

# 独立成分分析による 爪装着型センサの接触力と屈曲の分離

安藤英由樹<sup>\*1</sup> 渡邊淳司<sup>\*2</sup> 杉本麻樹<sup>\*1</sup> 前田太郎<sup>\*1</sup>

Separation of contact force and bending of fingernail sensor  
by Independent Component Analysis

Hideyuki ANDO<sup>\*1</sup> Junji WATANABE <sup>\*2</sup> Maki SUGIMOTO<sup>\*1</sup> and Taro MAEDA<sup>\*1</sup>

**Abstract** – The measurement of a dexterous manipulation of the finger is researched. And, the measurement of the finger operation is important for a smooth information input in VR. Therefore, the measurement device of the glove type is used. However, the glove type hinders a dexterous manipulation. Therefore, the method that measures from the fingernail is researched. However, the research of the past was not able to distinguish the contact force and the bend of the finger. In this research, we use ICA(Independent Component Analysis) to distinguish the bending of the contact force and the finger. As a result, we measured bending and the contact force vector with three sensors.

**Keywords** : Fingernail sensor, Independent Component Analysis, Finger operation

## 1. はじめに

人間の手先の器用な操作を計測することによって、ロボットハンドに巧みな動作を与える研究がなされている [1]。また、VR空間で日常と違和感なくスムーズに作業を遂行するためにはつまむ、掴むといった手先の動作を入力することが重要である。

このような指先にかかる力、指の屈曲角を計測する必要性に対し、現在までに様々な手法によってデバイスが開発されている。接触センサによって指先の接触のみを検出する Pinch(Fakespace 社) や、フィルム状の、センサを用いて把持力分布を測定するグローブスキャンシステム(ニッタ(株))、光ファイバーを曲げたときの光減衰量を利用しての関節角度を計測する DataGlove(VPL Reserch 社)、CyberGlove(Virtual Technology 社) などがある。

しかし、これらのデバイスに共通する問題点としてグローブ型であることが挙げられる。指先の接触を伴う動作では指先で直接接触する場合の感覚とグローブのような皮や布越しで得られる感覚とは全く異質となる。Johanssonらは異なる摩擦係数を持つ物体を把持する場合の把持力と負荷力の関係として、指は滑りを

起こさない最低限の力で把持を行っていることを示している [2]。また、人間の指先はせん断方向にも粘弾性特性が物体の把持動作に対して重要な役割を果たしているという報告もなされている [3]。このことは、把持動作に対して指と物体の間に何か物体が挟まっている場合とそうでない場合とでは、滑りに対する感度が低下するため把持力が変化するなど、動作そのものに影響を与える可能性があると考えられる。

一方で、指腹部には何も付けず爪側から指腹部にかかる接触力と指の屈曲を計測する手法の研究がなされている [4][5][6]。これらの手法は指先にかかる力や指の屈曲による血流量の変化を血中ヘモグロビンが吸光特性を持つことを利用して光学的に爪上からとらえる手法である。

この手法では指腹部に何も付ける必要がないため把持動作等に影響を与えにくいと考えられる。したがって、前述した人間の動作計測に対して有効な手段であると推測できる。ところが、爪の下で起きている血流量の変化は力が加わった場合も指を屈曲した場合も変化するため、そのどちらであるか判断することは困難である。このため、実際に計測に用いるためには、動作に対して接触力を計測しているのか屈曲をしているのか判別のために別のセンサを必要とした。

本研究では、指腹の接触力と指の屈曲角度を分離して計測をおこなうために爪の下で起きている血流量の変化を多点計測しこれらの計測情報を独立成分分析(Independent Component Analysis,ICA)[7][8]を

\*1: 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所 / 科学技術振興事業団

\*2: 東京大学大学院 情報理工学系研究科

\*1: NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation / Japan Science and Technology Corporation

\*2: Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

用いて血流量変化の要因を解析する手法について提案する。

## 2. 爪側から指の接触及び屈曲を検出する手法

ここでは爪側から指の接触及び屈曲を検出する手法について説明する。指腹に力を加えたり、指を屈曲させたりするとその指の爪の下では色の変化が起きていることが観察される。これは、爪下の毛細血管に流れる血液の流量に変化が起きているからである。

生体内部の非侵襲的な透過計測手法として、X線を用いる手法や、近赤外線を用いる手法が提案されている。しかしX線は被爆の危険性があり日常生活において常時使用することは困難である。一方で近赤外線はこのような危険性はない。また、血液中のヘモグロビンが近赤外近傍波長の吸光特性を持つことから近赤外光の透過量を計測することによって血液の量や血中の酸素飽和度を計測することが可能である。医療現場においても、パルスオキシメーターが用いられている[10]。

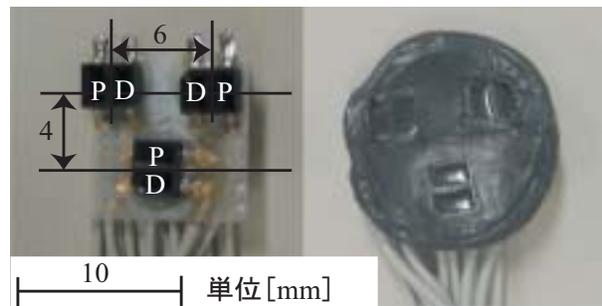
同様の手法によって、爪下の血流量の変化をとらえる研究がなされている。Mascaroらは爪の下で起きている血流の変化を解剖学的な知見から指腹部にかかる力に対する血流量の変化の物理的なモデルを立て、解析を行っている[4]。また、野村らは接触力だけでなく屈曲の検出も可能であることを示した[5]。さらにMascaroらは爪上に6個の近赤外発光ダイオード(770nm)と8個のフォトトランジスタを配置し、複数の計測情報に対する力、屈曲の関係を線形回帰モデル、多項式モデル、ニューラルネットによるモデルによって解析を行い、指腹部にかかる力を3軸方向の力及び屈曲を計測している[6]。ところが、どの手法においても、爪下の血流量変化からは指の接触力と屈曲のどちらであるか分離するには至っていない。

