

センサフュージョンを用いた電子ペンの筆記軌跡復元

生産システム工学専攻 齋藤 航

Reproducing the Handwriting Trajectory for Electronic Pen Device by Sensor Fusion Technology

Wataru SAITOU

Advanced Course of Production System Engineering, Toba National College of Maritime Technology

Abstract

Current handwriting inputting devices are restricted by limitations such as requiring a dedicated pen and paper, or having a limited writing surface. Therefore, this paper considers a method of reproducing the handwriting trajectory by using acceleration and angular velocity information. So far, it has been found that accurate determination of pen-angle conditions is effective for improving reproduction accuracy. In this paper, sensor fusion technology was used to calculate pen-angle conditions, and its effectiveness is examined.

Keywords: Digital Pen, Handwriting Character Reproduction, Acceleration Sensor, Gyro Sensor, Sensor Fusion

1. はじめに

現在、情報機器へ手書き文字を入力する手段として、様々な種類のデバイスが販売されている。これらを大きく分類すると、アノトペン方式、電磁誘導方式、超音波方式、ペンタブレット、タッチセンサ付ディスプレイとなる。しかし、これらを利用するとき、電子ペンの他に専用紙が必要、専用のデバイスのみには書き込むことが出来ないなどの制約がある。

そこで我々は、新しい電子ペンとして、筆記時に得られる加速度情報と角速度情報から筆記軌跡を復元する方式について検討を行なっている。提案方式では、ペンに取り付けた加速度・角速度センサから得られる値に対して積分処理を行うことで、筆記軌跡の復元が可能となる。また、加速度・角速度センサをどのようなペンにでも取り付けられるようにすることで、専用紙や他のデバイスを必要としない。また、この方式については、既にいくつかの先行研究[1][2][3]が存在するが、この方式の電子ペンは現在までに実用化されていない。

我々はこれまでの研究で、加速度・角速度センサを搭載した電子ペンを開発し、筆記動作から発生する3次元の加速度・角速度値から、筆記軌跡の復元を行ってきた[4]。その結果、筆記軌跡の復元精度を向上させるためには、筆記中のペンの姿勢を正確に把握する必要があることが分かった。従来手法[4]のように、角速度を積分し角度を求める方法では、計測誤差などの要因によって実際のペンの姿勢と計算で求めたペンの姿勢の間の誤差が時間とともに大きくなってしまう。

そこで本稿では、この誤差の影響を抑え、より正確

にペンの姿勢を把握すべく、ペンの姿勢を推定するアルゴリズムにオープンソースな自己姿勢推定アルゴリズムである Madgwick's IMU algorithms [5]を使用し、従来手法との復元精度の比較を行うことで、その有効性を検討した。また、電子ペンを用いて実際に文字を筆記し、筆記軌跡の復元精度の定量的な評価を行った。

2. 電子ペンの概要

本研究で開発した電子ペンの構成を図1に示す。電子ペンは3軸加速度・角速度センサ、制御用マイコン、そして無線通信ユニットから構成される。電子ペンを用いて文字を筆記した時に、電子ペンに加わった加速度・角速度情報を計測し、制御用マイコンを通して無線送信によりPCへ送信する。電子ペンに搭載する加速度センサはSTMicroelectronics製のLSM303DLH、角速度センサはInvenSense製のIMU3000を使用した。加速度センサの測定範囲は $\pm 2[g]$ 、角速度センサの測定範囲は $\pm 500[^\circ/s]$ とした。加速度センサと角速度センサの軸方向は図2の通りに定義した。

