

### 筆先追従と判別分析法を用いた筆接触画像取得型毛筆ディスプレイ

植田, 耕平 / UEDA, Kohei

---

(発行年 / Year)

2009-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2009-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2008年度 修士論文

筆先追従と判別分析法を利用した筆接触画像  
取得型毛筆ディスプレイ

指導教授 岩月 正見 教授

法政大学大学院工学研究科

電気工学専攻修士課程

07R3107

ウエダ コウヘイ  
植田 耕平

# Writing Brush Display by Capturing Touch Images of the Top of a Brush using Object Tracking and Discriminant Analysis Method

Kohei UEDA

## Abstract

This paper proposes a modified writing brush display system that can reproduce brushstrokes with a writing brush. The proposed system is composed of an LCD projector that projects brush writing images, a frosted glass plate on which users draw with a brush and the images are displayed, a CCD camera that captures touch images of the top of the brush by using object tracking and thresholding with discriminant analysis method.

**Key Word:** object tracking, Discriminant Analysis Method, Pen tablet, brush

# 目次

## 第1章 緒言

1.1 目的	5
1.2 本論文の概要	6

## 第2章 初期段階のシステム

2.1 はじめに	7
2.2 装置	7
2.3 画像処理アルゴリズム	8
2.4 結果	8
2.5 おわりに	8

## 第3章 初期段階のシステムの問題点

3.1 はじめに	9
3.2 問題点	9
3.3 筆致画像と描画位置の不一致	9
3.4 筆接触面以外の誤検出	10
3.5 2値化に用いるしきい値の設定方法	10
3.6 おわりに	10

## 第4章 射影変換による筆致画像の補正

4.1 はじめに	11
4.2 原因と解決策	11
4.3 初期設定	11
4.4 結果	12
4.5 おわりに	12

## 第5章 背景差分法による筆接触部の抽出

5.1 はじめに	13
5.2 原因と解決策	13
5.3 背景差分法のための背景モデル	13
5.4 筆接触部の抽出	14
5.5 結果	14
5.6 おわりに	14

## 第 6 章 CamShift 法による筆接触部の追従

6.1 はじめに	15
6.2 CamShift 法	15
6.3 筆接触部の特定および, 追従	16
6.4 結果	16
6.5 おわりに	16

## 第 7 章 ラプラシアンフィルタを利用した判別分析法

7.1 はじめに	17
7.2 しきい値の設定方法	17
7.3 判別分析法	17
7.4 ラプラシアンフィルタによる濃度ヒストグラムの二分化	18
7.5 結果	20
7.6 おわりに	20

## 第 8 章 解決策の実装

8.1 はじめに	21
8.2 投影する筆致画像の補正	21
8.3 筆接触部以外の誤検出の防止	21
8.4 2 値化の精度	21
8.5 まとめ	22
8.6 おわりに	22

結言

参考文献

謝辞

# 第1章 緒言

## 1.1 目的

現在普及している液晶ペンタブレットを用いれば、ディスプレイ上に直接ペンで描くことができる。このタイプの入力システムは、電磁誘導方式等を用いた専用のペンを必要とするため、擬似的に毛筆や絵筆の筆致再現することはできるが、本物の筆を使って描きこんでいくことができない。したがって、実際に筆を使って描く感覚とは異なるタッチで文字や絵を描かざるを得ない。これに対して、ポリゴンミラーを用いて、ディスプレイ面上の筆や指などの指示物の遮断角度等から、その位置と大きさを計測することにより、市販の筆や指先の筆致を再現できる光走査型タッチパネルが提案されている。しかしながら、このシステムでは、指示物の遮断面を、ディスプレイ枠に配置された受光素子により 1 次元的に計測しているため、筆の接触面を円形としてしか表現できない。したがって接触面の太さは表現できるが、接触面の正確な形状から、筆致を忠実に再現することはできない。そこで、すりガラス上で筆を運んでいる映像をその裏面から取得して、筆の接触面を抽出することにより、筆致を忠実に再現できるシステムを提案した。

しかしながら初期段階のシステムでは、画面全体を2値化して筆先を検出していたので、照明などの環境によって筆致画像の抽出精度が悪い場合があった。この問題を改善するため、本論文では、筆先を追従して、2値化を行う領域を制限する処理を新たに加える手法を提案する。

