

# 初期滑り時の指紋変形を利用した小型ポインティングデバイスの開発

池田 篤 俊<sup>†</sup>, 栗田 雄 一<sup>†</sup>  
上田 淳<sup>†</sup> 小笠原 司<sup>†</sup>

本研究では初期滑りにおける指紋変形を利用した新しい小型ポインティングデバイスを提案する。人の指のような半球状弾性体を剛体平板に押しつけたまま接線方向に微小変位させると、“初期滑り”と呼ばれる部分的な滑りが発生する。本研究では初期滑りによる接触面の面積変化を“偏心率”と定義する。まず弾性球と剛体平板の接触と同様に指紋変形における偏心率と指の微小変位量および偏心率と接触面に働く力の関係を調べ、偏心率と指の微小変位量が線形関係にあることを述べる。偏心率より指の微小変位量を推定しポインタを操作する。ユーザはあらかじめ指紋画像を登録しておき、登録画像の指紋中心と微小変位後の画像における接触中心の差分によってポインタを操作する。このとき、あらかじめ登録しておいた指紋中心付近において指紋画像の変形が微小であるので画像特徴量に基づいたトラッキングが可能である。指紋中心のトラッキングには GDS マッチングを用いる。これらの手法を用いて実際にデバイスを試作し、5名の被験者による操作実験を行った。実験より従来のデバイスに比べ少し操作に時間がかかるものの実用に十分な精度で操作可能であることを確認した。

## Development of a Compact Pointing Device Utilizing the Fingerprint Deformation during the Incipient Slip

ATSUTOSHI IKEDA,<sup>†</sup> YUICHI KURITA,<sup>†</sup> JUN UEDA<sup>†</sup>  
and TSUKASA OGASAWARA<sup>†</sup>

In this research, a novel compact pointing device is proposed which utilizes the deformation of the fingerprint. When the fingertip is pressed and slid slightly on a rigid plate, a partial slip, called “incipient slip” occurs on the contact surface. In this research, we define a deformation of contact area as “eccentricity”. A pointer is operated by measuring the incipient slip that occurs between a fingertip and a fingerprint sensor. The relationship between the eccentricity and the fingertip displacement, and the eccentricity and force applied on the contact surface are investigated. It is shown that this eccentricity is almost linear to the fingertip displacement. Since the deformation around the center of the contact surface is small, the center of the fingerprint can be detected during the incipient slip. The Group Delay Spectrum tracking is utilized to track the center of the fingerprint. The velocity of the pointer is determined based on the eccentricity of the contact area. An experimental pointing device is developed to examine the operability of the proposed method. The experimental results show that subjects can operate the pointer with sufficient accuracy.

### 1. はじめに

近年ハードウェア技術の向上にともない、ノート型コンピュータの小型化が進んでいる。また同時に、PDA や携帯電話といったモバイル機器はその性能を年々増しており、PC に匹敵する機能を持ちつつある。このような情報端末機器の入力デバイスにおいて、小型化と操作性の向上は重要な課題である。従来の入力

デバイスとしては、マウス、スライドパッド、トラックポイントなど多数開発されているが、これらデバイスは操作性や小型化において一長一短がある。

そこで本研究では、直感的な操作が可能で、かつ小型化が可能な入力デバイスとして、人の指腹部の指紋変形を用いたポインティングデバイスを提案する。人の指紋の稜線のピッチは 0.3[mm] 程度であり、この情報を利用することにより、空間解像度の高い、すなわち操作性の良いポインティングデバイスを実現することができる。また、指紋情報は近年普及しつつある指紋認証センサにも使われる情報であるため、指紋撮像デバイスを共用できる。撮像デバイス自体は小型で薄いチップタイプのものが市販されており、入力デバイ

<sup>†</sup> 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科  
Graduate School of Information Science, Nara Institute  
of Science and Technology  
現在、ヤマハ発動機株式会社  
Presently with Yamaha Motor Co., Ltd.

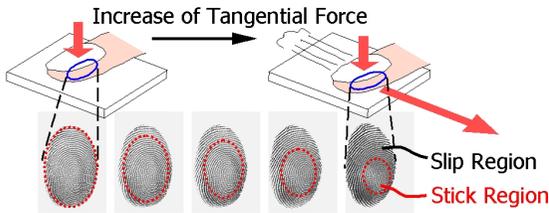


図 1 初期滑り  
Fig. 1 Incipient slip.

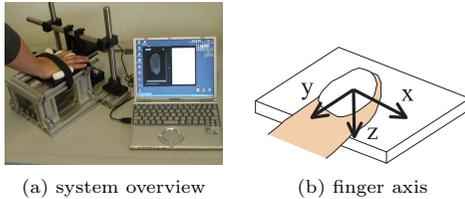


図 2 指紋変形計測装置  
Fig. 2 Fingerprint measurement device.