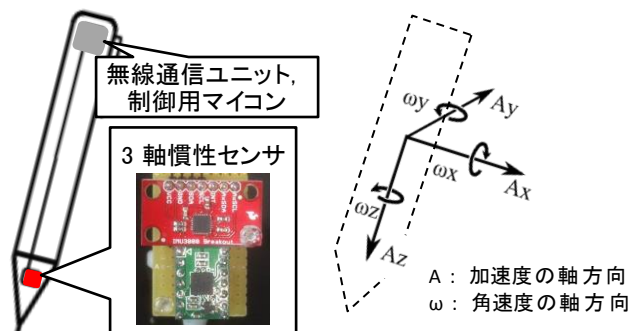


図1 電子ペンの概観 図2 電子ペンの軸方向

なお、これらのセンサのサンプリングレートは200[Hz]とした。これは、筆記動作により現れる加速度の成分を大別すると、ペンそのものの動きである低周波成分（10[Hz]程度）と、筆記面とペンとの摩擦による高周波成分（100[Hz]程度）があるという報告[6]に基づいている。

3. 筆記軌跡の復元処理の概要

3.1 復元処理の流れ

電子ペンより取得した加速度・角速度情報を元に、図3のような流れで筆記軌跡の復元処理を行う。次節より、それぞれの処理の詳細を述べる。

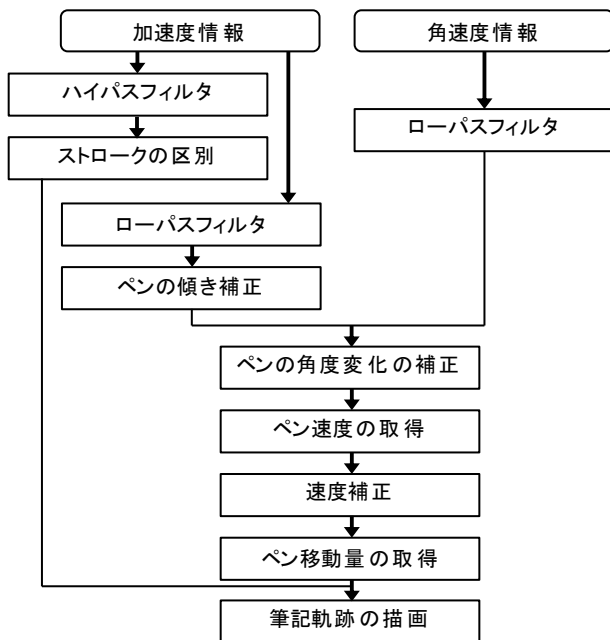


図3 筆記軌跡の復元処理の流れ

3.2 フィルタ処理

はじめに、加速度・角速度情報に対してフィルタ処理を行う。加速度センサ、角速度センサからの出力は、ペンそのものの動きである低周波成分と、筆記面とペンとの摩擦による高周波成分に大別される。そして、低周波成分は10[Hz]程度、高周波成分は100[Hz]程度を中心に現れる。これより、加速度情報に対しローパスフィルタ・ハイパスフィルタを適用することによって目的の周波数成分を得る。本稿では、ローパスフィルタのカットオフ周波数は20[Hz]、ハイパスフィルタのカットオフ周波数は50[Hz]とした。

3.3 ストロークの区別

2節で述べたように、筆記面とペンが接触しているとき、加速度情報には高周波成分が含まれる。これを利用して、ペンと筆記面が接触しながら筆記している

か（以下、実ストローク）、ペンが空中を移動しているか（以下、虚ストローク）を区別する。

ストロークの区別を行う手順を、実際の加速度出力を用いて説明する。ペン先に加速度センサを取り付け、「×」という文字を図4のような筆順で紙上に筆記した。そのときの加速度センサのY軸方向の出力の例を図5に示す。