## 1.2 本論文の概要

本論文は8章から構成されており、各章の概要を以下に示す。

### 第1章

本論文の目的や、概要について述べた緒言である。

### 第2章

提案した初期段階のシステムについて述べる。

### 第3章

初期段階のシステムの問題点について述べる。

### 第4章

射影変換による筆致画像の補正について述べる。

### 第5章

背景差分法による筆先の抽出について述べる。

### 第6章

CamShift法による筆先の追従について述べる。

### 第7章

ラプラシアンフィルタを用いた判別分析法によるしきい値の設定方法について述べる。

### 第8章

本論文のまとめ、第4章から第7章で述べた手法を実装した結果について述べる。

# 初期段階のシステム

## 2.1 はじめに

本章では、初期段階のシステムの概要について述べる。

## 2.2 装置

すりガラスの下部にカメラを設置することで、筆先とすりガラスとの接触面を捉えることが可能になる。また、すりガラスを使用することで、カメラ画像において、筆とすりガラスの接触面以外が不明瞭になるため、接触部を抽出しやすくなる。また、プロジェクタを利用し、ユーザが描画した画像を、すりガラスの裏面からすりガラスに投影し、ユーザに提示することで、使いやすさを向上させている。

Fig.2-1 にシステムの全体図を示す。

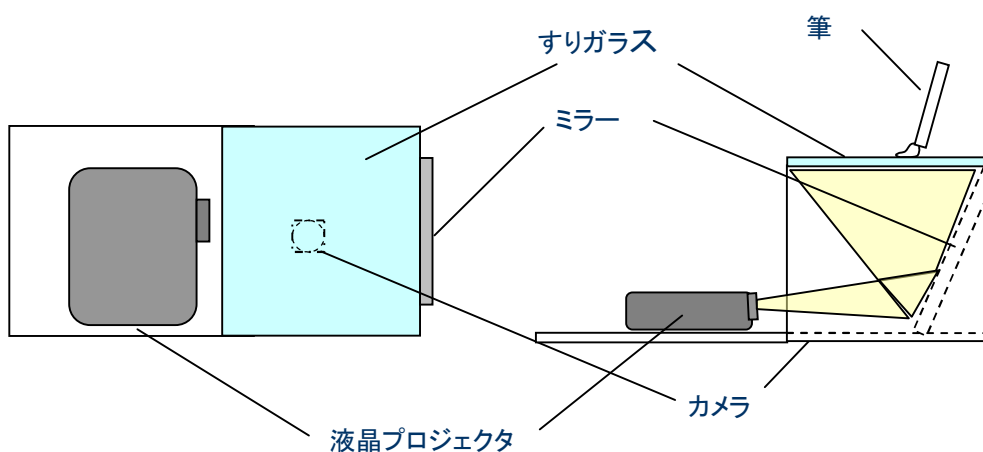


Fig.2-1 システム全体図

Fig1-1 において示した装置を実際に制作し、プロジェクタからすりガラスに画像を投影した。

その様子を Fig.2-2に示す。



(a) 装置の全体図 (b) 投影した画像の見え方

Fig.2-2 制作した装置



## 2.3 画像処理アルゴリズム

すりガラスの下から捉えた筆先の画像に対して、あらかじめ設定したしきい値を用いて画像全体を2値化し、筆接触面を抽出する。抽出した筆接触面画像を投影用の筆致画像に重ね合わせて行くことで、筆致を再現する。

