「自然に行うことができた」というコメントを得た。

なお、本システムは移流処理を含めて 25~30fps の画面更新を達成しているので、ユーザはストレスなく描画作業を実行できる。コンピュータの性能は年々向上しているので、現描画モデルを拡張したり、対話デバイスの複雑な幾何位置合わせ処理を導入しても、MR 描画の実時間処理は十分達成できる。

本論文では、実際に外部展示を行った簡便なシステム構成を記したが、磁気センサによる位置姿勢決定では、筆の穂先と描画位置にある程度の「位置ずれ」が生じることが避けられない。ただし、実運用上は、この誤差はあまり問題にならず、不満の声は殆どなかったとことを記しておきたい。「挟む」「掴む」「叩く」といった対話デバイスに比べて、筆型デバイスの場合、利用者（描画者）が、描き慣れるに従って、この位置ずれをオフセット値として許容してしまう傾向にある。中には、筆で隠れるよりも、描画位置が上や（右利きの場合）左に 1cm 程度ずれることを好む場合すらある。

意図的にずらすことはできるので、MR システムとしては、位置ずれ誤差は少ないに越したことはない。本論文で提案した筆型デバイスによる電子描画は、位置姿勢決定手法とは独立であるので、高精度の物理センサやビジョンベースの手法の併用により、位置合わせ精度を向上させることは可能である。例えば、形が既知の対話デバイスに適した方法として開発された [15] は、本筆型デバイスにも適用可能である。ただし、センサをデバイス本体の内蔵させる場合も外に付着する場合も、筆のバランスを崩さず、かつデザインを損なわない配慮も必要である。

筆型デバイス内のしなり量計測の実現機構、穂先

部分の材質など、まだ改良の余地はあるが、より絵筆に近い感触を得るための大きな道筋は示された。MAI Painting Expert Ver.1.0 としては、当初の目的を十分達成できたと言える。

6. むすび

本研究では、実世界に近い感覚で描画が行える電子描画システムを目指し、新しい筆型デバイスと描画モデルを提案し、実際に設計・開発を行った。特に留意したのは、本当に穂先がしなり、その量が計測できる筆型デバイスを導入することと、平面スクリーンだけでなく、立体形状の表面にも直接操作で電子描画し、それを視認できる機能の実現である。対話デバイスの完成度という点では、まだ改良すべき点はあるが、本研究で提案した描画モデルの妥当性は証明されたと考えられる。

本研究は、筆者らが推進する「直観的な道具型デバイスの研究開発」という視点では、描画に特化した対話デバイスの実現例であり、先端が着脱可能な対話デバイスの実現例として新しい試みである。また、MR 分野の視点からは、新しい応用事例である。自分の手元が見え、かつ対話デバイスが実物体と接触した際の力覚フィードバックを直接感じるができるという点で、MR 技術の特性を生かした事例となっている。

謝辞

本研究は、学振・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」の支援による。

参考文献

[著者紹介]

- [1] B. Gooch and A. Gooch: *Non-photorealistic Rendering*, A. K. Peters, Ltd., 2001.
- [2] 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.
- [3] N. S.-H. Chu and C.-L. Tai: "MoXi: Real-time ink dispersion in absorbent paper," Proc. SIGGRAPH 2005, pp. 504 - 511, 2005.
- [4] 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.
- [5] 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, 情処論, No. 41, Vol. 3, pp. 608 - 615, 2000.
- [6] 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回情処全大, 1F-6, 2008.
- [7] K. Ryokai, S. Marti, and H. Ishii: "I/O Brush: Drawing with everyday object as ink," Proc. CHI 2004, pp. 303 - 310, 2004.
- [8] 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.
- [9] 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, 情処論, Vol. 46, No. 7, pp. 1582 - 1593, 2005.
- [10] 森田恒之, 横山勝彦, 小泉晋弥, 降旗千賀子, 井口智子: 絵画表現のしくみ, 美術出版社, 2000.
- [11] ホルベイン工業(株): 絵具の科学, 中央公論美術出版, 1994.
- [12] Q. Zhang, Y. Sato, J. Takahashi, K. Muraoka, and N. Chiba: "Simple cellular automaton-based simulation of ink behaviour and its application to Suibokuga-like 3D rendering of trees," *J. Visualization and Computer Animation*, Vol. 10, No. 1, pp. 27 - 37, 1999.
- [13] B. Baxter, V. Scheib, M. C. Lin, and D. Manocha: "DAB: Interactive haptic painting with 3D virtual brushes," Proc. SIGGRAPH 2001, pp. 461 - 468, 2001.
- [14] 島田英之, 島田恭宏, 大倉充: 毛筆で筆記可能な仮想書道システムの開発, 情処論, No. 47, Vol. 12, pp. 3392 - 3401, 2006.
- [15] 石黒祥生, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 複合現実空間操作対話デバイスのためのハイブリッド型位置姿勢決定法, 日本VR学会論文誌, Vol. 14, No. 3, pp. 381 - 389, 2009.



大槻 麻衣 (学生会員)

2006年立命館大学理工学部情報学科卒。現在、同大学院博士後期課程在学中。2008年より学振・特別研究員。複合現実感、ポストWIMP型インタフェースの研究に従事。2009年本学会論文賞を受賞。



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。4月より、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。



中嶋 友美

2010年立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒。4月より、(株)日新システムズ勤務。在学中、筆型対話デバイスによるストローク表現を研究した。



木村 朝子 (正会員)

1998年阪大・基礎工・博士前期課程了。同大学助手、立命館大学理工学部助教授、JST 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。本学会学術奨励賞・論文賞、情報処理学会山下記念研究賞等受賞。



柴田 史久 (正会員)

1999年阪大・基礎工・博士後期課程了。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。本学会学術奨励賞・論文賞を受賞。



田村 秀行 (正会員)

1970年京大・工・電気卒。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。画像情報処理、人工知能、複合現実感の研究開発と実用化に従事。本学会元理事、現在、評議員、複合現実感研究委員会顧問。本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。

(2010年3月26日受付)