

# PSD を用いた指先触覚センサの多点接触位置推定に関する研究

金子 真<sup>\*1</sup> 瀧下直樹<sup>\*2</sup> 辻 敏夫<sup>\*1</sup>  
前川 仁<sup>\*3</sup> 谷江和雄<sup>\*3</sup>

## Study on Multiple Contact Points Estimation for Finger-shaped Tactile Sensor Using PSD

Makoto Kaneko<sup>\*1</sup>, Naoki Takishita<sup>\*2</sup>, Toshio Tsuji<sup>\*1</sup>,  
Hitoshi Maekawa<sup>\*3</sup> and Kazuo Tanie<sup>\*3</sup>

The authors have developed the finger-shaped tactile sensor which consists of an optical waveguide, an elastic cover, eight LEDs to provide light to the waveguide, a PSD for obtaining current outputs from a light spot, and lens system for focussing the light emitted from the contact point. The use of a PSD enables us to execute a real time sensory feedback control using the finger-shaped tactile sensor. This is an essential advantage to use a PSD compared with a CCD. However, since a PSD can only provide four current components depending on both the intensity of the total light emitted and the location of the light spot focused on the PSD, it can not decompose multiple contacts into individual contact points. Assuming that multiple contacts are allowed, we challenge the issue on how to estimate individual contact points from the PSD outputs. In this paper we consider this issue under the assumption that multiple contacts never happen at the same time. We show that the change of contact phase from single contact to double contact can be evaluated by differentiating the PSD output signals and the multiple contact points can be estimated by considering the time history of the output signals.

**Key Words:** Finger-shaped Sensor, Tactile Sensor, PSD, Multiple Contacts, Optical Sensor

### 1. ま え が き

多指ロボットハンドが未知対象物（以下、単に対象物と呼ぶ）に接近し、最終的に安定な把握系を構成する場合、対象物の概略形状をある程度把握しておく必要がある。この場合、対象物のマクロな位置・形状をまず視覚によってとらえ、次に、対象物の詳細形状を指先触覚センサ [1]~[5] を使って調べるという視触覚相補利用方式 [6] が最近注目されつつある。このうち触覚センサは直接対象物に触れて対象物の形状を探るセンサであり、視覚が利用できない環境下では特に重要な役目を演じる。さらにロボットの可動範囲内において、対象物の裏側の形状もセンシングできるという特徴を有している。

このような指先触覚センサの必要性を踏まえて、筆者らはこれまで多指ロボットハンドへの組み込みを想定した光導波路の指先触覚センサを開発してきた。このセンサは基本的に、光源、ガラス製の半球形光導波路（以下、光導波路と呼ぶ）、そ

れを覆うシリコンカバー、接触点から漏れた光を集光するレンズ系、そして光スポットの位置を検出する光像位置検出素子から構成されている。当初のモデルでは、光像位置検出素子として CCD を用いていたが [7]、実時間処理に不向きでしかも大掛かりな画像処理システムが必要ということで、第 2 パージョン以降光像位置検出素子として PSD を採用している [8]~[10]。これにより実時間処理に関する問題は一応解決されたものの、PSD では多点接触時に全接触点の重心位置が求まってしまうという不具合が生じてきた。このような点を踏まえた上で、本論文では、多点接触が同時に発生したり消滅したりしないという仮定の下に、PSD 出力の時系列波形をもとに多点接触時のそれぞれの接触点位置を実時間で推定する方法について考察する。

### 2. PSD を用いた指先触覚センサの接触点検出原理

指先触覚センサは、Fig. 1 に示すように光導波路、光源 (LED)、それを覆うシリコンカバー、レンズ系、PSD よりなるシステムである。まず、光導波路の端面に LED で光を照射する。ここで光導波路とシリコンカバーの間には空気層があり、光導波路と空気の境界で光は全反射を繰り返す。この状態でシリコンカバーに対象物が接触するとシリコンカバーと光導波路が接触し、その境界で光の全反射の条件が崩れ、半球面内に光が漏れる。その光をレンズ系で集光して PSD で検出する。

原稿受付 1994年2月14日

\*1 広島大学工学部

\*2 (株) ナムコ

\*3 機械技術研究所

\*1 Faculty of Engineering, Hiroshima University

\*2 Namco Co.

\*3 Mechanical Engineering Lab.