そこで本研究では独立成分分析を用いた解析手法を試み接触力と屈曲を分離する手法について述べる。

また、Mascaroらの手法では光源とセンサの数を多く必要とするため、実際の実装を考えると爪上にすべてを乗せることは困難である。このため、本研究では2次元方向に配置する最小個数である3個の赤外発光ダイオードと3個のフォトトランジスタを用いて光源を走査することで少ない光源、センサによっても検出が可能であるか試みる。

## 3. センサの構成と得られる情報

本研究で使用した爪センサの構成を図1に示す。このセンサは爪にフィットするように個人の爪の形に合わせて自由樹脂を充填し、一般的な両面テープ(半透明)によって爪上に固定される。赤外発光ダイオードとフォトトランジスタは対に構成されている超小型フォ



(左) センサの配置  
(右) 自由樹脂により付け爪型に加工  
D: 赤外発光ダイオード P: フォトトランジスタ

図1 爪センサの構成

Fig. 1 Composition of fingernail sensor

トリフレクタ(三洋製 SPI-315-34 波長 800nm)を3個用いた。計測するにあたって、3個のフォトリフレクタは図2に示すように時分割に走査する。同じフォトリフレクタでは距離が近接しすぎているためフォトトランジスタの出力値は飽和し情報は利用できない。時分割に走査することによって(i) から , へ, (ii) から , へ, (iii) から , への合計6つの光量情報が得られる。また、実際の指先の接触力と指の屈曲角も同時に計測することで、上記の情報からどの程度の誤差精度を持った接触力、屈曲角が得られるか比較するために図3の実験システムを構築した。

輝度情報のアナログ値の取得のためにA/D変換とデジタルI/OにはPCI-3133(Interface社)を、実際の指腹部の接触力の計測のための力センサとしてIFS-67F25A25(ニッタ社)、実際の指の屈曲角の計測のために加速度センサADXL-202(Analog Devices社)を10Hzのローパスフィルタを用いて高周波成分を除去し重力方向センサとして使用した。また、計測のサンプリングレートは100Hzとした。被験者は着座状態で右手人差指の爪上にセンサを取り付け手の甲は水平を保ったままで、人差指は約20deg屈曲させた状態を基準として、まず、手首を曲げないように腕の力によって、上下方向(Z軸方向)に2回力を加える。この作業は力センサ上で行う(以下同様)。次に、指差し方向から見て前後方向(X軸方向)に接触した状態で2回力を加える。第3に、指差し方向から見て左右方向(Y軸方向)に接触した状態で2回力を加える。最後に、手首を曲げないように腕を上方向に移動させて2回指を屈曲するように指示を行った。

この計測によって実際に得られた6つの光量情報及び実際の指腹部の情報を計測した結果について図4に示す。図4の(a)~(f)はフォトセンサ(フォト・トランジスタ)から得られた電圧に10倍のゲインを掛け、

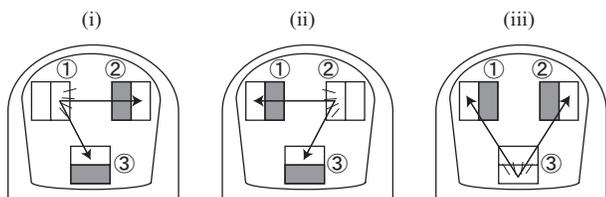


図 2 時分割走査による 6 つの光路

Fig. 2 Six optical paths by timesharing scanning

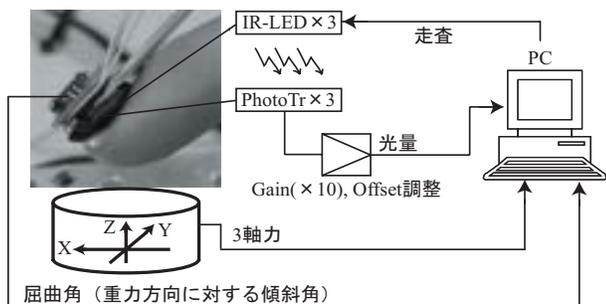


図 3 実験システム

Fig. 3 Experiment system

A/D 変換の範囲内に収まるようにオフセットを調整した電圧値で光量と等価な情報を示す。また、それぞれは図 2 に示す から (a), (b), から (c), (d), から (e), (f) の 6 つの光路である。ここで, (a) と (c), (b) と (e), (d) と (f) は同じ光路であるが発光素子と受光素子の位置にも距離があるため実際に光が通過した区間は異なると考えられる。図 4 の (g), (h), (i) は力センサから得た指腹部の接触力成分を示す。図 4 の (j) は加速度センサから得た指腹部の重力方向に対する傾斜角を示す。(g), (h), (i), (j) より指示どおりの動作を行っていることが見て取れる。このとき, (a) ~ (f) の変化はどの動作においても変化は見られるが, それがどの動作に相当するか推定することが容易でないことがわかる。

本研究ではこの 6 つの情報から接触力のベクトルと屈曲角を求める手法について, 独立成分分析を用いることで, (a) ~ (f) の情報から (g), (h), (i), (j) に相当する成分を抽出することを試みる。

#### 4. 独立成分分析を用いた解析手法

##### 4.1 独立成分分析

独立成分分析 (Independent Component Analysis, 以下 ICA) とは, 多変量データ解析の手法として近年注目を集めている手法である。事象が発生している全分布に対して相関を基準として信号空間からの直交変換によって主成分を抽出する主成分分析とは異なり, ICA は特定の独立な事象が生じた差異のサンプル集合に対して線形分離を当てはめることで事象を独立な成