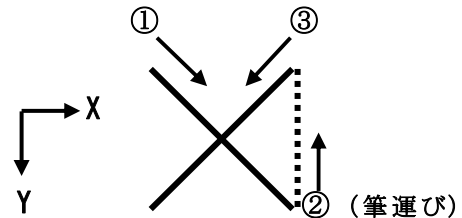


図4 「×」の書き順

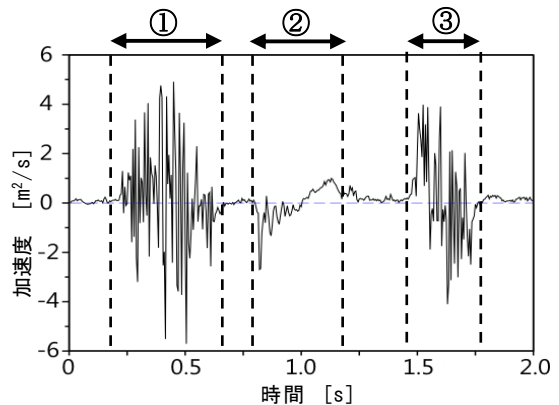


図5 「×」を筆記した時の加速度の出力例

図5より、筆順①、③のときに筆記面とペンとの摩擦によって加速度は激しく変動していることが分かる。

まず、加速度信号の高周波成分を取り出すためにハイパスフィルタを適用し、その絶対値を求める。得られた信号は変動が大きく不安定なため、移動平均を行う。図5の波形に対してこの操作を行った結果を、図6に示す。

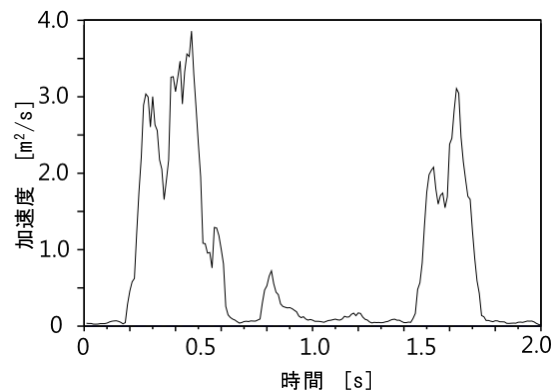


図6 高周波成分の強度を取り出した結果

その後、信号の強度が予め設定したしきい値よりも大きい場合を実ストローク、小さい場合を虚ストロークとみなす。

3.4 ペンの傾き検出と補正

電子ペンで筆記を行う場合、ペンに取り付けた加速度センサの軸と筆記面が直交するとは限らない。そのため、加速度センサの出力から傾き検出を行い、傾き補正処理を行うことで、加速度センサの軸方向を筆記面に直交させる。重力加速度は約 $9.8[m/s^2]$ のため、ペンを持った時の加速度センサの各軸の値を、重力加速度方向を基準に座標変換し、仮想平面を求める。

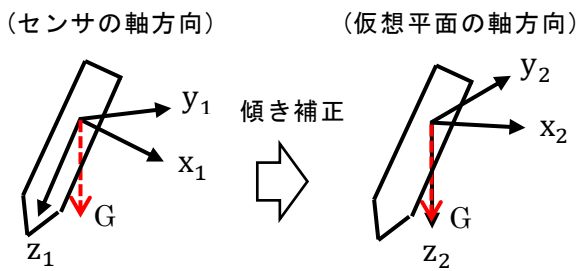


図7 傾き補正の概要

$(x_1 \ y_1 \ z_1)^T$ は加速度センサからの出力値を、 $(x_2 \ y_2 \ z_2)^T$ は傾き補正後の加速度値を表す。仮想平面を求めるための座標変換は、(1)式の回転行列によって行われる。なお、式中の α 、 β はそれぞれ z_1y_1 、 z_1x_1 平面上における z_1 と重力加速度の成す角度を表す。

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

この処理は、ペンの起動時、筆記を行う前に1度のみ行っている。筆記中のペンの角度変化については、次節に述べる補正処理で対応する。

3.5 ペンの角度変化の検出と補正

3.4 節において、電子ペンが傾いている場合の加速度値の補正を行った。しかし、3.4 節で仮想平面における正しい加速度情報を得られるのは、電子ペンの筆記面に対する傾きが筆記中も一定の場合のみである。実際の筆記において、ペンの傾きは筆記中に変化し得る可能性がある。したがって、ペンの傾きが筆記中に変化した場合であっても仮想平面における正しい加速度情報を得られるよう、ペンの角度変化を検出し補正を行う。図8に示すように、X軸まわりの回転を θ 、Y軸周りの回転を φ 、Z軸周りの回転を Ψ とおく。これを利用し、ペンの回転を打ち消すような回転行列を加速度情報に適用することで、筆記中にペンの傾きが変化しても、座標変換で求めた仮想平面での加速度を得