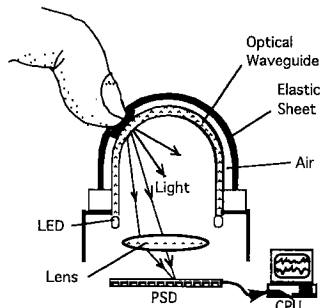


Fig. 1 Structure of finger-shaped sensor

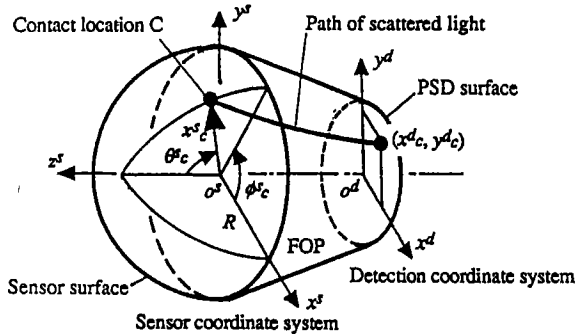


Fig. 2 Sensor coordinate system

PSDの表面と半球面はそれぞれ二次元であり、かつ両者の間で1対1対応が成り立つから、PSD出力よりセンサの接触位置が求まる。

Fig. 2のように、センサ表面の位置  $C = (\phi_c^s, \theta_c^s)$  に触ったときのセンサ出力を  $\Delta v_{x1}$ ,  $\Delta v_{x2}$ ,  $\Delta v_{y1}$ ,  $\Delta v_{y2}$  とする。ここでPSD表面での入射光位置  $(x_c^d, y_c^d)$  を  $\Delta v_{x1}$ ,  $\Delta v_{x2}$ ,  $\Delta v_{y1}$ ,  $\Delta v_{y2}$  を用いて表すと式 (1), 式 (2) のようになる。

$$x_c^d = \frac{(\Delta v_{x2} + \Delta v_{y1}) - (\Delta v_{x1} + \Delta v_{y2})}{\Delta v_{x1} + \Delta v_{x2} + \Delta v_{y1} + \Delta v_{y2}} \quad (1)$$

$$y_c^d = \frac{(\Delta v_{x2} + \Delta v_{y2}) - (\Delta v_{x1} + \Delta v_{y1})}{\Delta v_{x1} + \Delta v_{x2} + \Delta v_{y1} + \Delta v_{y2}} \quad (2)$$

ただし、センサからの各出力はオフセット値（非接触時の出力平均）をすでに引いてあるものとする。この式で表すPSD上の座標とセンサ半球面上の位置との関係式や接触面積とPSDの電圧出力の関係はセンサの較正実験より求めることができる。なお詳細については参考文献[10]を参照されたい。

### 3. 従来方式の接触点検出の問題点

ここで、2点接触時にPSD上に発生する電荷を考えてみよう。Fig. 3に示すように半球面内部にもれた光によって、2箇所において電荷が発生する。しかしそのセンサからの出力はあたかもFig. 3の破線で示すような2点の重心位置に一つの接触点があるかのような信号となる。さらに3点以上についても同様であり、すべての接触点の重心位置に対応する信号がPSDから出力される。したがって、PSDを用いた指先触覚センサはその構造上、実時間性には優れているが、複数の接触点の位置を区別して出力することができないという問題点を有している。本

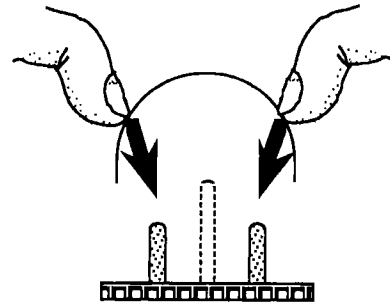


Fig. 3 Evoked electric charge on PSD

論文では4章以降において接触点数が増減する場合のPSD出力の時間的変化に着目して、複数接触時の各接触点位置を推定する方法について考察する。

## 4. 多点接触位置の推定方法

### 4.1 仮定

本研究においては次の4つの仮定を設ける。

- [仮定1] 同時刻に接触点の数が二つ以上変化しないものとする。
- [仮定2] 複数点接触時に接触点がセンサ上を移動しないものとする。
- [仮定3] 接触点数が新たに増減しても、すでに接触状態にある接触点における光量は変化しないものとする。
- [仮定4] 一点接触時のPSD出力電圧はセンサ接触面積に対して単調増加関数とする。
- [仮定5] 初期状態は既知とする。

指先触覚センサを多指ロボットハンドにつけて作業させるような場合、対象物上の2点が同時に指先触覚センサに接触することは極めて稀であると考えられる。また一般的に多点接触状態で、ハンドが対象物上を滑るような場合を除いて、特定の接触点だけセンサ上を滑るようなことも少ないと考えられる。したがって仮定1, 2は、指先触覚センサにおいては比較的現実的な仮定であると筆者らは考えている。本研究では、時間的な履歴に着目しているため、初期状態が既知であることが大前提である。特に、非接触とか一点接触に限定する必要はないが、初期状態で各接触位置と各点の光スポットに対応する電圧値が既知である必要がある。仮定5は以上の点を考慮した仮定である。

