オンライン筆跡鑑定への微分幾何学の応用

柴田 絢子　(指導教員: 金子 晃)

1 はじめに

近年では, 本人認証において筆跡, 指紋, 静脈, 声紋, 虹彩等の様々な技術が用いられている. その中で本研究ではオンラインの筆跡鑑定について取り上げる事にした. オンラインで取得した文字形態, 筆記するスピード, 筆圧のデータを使用し, 微分幾何学を応用することで, 本人の筆跡であるかを従来より効率的に判別する方法の開発を目指した.

なお, タブレットを用いたオンラインの署名鑑定においては, 10 年前に本研究室の平尾泰子によってシステム構築の為の前段階的実践が発表されている. 本研究では python で実装された mypaint を書き直した ayapaint を用いてデータを取得し, 先行研究を改良してデータの解析を行っている.

2 筆跡とは

筆跡すなわち手書き文字は, まず文字形態のイメージが意識空間で想起され, 次に腕, 手の動きを制御する運動指令の発生の過程を経て, 2 次元空間信号の形で出力される. 最終的に空間図形として表現された文字は, 筆記者の網膜を介して形状が認識され, 意識空間にフィードバックされる. 文字の形状を決定するパラメータはいくつか存在するが, 運動指令の過程で与えられる筆点の動的特性が文字の形状を修飾する形で現れた特徴である個人性がユーザ認証では重要な情報となる.

3 オンライン筆跡鑑定とは

コンピュータに接続された電磁誘導式の小型タブレットなどの座標入力装置を用いて, そこにペン先の座標を一定時間間隔でサンプリングして得られる時系列情報を署名の運筆情報としてとらえ, あらかじめ登録した基準となる署名データと入力署名の運筆情報を照合することにより本人の書いた署名であるかを判定する. コンピュータのログイン, 特定場所への入退室コントロールなどの本人確認を手書き動作で行う. 登録される純正署名も提示署名もともにデジタル化され, 特徴ベクトルとして計算処理される.

4 曲率と捩率・Frenet-Serret の公式

一般に曲線の曲がり具合を表す量は曲率 κ という概念が用いられる.

○ 平面曲線

平面の座標系 (x, y) において

$$x = x(t), \quad y = y(t)$$

で与えられた曲線の曲率は次のようになる.

$$\text{曲率:}\ \ \kappa(t) = \frac{x'(t)y''(t) - x''(t)y'(t)}{(x'(t)^2 + y'(t)^2)^{3/2}}$$

また, s が弧長パラメータのとき, $c(s) = (x(s), y(s))$ における曲線の曲率は次のようになる.

$$\text{曲率:}\ \ \kappa(s) = |c''(s)| = \sqrt{x''(s)^2 + y''(s)^2}$$

○ 3 次元の空間曲線

3 次元空間の場合には, 曲率 κ と捩率 τ が存在する. 捩率とは平面曲線からの離れ具合を表す量のことである. また, 法線ベクトルは主法線 $\boldsymbol{n}$ と従法線 $\boldsymbol{b}$ が用いられる.

s が弧長パラメータのとき, $p(s) = (x(s), y(s), z(s))$ の 3 次元ユークリッド空間中における曲線の曲率, 捩率は $\boldsymbol{t}(= \boldsymbol{x}'(s) = (x'(s), y'(s), z'(s)))$ と Frenet-Serret の公式を用いて求められる.

- Frenet-Serret の公式

$$\begin{cases} \boldsymbol{t}'(s) = & & \kappa(s)\boldsymbol{n}(s) & \\ \boldsymbol{n}'(s) = & -\kappa(s)\boldsymbol{t}(s) & & +\tau(s)\boldsymbol{b}(s) \\ \boldsymbol{b}'(s) = & & -\tau(s)\boldsymbol{n}(s) & \end{cases}$$

これより, 曲率, 捩率は以下の式で求まる.

$$\text{曲率:}\ \ \kappa(s) = |\boldsymbol{t}'(s)| = \sqrt{x''(s)^2 + y''(s)^2 + z''(s)^2}$$

$$\text{捩率:}\ \ \tau(s) = |(\frac{1}{\kappa}\boldsymbol{t}')' + \kappa\boldsymbol{t}|$$

5 高次元空間内の曲線の曲率

高次元空間曲線は, 筆圧等の付加情報を利用するときに必要となる.