ることができる。

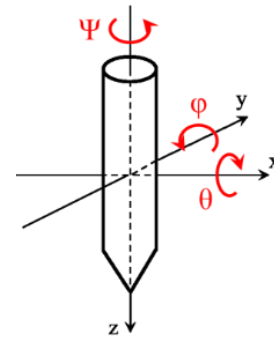


図8 それぞれの軸の回転角度の対応

角度補正を行う前の加速度情報を $(x_2 \ y_2 \ z_2)^T$ 、角度補正を行った後の加速度情報を $(x_3 \ y_3 \ z_3)^T$ とすると、 $(x_2 \ y_2 \ z_2)^T$ と $(x_3 \ y_3 \ z_3)^T$ の関係は以下の式で表される。

$$(x_3 \ y_3 \ z_3)^T = R_z R_y R_x (x_2 \ y_2 \ z_2)^T \quad (2)$$

なお、 R_x, R_y, R_z はそれぞれ3次元の回転行列で、式(3)~(5)のとおりとする。

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos\Psi & \sin\Psi & 0 \\ -\sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

これにより、筆記中にペンの角度が変化した場合であっても、3.4 節で求めた仮想平面での加速度を得ることが出来る。

本稿では、ペンの角度変化を求める際に、

- ① 角速度センサからの出力の積分（従来手法）
- ② Madgwick's IMU algorithms（新手法）

以上の2通りの方法を用いて、それぞれの方法での筆記軌跡の復元精度を比較した。この詳細については、4 節で詳しく説明する。

3.6 積分処理によるペン速度・移動量の算出

これまで得られたペンの傾きと回転を補正した加速度値に対して二階積分を行うことで各軸方向に対する変位を求めることができる。この変位を時系列データとして平面上に配置することで筆記軌跡の復元を行うことができる。積分処理にはシンプソンの公式を用いた。

3.7 速度補正

各センサからの出力を単純に積分していくと、計測誤差が累積していく。この誤差はペンの移動量として現れるため、誤差を低減する必要がある。文字を筆記する場合、各ストロークの書き始めと書き終わりは速度がほぼ 0[m/s]となる傾向が得られるという報告がある[6]。そこで、1 度目の積分を行った後、速度補正を行う。ペン速度の誤差は時間に比例して増大すると仮定し、文字の書き終わり時点での速度が 0[m/s]となるようトレンドを除去し速度を補正する（図 9）。なお、文字の書き終わりの判定には、一定時間内に Z 軸方向の加速度の変動量が微小であるときとした。

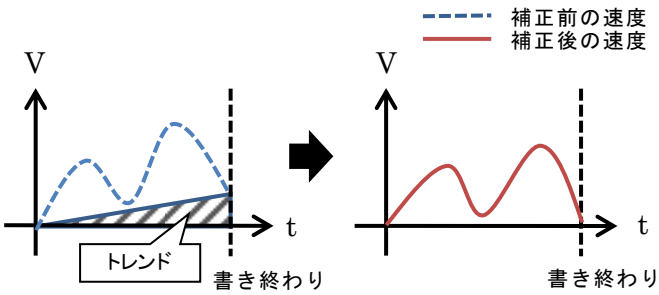


図 9 速度補正の概要

4. ペンの角度変化の検出方法の比較

3.5 節では、筆記中にペンの角度が変化しても仮想平面における正しい加速度情報を得るためには、ペンの角度変化を検出し、それを打ち消すような回転行列を加速度情報に適用すればよいことを述べた。