### 4.2 接触点数の増加減少の判別

触覚センサの接触点の一つ増えるときのPSDからの出力  $\Delta v_{x1} + \Delta v_{x2} + \Delta v_{y1} + \Delta v_{y2}$  を考えよう。Fig. 4(a)のように接触点が増えた瞬間、新たな接触点によって漏れた光がPSDに照射され、それによってPSD出力は増加する。また、接触点の位置は変わらないが接触面積<sup>†</sup>が急激に大きくなる場合もPSD出力はFig. 4と同様な挙動を示す。このときのPSD出力の微

<sup>†</sup>対象物が弾性体の場合、接触力に応じて、対象物と指先触覚センサとの間の接触面積は変化する。シリコンカバーとガラス半球殻との間の接触面積も接触力に応じて多少変化するが、実際には初期の接触によってシリコンカバーはガラス面に密着してしまい、その後、接触力を増しても接触面積はほとんど変化しない。したがって、実質的な接触面積の変化は、弾性体をセンサに接触させた状態で接触力を増減させた際に現れる。

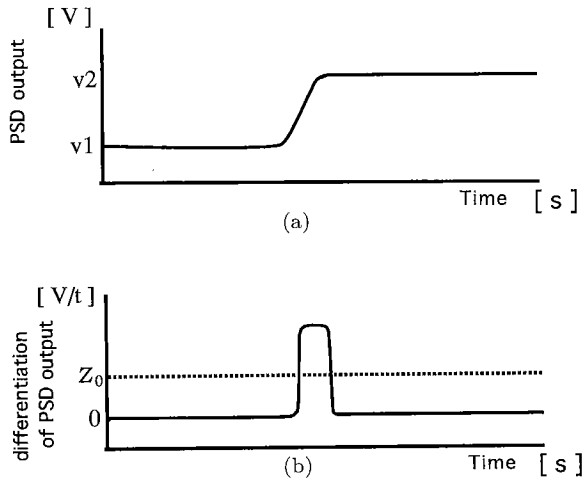


Fig. 4 PSD output and its differentiation

分値は, Fig. 4(b)のように接触点が増えたとき, 一時的に大きな値となる. ここで, 微分値が大きく変化したということをしきい値  $z_0$  を用いて判断する (式 (4)). 微分値が正の場合 (式 (5)) は接触点の数が増加したか, または接触面積が急に増加した場合に対応する. 微分値が負の場合 (式 (6)) は接触点の数が減少したか, または接触面積が急に減少した場合に対応する.

$$z = \frac{d(\Delta v_{x1} + \Delta v_{x2} + \Delta v_{y1} + \Delta v_{y2})}{dt} \quad (3)$$

$$|z| > z_0 \quad (4)$$

ただし,  $z_0$  はしきい値である

・微分値が正

$$\text{sgn}(z) > 0 \quad (5)$$

・微分値が負

$$\text{sgn}(z) < 0 \quad (6)$$

以上, 整理すると Table 1 の対応関係が成立する.

#### 4.3 式 (4) (5) を満足する場合

一般に式 (4) (5) の条件が, 接触点数増加によるものか, それとも接触面積増加によるものかは, 新たな接触点の位置を算出してみるまで分からない. ここでは, 基本的に式 (4) (5) が成立するとき, 接触点数が増加したものと見なして, 新たな接触点を算出する. 次にこの接触点とすでに接触状態にあるすべての点との距離を算出し, その距離によって接触点数の増加によるものかそれとも接触面積の増加によるものかを判定する.

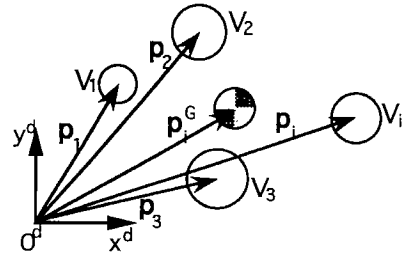
さて  $i$  番目の接触による総電圧変化を  $V_i$ , その接触点の PSD 上での座標を  $\mathbf{p}_i = (x_i^d, y_i^d)$  とする. また, 接触点の数が  $i$  のときの総電圧を  $V_i^T$ , そのとき, 式 (1) (2) によって求められるすべての接触点の重心位置を  $\mathbf{p}_i^G$  とする. それを表したのが Fig. 5 である. ただし, ここでは PSD 上の座標系にその接触点に関与して出力された PSD 電圧  $V_i$  を重ねて表示していることに注意されたい.

ここでは, 過去の接触点とそのときの電圧増加が分かっているならば, 新たに発生する接触点位置と, 電圧増加が算出できることを示す.