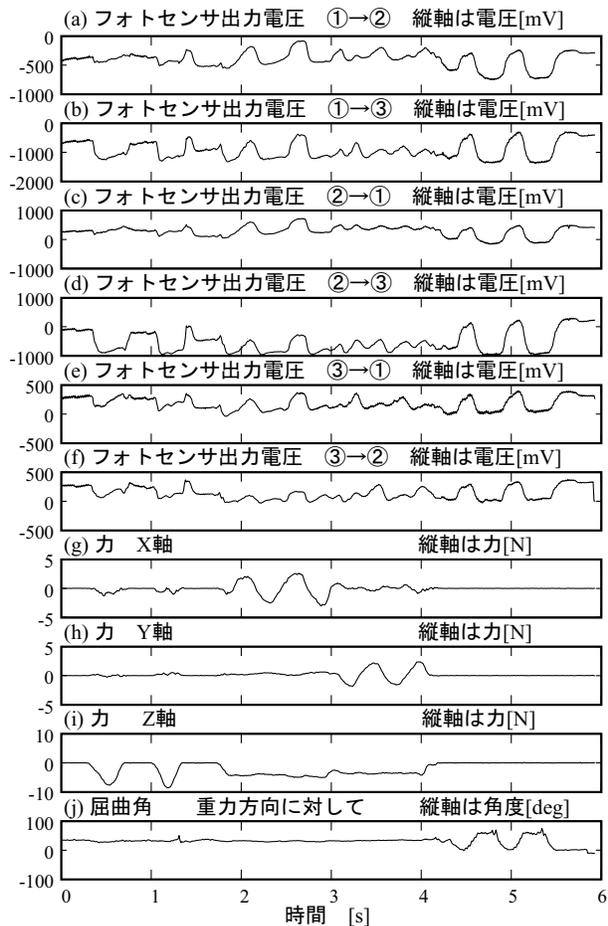


図 4 光量情報と接触力・屈曲角

Fig. 4 Light quantities information and finger force, angle

分として抽出する解析方法である。この解析では事象の独立性を基準としており, 得られる独立成分は直交変換であるとは限らない。

近年, ICA は磁気共鳴機能画像 (fMRI) や脳磁計 (MEG) 等で得られる各部位から生じた信号が重畳された情報の中から, ある事象に関連する情報のみを抽出する手法として多く用いられている [8]。これらの事例において計測される成分は, 各部位からの信号が線形に重畳された保証はなく, 刺激に対する神経発火の応答の単調性が認められているにすぎない。しかし, これらの事例においても線形重畳性を前提とした ICA による成分分離は有効に機能している。

本研究で課題としている爪センサにおける接触と屈曲の分離についても爪センサから得られる光量情報は接触力の定義座標軸ごとに独立に採取が可能であることと, 指先の圧力や指の屈曲によって引き起こされる爪の色変化においても単調性が認められていること [6] を考えると, ICA によってその現象の分離が可能であると考えられる。(本実験における ICA による解析は Hyvaerinen らの FastICA アルゴリズム [9] を用いて

解析を行った.)

#### 4.2 処理の定式化

ここでは、処理の定式化について述べる。

光量情報の時系列 (図 4(a)~(f)) を  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t) \ x_5(t) \ x_6(t)]^T$  とおく。求めたい情報である接触力と屈曲角を  $\mathbf{s} = [F_x \ F_y \ F_z \ \text{屈曲角}]^T$  としたとき、

$$\mathbf{s} = \mathbf{M}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

が成立すると仮定する。この写像  $\mathbf{M}$  を求めれば、光量情報から接触力と屈曲角を得ることができる。

以下では、ICA を用いてこの写像  $\mathbf{M}$  を求める手法について説明する。

まず、光量情報の時系列  $\mathbf{x}(t)$  について、光量情報の動的変化も入力とすることが解析に有利であると考え、1 階微分、2 階微分したものを並べたベクトル  $\mathbf{X}(t) = [x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)]$  を入力とした。この  $\mathbf{X}(t)$  に対して ICA を用いて独立成分を抽出すると

$$\mathbf{I}(t) = \mathbf{W}\mathbf{X}(t) \quad (2)$$

が成り立つ変換行列  $\mathbf{W}$  と独立成分  $\mathbf{I}(t) = [I_1(t) \ I_2(t) \ \dots \ I_n(t)]^T$  が得られる。ここで、独立成分の要素の個数  $n$  は  $\mathbf{s}$  の次元数より大きく、 $\mathbf{X}$  の次元数より小さなものを指定する。しかし、 $\mathbf{X}$  によっては明確な独立成分が指定した個数を満たすとは限らない。この独立成分の時系列  $\mathbf{I}(t)$  のどの要素が求めたい情報の要素に相当するか ICA は決定できないので求めるべき物理量  $\mathbf{s}(t)$  に対して最も相関性の高い時系列  $I_i(t)$  を  $\mathbf{I}(t)$  の中から選択する。 $\mathbf{I}(t)$  の中から選択した要素を  $\mathbf{s}(t)$  の要素の対応する順番に並び替えたベクトルを  $\mathbf{I}_s$ 、同様に、 $\mathbf{W}$  の要素の対応する行を取り出し並び替えた行列を  $\mathbf{w}_s$  とすると、

$$\mathbf{I}_s(t) = \mathbf{w}_s\mathbf{X}(t) \quad (3)$$

が成り立つ。ここで  $\mathbf{I}_s$  を  $\mathbf{s}$  に対応した物理量  $\hat{\mathbf{s}}$  ( $\mathbf{s}$  の推定値) に変換するための写像を  $\mathbf{P}$  とおき、

$$\mathbf{s} \cong \hat{\mathbf{s}} = \mathbf{P}(\mathbf{X}) = \mathbf{a}\mathbf{w}_s\mathbf{X} + \mathbf{b} \quad (4)$$