つまり、ペンの角度変化を正しく検出することは、すなわち筆記軌跡の復元精度の向上に繋がるといえる。これまで我々は、角速度センサからの出力を積分したものをペンの姿勢角としていた[4]。しかし、角速度センサからの出力を積分し、姿勢角として用いる場合、計測誤差なども含めて積分を行うため、時間とともに誤差が増大してしまう。このためペンの角度変化が大きような文字に対しては、筆記軌跡を復元することが困難であった。

そこで本稿では、従来手法よりも高精度にペンの角度変化を検出すべく、加速度センサと角速度センサのセンサフュージョンを適用する。今回は、加速度センサと角速度センサからの出力を統合し、自己姿勢角を計算するオープンソース・アルゴリズムである Madgwick's IMU algorithms[5]を用いた。

Madgwick's IMU algorithms では、角速度センサからの出力を積分することによって得られた角度と、加速度センサによって得られた、重力加速度を基準にした絶対角度を組み合わせる。それにより、角速度センサの持つバイアス誤差を補正する。このため、時間とともに増大する積分誤差を低減できる。

5. 評価実験

5.1 筆記情報の取得方法

本稿では、8名の被験者を対象に、電子ペンを用いて実際に文字を筆記してもらうことで復元精度の評価実験と、ストロークの区別の検証を行った。

各センサからの情報と実際の筆記軌跡を同時に取得するため、11種類の文字をペンタブレット上に各5回ずつ筆記してもらった。得られたデータを元に、実際の軌跡と復元形状を比較することで、復元精度の定量的な評価と、ストロークの区別の検証を行う。筆記を行う文字には、数字の「1」から「5」、記号の「○」、「×」、「△」、カタカナの「ア」、「イ」、「ウ」を選んだ。これらの文字のうち、「×」、「4」、「5」、「ア」、「イ」、「ウ」の6種の文字には虚ストロークが含まれている。

5.2 復元精度の評価方法

復元精度の定量的な評価を行うためには、被験者ごとに筆記する文字の大きさと、筆記にかかる時間が違うことに注意する必要がある。そのため、筆記にかかった時間を10等分し、それぞれの時間における実際の軌跡と復元形状との距離を求め、それを実際の文字の大きさと正規化したものを評価値 E とした。評価値 E を求める式を式(6)に示す。評価値の値が小さくなるほど、復元精度が良い。復元結果の例を図10に示す。

$$E = \sum \sqrt{\{(x_{act} - x_{rep})^2 + (y_{act} - y_{rep})^2\} / (W \times H)} \quad (6)$$

x_{act}, y_{act} : 実際の軌跡の座標
 x_{rep}, y_{rep} : 復元形状の座標
 W, H : 実際の軌跡の幅、高さ

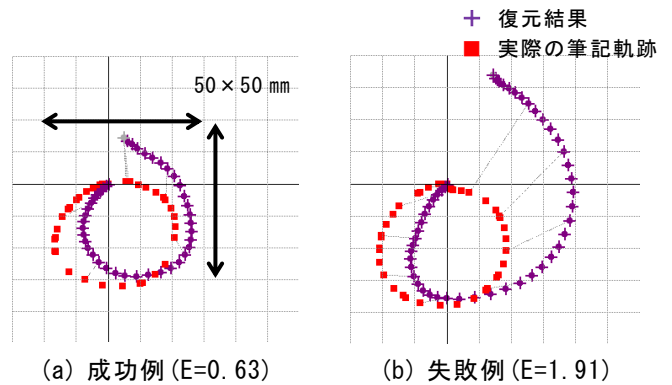


図 10 復元結果の評価値と復元形状

また、ペンの角度変化の検出方法について、従来手法を用いた場合と本稿で提案する新手法を用いた場合の、それぞれの復元精度の比較を行うことで、新手法の有効性を検討する。