[1]  $i = 1$  のときは原理より

Table 1 Classification map

式 (4)	式 (5)	接触点数増加 接触面積増加
	式 (6)	接触点数減少 接触面積減少

Fig. 5 Definition of  $\mathbf{p}_i$  and  $s_i$ 

$$V_1 = V_1^T \quad \mathbf{p}_1 = \mathbf{p}_1^G \quad (7)$$

[2]  $i = k$  までのすべての接触点の位置  $\mathbf{p}_i$  と接触に伴う電圧変化  $V_i$  が分かっていると仮定する.

[3]  $i = k+1$  のとき, センサ出力より  $V_{k+1}^T$  と  $\mathbf{p}_{k+1}^G$  は測定できる. また, その  $V_{k+1}^T$  と  $\mathbf{p}_{k+1}^G$  は以下の関係式を満たす.

$$V_{k+1}^T = \sum_{i=1}^{k+1} V_i \quad (8)$$

$$\mathbf{p}_{k+1}^G = \frac{\sum_{i=1}^{k+1} V_i \mathbf{p}_i}{\sum_{i=1}^{k+1} V_i} \quad (9)$$

式 (8) より  $V_{k+1}$  について解くと,

$$V_{k+1} = \sum_{i=1}^{k+1} V_i - \sum_{i=1}^k V_i \quad (10)$$

また式 (9) を  $\mathbf{p}_{k+1}$  について解き, 式 (10) を代入すれば

$$\mathbf{p}_{k+1} = \frac{V_{k+1}^T \mathbf{p}_{k+1}^G - \sum_{i=1}^k V_i \mathbf{p}_i}{V_{k+1}} \quad (11)$$

したがって,  $k$  番目までの接触点分かれば,  $k+1$  番目の接触点の位置ベクトル  $\mathbf{p}_{k+1}$  と接触に伴う電圧変化  $V_{k+1}$  が分かる. よって数学的帰納法により, 一般に  $n$  個の接触点があった時, それらの接触位置とそれに伴う電圧変化が分かることになる. 式 (11) によって, 新たな接触に伴って発生した PSD 表面上の光スポットの位置ベクトルが求まったことになるから, 指先触覚センサ表面上の位置は, 幾何学的な対応関係 (または較正実験によって得られるマッピング関係) から, 一意に決めることができる. ここで, 位置ベクトル  $\mathbf{p}_{k+1}$  を算出する上で, 接触面積を陽に必要とせず, PSD の電圧出力だけで算出できる点に留意されたい. 一般に接触面積と PSD 出力との間の関係は, 接触位置の関数になり, センサの全動作範囲に

渡って較正実験を行うことは大変な労力を要するが、この対応関係を使わなくても指先触覚センサ表面上の接触位置が推定できる点が重要である。もちろん、接触面積も推定したいというときには、あらかじめ、PSD 出力と接触面積の関係を明らかにしておく必要がある。

次に式 (11) によって与えられる点が接触点の増加によるものか、それとも接触面積の増加によるものかの判別法について考えてみよう。

ここで、

$$d_j \triangleq \|\mathbf{p}_{k+1} - \mathbf{p}_j\| \quad j \in \{1, \dots, k\} \quad (12)$$

を定義する。ただし  $\|\cdot\|$  はベクトルのノルムを表している。物理的に考えて、触覚センサ上の同一点に新たな接触点が発生することは考えられないので、 $d_j$  が零になるということは接触点数が増加したのではなく、接触面積が増加したと考えることができる。以上、定式化すると、

・接触点数増加

$$(d_j)_{\min} \neq 0 \quad (13)$$

ただし添字  $(\ )_{\min}$  は最小値を意味している。

・接触面積増加

$$(d_j)_{\min} = 0 \quad (14)$$

#### 4.4 式 (4) (6) を満足する場合

Fig. 6 (a) のようにセンサ上の直線上に三つの接触点  $C_1, C_2, C_3$  があるものとする。それぞれの接触による電圧変化が 1, 1, 0.5 であり、 $C_1C_2, C_2C_3$  の間隔が 2, 1 であるとする。このとき  $\Delta$  は三つの接触点の重心位置であり、 $C_1$  から右に  $\frac{7}{6}$  の位置にある。またこれはセンサからの出力に対応している。ここで  $C_2$  がセンサから離れた時、重心位置は Fig. 6 (b) のように左に  $\frac{1}{6}$  だけ移動するが、一方  $C_2$  の代わりに  $C_3$  がセンサから離れた時も重心位置は Fig. 6 (c) のように左に  $\frac{1}{6}$  移動する。このように、接触点が増加する時、センサ出力を満足する解が複数個存在する可能性があることに注意されたい。したがって、位置情報だけでは、センサから離れた点を一意に同定できない場合があることに留意されたい。