スの小型化が容易である。

ポインティングデバイスの操作方法としては、指を指紋撮像センサ表面に軽く押しつけた状態で接触面に対して接線方向に指をわずかにずらす方法をとる。指を平板に押しつけて接触面に対して接線方向に動かす運動は、弾性球と剛体平板との接触として考えることができる。このような弾性球と剛体平板の接触では、接触領域の中心部分に比べて周辺部分では法線方向の接触力が弱くなるため拘束が弱い状態になり、周辺部から滑り始める初期滑りと呼ばれる現象が起こる<sup>1)~3)</sup>。

図 1 に示すこのような現象は把持運動においても重要な役割を果たすといわれている<sup>4)</sup>。この初期滑り現象を利用して指の移動量を検出することにより、ユーザは最低限の指の動作でポインティングデバイスを操作することができる。これに加えて、指の押しつけの強さによって接触面積が拡大・縮小することを利用して、クリック操作も実現可能である。

以下、本稿では示指の指紋変形特性を解析し、指紋変形からポインタ操作を行う手法を提案する。また提案した手法を用いてポインティングデバイスを試作し、従来のデバイスと比較し提案手法の有効性を検討する。

## 2. 初期滑りによる指紋変形の解析

### 2.1 初期滑り

人の指(示指)が初期滑りを起こしたときの接触面の変形特性を調べるための装置を製作した。図 2(a)に装置の外観を示す。装置は被験者が手を置くための台と市販の圧力感応式指紋認証用指紋撮像センサ(MBF



(a) neutral



(b) 1[mm] (c) 2[mm] (d) 3[mm] (e) 4[mm]

図 3 指紋変形(元画像)

Fig. 3 Deformation of fingerprints (original).



(b) 1[mm] (c) 2[mm] (d) 3[mm] (e) 4[mm]

図 4 指紋変形(差分)

Fig. 4 Deformation of fingerprints (differential).

社製 EZF-650), 3 軸の力センサ(ニッタ株式会社製 PicoForce PD3-30-10-15), 2 つのセンサを支える 3 軸ステージから構成される。被験者は台の上に手のひらを置き、示指を伸ばして指紋センサに指腹部を置く。力センサは指紋センサのセンサ面の真下にあり、接触面にかかる力を計測することができる。2 つのセンサは 3 軸ステージに固定されており、センサ面を任意の距離だけ動かせるようになっている。本研究ではこの装置を用いて指の移動量と滑り・固着領域の変化、指紋中心の接触中心に対する偏心度および接触面に働く接線方向の力を計測した。以後示指の移動方向は図 2(b)に示すように左右方向を  $x$  軸、前後方向を  $y$  軸、上下方向を  $z$  軸とする。まず指の移動に対する接触面の変形を指紋画像より考察する。実験は被験者 5 名に対して行い、うち 1 名を例にあげる。実験結果は 5 名ともほぼ同様の結果を得ることができた。図 3 に  $x$  軸正方向にセンサ面を動かしたときの接触面の指紋画像の変化を示す。なお図 3(a)を基点としたとき、(b)-(e)はそれぞれ  $x$  軸正方向に約 1[mm] ずつ動かしたときの接触面となっている。また、(b)-(e)の画像から(a)の画像の差分をとった後にピクセル値を 3 倍した画像をそれぞれ図 4 に示す。図中の白い部分が画像間で差

があった領域である．これらの図から接触面の周辺部から滑り始め，中央に向かって滑りが拡大していく様子が確認できる．なお指を 5[mm] 以上同方向にずらした場合，接触面のほぼ全面が滑り領域になり，固着領域を残すことが困難になることが確認された．

## 2.2 指紋変形を利用したポインタ操作法

本研究では，この初期滑り現象を利用してポインティングデバイスの移動量を決定する．

ここで，指を平板に押しつけながら接触面に対して完全には滑らない程度（最大 4[mm] 程度の移動）にずらし動作を，指の“ずらし動作”と呼ぶことにする．ずらし動作時においては初期滑り現象が起こっており，接触中心周辺部には固着領域が必ず存在することになる．また，ずらし動作時の接触面は，図 3 から読み取れるように，指を動かした方向に少しだけ移動する．したがって，指紋模様から推定した接触中心を基準として接触面がどの方向に移動したかを算出することによって，微小な指の移動量でポインタの移動量を決定することができる．本研究ではこのような指紋中心とずらし動作後の接触中心の微小変位を次節で定義する偏心度を用いて推定する．指紋中心を用いることで初期状態の登録時の位置が多少ずれても操作に影響がでない．また指をセンサ面に強く押しつけることによって，接触面はある程度まで広がる．この指の押しつけ強さによる接触面積変化を利用することでクリック操作を実現することも可能である．

## 2.3 指紋変形特性

人の指は骨，爪，皮膚，皮下組織など複数の物質特性を持つ材料から構成される．また，指先の形状は球状と違い楕円体になっており間接によって固定されている．したがって示指を動かす方向によって初期滑りの起こり方が違い，ずらし動作における指紋変形にも影響が生じると考えられる．そこで図 2(b) における各軸に対するずらし動作の特性を調べるため，偏心度と指の移動量および偏心度と接触面に働く力の関係をそれぞれ調べる．なお，実験装置は前節と同じものを用いており，被験者も同様の 5 名である．

個人における示指の物質的な違い（皮膚の硬さや表面の摩擦係数など）以外の条件を統一するため被験者の示指を台の上で固定し，z 軸に約 9.8[N] の力でセンサに指を押しつけた．また，今回の実験では被験者にデバイスに対して指を置く方向をある程度指定して実験を行った．

ステージを各軸方向独立に 0.5[mm] ずつ移動させることでずらし動作を再現し，各位置における指紋画像と接触面に働く力を計測した．

実験結果を図 5 に示す．図中 (a)，(c)，(e) は x，y，z 軸における偏心度  $\delta_x$ ， $\delta_y$ ， $\delta_z$  と微小変位量  $D_x$ ， $D_y$ ， $D_z$  の関係を表し，(b)，(d)，(f) は x，y，z 軸における偏心度と接触面に働く力  $F_x$ ， $F_y$ ， $F_z$  の関係を表している．それぞれのグラフには被験者ごとに近似直線を描画している．