5.3 復元精度の評価結果と考察

従来手法、新手法を用いた場合の復元精度の比較を

行うため、それぞれの被験者別の評価値の平均値をまとめた。そのうち、画数が1画（実ストロークのみ）の文字の評価値を表1、表2に示す。

表1 従来手法、画数が1画の文字の評価値

被験者	文字					平均
	1	2	3	○	△	
A	0.90	0.84	1.58	1.37	2.48	1.43
B	1.50	0.80	0.80	2.27	1.19	1.31
C	1.41	1.47	1.06	2.08	2.30	1.66
D	1.45	1.84	1.27	1.37	1.34	1.45
E	1.00	1.00	1.00	1.10	1.29	1.08
F	0.65	1.43	1.27	1.17	0.66	1.04
G	1.03	1.12	1.20	1.82	1.10	1.25
H	1.38	1.91	1.72	1.92	2.73	1.93
平均	1.17	1.30	1.24	1.64	1.64	1.43

表2 新手法、画数が1画の文字の評価値

被験者	文字					平均
	1	2	3	○	△	
A	1.02	1.08	2.40	1.64	1.75	1.58
B	1.61	0.73	0.82	2.56	1.88	1.52
C	1.54	1.99	2.05	1.18	1.15	1.58
D	1.36	1.79	1.55	1.39	1.54	1.53
E	1.18	0.91	1.06	1.12	1.21	1.10
F	0.76	1.96	1.64	1.17	0.62	1.23
G	1.72	1.14	1.68	1.81	1.38	1.55
H	1.92	1.92	1.72	1.92	2.04	1.90
平均	1.39	1.44	1.62	1.60	1.45	1.50

■は従来手法に比べ精度が向上したのもの

復元結果の例として、評価値が表2、表3の平均値に近いものを図11に示す。いずれの文字の大きさも5cm角程度である。

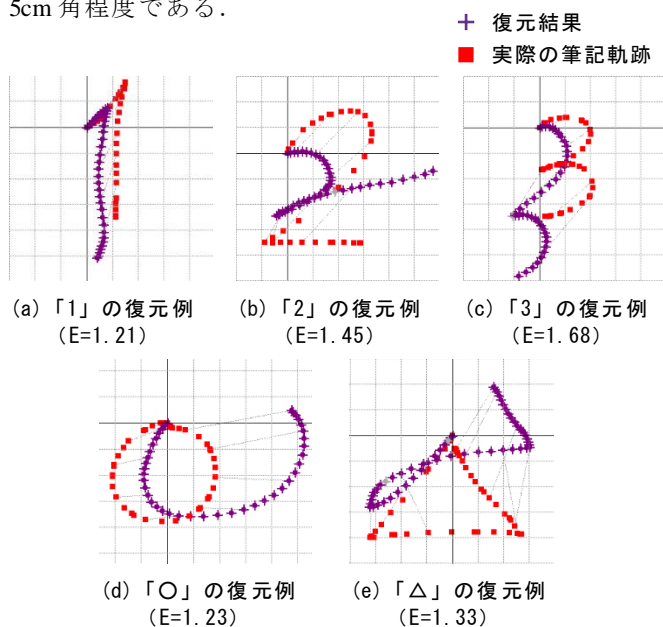


図11 画数が1画の文字の復元例

次に、画数が2画以上（虚ストロークを含む）の文字の評価値を表3、表4に示す。

表3 従来手法、画数が2画以上の文字の評価値

被験者	文字						平均
	4	5	×	ア	イ	ウ	
A	2.53	1.64	3.26	2.70	1.88	1.10	2.19
B	1.47	2.76	1.61	1.34	1.15	1.07	1.57
C	1.28	2.06	0.85	0.75	1.47	0.98	1.23
D	1.48	2.60	2.45	1.45	1.38	1.36	1.79
E	2.34	2.98	2.00	1.79	0.76	2.15	2.00
F	0.77	1.28	1.17	0.64	0.61	0.86	0.89
G	2.04	1.63	1.85	1.07	1.22	2.29	1.68
H	2.82	1.83	1.68	1.42	1.55	1.62	1.82
平均	1.84	2.10	1.86	1.39	1.25	1.43	1.65