Fig.2-3 にカメラ画像とそれを2値化処理した画像を示す。

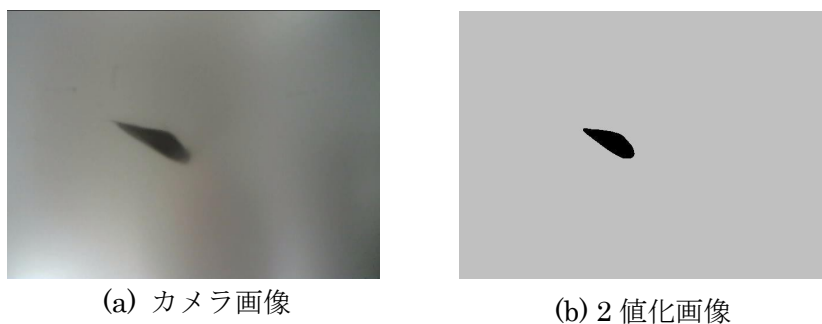


Fig.2-3 2値化処理

## 2.4 結果

Fig.2-4 に初期段階のシステムを用いて描画した結果を示す

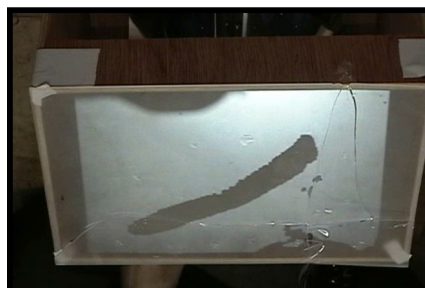


Fig.2-4 出力結果

## 2.5 おわりに

本章では、初期段階のシステムの概要について述べた。次章では初期段階のシステムの問題点について述べる。

## 第3章 初期段階のシステムの問題点

### 3.1 はじめに

本章では、前章で説明した初期段階のシステムにおける問題点について述べる。

### 3.2 問題点

初期段階のシステムの問題点として、以下の3つが上げられる。

1. 投影する筆致画像と描画位置のずれ
2. 筆接触面以外の誤検出
3. 2値化処理に用いるしきい値の設定方法

以下にそれぞれの問題点の詳細を記す。

### 3.3 筆致画像と描画位置の不一致

カメラ取得画像には、Fig.3-1 のようにプロジェクタで投影した筆致画像と、その周辺が写り込んでいる。

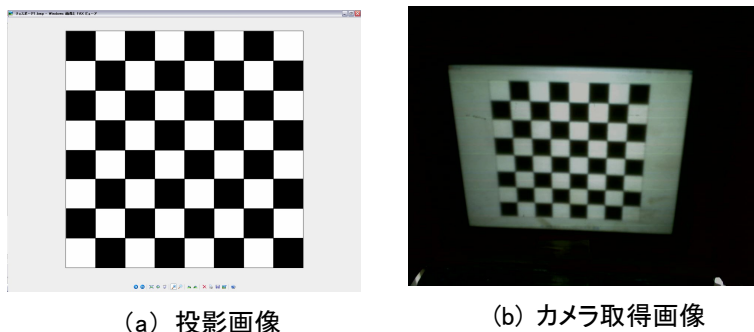


Fig.3-1 投影画像とカメラ取得画像

そのため、カメラ取得画像に対して、2値化処理を行ったものを投影しても、Fig.3-2 のように投影した筆致画像と筆接触部が一致しない。

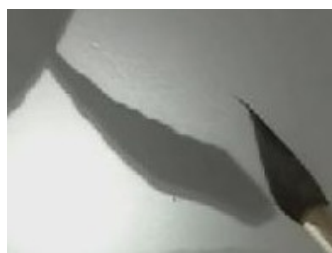


Fig.3-2 筆致画像と筆接触部の不一致

### 3.4 筆接触面以外の誤検出

初期段階のシステムでは、カメラ取得画像全体に対して、2 値化処理を行い、筆接触面を検出しようとしていたので、筆接触面以外の、Fig.3-3のように人の影などを誤検出し、そこを筆接触面として処理してしまうことが多々あった。

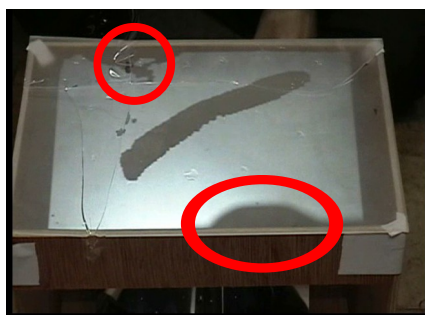


Fig.3-3 誤検出

### 3.5 2 値化処理に用いるしきい値の設定方法

初期段階のシステムでは、初期設定の段階において、筆先と同じ色をすりガラス上に配置した状態の画像を記憶し、その画像をしきい値画像としていた。そのため、時間による環境光の変化などによる筆先のしきい値の変化に対応することが不可能なので、筆先の2値化の精度が悪かった。



Fig.3-4 初期段階のシステムによる2値化結果画像

### 3.6 おわりに

本章では初期段階のシステムにおける問題点を述べた。次章から、本章で述べた問題点の解決策と、その実験結果を述べる。

## 第4章 射影変換による筆致画像の補正

### 4.1 はじめに

本章では、投影する筆致画像と筆接触部の不一致という問題の原因、およびその解決策、またその解決策の実施結果について述べる。

### 4.2 原因と解決策

投影された筆致画像と筆接触部が不一致となる原因は、カメラの取得範囲と投影範囲が一致していないからである。Fig.4-1に示すようにカメラ取得画像には、投影した筆致画像とその周囲が写りこんでいる。そのため、カメラ取得画像をそのまま2値化した筆致画像を投影すると、筆致画像と筆接触部が不一致となる。

この問題の解決策として、カメラ取得画像から投影されている画像のみを抽出し、その画像をカメラ取得画像と同じ大きさに補正する方法があり、これをシステムの初期設定とすることで筆致画像と筆接触部の不一致を回避することが可能になる。

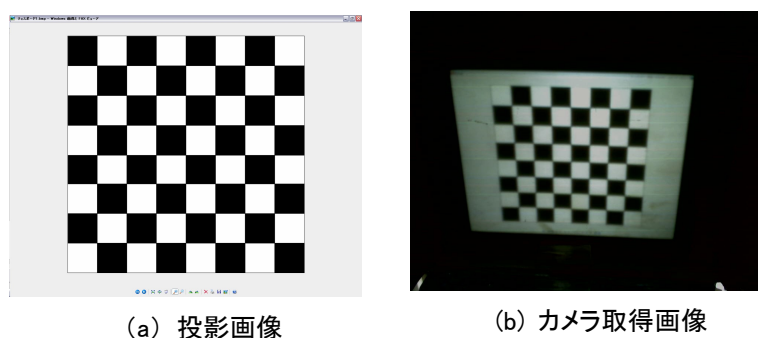


Fig.4-1 投影画像とカメラ取得画像

### 4.3 初期設定

まず、単一色の画像を PC 上で全画面表示にして投影することで、すりガラス上での投影範囲（描画可能範囲）を取得する。カメラ取得画像上の、すりガラスに投影された単一色画像の4頂点を、投影する筆致画像の4頂点となるように補正することで、投影された筆致画像とすりガラス上の筆接触部を合致させることができる。カメラ取得画像から筆致画像への変換行列は次式のように表すことができる。