偏心度  $\delta_x$ ， $\delta_y$ ， $\delta_z$  は指紋中心のずらし動作後の接触中心に対する微小変位量を表しており，次式で定義される．

$$\delta_x \triangleq \frac{S_{tx}}{S_t} - \frac{S_{sx}}{S_s} \quad (1)$$

$$\delta_y \triangleq \frac{S_{ty}}{S_t} - \frac{S_{sy}}{S_s} \quad (2)$$

$$\delta_z \triangleq S_t - S_s \quad (3)$$

ここで  $S_s$  は定常状態における接触面全体の面積であり， $S_t$  は各軸方向にステージを移動させた後の接触面全体の面積である．各軸方向の接触面積変化を接触面積全体で割ることで正規化を行っている．さらに定常状態における示指の x 軸における接触面積変化を  $S_{sx}$ ，y 軸における接触面積変化を  $S_{sy}$  とし次式で定義する．

$$S_{sx} \triangleq (S_{s1} + S_{s4}) - (S_{s2} + S_{s3}) \quad (4)$$

$$S_{sy} \triangleq (S_{s3} + S_{s4}) - (S_{s1} + S_{s2}) \quad (5)$$

同様にずらし動作後における示指の接触面積変化  $S_{tx}$ ， $S_{ty}$  も定義される．

図 6 (a) は示指の定常状態の指紋画像であり，(b) は (a) の指紋画像に対して  $7 \times 7$  近傍の平滑フィルタをかけた後，適当な閾値で二値化をかけた画像である．なお水平・垂直方向の線は，指紋中心を手動で設定した中心点の座標である．ここで図 6 (b) に示すように，あらかじめ登録した指紋画像を指紋中心から 4 つの象限に分割し，各象限における接触面積をそれぞれ  $S_{s1}$ ， $S_{s2}$ ， $S_{s3}$ ， $S_{s4}$  とする．同様にステージを移動させた後（ずらし動作後）の画像における各象限の接触面積を  $S_{t1}$ ， $S_{t2}$ ， $S_{t3}$ ， $S_{t4}$  とする．

図 5 から明らかのように x 軸においては，偏心度と微小変位量および接触面に働く力それぞれにおいて線形な関係があることが分かる．さらに x，y，z 軸それぞれにおいて力に比べて微小変位量の方が線形関係が強いことが分かる．ここで表 1 は各グラフにおける被験者ごとの近似直線の  $R^2$  値の平均をまとめたものである． $R^2 (0 < R^2 < 1)$  とは決定係数と呼ばれ，統計処理などで一般的に用いられる．この値は近似直線がどれほど実験データを予測できるかを表しており，

1 に近いほど直線が実験データに近似していること

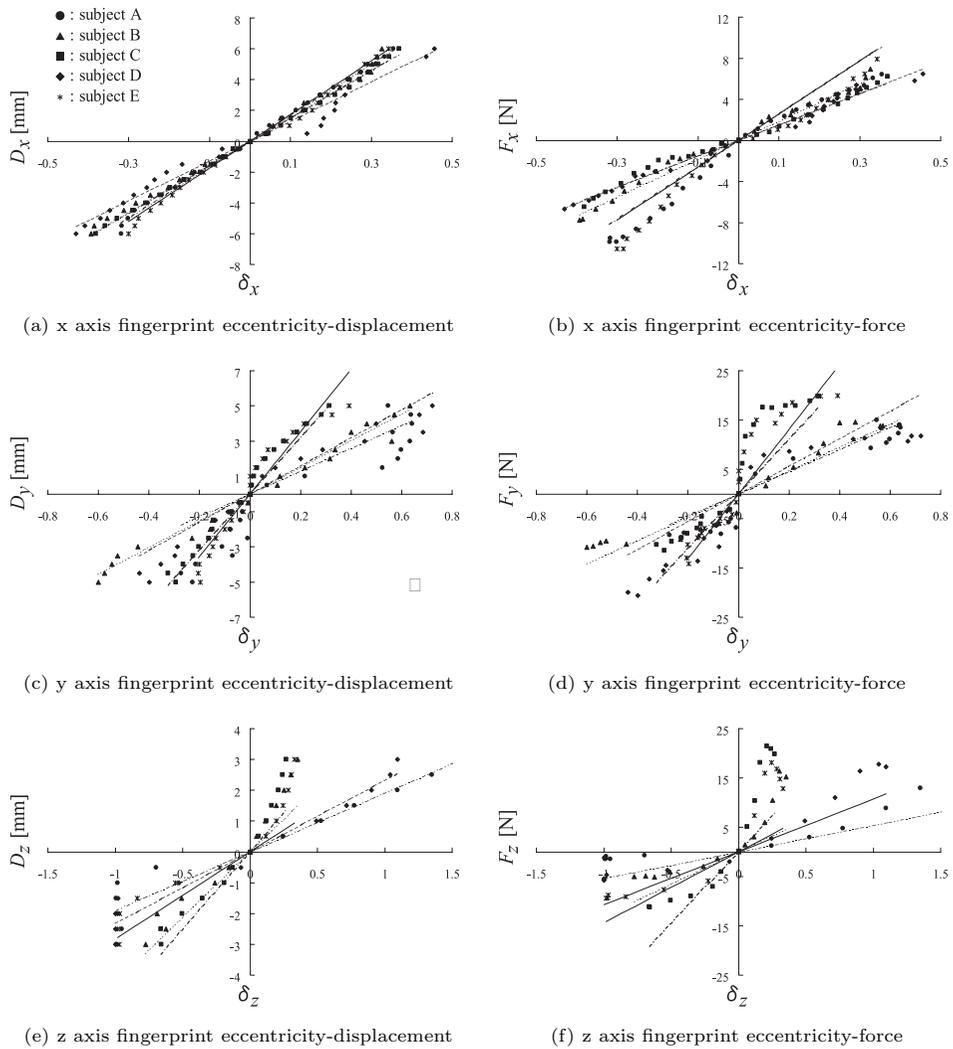


図 5 偏心度と微小変位量および力の関係  
 Fig. 5 The relationship between eccentricity, and displacement and force.