表4 新手法、画数が2画以上の文字の評価値

被験者	文字						平均
	4	5	×	ア	イ	ウ	
A	2.83	2.49	2.35	1.33	1.59	1.16	1.96
B	1.31	2.53	1.51	1.72	1.20	1.73	1.67
C	1.61	1.29	1.20	0.76	1.20	1.10	1.19
D	1.71	2.07	1.93	1.40	1.29	1.55	1.66
E	2.00	3.23	1.46	0.96	0.55	1.20	1.57
F	0.80	1.15	1.26	0.84	0.66	0.92	0.94
G	1.65	1.85	1.68	0.89	1.25	2.05	1.56
H	1.86	2.50	1.75	1.29	1.60	1.66	1.78
平均	1.72	2.14	1.64	1.15	1.17	1.42	1.54

■は従来手法に比べ精度が向上したのもの

同様に、評価値が表4、表5の平均値に近い復元結果の例を図12に示す。

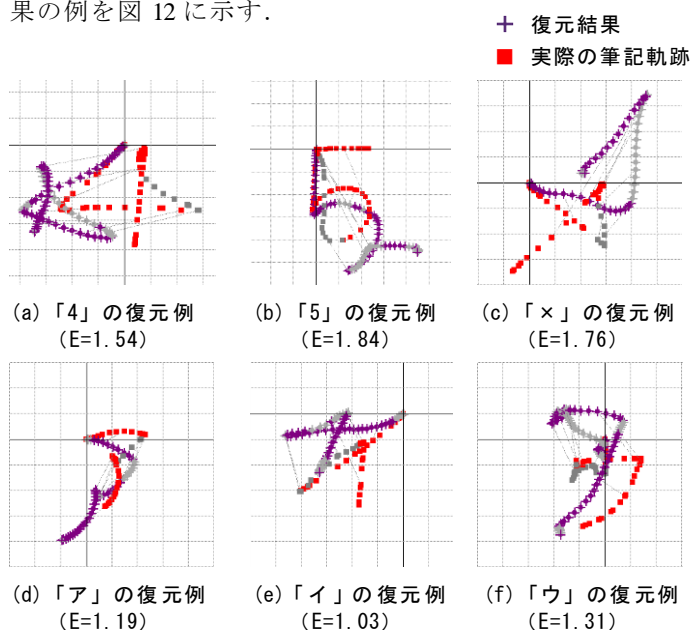


図12 画数が2画以上の文字の復元例

これらの表より、新手法は虚ストロークを含むような文字に対して復元精度が向上するため、有用であると言える。その理由を考えると、主に以下の2点が挙げられる。まず、虚ストロークを含むような文字は、1画の文字に比べ筆記にかかる時間が長い。次に、虚ストロークではペンが空中を移動するため、ペンの角度が変化しやすい。これらの点で、新手法は時間とともに積分誤差の増大しやすい従来手法よりも有利である。新手法は筆記にかかる時間が長い場合に適しており、これは現実の筆記に即していると言える。

また、復元結果の例を見ると、現時点でおおよその文字の特徴を捉えられていると考えられる。誤差の累積により、復元した文字は少しずつ実際の筆記軌跡からずれていってしまっているものの、個別のストローク単位で見れば、十分に文字を復元出来ているといえる。本研究の最終目標は筆記軌跡の復元であるため、その目的とは異なるが、文字認識によって筆記文字を判別出来る可能性が高いことをこの結果は示唆していると言える。

文字別に復元精度を評価すると、1画の文字に比べ、2画以上は全体的に復元精度が低く、評価値にばらつきが出る。特に「4」、「5」、「×」といった文字にその傾向がある。2画以上の文字は、実ストロークから虚ストローク、虚ストロークから実ストロークに変化するときに、ペンの上下動とそれに伴う衝撃によって、加速度情報にインパルス信号のような急峻な変化が現れる。この変化が復元処理に影響を与えていると予想される。また、こういった変化は筆者個人の筆記の勢い、筆圧等によって大きく異なると考えられる。そのため、筆者毎にフィルタの特性を調整する等、前処理として電子ペンの校正を行う必要があると言える。