一般に, 次のことが知られている.

n 次元空間の曲線の曲率

n 次元空間の曲線の曲率は $n-1$ 個ある.

例えば, 3 次元空間の場合は曲率が 2 つあり, それらが上で述べた曲率と捩率である. 4 次元以上の場合は, 第 1 曲率, 第 2 曲率, 第 3 曲率 $\cdots$ と呼ばれ, $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \cdots$ と表される. それぞれの曲率は以下のようにして求められる.

一般パラメータ表示 $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}(t)$ が与えられたとする. ここで長さが 1 と限らない接線ベクトルは $\boldsymbol{x'}(t)$ となり, $ds = |x'(t)|dt$ を用いると, Frenet-Serret の一般化は次のように書かれる. 第 3 曲率以下もこの式からわかる. ここで, $\boldsymbol{n}_i$ で第 i 法線ベクトルを表す.

$$\begin{cases} \frac{d\boldsymbol{t}}{ds} = \frac{1}{|x'(t)|} \cdot \frac{d\boldsymbol{t}}{dt} = \kappa_1\boldsymbol{n}_1 \\ \frac{d\boldsymbol{n}_1}{ds} = \frac{1}{|x'(t)|} \cdot \frac{d\boldsymbol{n}_1}{dt} = \kappa_2\boldsymbol{n}_2 - \kappa_1\boldsymbol{t} \\ \frac{d\boldsymbol{n}_2}{ds} = \frac{1}{|x'(t)|} \cdot \frac{d\boldsymbol{n}_2}{dt} = \kappa_3\boldsymbol{n}_3 - \kappa_2\boldsymbol{n}_1 \\ \vdots \\ \frac{d\boldsymbol{n}_{n-2}}{ds} = \frac{1}{|x'(t)|} \cdot \frac{d\boldsymbol{n}_{n-2}}{dt} = -\kappa_{n-1}\boldsymbol{n}_{n-1} \end{cases}$$

長さを 1 にした単位接線ベクトルは $\boldsymbol{t} = \frac{x'(t)}{|x'(t)|}$ となるので, この式を用いると 4 次元空間で考えた曲率の式は以下のようになる.

$$
\begin{aligned}
\text{第 1 曲率:}\quad & \kappa_1 = \frac{1}{|\boldsymbol{x}'(t)|} \cdot \frac{d\boldsymbol{t}}{dt} \\
\text{第 1 法線ベクトル:}\quad & \boldsymbol{n}_1 = \frac{1}{\kappa_1 |\boldsymbol{x}'(t)|} \cdot \frac{d\boldsymbol{t}}{dt} \\
\text{第 2 曲率:}\quad & |\kappa_1 \boldsymbol{t} + \frac{1}{|\boldsymbol{x}'(t)| \cdot \frac{d\boldsymbol{n}_1}{dt}}| \\
\text{第 2 法線ベクトル:}\quad & \boldsymbol{n}_2 = \frac{1}{\kappa_2}(\kappa_1 \boldsymbol{t} + \frac{1}{|\boldsymbol{x}'(t)|} \cdot \frac{d\boldsymbol{n}_1}{dt} \\
\text{第 3 曲率:}\quad & |\kappa_2 \boldsymbol{n}_1 + \frac{1}{|\boldsymbol{x}'(t)| \cdot \frac{d\boldsymbol{n}_2}{dt}}|
\end{aligned}
$$

また, 空間曲線について一般に次のことが知られている.

空間曲線の主定理

空間曲線の合同類は $n-1$ 個の曲率によって決まる.

曲率は, 平行移動や回転をした際にも値が変わらないので, 筆跡鑑定において有効なデータとなることが考えられる.

6 微分公式

これまでの式からわかるように, 曲率の式には微分の式が含まれている. よって曲率を求めるには, まず微分の公式を求めておく必要がある. 更に, 筆跡においてはサンプル時間間隔が不等になるため, 不等間隔時間での数値微分の公式が必要となる. これは Taylor の公式と差分法を用いて求められる.