$$\alpha \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{H}_p \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

$$\mathbf{H}_p = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

上式において $(x, y)$ と $(u, v)$ は、それぞれ筆致画像の座標とカメラ取得画像の座標であり、 $\alpha$ は定数、 $\mathbf{H}_p$ はホモグラフィ行列と呼ばれる。ホモグラフィ行列 $\mathbf{H}_p$ はスカラー倍の自由度を除けば、8個の未知数として記述できるので、3次元空間内で同一平面上にある4点以上の、画像上での対応がわかれば求めることができる。本手法では、カメラ取得画像上の、すりガラスに投影された筆致画像の4頂点と、補正後の投影する筆致画像の4頂点が既知となるので、ホモグラフィ行列を求めることができる。Fig.4-2に得られたホモグラフィを利用して補正した結果を示す。

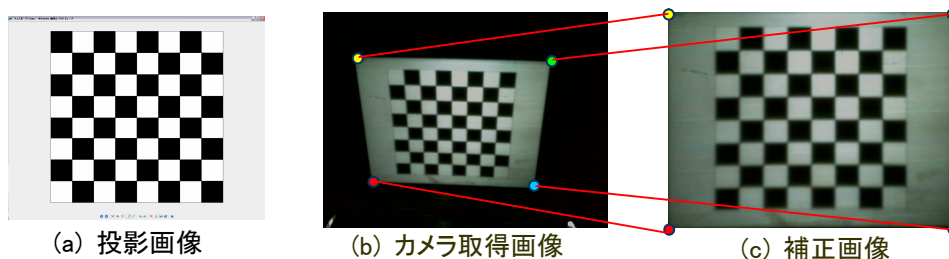


Fig.4-2 筆致画像の補正

## 4.4 結果

前節において提案した初期設定の手法をシステムに実装した。Fig.4-3にその結果を示す。筆接触部と投影された筆致画像が一致しているのがわかる。

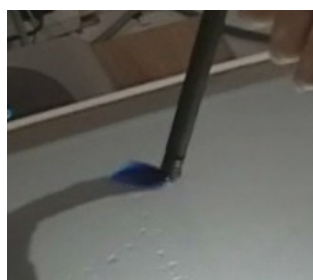


Fig.4-3 結果画像

## 4.5 おわりに

本章では、投影された筆致画像と筆接触部を一致させる手法を提案し、実装した結果について述べた。

# 第5章 背景差分法による筆接触部の抽出

## 5.1 はじめに

本章では、筆接触部以外の誤検出してしまう問題を解決する手法について述べる。

## 5.2 原因と解決策

初期段階のシステムでは、カメラ取得画像全体に対して2値化処理を行っているのに、筆接触部に色情報が似ている部分も筆接触部として2値化してしまう。この問題の解決策として、2値化する領域を筆接触面周辺のみ限定する方法が有効である。

## 5.3 背景差分法のための背景モデル

2値化する領域を限定するにあたって、筆接触部を抽出する必要がある。そこで、背景差分法によって筆接触部を抽出することにした。しかし、単純な背景差分法では、環境光の影響などに影響されやすいので、背景のゆらぎをモデル化し、環境光などに強い背景差分法を適用する。

本研究では、ゆらぎが正規分布をなすと想定した。正規分布は次式のように表せる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

(5.1)

式(5.1)において、 $\mu$  は平均値、 $\sigma^2$  は分散を表す。背景のモデルとして正規分布を用いるには、それぞれの画素ごとに平均値と分散を求める必要がある。一般的に、 $N$  個のデータ  $[x_1, x_2, \dots, x_N]$  に対して、平均  $\mu$  と分散  $\sigma^2$  は次式で求めることができる。

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \tag{5.2}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad (5.3)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 - \mu^2 \quad (5.4)$$

## 5.4 筆接触部の抽出

あらかじめすりガラス上に何も無い状態を背景として保存し、すりガラス上に筆が接触したときにカメラ取得画像と背景画像の差分をとることで、筆接触部を含む前景画像を作成する。Fig.5-1 に、背景画像・カメラ取得画像・前景画像を示す。