とする。対角行列  $\mathbf{a}$  はゲイン、ベクトル  $\mathbf{b}$  はオフセットである。また、 $\mathbf{X} = \mathbf{Q}(\mathbf{x})$  を満たす写像  $\mathbf{Q}$  を用いて変換写像  $\mathbf{w}$  を以下の式に示す。

$$\mathbf{s} \cong \hat{\mathbf{s}} = \mathbf{P}(\mathbf{Q}(\mathbf{x})) = \mathbf{w}(\mathbf{x}) \quad (5)$$

したがって式 (1) と式 (5) から  $\mathbf{M} \cong \mathbf{w}$  となり、光量情報から接触力と屈曲角を得ることができる。

次章では実際にこの変換写像  $\mathbf{w}$  を求め、この手法によってどの程度の誤差範囲で接触力と屈曲角を得ることができるか実験を行う。また、この  $\mathbf{w}$  は個人差や装着の具合によってどの程度の影響を及ぼすのか検証を行う。

#### 5. 爪センサと ICA による接触力と屈曲の計測

本章では、爪センサから得られる情報を ICA で処理することによって、接触力、屈曲角を得る実験を行い、実測値と比較して評価を行う。以下では、1) ICA によって前章の変換写像  $\mathbf{w}$  を求める。2) 実時間で  $\mathbf{w}$  を用いて変換した場合の評価。3) 装着の経過時間に対する誤差の評価。4) センサの付け直しや別の被験者に対してどの程度  $\mathbf{w}$  が適用可能か評価する。5) 各個人に対して、どの程度誤差に差があるか評価する。

##### 5.1 変換写像 $\mathbf{w}$ の取得

3 章において計測によって得られた光量情報  $\mathbf{x}$  (図 4 の (a)~(f)) とその時間微分要素からなる  $\mathbf{X}(t)$  を入力として ICA を実行する。この結果、前章 (2) 式の関係を満たす 15 個の独立成分  $\mathbf{I}(t)$  と  $\mathbf{W}$  が得られる。得られた独立成分  $\mathbf{I}(t)$  を図 5 に示す。図 5 の縦軸は無単位と記しているが、独立成分が成分のみであり大きさを持たないためである。この独立成分  $\mathbf{I}(t)$  と力センサ、傾斜センサによる実際の計測値の時間波形 (図 4(g)~(j)) から類似した要素を探すと、 $X$  軸方向の接触力  $F_x$  (図 4(g)) と図 5(ix) が似た時間応答特性を持っていることが見て取れる (図 6(a))。同様に対応する波形として、 $Y$  軸方向の接触力  $F_y$  を図 6(b)、 $Z$  軸方向の接触力  $F_z$  を図 6(c)、屈曲角を図 6(d) に示す。本実験ではこの対応した独立成分の選定は実験者が手作業で行った。このとき、3 章でも解説したが接触力と屈曲角は各軸独立に与えていることに注意する。ICA アルゴリズムではどの成分がどの軸方向に対応するという情報は扱っていない。しかし、我々が欲しい情報は各軸方向の接触力及び屈曲角の分離された成分である。したがって、1 つの成分を 1 つの独立成分と対応づけるために時間的に分離した形でそれぞれの成分を与える必要がある。たとえば、 $F_x$  軸方向の接触力を独立成分として得るためには、 $F_x$  軸方向の接触力だけを発生させているときの光量情報から得られた独立成分は  $F_x$  軸方向の接触力だけの成分として抽出される。本論文では変換写像  $\mathbf{w}$  を求めるために爪センサから光量情報を各軸時間的に独立に計測しこれをキャリブレーションデータとした。次に、この対応した波形は成分なので大きさを持たないため、単位やスケールが等価となるようにゲインとオフセットの調整値を求める。この処理は前章の写像  $\mathbf{P}$  を求める作業と等価である。式 (4) を満たすゲイン  $\mathbf{a}$ 、オフセット  $\mathbf{b}$  を計算する。この方法として本実験では、各成分の類似した波形の近傍の最大、最小値が一致するようにゲイン  $\mathbf{a}$  を決定し各成分の全領域での  $|\mathbf{s} - \hat{\mathbf{s}}|$  が最小となるようにオフセット  $\mathbf{b}$  を調整した。