いま  $k$  個の接触点があったと仮定する。式 (6) より接触点の数 (または接触面積) が減少したとする (Fig. 7)。ここで  $k$  番目までの接触点の位置と接触に伴う電圧変化が分かっていると仮定すれば次の関係式が成り立つ。

$$\mathbf{p}_k^G = \frac{\sum_{i=1}^k V_i \mathbf{p}_i}{\sum_{i=1}^k V_i} \quad (15)$$

ただし、PSD 出力が変化する前の重心点を  $\mathbf{p}_k^G$  としている。ここで PSD 出力が変化した後の重心点の移動ベクトルを  $\Delta \mathbf{p}^G$  とし、 $m$  番目の点が PSD の出力変化に関与していたとすると、式 (15) より  $\Delta \mathbf{p}^G$  は次のように表すことができる。

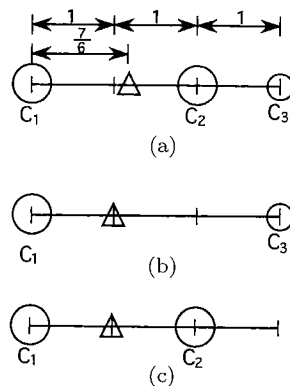


Fig. 6 An example of non-decisive case through the shift of center of gravity

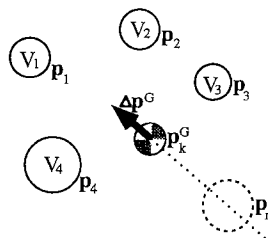


Fig. 7 The relationship between the shift of center of gravity and the removed point

$$\Delta \mathbf{p}^G = \frac{\sum_{i=1}^k V_i \mathbf{p}_i - \Delta V \mathbf{p}_m}{\sum_{i=1}^k V_i - \Delta V} - \mathbf{p}_k^G \quad (16)$$

ただし、 $\Delta V$  は接触の状態変化に伴う電圧降下分である。式 (16) を  $\mathbf{p}_m$  について解く。まず式 (16) に式 (15) を代入し、分母を払うと、

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^k V_i \left( \frac{\sum_{i=1}^k V_i \mathbf{p}_i - \Delta V \mathbf{p}_m}{\sum_{i=1}^k V_i - \Delta V} \right) \Delta \mathbf{p}^G \\ &= \sum_{i=1}^k \{V_i \mathbf{p}_i\} \Delta V - \sum_{i=1}^k \{V_i\} \Delta V \mathbf{p}_m \end{aligned} \quad (17)$$

を得る。次に  $\mathbf{p}_m$  について整理すれば、

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_m &= \frac{\sum_{i=1}^k \{V_i \mathbf{p}_i\} \Delta V - \sum_{i=1}^k \{V_i\} \left( \sum_{i=1}^k V_i - \Delta V \right) \Delta \mathbf{p}^G}{\sum_{i=1}^k \{V_i\} \Delta V} \\ &= \mathbf{p}_k^G - \frac{\sum_{i=1}^k V_i - \Delta V}{\Delta V} \Delta \mathbf{p}^G \end{aligned} \quad (18)$$

式 (18) より PSD に変化をもたらした点は、 $\Delta p^G$  の延長上にあることが分かる。さらに、 $V_i > 0$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) であるので、

$$-\frac{\sum_{i=1}^k V_i - \Delta V}{\Delta V} < 0 \quad (19)$$

が成り立つから、式 (18) より  $p_m$  は  $\Delta p^G$  の負の方向に存在することも分かる。したがって、取り除かれた点（あるいは接触面積が減った点）を探す方法として、 $k$  個すべての接触点について調べる必要はなく、 $\Delta p^G$  と反対側の直線上に存在する点だけ調べれば必ず見つかることが分かる。