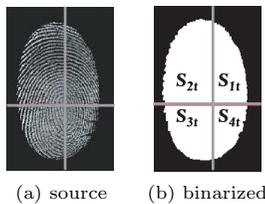


図 6 接触領域分割  
 Fig. 6 Segmentation of contact area.

を意味する．次にデータのばらつきについても同様に表 2 のようにまとめた．変動係数とは統計処理で用いられる尺度で，標準偏差を平均値で割ることで求めることができる．実質的なデータのばらつきの大きさを評価でき，値が少ないほど（0 に近いほど）ばらつ

表 1  $R^2$  平均値

Table 1 Average of  $R^2$ .

axis	displacement	force
x	0.99	0.96
y	0.89	0.82
z	0.87	0.55

表 2 変動係数

Table 2 Variation coefficients.

axis	displacement	force
x	0.11	0.27
y	0.47	0.51
z	0.41	0.61

きが少ないことを示す．表 1 と表 2 から分かるように  $R^2$  平均値と変動係数は同様の傾向となっている．これらの結果より初期滑りによる接触中心と指紋中

心の微小変位，すなわち偏心度は指の微小変位量と線形関係にあり，かつ個人差によるばらつきが少ないことが分かった．また， $x$  軸と  $y$  軸で指の変形特性が違いため指のデバイスに対する相対角度が大きくなる（15[deg]程度まで）と操作に影響が見られる．

このように偏心度と指の微小変位量の線形関係を利用してポイント移動量を決定することで直感的な操作を実現することができる．さらに偏心度を計測することで指の微小変位量を簡単にしかも高精度に推定することができ，ポイントの動作にユーザの意図を十分に反映させることができる．

### 3. ポインタ移動量計算手法

#### 3.1 指紋中心検出

前節で説明したとおり，ずらし動作時においては接触面中心付近はほとんど滑らず，指紋変形が少ない特徴がある．ただしずらし動作中において接触面全体が微小変位する場合があります，中心をトラッキングする必要があります．本章では GDS 分析を用いた指紋中心トラッキング手法について述べる．

指紋中心を抽出するための手法として，バイオメトリクスの一つである指紋照合技術を利用する．指紋照合法としてよく利用される手法として，マニューシャ特徴を利用したもの<sup>(6),7)</sup> や，テンプレートマッチングに基づく手法<sup>(8)</sup> などがあげられる．しかしこれらは，指の置き方や皮膚表面の状態などに対応した柔軟性の高い照合を行う場合，前処理時および照合時において計算量が非常に大きくなる傾向がある．したがって指紋認証のようなリアルタイム性が重要でない状況においては有効であるが，ポインティングデバイスのように指の動作との追従性が非常に重要な状況においては適用が難しい．

そこで本研究では，指紋中心を群遅延スペクトル（Group Delay Spectrum: GDS）特徴を用いたパターンマッチングにより検出する．スペクトル特徴による指紋の特徴抽出は，水平または垂直方向 1 ラインの濃淡画像を時系列信号に置き換えた 1 次元時系列処理で構成されているため，計算量が比較的少ない．また GDS は，雑音の影響を受けにくいという特性を持つ．

#### 3.2 GDS 分析

GDS は，線形予測法により推定される全極形フィルタ  $H(z)$  における位相スペクトルの周波数微分として定義される<sup>(9),10)</sup>． $H(z)$  は次式で求まる．ここで， $a_k$  は線形予測係数， $p$  は予測次数である．

$$H(z) = \frac{1}{(1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k})} \quad (6)$$

また  $H(z)$  の位相スペクトル  $\theta(\omega_i)$  は，次式で与えられる．

$$\theta(\omega_i) = -\tan^{-1} \left[ \frac{\text{Im}\{H'(\omega_i)\}}{\text{Re}\{H'(\omega_i)\}} \right] \quad (7)$$

$$H'(\omega_i) = 1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-kj\omega_i T} \quad (8)$$

ここで， $T$  はサンプリング周期， $\omega_i = \pi i/L$  ( $i = 1, 2, \dots, L$ ) であり  $L$  は周波数帯域の分割数である．

以上から群遅延スペクトル  $T_g(\omega_i)$  は次式で求めることができる．

$$T_g(\omega_i) = -\frac{\Delta\theta(\omega_i)}{\Delta\omega} \quad (9)$$

$$\Delta\theta(\omega_i) = \theta(\omega_i) - \theta(\omega_{i-1}) \quad (10)$$

$$\Delta\omega = \frac{\pi}{L} \quad (11)$$

GDS はスペクトルピークが先鋭化されすぎる，という特徴がある．そこで照合時においてある程度のノイズに対応させるために，線形予測係数  $a_k$  に対して次式の重み付けを行い，スペクトルピークの平滑化を行う．

$$a'_k = c^k a_k \quad (0 \leq c \leq 1) \quad (12)$$

図 7 に指紋画像に対する GDS 分析の結果例を示す．図 7(a) は  $256 \times 384$ [pixel] の解像度で撮像された指紋画像である．(b) は (a) 中の白線で示された範囲における波形であり，この波形に対して GDS を計算した結果が (c) である．このとき線形予測次数  $p = 32$  である．