この処理を行った結果を図 7 に示す。図 7 より実測

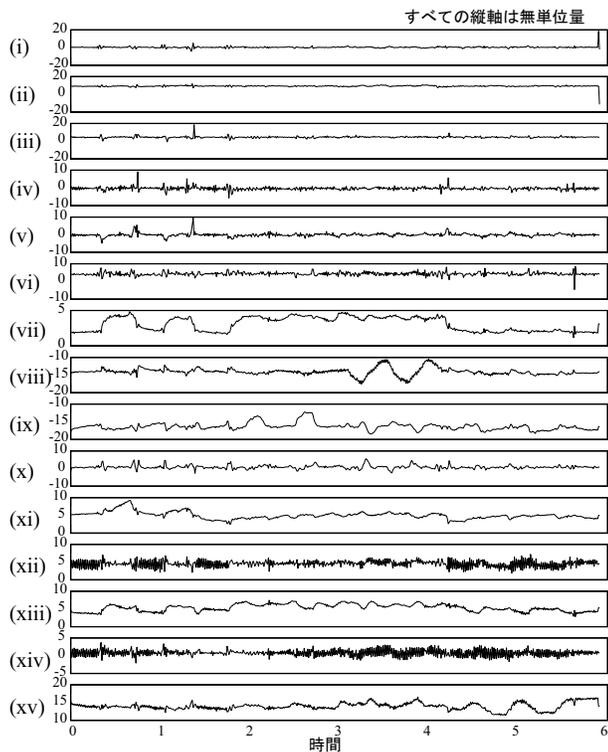


図5 ICAによって抽出された独立成分  
Fig. 5 Independent element extracted by ICA

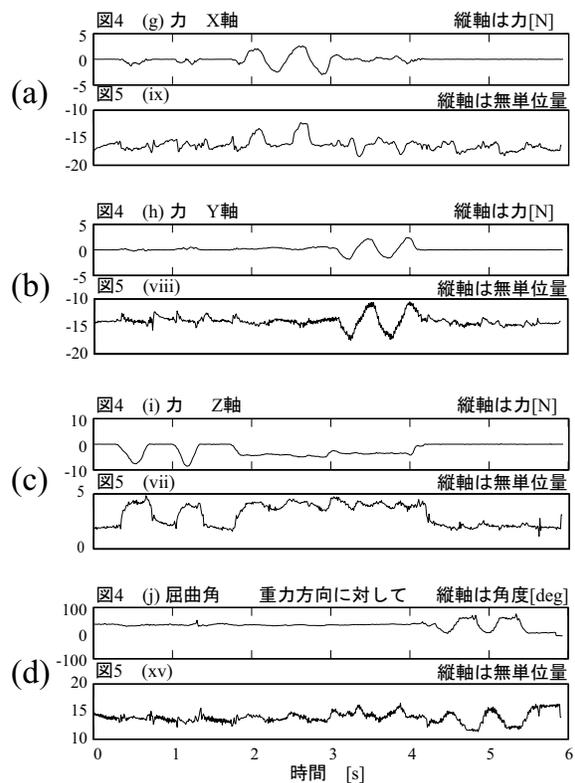


図6 類似した要素の選定  
Fig. 6 Selection of similar element

値に近い推定値が得られていることを確認できる。

すべての成分についてゲイン、オフセットのパラメータを求めることによって、前章(5)式を満たす  $w$  が決定される。次節ではこの  $w$  を実時間計測に適用する。

### 5.2 変換写像 $w$ を使用した実時間計測

前節までは接触力ベクトルが単軸方向の成分にのみ分離を示したが、実際には、合成された接触力ベクトルを各軸方向に分離できなくてはならない。

ここでは、変換写像  $w$  によって合成された接触力ベクトルを各軸方向に分離できるか検証を行い、また得られる接触力、屈曲角の誤差と、装着時間に対する誤差変化の評価を行った結果について示す。

3章同様の実験設定の下、前項と同様の手法によって  $w$  を求める、このとき被験者は着座の状態待機させ、 $w$  が求まった後、これを用いて記録と同時に計算を行う。被験者には力センサ上に自由に指を押しつけさせ、また屈曲動作をさせた。計測中の5秒間を切り出した結果を図8に示す。同時に複数軸へ力を出している場合でも、各軸の接触力に分離できていることが分かる。

### 5.3 装着時間に対する誤差

ここからは誤差要因について実験を行った結果について述べる。生体計測の場合、装着したままの状態でもドリフトなどの現象がしばしば起こる。爪センサの場合において、装着時間が誤差要因となるか調べる実験

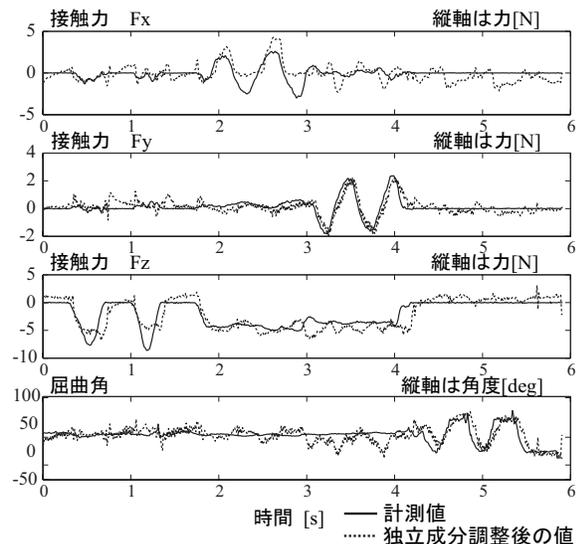


図7 独立成分(調整)と実測値  
Fig. 7 Independent element extracted by ICA and Measurement value

を行った。実際の力センサ、傾斜センサの計測値と爪センサから推定される接触力、屈曲角の差を誤差としたとき、任意の5秒における誤差の平均値と標準偏差を図9に示す。また、計測を開始してから15分経過した後の任意の5秒における誤差の平均値と標準偏差も示す。

図9から時間経過による誤差の増大傾向は見られな

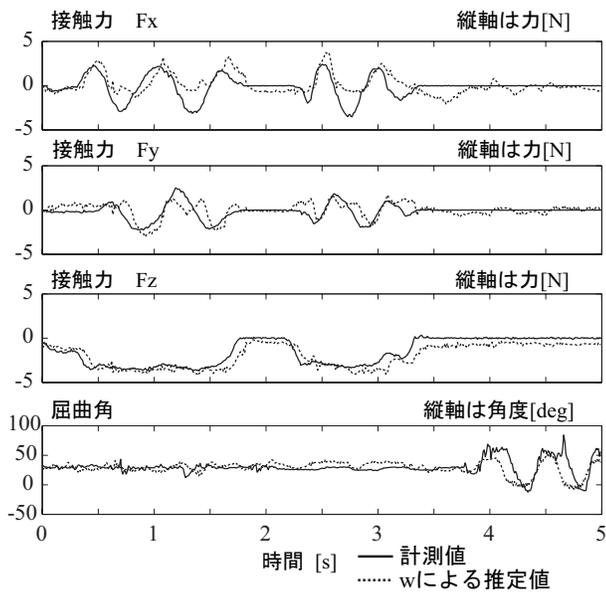


図8 変換写像  $w$  を使用した実時間計測  
Fig.8 Real-time measurement using transformation matrix  $w$