さらに、接触点数減少と接触面積減少の判定は以下のようにして行うことができる。

- ・接触点数減少

$$\Delta V = V_m \quad (20)$$

式 (20) が成立するとき、 $m$  番目の接触点がセンサから離れたと判定される。

- ・接触面積減少

$$0 < \Delta V < V_m \quad (21)$$

式 (21) が成立するとき、 $m$  番目の接触面積が減少したと判断される。

## 5. 実 験

### 5.1 接触面積と出力電圧との関係

指先触覚センサの頂点近傍を断面積の違う棒で押し、そのときのセンサからの出力電圧の和  $\Delta v_{x1} + \Delta v_{x2} + \Delta v_{y1} + \Delta v_{y2}$  を調べる。接触に用いる棒としては断面が丸で半径が 1.5 [mm], 2.0 [mm], 2.5 [mm], 3.0 [mm], 3.5 [mm], 4.0 [mm], 5.0 [mm] のものと、断面が正方形で一辺が 2.0 [mm], 3.0 [mm], 5.0 [mm] の計 10 種類が用意された。棒を触覚センサに押し付け、サンプリングタイム 1 ミリ秒で 1,500 個の出力電圧を測定し、その平均を 1 個のサンプルとし、計 30 個のサンプルデータを取った。ただし押し込み力と接触位置のばらつきを除外するために、それぞれ 30 個のサンプル中上下 5 個ずつを除外した。このようにして得られたサンプルの平均と分散を Fig. 8 に示す。グラフの横軸は棒の接触面積で、それぞれ棒の形状と断面積を表している。グラフの縦軸は電圧である。

センサ上の接触面積と出力電圧の和の間には接触面の形状によらずほぼ 1 対 1 の対応関係が見受けられる。ただし接触面積が大きくなるにつれて、出力電圧の和と接触面積との関係は直線からはずれ、飽和傾向を示す。この原因の一つは、今回の実験に用いた接触棒の断面は平面であるのに対して、触覚センサが半球面であるため、接触棒の面積が大きくなるとその端のほうにおいては完全に触覚センサに接触できていないためであると推定される。また、この関係は接触位置によっても変わること付記しておきたい。

### 5.2 触覚センサ接触点増減時の接触位置推定実験

4 章に記述した、接触点の数が増減するときの接触点推定の有効性を確認する実験を行った。1 点, 2 点, 3 点と対象物を接触させ、次に 1 点ずつ対象物を触覚センサから離していく。この

diameter .	○	○	□	○	○	□	○	○	□
side [mm]	1.5	2.0	2.0	2.5	3.0	3.0	3.5	4.0	5.0
area [mm <sup>2</sup> ]	1.766	3.140	4.000	4.906	7.065	9.000	9.616	12.56	19.625

○ plastic beam round      □ plastic beam square      ○ iron beam round

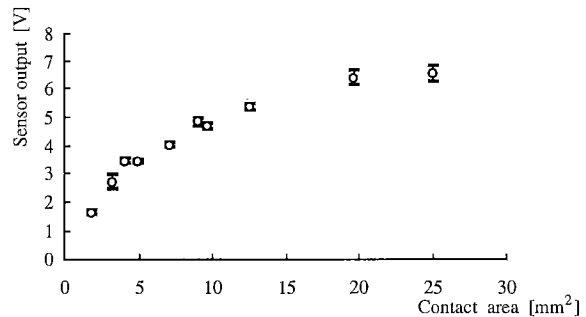


Fig. 8 The relationship between sensor output and contact area

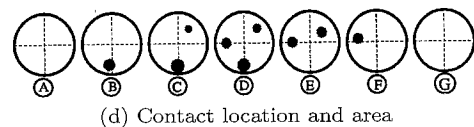
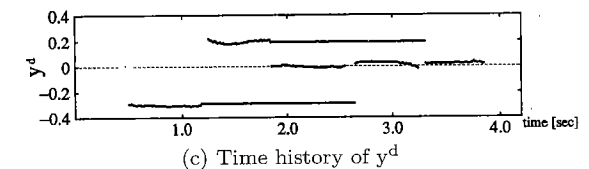
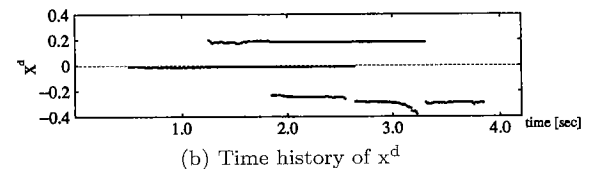
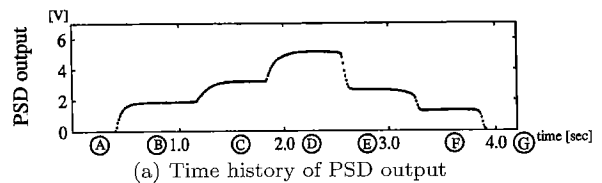


Fig. 9 Experimental result

とき、各接触点の位置を PSD 上の座標で推定する。Fig. 9 (a) はセンサ出力電圧の和  $\Delta v_{x1} + \Delta v_{x2} + \Delta v_{y1} + \Delta v_{y2}$ , Fig. 9 (b) (c) はそれぞれ推定された接触点の  $x$  座標,  $y$  座標を記録したものである。なお、Fig. 9 (b) (c) の縦軸は式 (1) (2) で定義される PSD 上の座標軸であり、理論上その値域は  $-1.0 \sim 1.0$  であるが、触覚センサでは歪みが発生しやすい PSD の端のほうには接触点からの入射光が届かないような構造となっているので、実際の動作値域は  $-0.5 \sim 0.5$  程度である。また、Fig. 9 (d) は推定された接触点の位置を PSD 平面に置き換えて示している。●は接触点を意味しており、それらの大きさは接触状態の変化に伴って発生した電圧変化の大きさを表している。なお、出力には 1 次のパワースフィルタ 10 [Hz] を施した上で計算処理