#### 3.3 GDS トラッキング

前節で説明した方法によって求めた GDS の波形を用いて，指紋中心の抽出を行う．抽出の概要図を図 8 に示す．抽出の手順は以下のとおりである．まず初期状態における指紋画像を用意し，指紋中心として登録する座標（以下，単に指紋中心と呼ぶ） $(x, y)$  を手動で決定する．次に指紋中心を含む行および列の成分を GDS 分析し，結果を  $g_x^{p \times 1}$ ， $g_y^{p \times 1}$  として保存する．ここで  $p$  は全極形フィルタの予測次数である．

次にずらし動作時における指紋画像から中心点を抽出する．まず  $x$  方向において， $i$  列目の GDS 分析結果を  $g_i^{p \times 1}$  とおくと，以下の誤差ノルムを計算する．

$$d_i = |g_i - g_x| \quad (13)$$

ここでトラッキングする指紋の中心点は連続的に移動すると仮定できるので，直前に抽出された中心点の  $x$  座標  $i'$  からの距離に比例した重み  $W_i = |i' - i|/3 + 1$  を評価値に影響させる．すなわち，

$$d'_i = W_i d_i \quad (14)$$

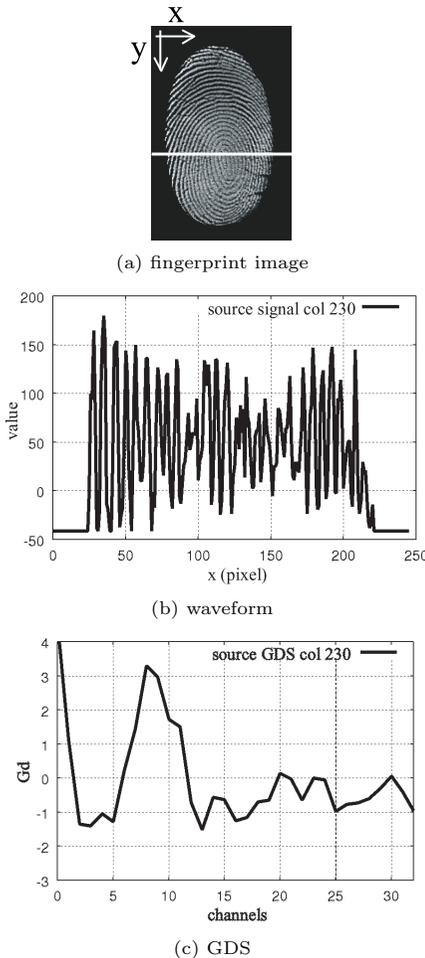


図7 GDS 分析  
Fig. 7 GDS analysis.

を  $i$  列における評価値とする．以上から，

$$i^* = \operatorname{argmin}(d'_1, \dots, d'_{N_{width}}) \quad (15)$$

を満たす  $i^*$  を中心点の  $x$  座標として抽出する． $y$  方向に関して同様に， $j$  行目の GDS 分析結果  $g_j^{p \times 1}$  から評価値  $d'_j$  を計算し，最小値を与える  $j^*$  を中心点の  $y$  座標として抽出する．以上から，中心点は  $(i^*, j^*)$  として抽出される．

3.4 ポインタ移動量計算およびクリック動作認識

図 9 (a), (c) は，示指を  $x$  軸の左および右方向にずらし動作を行ったときの接触面の指紋画像を示す．また (b), (d) は (a), (c) の画像に対して 2.3 節と同様に， $7 \times 7$  近傍の平滑化フィルタをかけた後，適当な閾値で二値化をかけた画像である．なお水平・垂直方向の線は，定常状態の指紋画像から決定した指紋中心の GDS 特徴から検出した中心点の座標を表す．

ここで 2.3 節より指の微小変位量と偏心度には線形

関係にあることが分かっている．よって 2.3 節で求められた被験者ごとの近似直線の傾き  $K_x, K_y$  の平均を求め，さらに適当な係数をかけることでポインタ移動量  $\Delta X, \Delta Y$  を計算する．

$$\Delta X = M_x K_x \delta x \quad (16)$$

$$\Delta Y = M_y K_y \delta y \quad (17)$$

ここで  $M_x, M_y$  は各軸におけるゲインを表している． $K_x, K_y$  は偏心度から指の微小変位量を推定するための係数である．図 10 はセンサ面に指を押しつけたときの接触面を  $7 \times 7$  近傍の平滑化フィルタをかけた後，適当な閾値で二値化した画像である．このようにセンサ面と指の接触面積は，指をセンサ面に強く押しつけることで拡大する．ここで接触面積に対して適当な閾値を設定しておき，閾値を超えた場合にクリック動作を行ったと認識する．

4. デバイス実装

4.1 システム概要

これまで説明した手法を用いて，指紋変形を利用したポインティングデバイスを試作した．図 11 にデバイスの外観を示す．接触面の指紋計測は，図 11 (a) に示す市販の静電容量式センサ ( Fujitsu Microelectronics Europe 製, BMF110-PWF1 ) を利用した．図 11 (b) はポインティングデバイスのシステム全体図である．図 12 に本センサによって撮像される指紋画像を示す．センサ全体の大きさは  $26 \times 24 \times 2.6[\text{mm}]$  であり他のデバイスと比べると，ポインティングスティックに比べ厚み方向で約  $1/3$  の大きさとなっており，タッチパッドに比べセンサ占有面積が約  $1/4$  となっている．またセンシング面は  $15 \times 15[\text{mm}]$  であり，1 辺あたり 300 のセンサ素子が並んでいるため，得られる指紋画像の解像度は最大  $300 \times 300[\text{pixel}]$  である．