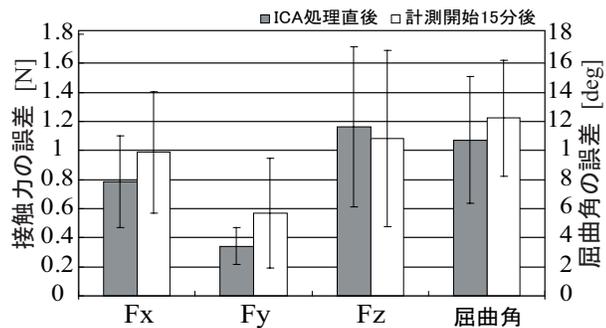


図9 接触力, 屈曲角の誤差に対する時間変動  
Fig.9 Error margin average of contact force and bending angle by Time Change

いことがわかる．誤差の評価については考察で述べる．

#### 5.4 付け直し, 他者へ使用した場合の誤差

前節の実験では時間に対して誤差の増大は見られなかった．しかし, このセンサは両面テープで固定してあるため, 大きな外力が加わるとセンサの固定位置にずれを生ずる可能性がある．もしずれが生じた場合, 得られる光量情報が変化してしまうので, 変換写像  $w$  を用いた接触力, 屈曲角も不正確になると考えられる．

このため, 一度外し, 同じ位置に付け直しをした場合においても外す前の変換写像  $w$  が適用可能であるか, また別の被験者に対しても同じ変換写像  $w$  が適用可能であるか調べる実験を行った．

前節と同じ実験条件下で, 変換写像  $w$  が求めた後, 一度爪センサを外し再度同じ指に, 外す前と同じ位置に付ける．このとき, 両面テープは新しいものを用いた．付けた後, 前節と同様に計測した誤差平均と標準偏差を図10に示す．また, 再びキャリブレーション

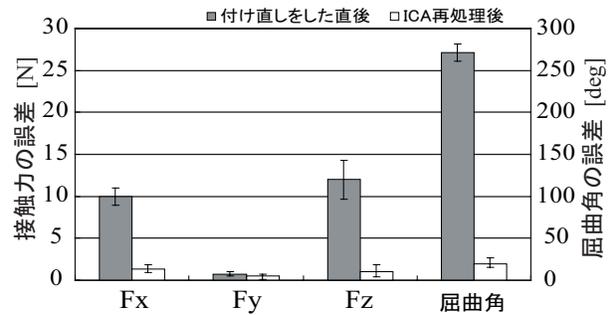


図10 付け直しした場合の誤差  
Fig.10 Error margin when renewing sensor

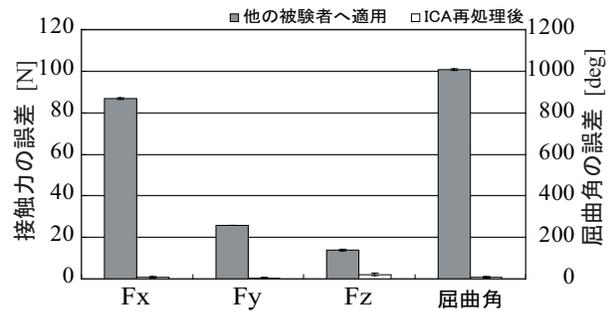


図11 他の被験者に適用した場合の誤差  
Fig.11 Error margin when applying to other subject

ンをした情報から ICA によって求めた変換写像  $w$  を使用した場合の誤差平均と標準偏差も図10に示す．この図から, 一度付け外しを行ってしまうと大きな誤差が生じることが分かる．

同様に, 前節と同じ実験条件下で, 変換写像  $w$  が求めた後, この変換写像  $w$  を別の被験者が付けた爪の光量情報に適用した場合と, 再びキャリブレーションをした情報から ICA によって求めた変換写像  $w$  を使用した場合の, 誤差平均と標準偏差を図11に示す．

この場合は, 付けなおした場合に比べてさらに誤差が増大している．しかし, どちらも再度キャリブレーションと ICA により変換写像  $w$  を求め直すことで, 元の程度まで誤差が減少することが分かる．これらのことから, 付けなおした場合でも, 被験者が変わった場合でも再度キャリブレーションと ICA により変換写像  $w$  を求め直す必要があると考えられる．

#### 5.5 個人差に対する誤差

前節では被験者が変わった場合について, 再度キャリブレーションと ICA によって変換写像  $w$  を求めれば誤差を縮小できることがわかった．しかし, 爪の形状等は個体差に依存する．そこで, 各個人に対して変換写像  $w$  を求めることによって同程度の誤差範囲に収まるか検証を行う．前節と同じ実験条件下で, 25~29歳の健康な成人男性3名に対し, 右手人差し指を計測に用いた．爪センサは各個人の爪にそれぞれフィット

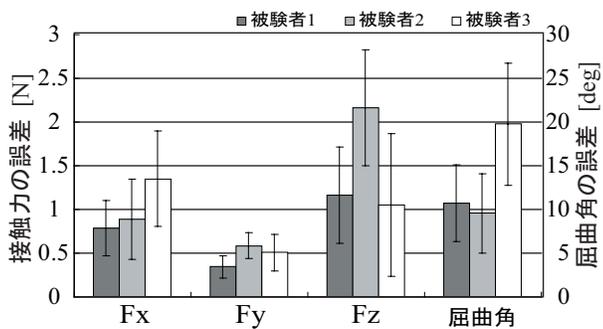


図 12 個人差に対する誤差

Fig.12 Independent element extracted by ICA and Measurement value

トするように自由樹脂を充填した。前節までの手法と同様に各人それぞれキャリブレーション情報から ICA によって変換写像  $w$  を求め、その後、力センサ上に自由に指を押しつけ、屈曲動作をさせ、その計測中の 5 秒間についての誤差平均と標準偏差を図 12 示す。図より、被験者によって誤差に違いが見られた。この爪センサを使用するにあたり、最大で 10[N] 程度までの計測が可能であった。したがって、図 12 から個人差に対する誤差が 1~2[N] であるので、分解能は 2~3[bit] 程度である。