三つの不等間隔時間 t_0, t_1, t_2 で与えられた関数 $f(t_0), f(t_1), f(t_2)$ において,$f(t_1)$ の 1 階微分, 2 階微分の式はそれぞれ

$$
\begin{aligned}
f'(t_1) = & \{(t_1 - t_0)^2 f(t_2) + (t_2 - t_0)(t_0 + t_2 - 2t_1) f(t_1) \\
& - (t_2 - t_1)^2 f(t_0)\} \frac{1}{(t_2 - t_1)(t_1 - t_0)(t_2 - t_0)} \\
f''(t_1) = & [2 \cdot (t_1 - t_0)^3 f(t_2) - \{(t_2 - t_1)^3 + (t_1 - t_0)^3\} f(t_1) \\
& + (t_2 - t_1)^3 f(t_0) + \{(t_1 - t_0)(t_2 - t_1)^3 \\
& - (t_2 - t_1)(t_1 - t_0)^3\} f'(t_1)] \frac{1}{(t_1 - t_0)^2 (t_2 - t_1)^2 (t_2 - t_0)}
\end{aligned}
$$

となる.

また, Risa/Asir で五つの不等間隔時間 t_0, t_1, t_2, t_3, t_4 で与えられた関数 $f(t_0), f(t_1), f(t_2), f(t_3), f(t_4)$ における $f(t_2)$ の 1 階微分の式も求めた.
それぞれの式が, 良い近似値であることは数値例 $f(t) = \cos t$ とする下記の結果からわかる.

```
f(1)=0.123
f(2)=0.128
f(3)=0.135
f(4)=0.150
f(5)=0.163
1 階 2 次差分 :approximate value=-0.127650
               true        value=-0.127651
2 階 2 次差分 :approximate value=-0.991731
               true        value=-0.991819
1 階 4 次差分 :approximate value=-0.134590
               true        value=-0.134590
```

7 タブレットの使用と解析方法

1. タブレットをコンピュータに接続.
2. ファイル名を指定し, 入力用プログラム (ayapaint) を実行.
3. タブレットのペンを用いて, 署名をする.
4. 署名を筆記したら右クリックで読み取り終了.
5. 時間, x 座標値, y 座標値, 筆圧の 4 つのデータが指定したファイルに保存される.
6. 解析プログラムで, 保存したデータを解析. 筆圧が 0 より大きくなったところから解析が開始される.
7. x 軸, y 軸が筆跡の x, y の座標値, t 軸が時間, t 軸方向に描かれた曲線の色が筆圧を表す.(青は筆圧 0, 赤は筆圧 1.0 で一般にはそれらの中間色)

8 解析結果

筆記した署名を解析すると, 以下のような結果が得られる.

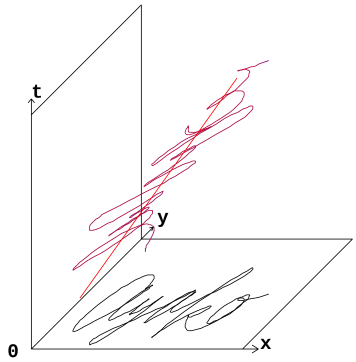

図 **9.1** 解析結果

9 まとめと今後の課題

本研究の核心は曲率を用いることにより, 時間・空間シフトや回転に対してロバストな特徴ベクトルを得ることができるというアイデアである.

現段階では曲線の曲率を求めるための公式を導き出した. 今後これらの式を用いて実際の筆跡の曲率を計算する. そして現在取得している実験データの数を増やし, それらを用いて本人認証の正確性が従来法と比較して, どの程度増すかを調べることが課題となる.

さらに本研究では, 先行研究の改良ということで筆圧のデータを用いることに重点をおいた. なぜなら, 文字形態と書くスピードのみの取得では他人が本人の遺留署名に基づいた練習により, 徐々に本人の署名であるかの判別が難しくなってきてしまう. そこで, 人によって癖の違いが出やすく, 真似するのが困難な筆圧を加えれば, より認証の正確性が高まり, 高度な筆跡鑑定ができるはずであると考えた.

参考文献

[1] 瀬戸 洋一, “サイバーセキュリティにおける生体認証技術”, 共立出版株式会社, 2002.

[2] 小林 昭七, “曲線と曲面の微分幾何”, 裳華房 , 1997.

[3] 平尾 泰子, “オンライン署名鑑定 -研究の外観とタブレットを用いた実践の試み-”, 卒業研究 2000.