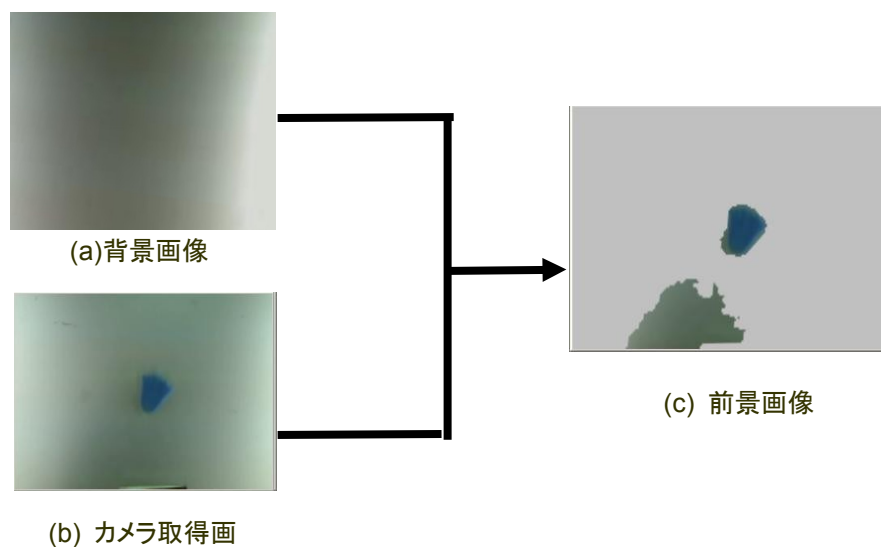


Fig.5-1 背景差分法

## 5.5 結果

背景のゆらぎをモデル化し、背景差分を行うことで、筆接触部を含む前景画像を作成することができた。筆を持つ腕の影も前景画像に含まれているが、筆接触部とは明らかに違うと判断できるので、筆接触部の特定には問題ないといえる。

## 5.6 おわりに

本章では、筆接触部を抽出する手法について述べた。次章では、本章で述べた手法による前景画像から筆接触部を特定する手法について述べる。

# 第6章 CamShift 法による筆接触部の追従

## 6.1 はじめに

本章では、筆接触部以外の誤検出を防ぐために、筆接触部周囲を特定する手法について述べる。

## 6.2 CamShift 法

色情報を用いた物体追跡では、MeanShift 法や CamShift 法がある。CamShift 法は MeanShift 法の拡張アルゴリズムである。

MeanShift 法は、追跡対象領域における RGB の各ヒストグラムに着目し、現フレームの画像中で追跡対象のヒストグラム特徴により近くなる位置にシフトしていく。シフトの移動量が一定以下になるか、繰り返し回数が上限に達するまで処理を繰り返すことで、対象領域の現在の位置に追跡する。MeanShift 法は RGB のヒストグラムを用いるが、CamShift 法は色相値のヒストグラムを利用する。このため、色情報が動的に変化する動画像に対してより安定した追跡が可能になる。Fig.6-1 に CamShift 法のフローチャートを示す。