ここで 1 回のサンプリングにかかる時間は，キャプチャする指紋画像の解像度を調節することで変化させることができる．なお解像度を  $60 \times 60[\text{pixel}]$  にしたときのサンプリングレートは約  $54[\text{Hz}]$  であり， $120 \times 120[\text{pixel}]$  にしたとき約  $14[\text{Hz}]$  である．

キャプチャされた指紋画像は ISA バスを通じて PC ( PentiumIII 500 MHz, Linux 2.4.18 ) に送られる．PC に送られた画像は指紋中心との GDS 分析により中心点の抽出が行われるが，GDS トラッキングに要する時間もまた画像解像度に依存する．本システムにおいて 1 つの画像に対して中心点の抽出を行うのにかかる時間は， $60 \times 60[\text{pixel}]$  のとき約  $30[\text{msec}]$  であり， $120 \times 120[\text{pixel}]$  のとき約  $180[\text{msec}]$  である．この計算時間を見た目上少なくするために，本シス

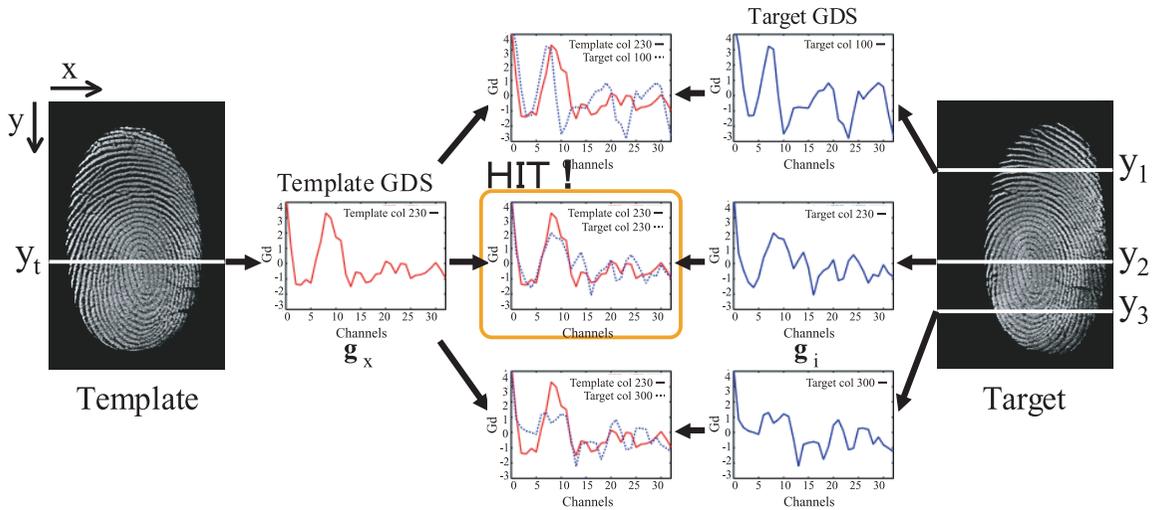


図 8 GDS トラッキング手法  
Fig. 8 GDS tracking method.

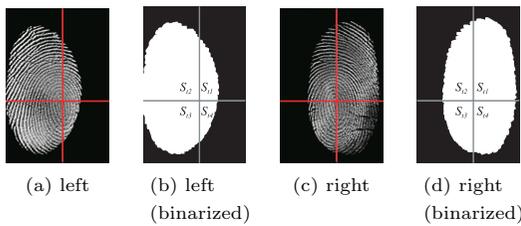


図 9 接触領域  
Fig. 9 Contact area.



図 12 試作機の指紋画像  
Fig. 12 Fingerprint image captured by the constructed device.

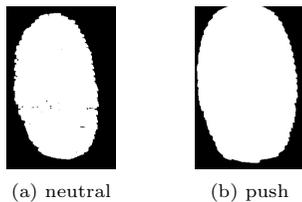


図 10 押しつけ動作  
Fig. 10 Pushing motion.

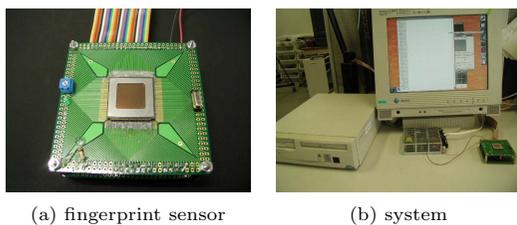


図 11 ポインティングデバイス試作機  
Fig. 11 Prototype pointing device.

テムでは中心点抽出を毎フレームごとに行うのではなく、一定の間隔をあけてマルチスレッド方式を用いて計算を行う。このときのサンプリングレートは画

像解像度が  $60 \times 60[\text{pixel}]$  のとき約  $50[\text{Hz}]$  であり、 $120 \times 120[\text{pixel}]$  のとき約  $8[\text{Hz}]$  となる。今回の実験では、指紋画像の解像度は  $60 \times 60[\text{pixel}]$ 、GDS 分析における線形予測次数  $p = 16$ 、式 (12) における平滑化重み係数  $c = 0.9$ 、式 (16) および (17) における係数  $M_x = 0.5$ 、 $M_y = 0.8$  とした。また、微小変位量を推定する係数  $K_x$ 、 $K_y$  は 2.3 節の各被験者平均値より  $K_x = 15.5$ 、 $K_y = 11.1$  と定めた。

#### 4.2 初期状態における指紋中心登録

まず被験者は、ポインタの操作に先だって初期状態における指紋中心点を手動で登録しておく。被験者は画面を見ながら指をセンサの中心付近に置き登録ボタンを押す。登録する指紋中心点は得られた画像の中心（必ずしも指紋紋様の厳密な中心である必要はない）とし、今回の実験では実験前に被験者が指紋中心点の登録作業を行ってそのまま実験を開始した。

実際に使用する場合においても基本的に指紋登録作業は各ユーザ 1 回ずつよく、今回の実験では手動で登録を行ったがユーザが指を置いたことを自動的に検出、登録するツールを製作済みである。

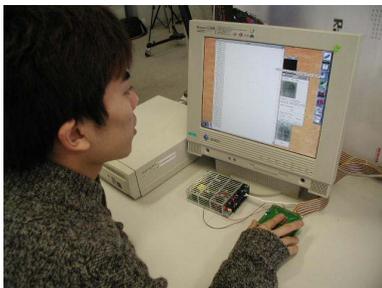


図 13 実験風景  
Fig. 13 Experimental scene.