5.4 ストロークの区別の評価方法

復元精度の評価とは別に、虚ストロークを含む文字（「4」、「5」、「×」、「ア」、「イ」、「ウ」）について、ストロークが区別できているか検証を行う。各サンプルに対して、タブレット上の筆記データ（正解データ）と、3.3節の方法で求めたストロークの区別の結果（判定データ）でストロークの状態が一致しているかを調べ、式(7)のように正解率を求める。

$$\text{正解率} = \frac{\text{正解データと判定データでストロークの状態が一致したデータ数}}{\text{正解データ中の実(虚)ストロークのデータ数}} \quad (7)$$

5.5 ストロークの区別の評価結果と考察

前節の方法で求めた、ストロークの区別の正解率を表5に示す。

表5 ストロークの区別の正解率

被験者	正解率 (カッコ内はデータ数)	
	実ストローク	虚ストローク
A	0.69 (6677/9628)	0.74 (1907/2561)
B	0.71 (4527/6332)	0.69 (1731/2509)
C	0.64 (4995/7816)	0.54 (1624/2982)
D	0.72 (5772/8000)	0.82 (1851/2245)
E	0.69 (3910/5698)	0.61 (1553/2531)
F	0.53 (4407/8287)	0.70 (1395/2000)
G	0.81 (4646/5754)	0.67 (1129/1680)
H	0.75 (4722/6337)	0.51 (955/1889)
平均	0.69 (39656/57582)	0.66 (12145/18397)

表5より、どちらも概ね7割程度の正解率となったため、改善の余地がある。被験者毎にも正解率は大きく異なり、被験者Dの正解率は共に高いが、被験者Cではどちらも低くほとんど区別できていない。これは区別のために設定した加速度の変動のしきい値が、被験者Cにとっては適切でないためであると考えられる。被験者毎に適切なしきい値を決めることができれば、正解率を向上させることが出来ると予想される。

6. まとめ

本稿では、加速度センサと角速度センサを搭載した電子ペンによる筆記軌跡の復元に関する評価実験を行った。その結果、センサフュージョンによるペンの姿勢の推定が有効であることを確認した。今後は筆者ごとの筆記の特性に適應した信号処理の手法を検討し、さらなる精度の向上を目指したい。

文 献

- [1] 佐藤康弘, 新行内充, 古田俊之, 別府智彦, “筆跡入力用新規デバイスの開発”, Ricoh Technical Report, no.27, pp.53-60, Nov.2001.
- [2] 宮川透, 米澤義道, 伊藤一典, 橋本昌巳, “筆記具の加速度情報を用いた文字パターンの一再現法”, 電子情報通信学会論文誌 (D)-II, vol.J83-D-II, no.2, pp.671-679, Feb.2000.
- [3] 井上渉, 布川亮造, “加速度センサと角速度センサを組合せたタブレットレス型ペン入力方式の検討”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集 1999年, 基礎・境界, p.355, Mar.1999.
- [4] 齋藤航, 中井一文, 江崎修央, 杉浦彰彦, “加速度センサと角速度センサを用いた電子ペンにおける筆記形状復元”, MIRU2012 第15回画像の認識・理解シンポジウム 論文集, IS3-53, Aug.2012.
- [5] S.O.H.Madgwick, A.J.L.Harrison, R.Vaidyanathan, “Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm”, Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on, Zurich, Switzerland, Jun.2011.
- [6] 石川裕記, 米澤義道, 伊東一典, 橋本昌巳 “ペン加速度による手書き文字パターンの抽出”, 電子情報通信学会論文誌 (D)-I, vol.J76-D-I, no.10, pp.541-543, Oct.1993.