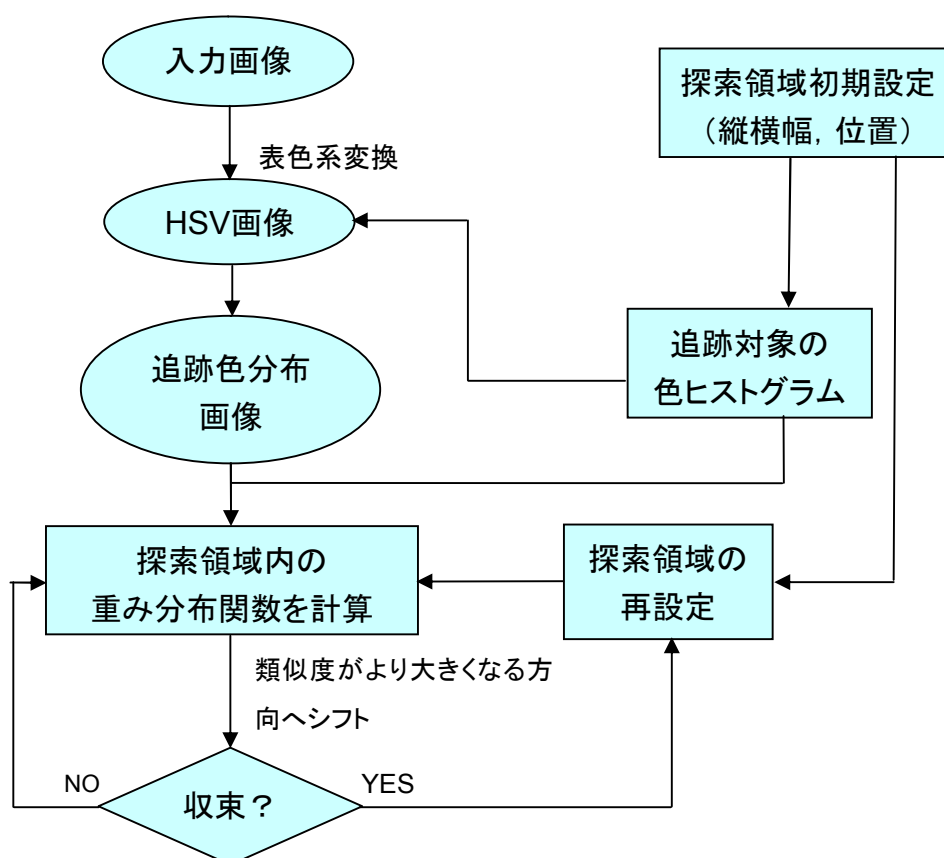


Fig.6-1 CamShift 法のフローチャート



## 6.3 筆接触部の特定, および追従

第5章で述べた手法により作成した前景画像に対して, CamShift 法による筆接触部の特定と追従を行う. 前景画像は, 筆接触部以外の“ノイズ”がほぼ除去されているので, 精度の高い筆接触部の特定を行うことができる. Fig.6-2 に前景画像と, CamShift 法による筆先特定の結果を示す.

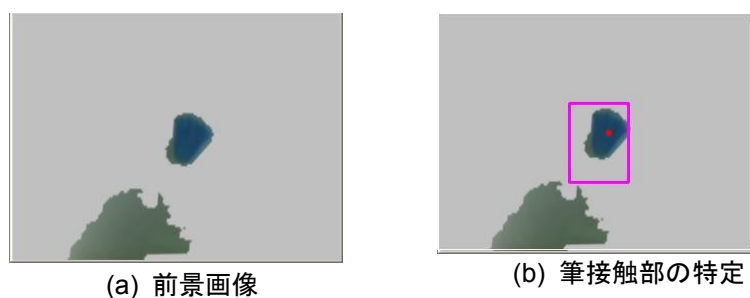


Fig.6-2 CamShift 法の適用

## 6.4 結果

本章で述べた CamShift 法を動画像に対して適用し, 筆接触部の追従を行った. 以下にその結果を示す.



Fig.6-3 筆接触部の追従

筆接触部を正確に追従でき, 筆接触部以外を誤検出していないことがわかる.

## 6.5 おわりに

本章では, 筆接触部以外の誤検出を防ぐ手法を述べた.

# 第 7 章 ラプラシアンフィルタを利用した判別分析法

## 7.1 はじめに

本章では、環境光などによるしきい値の変化に対応するために、しきい値を動的に設定してフレームごとに更新する手法について述べる。

## 7.2 しきい値の設定方法

初期段階のシステムでは、あらかじめ定めた一定の値をしきい値としていた。そのため、環境光等によるしきい値の変化に対応できず、筆接触部の2値化の精度は悪かった。その問題を解決するためには、しきい値をフレーム毎に変化させ、更新していく手法が有効である。以下にその手法を示す。

## 7.3 判別分析法

判別分析法とは、ヒストグラムをある値  $t$  で二つのグループに分けたとき、グループ間の分散が最大となる値  $t_{\max}$  をしきい値とするというものである。ヒストグラムが双峰性を示す場合にモード法として働き、ヒストグラムに双峰性がない場合でも自動的にしきい値が決定できるという長所を持っている。モード法とは濃度ヒストグラムが画像の対象物と背景のそれぞれに対応した二つの山(双峰性があるとき)ができる場合、山の間の谷の位置をしきい値として設定する方法である。

具体的には、256 階調のある画像をしきい値  $t$  で 2 値化したとき、濃度が  $0 \sim t-1$  の画素の平均濃度を  $\bar{f}_0$ 、濃度が  $t \sim 255$  の画素の平均濃度を  $\bar{f}_1$ 、全画素の平均濃度を  $\bar{f}$ 、濃度  $k$  を持つ画素の数を  $n_k$  とすれば、クラス間分散  $\sigma_B^2(t)$  および、クラス内分散  $\sigma_I^2(t)$  は

$$\sigma_B^2(t) = \frac{\sum_{k=0}^{t-1} n_k (\bar{f}_0 - \bar{f})^2 + \sum_{k=t}^{255} n_k (\bar{f}_1 - \bar{f})^2}{\sum_{k=0}^{255} n_k} \quad (7.1)$$

$$\sigma_I^2(t) = \frac{\sum_{k=0}^{t-1} n_k (k - \bar{f}_0)^2 + \sum_{k=t}^{255} n_k (k - \bar{f}_1)^2}{\sum_{k=0}^{255} n_k} \quad (7.2)$$

となる, このときの分散比

$$F_0(t) = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_I^2} \quad (7.3)$$

が最大となる  $t_{\max}$  がしきい値となる.