4.3 ポインタ操作実験

Linux の X Window システムのポインタを前節で説明したポインティングデバイスで操作する実験を行った．図 13 に実験の様子を示す．

指紋センサの上に示指を置き、センサ面に対して示指のずらし動作を行うことでポインタの操作を行う．センサから得られた指紋データは 3.4 節で述べた手法によってポインタ移動量に変換される．

ここで試作したシステムの操作性を確かめるために、画面上に示された複数の円の内部にポインタを移動させてクリックをする実験を行った．実験は試作したシステムとノート型 PC に搭載されたタッチパッドとポインティングスティックの 3 種類を用いて行った．タッチパッドはデバイスに置かれた指先位置を検出しポインタを位置制御によって操作することができ、ポインティングスティックはデバイスに加えられた力を検出しポインタを速度制御によって操作することができる．一方、本研究で提案するデバイスは指紋変形から指先位置を検出しポインタを速度制御によって操作する．

被験者 5 名は実験前に各デバイスの操作練習を十分に行った．被験者は X Window システム上に表示された 500 × 500 [pixel] のウィンドウ内部に描画された 7 つの円を順番にクリックしていき、すべての円をクリックするのにかかった時間を計測した．実験における被験者 5 名のうち 1 名のポインタ軌跡およびクリック位置を図 14 に示す．また同じ被験者におけるデバイス操作時の代表的な指紋画像を図 15 に示す．(a)–(e) は、図 14 中の (a)–(e) 点における指紋画像を、同 (f) は初期位置における指紋画像を示す．これにより指紋変形に応じた操作が行えていることが確認できる．また円内のクリック操作もほぼ成功しており、実用に十分耐えうる精度でカーソルを操作できることが確認された．

次に各被験者がすべての円をクリックするのにかかった時間を図 16 に示す．計測は各被験者同様の動

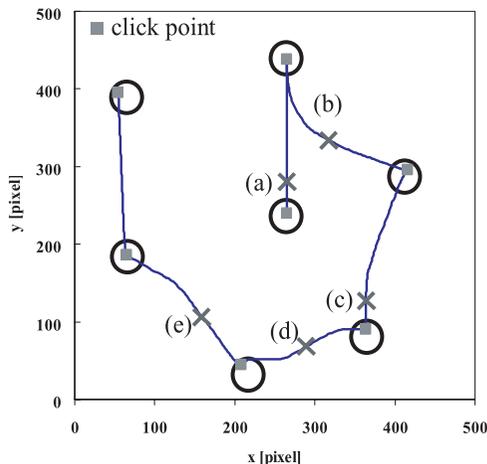


図 14 ポインタ軌跡  
Fig. 14 Trajectory of pointer.

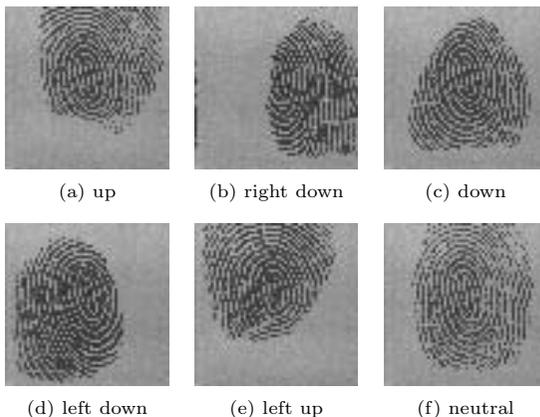


図 15 ポインタ操作時における指紋画像  
Fig. 15 Fingerprint images during the pointer operation.

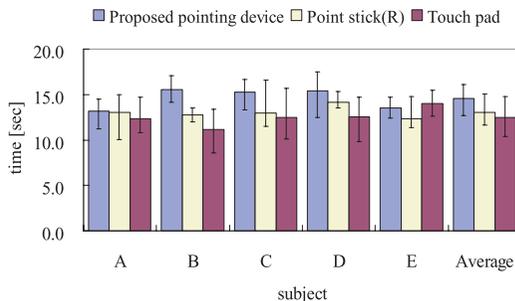


図 16 操作時間計測結果  
Fig. 16 Result of total operation time.