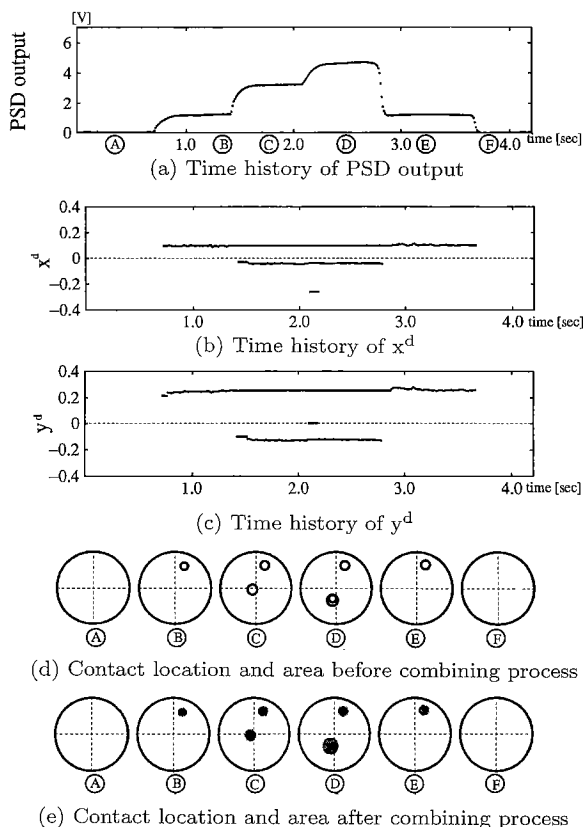


Fig. 10 Experimental result

をしている。

### 5.3 接触面積が変化するときの接触位置推定実験

1点、2点と接触させ、次に2点目の接触点の接触面積を増加させた後に対象物一つずつ離していく。このときのセンサの出力により接触位置を推定し、グラフ化したものが Fig. 10 (a)(b)(c) である。また Fig. 10 (d) はそれらの接触点を PSD 平面での位置として表したものである。グラフの見方は Fig. 9 (a) ~ (d) と同じである。ただし Fig. 9 (d) の ① は3点接触と判断した結果が示されている。①の下は二つの点が同一点にプロットされていることに注意されたい。さらに Fig. 9 (e) は  $(d_j)_{\min} = \epsilon$  ( $\epsilon$  は十分小さい値) になったとき、二つの点は同一点と見なして両者を同一接触点とする処理課程を追加した後の結果である。Fig. 9 (e) より、接触面積の増加と接触点数の増加がうまく区別して処理されているのが分かる。なお、センサ表面の距離換算での分解能は、センサ中心部で約 2 [mm] くらいであるが、周辺部では 4 [mm] 程度である。

## 6. 考 察

本論文では、状態の時間的変化が比較的大きな場合を取り扱ったが、実際問題として、接触点数あるいは接触面積が変化したにもかかわらず、状態がゆっくり変化する場合には、式 (4) で検知できない場合が考えられる。この場合、微分を使った判定条件と並行して、PSD 出力の総出力の変化を使った判定条件を組み込んで、両条件を相補的に利用するようになれば、状態変化速度に対して、幅を持たせることができよう。一方、

仮定 1 で明文化している“同時刻に接触点の数が二つ以上変化しない”というのは、どのレベルの時差まで許されるのだろうか。Fig. 9, Fig. 10 の実験では、出力に 10 [Hz] のパワースフィルタを施している関係で、最初の点が接触してから次の点が接触するまでに必然的に 100 [ms] 程度の時差を必要としたが、PSD からの出力波形はそれほどノイズが多いわけではないので、フィルタ周波数はもう少し上げられるものと思われる。ただ、指先触覚センサとしては、最低時差 100 [ms] 程度であっても、実用的にはまったく問題なく使用できるものと思われる。

## 7. 結 論

PSD を用いた指先触覚センサの多点接触位置を PSD センサ出力の時間的履歴から推定する方法について考察した。本論文を通じて得られた主な結果は以下の通りである。

(1) PSD 出力の時間微分値が正でしかもある規定値を越えた場合、状態変化の可能性として、接触点数が増えたか、またはすでに接触状態にある点の接触面積が増えたのか、の二通りの可能性があることを示した。