## 7.4 ラプラシアンフィルタによる濃度ヒストグラムの双峰化

ラプラシアンフィルタを適用することで, 隣接する画素との濃度値の変化分が大きい画素を抽出することができる. 抽出された画素とその周辺の画素を利用して濃度ヒストグラムを作成すると, フィルタを適用していない濃度ヒストグラムに比べて濃度ヒストグラムが双峰化する. ヒストグラムが双峰化されていると, 判別分析法で精度の高い最適なしきい値設定が可能となる. Fig.7-1 に適用した画像を, Fig.7-2 にフィルタを適用した画像を, Fig.7-3それぞれの画像の濃度ヒストグラムを示す.



Fig.7-1 入力画像



Fig.7-2 フィルタ適用後

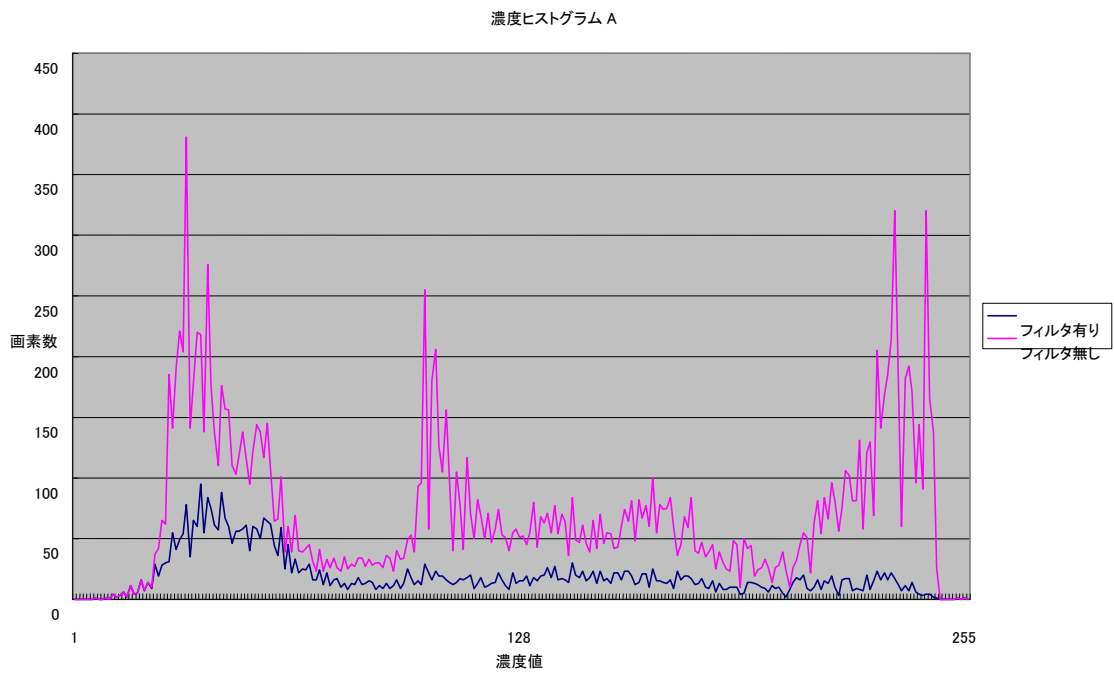


Fig.7-3 濃度ヒストグラム

どちらのヒストグラムも濃度値が完全な双峰化はしていないものの、フィルタなしに比べて、突出した山の部分が無くなり、より精度の高い判別分析法によるしきい値設定が可能になる。

## 7.5 結果

手動, 前述した手法, フィルタ無しの判別分析法による手法にて設定された閾値, およびその閾値を利用して2値化したものをそれぞれ示す.

Table.7-1 しきい値

	manual	Laplacian on	Laplacian off
画像 A	77	85	105
画像 B	83	85	108



Fig.7-4 画像 A の 2 値化結果

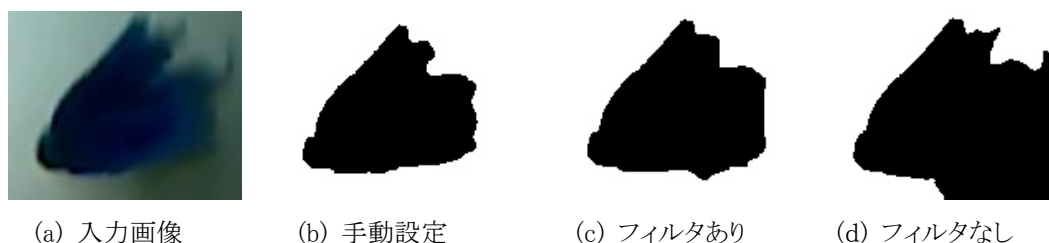


Fig.7-5 画像 B の 2 値化結果

画像 A,B ともにフィルタを適用したしきい値のほうが, 手動で設定した値に近く, 2値化の結果も手動設定したものとほぼ同一な結果といえる. このことからラプラシアンフィルタを適用することで, 精度の高い判別分析法によるしきい値設定が可能となる.