作を連続して 5 回ずつ行いそれぞれの平均を結果として用いた．この結果より従来のデバイスに比べてタッチパッドより平均約 2.0 [sec] ( 16.7% ), ポインティン

グスティックより平均約 1.6[sec] ( 11.9% ) 遅いことが分かった。また円の配置やサイズを変更して同様の実験を行ったが、実験結果に大きな違いは見られなかった。さらに本デバイスに慣れていない 5 名の被験者を加え、合計 10 名の被験者にウェブブラウジングなどのポインタ操作を数十分にわたって行ってもらった。

すべての円をクリックするのにかかった時間の比較においては、従来のデバイスに比べて大きな操作の遅れは見られず、ユーザはストレスを感じずにポインタを操作することができる。また、一般のポインタ操作実験においてはある程度の慣れを必要とするものの各被験者とも数分の練習で十分にポインタを操作することができ、従来のデバイスと同等程度にウェブの閲覧などが可能であった。

## 5. ま と め

本研究では、従来のポインティングデバイスに代わり指紋変形を利用しポインタを操作する手法を提案した。指を完全には滑らない程度に指を移動させる動作をずらし動作と定義した。ずらし動作においては接触面中心付近に固着領域が存在するため変形が少なく、逆に接触面周辺付近では滑りが発生し大きく変形する。そこで変形が少ない指紋中心をトラッキングし、指紋中心を原点とした接触面中心の微小変位量と等価である偏心率を用いてポインタ操作を行う手法を提案した。さらに人の示指のずらし動作における特性を調べ、各軸方向でのずらし動作の偏心率と微小変位量および接触面に働く力の関係を調べた。この結果、微小変位量と偏心率には線形関係があり、偏心率よりポインタの移動量を決定する手法が人間の直感的な入力手法として妥当であることが示された。また、提案手法の有効性を示すために実際にポインティングデバイスを試作し、従来の入力デバイスと比較実験を行って実用に十分な精度および速度でポインタを操作できることを確認した。

今回提案した偏心率を利用したポインタ操作手法は従来の手法に比べてより狭いセンシング面でも利用可能であり、ポインティングスティックと同等の面積で厚さが  $1/3$  程度のデバイスも実現可能である。そのため PDA や携帯電話といったスペースの限られたモバイル製品での応用が期待される。さらに指紋画像を取得する際に同時に指紋特徴を検出することでセキュリティデバイスとしても利用が可能である。

また、今回の実験では静電容量式の指紋センサを用いたため、指先における発汗や逆に指先が乾燥しているために指紋画像の計測が困難になるなど指先や室内

の湿度の影響を受ける問題が存在する。しかし現在、静電容量式の指紋センサにおいても湿度の影響が少ない製品が開発されており、他の検出方式である感圧式や薄型の光学式指紋センサを用いることも可能である。その際提案するポインタ操作手法はそのまま利用可能である。

提案手法には、以下の課題があり、今後これらの問題に対処していく予定である。

- (1) 中心点検出の精度を上げようとすると GDS 分析に時間がかかる。
- (2) 指紋が著しくヨー軸回転した場合に中心点の検出ができないかつポインタ操作に影響が見られる。
- (3) 力検出のための考察が不十分。

謝辞 本研究の一部は文部科学省 21 世紀 COE プログラム「ユビキタス統合メディアコンピューティング」および文部科学省の科学研究費 ( 13450104 ) の助成を得た。

## 参 考 文 献

- 1) Johnson, K.L.: *Contact Mechanics*, Cambridge University Press (1985).
- 2) Tada, M., Shibata, T. and Ogasawara, T.: Investigation of the touch processing model in human grasping based on the stick ratio within a fingertip contact interface, *Proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics*, TP1N4 (2002).
- 3) 前野隆司, 広光慎一: 物体把持時におけるヒト指腹部の固着・滑り分布と触覚受容器応答, 日本機械学会論文集 ( C ), Vol.68, No.667-C, pp.914-919 (2002).
- 4) Johansson, R.S. and Westling, G.: Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects, *Exp. Brain Res.*, Vol.56, pp.550-564 (1987).
- 5) Melchiorri, C.: Slip detection and control using tactile and force sensors, *IEEE Trans. Mechatronics*, Vol.5, No.3, pp.235-243 (2000).
- 6) Eieccion, K.: Automatic fingerprint identification, *IEEE Spectrum*, Vol.10, pp.36-45 (1973).
- 7) 浅井 紘, 星野幸夫, 木地和夫: マニユータネットワーク特徴による自動指紋照合, 電子情報通信学会論文誌 ( D-II ), J72-D-II(5), pp.724-732 (1989).
- 8) He, Y., Kohno, R. and Imai, H.: A fast automatic fingerprint identification approach based on a weighted-mean of binary image, *IEICE Trans.*, 76-A, pp.1469-1482 (1993).

- 9) 藤吉弘巨, 梅崎太造, 竹内英世, 佐分利伸, 鈴村宣夫: スペクトルの遷移確率を利用した指紋照合法, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), J80-D-II(5), pp.1169-1177 (1997).
- 10) 松本憲幸, 佐藤省三, 藤吉弘巨, 梅崎太造: LPC分析に基づく指紋照合法の評価, 電気学会論文誌 (C), 122-C(5), pp.799-807 (2002).

(平成 15 年 10 月 29 日受付)

(平成 16 年 5 月 11 日採録)



池田 篤俊

2002 年香川大学工学部知能機械システム工学科卒業。2004 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報システム学専攻博士前期課程修了。同年 4 月よりヤマハ発動機

株式会社勤務。



栗田 雄一

2000 年大阪大学基礎工学部情報科学研究科卒業。2002 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報システム学専攻博士前期課程修了。同年 4 月同博士後期課程進学。

触覚情報処理に関する研究に従事。



上田 淳

1996 年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。1996 年～2000 年三菱電機先端技術総合研究所勤務。2002 年京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程修了。同年 4

月より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。マニピュレーションに関する研究に従事。日本ロボット学会等の会員。工学博士。



小笠原 司 (正会員)

1978 年東京大学工学部計数工学科卒業。1983 年同大学院情報工学専門課程博士課程修了。同年通産省工業技術院電子技術総合研究所入所。1993 年～1994 年ドイツ, カールス

ルーエ大学客員研究員。1998 年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授。知能ロボットの研究に従事。ACM, IEEE, 日本ロボット学会等の会員。工学博士。