(2) PSD 出力の時間微分値が負でしかもその大きさがある規定値を超えた場合、状態変化の可能性として、接触点数が減ったか、またはすでに接触状態にある点の接触面積が減少したか、の二通りの可能性があることを示した。

(3) (1), (2) のそれぞれに対して、状態変化に関与した接触点位置は、指先触覚センサ表面上での接触面積と PSD 出力との較正曲線などを必要とせず、PSD の出力電圧だけで求まることを示した。

(4) PSD の変化が、接触点数の増減によるものか、接触面積の増減によるものか、を判定する方法を示した。

(5) 以上の基本原理を実験により確認した。

最後に、得られた結果は、指先触覚センサに限定されることなく、PSD 素子を使った様々なセンサに応用できるものと筆者らは考えている。

## 参 考 文 献

- [1] J.A. Purbrick: "A Force Transducer Employing Conductive Silicone Robber," Proc. of 1st Conf. on Robot Vision and Sensory Controls. pp.73-80, 1981.
- [2] P. Dario and G. Buttazzo: "An Anthropomorphic Robot Finger for Investigating Artificial Tactile Perception," Int. Journal of Robotics Research. 6-3, pp.25-48, 1987.
- [3] K. Tanie, K. Komoriya, M. Kaneko, V. Tachi and A. Fujikawa: "A High Resolution Tactile Sensor," Proc. of 4th Int. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls, pp.251-260, 1984.
- [4] V. Begej: "Planar and Finger-Shaped Optical Tactile Sensors for Robotic Applications," IEEE Journal of Robotics and Automations, 4-5, pp.472-484, 1988.
- [5] 朴, 小森谷, 金子, 大野, 谷江: "光導波路を用いた分布型触覚センサ", 日本ロボット学会誌, vol.5, no.4, pp.31-38, 1987.
- [6] 金子真: "把握までのセンシング戦略 その1: 接触点および形状検出", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.7, pp.21-26, 1993.
- [7] 平石, 鈴木, 金子, 谷江: "光導波板型の分布型触覚センサによる触知対象の輪郭形状抽出", 日本機械学会論文集 (C編), vol.55, no.516, pp.2091-2099, 1989.
- [8] 中尾, 金子, 鈴木, 谷江: "接触位置および法線の検知機能を有する半球面光導波路形触覚センサ", 日本機械学会論文集 (C編), vol.57,

no.535, pp.159-166, 1991.

- [9] H. Maekawa, K. Tanie, K. Komoriya, M. Kaneko, C. Horiguchi and T. Sugawara: "Development of a Finger-Shaped Tactile Sensor and its Evaluation by Active Touch," IEEE International Con-

ference on Robotics and Automation, 4/92, pp.1327-1334, 1992.

- [10] 前川, 谷江, 金子, 鈴木, 堀口, 菅原: "半球面光導波路を用いた指先搭載型触覚センサの開発", 計測自動制御学会論文集, vol.30, no.5, pp.499-508, 1994.



金子 真 (Makoto Kaneko)

1954年1月18日生。1976年3月九州工業大学卒業。1981年3月東京大学工学系研究科博士課程卒業。工学博士。同年4月、通産省工業技術院機械技術研究所入所。1990年4月、九州工業大学情報工学部助教授。1993年10月、広島大学教授、現在に至る。ロボットハンド、力覚センサ、触覚ベーストアクティブセンシングなどの研究に興味を持つ。IEEE、計測自動制御学会、日本機械学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)



瀧下直樹 (Naoki Takishita)

1971年6月4日生。1994年広島大学工学部経営工学課程卒業。在学中は、指先触覚センサの研究に従事。現在、株式会社ナムコに入社、遊びをクリエイトしている。



谷江和雄 (Kazuo Tanie)

1946年11月6日生。1971年、早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年通産省工業技術院機械技術研究所入所。現在、ロボット工学部バイオロボティクス研究室長、筑波大学大学院工学研究科教授(併任)。工学博士。ロボットの機構と制御、センサ、インターフェースなどの研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会、バイオメカニズム学会、IEEEなどの会員。(日本ロボット学会正会員)



辻 敏夫 (Toshio Tsuji)

1959年12月25日生。1985年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年同大学工学部助手、1994年同助教授、現在に至る。人間とロボットの運動制御、ニューラルネット、マン・マシンシステムなどの研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会、電気学会、電子情報通信学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)



前川 仁 (Hitoshi Maekawa)

1963年4月21日生。1988年、東京工業大学理工学研究科制御工学専攻修士課程修了、同年通産省工業技術院機械技術研究所に入所。現在、ロボット工学部感覚制御研究室研究官。多指ハンドによる把握・操り制御、指先搭載型触覚センサなどの研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会、IEEEなどの会員。(日本ロボット学会正会員)