## 7.6 おわりに

本章では, 精度の高い2値化を実現するしきい値を設定する方法として, ラプラシアンフィルタを用いた判別分析法について述べた. 次章では, 第4章から第7章で述べた解決策を初期段階のシステムに組み込んだ結果を示す.

## 第 8 章 解決策の実装

### 8.1 はじめに

第 3 章で述べた問題点に関する解決策を第 4 章から第 7 章で述べたが, 本章では, その解決策を初期段階のシステムに実装した結果を示す.

### 8.2 投影する筆致画像の補正

投影された筆致画像と筆接触部の不一致の問題に対する解決策として, 第 4 章で投影する筆致画像の射影変換について述べた. Fig.8-1 にその結果を示す.



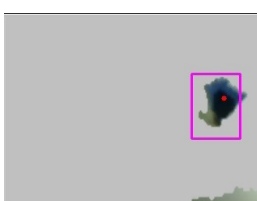
Fig.8-1 投影された筆致画像と筆接触部の一致

### 8.3 筆接触部以外の誤検出の防止

筆接触部以外の誤検出の問題に対する解決策として, 第 5 章と第 6 章で背景差分法と筆先追従について述べた. Fig.8-2 にその結果を示す.



(a) 筆接触部ありA



(b) 筆接触部ありB



(c) 筆接触部なし

Fig.8-2 筆接触部以外の誤検出の防止

### 8.4 2 値化の精度

2 値化の精度の問題に対する解決策として, 第 7 章でラプラシアンフィルタを用いた

判別分析法について述べた. Fig.8-3 にその結果を示す.

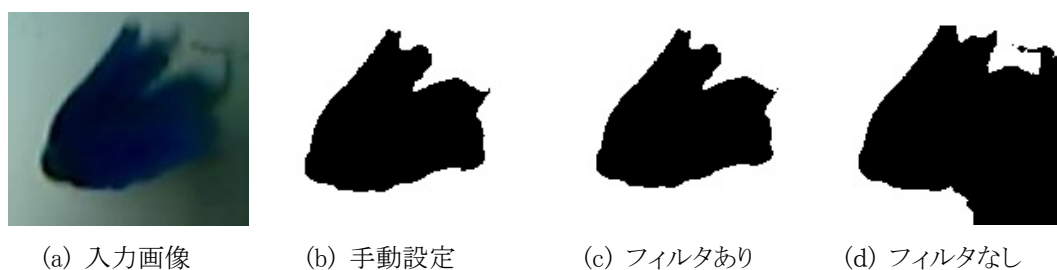


Fig.8-3 2値化の精度向上

## 8.5 まとめ

本章で述べたすべての手法を組み合わせ、提案システムを用いて描画した出力画像を Fig.8-4 に示す.



Fig.8-4 出力画像

## 8.6 おわりに

本章では、第4章から第7章にかけて述べた、初期段階のシステムの問題点の解決策を実装した結果について述べた.

## 結言

本論文では、筆先追従と判別分析法を利用することで、初期段階のシステムの描画能力の精度向上が可能であることを示した。今後、すりガラスを透明 EL ディスプレイにし投影機をなくすなどしてシステムのハードウェアの小型化、およびさらなる描画精度の向上などを目指していく予定である。



## 参考文献

- 1) 岩月正見, 植田耕平: “筆先接触画像取得型毛筆ディスプレイ”, 第6回情報科学技術フォーラム講演論文集, pp.165-166, 2007
- 2) 奈良先端科学技術大学院大学 OpenCV プログラミングブック製作チーム: “OpenCV プログラミングブック”, pp.218-271,毎日コミュニケーションズ
- 3) 大津 展之: 判別および最小 2 乗規準に基づく自動しきい値選定法, 電子通信学会論文誌 D, Vol. 63, No. 4, pp. 349-356, 1980
- 4) 植田耕平, 岩月正見: “筆先追従と判別分析法を利用した筆先接触画像取得型毛筆ディスプレイ”, 第 41 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文集, 2009

# 謝辞

本論文は、著者が法政大学大学院工学研究科電気工学専攻に在学している際に、法政大学工学部情報電気電子工学科岩月研究室において行った研究を取りまとめたものです。本研究を遂行するにあたり、全般的に深い御指導、御協力を賜りました岩月正見教授に心から感謝致します。また、本研究に携わってきた研究室のOBの方々、長い間一緒に学んできた同研究室の方々、4年間共に学び苦楽をともにした鈴木さん戸佐さんにもこの場を借りてお礼申し上げます。

2009年2月17日

Kohei UEDA