## 6. 考察

変換写像  $w$  を取得するためには、ICA アルゴリズムによって抽出された独立成分がどの要素（各軸方向の接触力或いは屈曲角）に相当するか照合する必要がある。本研究では、実験者が選択してこの処理をおこなった。しかし、この処理自体は計測値と成分の相関性を評価するアルゴリズムを導入することで事実上自動化できると考えられる。また、図 7、図 8 では接触力  $F_x$  の独立成分波形が正の力方向には追従しているが負の方向には追従が見られない。この原因として、実際に指腹部に力が加わったときの爪下の色変化を観察すると  $F_x$  を正負方向に変化させた場合に特に色変化の大きい箇所は爪の先付近であった（図 13(a), (b) の破線円）この付近は、本実験で使用した爪センサの光路（図 13(c)）に収まっていない。つまり、十分な感度で変化をとらえることができなかった結果として、負の方向の力を検出できなかったと推測される。したがって、十分な感度で血流量の変化を捕らえるようにセンサを配置することで、負の方向の検出を行うことができると考えられる。また指を弾性体とすると外力が加わった場合に応力は端面に集中すると考えられることから、外力に対して爪の外縁付近に大きく色変化が起きると推測される。それゆえ、感度を向上させるためには爪の外縁近辺に対してセンサを配置することが重要であると考えられる（例えば図 13(d)）。

変換写像  $w$  を使用した実時間計測では、合成された接触力ベクトル、屈曲を各軸方向ベクトルに分離できることを示した。このときの誤差について、Mascara ら [6] の手法による結果と比較したところ、Mascara らがランダムテストを行った結果は  $F_x$  で約 0.5N,  $F_y$  で約 0.8N,  $F_z$  で約 1.2N の誤差であった。本研究の手法では、図 9 から  $F_x$  で約 1.0N,  $F_y$  で約 0.5N,  $F_z$  で約 1.0N の誤差と余り差がない結果が得られた。しかし、Mascara らの手法では 2 倍以上の個数のセンサを必要としている。少ないセンサ数でも同程度の誤差となった要因として、本研究では爪上で光路距離を長く取るように走査する手法を用いている。このことにより血流量の変化量を大きく取ることができ SN 比が向上したと考えられる。

また、実時間計測という観点において、ICA による独立成分分析には、比較的計算量を要するが一度変換写像  $w$  が求められれば、4 章 (2) 式によって光量情報のみで接触力、屈曲角が得られ、またトータルの計算量は少なく済む。このため、オフラインで変換写像  $w$  を求めておき、オンラインで  $w$  を用いれば、実時間計測に適用可能であると考えられる。しかし、図 7、図 8 から計測値と推定値の間には遅延が観測された。この原因として、接触力による指先の変形や指の屈曲によって爪下の血流量が変化するまでの物理的な遅れによるものであると考えられる。予備実験によって、指先にかかる圧力と血流量の変化の周波数応答性を調べたところ、10[Hz] 程度までは血流量の変化には減衰が見られなかった。したがって、10[Hz] 以下の圧力変化に対して影響はないと推測される。この周波数特性によって、振動している物体から指先に対して受動的に力を受ける場合などにおいて計測は困難であると考えられるが、指先から力を与える、指をタッピングするといった人間の能動的な動作において 10[Hz] 以上の動作は日常的にほとんど観察されないため、日常動作の解析においては計測上問題がないと考えられる。

装着の経過時間に対して図 9 から誤差には影響を与えないと考えられる。これは、生体計測における皮膚などからの検出に比べて爪自身は汗や皮脂などが発生しにくいからであると考えられる。

しかし、図 10 に示すように付け直しを行った場合には再装着前の変換写像  $w$  が使用できない。このことから、位置ずれに対し敏感に  $w$  が変化してしまうことが予測される。このためセンサのを爪上に固定する強度が高ければ長時間着用していても精度に影響を与えないと考えられる。しかし、爪上に固定する強度は高いほど装着は困難となる。そこで、位置ずれに対して誤差の増大を抑える手法としてデフューザ（光拡散板）等を爪とセンサの間に挟み光量を空間的にばや

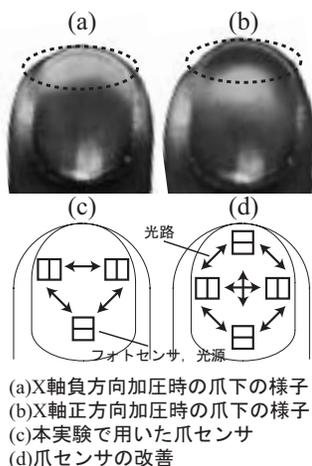


図 13 爪センサの改良

Fig. 13 Improvement of fingernail sensor

かすことによって、位置ずれによる  $w$  の変化を抑えることができると考えられるが、検出精度は低下する。

このデバイスに使用にあたって、各個人毎に計測誤差がみられた(図 11)。これらの誤差要因は個人差によって異なる爪のサイズ、形状によるものと考えられる。現状のセンサ単体は約  $2\text{mm} \times 2\text{mm}$  の平面を持っているので、爪が平らな被験者に比べ爪が円筒型に近い形状の被験者はセンサの設置の安定性が悪く誤差が大きくなると考えられる。したがって、なるべく点に近いセンサを爪の曲面へ正確に配置できるデバイスの工夫が誤差減少に繋がると考えられる。

本論文で提案する手法による圧力計測の実用範囲はフルスケールに対して分解能  $2 \sim 3[\text{bit}]$  であった。また、血流量変化の物理的な遅れに起因すると考えられる周波数応答性が観測された。この条件下で適用可能と考えられる応用範囲について述べる。

前田ら [11] は把持行動などの行動予測のために必要な行動計測条件はどのような時間タイミングで把持力や屈曲角が変化しているかを捉えることが重要であり、分解能的には  $2 \sim 3[\text{bit}]$  程度で十分としている。また、周波数応答性についても日常的な人間の把持動作の計測であれば  $10[\text{Hz}]$  以上の応答性は要求しないと考えられる。Mascaro ら [4] の研究の応用例では行動を妨げないインターフェースとしてウェアラブル・ポインティングデバイスを提案しているが、本研究で提案する手法により光源やセンサ数を減らすことで、デバイスの小型化が期待できる。また、爪上触覚ディスプレイとして提案されている SmartFinger [12] において、爪上から指先にかかる圧力を計測し、押さえつけの圧力に対して振動の振幅を変化させることによって効果的な演出が可能になると考えられる。

## 7. おわりに

本研究では、爪側から爪下の血流量を観察して指腹の接触力と指の屈曲角度を得る手法に ICA アルゴリズムを適用して解析を行った。この結果、今まで分離が困難であった指腹の接触力と指の屈曲角度を分離でき、また従来よりも少ない個数のセンサで検出する手法について提案し、検証実験と評価を行った。

謝辞

この研究は科学技術振興事業団 戦略的創造研究推進事業「協調と制御」領域の一環として行われた。

## 参考文献

- [1] S.B. Kang and K. Ikeuchi: "Toward Automatic Robot Instruction from Perception-Recognizing a Grasp from Observation," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 9, no. 4, AUGUST, pp. 432-443, 1993.
- [2] R.S. Johansson and G. Westling: Role 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(1984)
- [3] 中沢信明, 池浦良淳, 猪岡光: 人間の指先のせん断方向粘弾性特性, 日本機械学会論文集 C 編 Vol.64, No.624, pp.292-298(1998)
- [4] Mascaro, S. and Asada, H., 2001. "Photoplethysmograph Fingernail Sensors for Measuring Finger Forces without Haptic Obstruction," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 17, no. 5, pp. 698-708.
- [5] 野村, 前田: 爪センサーを用いた指の接触及び屈曲検出の研究, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.6, No.3 pp.215-220, (2001).
- [6] Mascaro, S. and Asada, H., 2002. "Measurement of Finger Posture and Three-Axis Fingertip Touch Force Using Fingernail Sensors," Submitted to the IEEE Transactions on Robotics and Automation.
- [7] A. Hyvaerinen, "Fast and Robust Fixed-Point Algorithms for Independent Component Analysis", IEEE Transactions on Neural Networks, 10(3):626-634, 1999.
- [8] 甘利俊一, 村田昇, "独立成分分析", サイエンス社, 2002.
- [9] Hugo Gert, Jarmo Hurri, Jaakko Selx, and Aapo Hyvaerinen "The FastICA package for MATLAB", <http://www.cis.hut.fi/projects/ica/fastica/>
- [10] バイオメディカルサイエンス社: 組織 SO<sub>2</sub>・Hb 量モニター PSA-N マニュアル
- [11] T. MAEDA, H. ANDO, M. SUGIMOTO, J. WATANABE, and Takeshi MIK: Wearable Robotics as a Behavioral Interface -The Study of the Parasitic Humanoid-, Proc of 6th International Symposium on Wearable Computers, pp.145-151, 2002.
- [12] H. Ando, T. Miki, M. Inami and T. Meda, SmartFinger: Nail-Mounted Tactile Display, ACM SIGGRAPH 2002 Conference Abstracts and Applications, p.78(Emerging Technologies), 2002

(2003年9月30日受付)

[ 著者紹介 ]

安藤 英由樹 (正会員)



平 11 愛知工業大学大学院 工 電気電子工 修士課程修了。平 11 同大学工学研究科 電気材料工博士課程。平 12 理化学研究所 BMC JRA 配属。平 13 科学技術振興事業団「協調と制御」領域グループメンバーとして 東京大学大学院情報学環研究員を経て現在 NTT CS 研 客員研究員。生体工学, VR, ウェアラブルなどの研究に従事。 <http://www.star.t.u-tokyo.ac.jp/~hide/>

渡邊 淳司 (学生会員)



平 14 年 東京大学大学院工学系研究科修了。現在 同大学院情報理工学系研究科 博士課程。眼球運動を利用したディスプレイ及び眼球運動中の視覚特性の研究を行う。日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞(平 13 年), 学術奨励賞受賞(平 14 年)。 <http://www.star.t.u-tokyo.ac.jp/~junji/>

杉本 麻樹 (正会員)



平 12 千葉工業大・工・電子工卒, 平成 14 同大学院・情報工・博士前期課程修了。東京大学大学院情報学環研究補佐員を経て現在, NTT コミュニケーション科学基礎研究所 客員研究員。科学技術振興事業団「協調と制御」領域グループメンバー。

前田 太郎 (正会員)



昭 62 東大・工・計数工卒。工博。昭 62 通産省工業技術院機械技術研究所。平 4 東大先端科学技術研究センター助手, 平 6 同大学院・工 助手, 平 9 同大学院・工 講師, 平 12 同大学院情報学環講師。平 14 NTT コミュニケーション科学基礎研究所 主幹研究員。人間の知覚特性・神経回路のモデル化, テレイグジスタンスの研究に従事。計測自動制御学会論文賞, 学術奨励賞, 日本ロボット学会技術賞受賞。