449 手触り感計測用センサシステムの開発

Development of a sensor system for collecting tactile information

○正 田中 由浩 (名古屋工業大) 正 田中 真美 (東北大)
正 長南 征二 (秋田県立大)

Yoshihiro TANAKA, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555

Mami TANAKA, Tohoku University, Aoba-yama 6-6-04, Sendai 980-8579

Seiji CHONAN, Akita Prefectural University, Tsuchiya 84-4, Yurihojo, Akita 015-0055

This paper presents the development of a sensor system for collecting tactile information. First, distinction examination on six kinds of fabrics is done through human tactile perception. Next, an active sensing system using the piezoelectric effect and the pyroelectric effect of a PVDF (Polyvinylidene Fluoride) film is fabricated. The sensor's surface is heated and two kinds of active sensing, contact and slide, are introduced. Measurement using the sensor system is done on the samples. Comparison between the sensor outputs and the results of the distinction examination shows that the sensor system extracts features on feelings of vibration and warmth.

Key Words : Measurement, Sensor, Tactile sensation, PVDF film, Piezoelectric effect, Pyroelectric effect

A1. 緒 言

現在開発されている触覚センサの大部分は変位や力を中心とした力学的物理量を検出するものであり、ヒトの触感を計測するセンサおよび評価する方法は未だ十分に開発されていない。

近年筆者らは、PVDF フィルムの圧電効果に着目し、PVDF フィルムを受感材に用いてヒトのなぞり動作を考慮したセンサを製作、布を用いた実験により PVDF フィルムから得られた出力信号が主要な数種の触覚感性量と対応関係を有することを明らかにした。また、PVDF フィルムが圧電効果と同時に焦電効果も有していることに着目し、温冷感計測を目的に焦電効果を利用したセンサを製作、その有効性を確認した。ところで、ヒトの皮膚は機械的刺激や温度刺激を検出することができ、我々は対象物に対し指や手のひらを能動的に動かし、欲しい情報に応じた動作を行うことで、これらの刺激を得て振動感や温冷感などの様々な手触り感を知覚している。したがって、これまでに開発されたセンサを基に PVDF フィルムの圧電と焦電の両効果を利用したセンサを製作することで、単一のセンサによる振動感および温冷感の情報収集が実現され、様々な触覚感性量の定量評価や総合評価が可能となると考えられる。

本研究は以上に鑑み、手触り感計測用センサシステムの開発を目的とし、PVDF フィルムの圧電効果と焦電効果を利用した能動触覚センサシステムの開発を行うものである。あらかじめヒトの触覚による判別試験を行った数種の布について、本センサシステムによる計測実験を行い、振動感および温冷感の情報取得の可能性について検討する。

A2. センサシステム

図 A1 にセンサの構造を示す。センサはロボットフィンガ先端に搭載されており、母材に弾性体を用いて、表面に PVDF フィルムを貼り付けた構造となっている。センサ表面は加熱・温度制御が可能であり、本センサを搭載したロボットフィンガ基底部が X 軸スライダに取り付けられている。計測では、センサ表面を一定温度に加熱し、振動感および温冷感の計測のために以下の 2 種類のセンシング動作を行う。

- (I) 温冷感計測：センサを対象物に接触させ、静止させる
(焦電効果による出力信号の検出)
- (II) 振動感計測：対象物表面をセンサでなぞる
(圧電効果による出力信号の検出)

Fig.A1 Geometry of sensor.

それぞれの動作について検討し、得られた出力データから信号処理を通し特徴量を求め、評価に用いるセンサ出力とした。動作(I)により得られた焦電効果による出力信号からは、ピーク値 V_p を温冷感評価に用いるセンサ出力として求めた。動作(II)により得られた圧電効果による出力信号からは、20~100Hz のパワースペクトル密度の総和 P_m および 100~500Hz のパワースペクトル密度の分布比 R_s を振動感評価に用いるセンサ出力として求めた。

A3. 実験結果および考察

ヒトの触覚による判別試験を行った 6 種類の布 (A~F) に対して、センサシステムによる計測実験を行い、手触り感とセンサ出力の関係について考察した。得られたセンサ出力結果を図 A2 に示す。センサ出力により布の判別が可能であることがわかる。さらに、得られたセンサ出力結果はヒトの触覚による判別試験の結果と似た傾向を示し、センサ出力が手触り感と関連性を有することが確認された。

以上の結果より、製作したセンサシステムによる振動感および温冷感の情報取得の可能性が明らかになった。

Fig.A2 Distributions of sensor outputs, (a): R_s vs. P_m (b): V_p vs. P_m
(■: A, ◆: B, ▲: C, ⊙: D, □: E, ○: F)

1. 緒 言

ヒトは日常生活の中でいろいろなものに触れ、触覚を通じて精密な把持や操作を実現し生活を送っている。特に、対象物との接触を知覚するだけに限らず、指や手のひらを能動的に動かし、触る・撫でるといった動作を行うことによって、対象物の質感や手触り感などの感性量も知覚している。触覚は視覚や聴覚と共にヒトの生活において必要不可欠な感覚である。

近年、触覚センサについて数多くの研究が行われている。しかしながら、開発されている触覚センサの大部分は力や変位などの力学的物理量を計測するものである⁽¹⁾⁻⁽³⁾。触覚の重要な機能である質感や肌触りなどの感性量の知覚を実現するセンサおよび評価する方法についての研究は未だ十分に行われていない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

触覚感性量が重要な評価要素となる対象物を考えると布が挙げられる。布の触感の特性評価は職業熟練者の用いる「風合い」という用語で判断されている。風合いは布の硬軟性、弾性、粘性、目の粗さなどの総合評価を意味するが、概念が極めて曖昧であるため、評価が非常に難しい。現在一般に用いられている布の特性を評価するシステムとしては KES⁽⁶⁾が挙げられる。これは布の引っ張り・せん断・曲げ・圧縮・表面摩擦特性などの物理情報を測定し、これらの測定結果の重みづけ合成値を用いて風合い評価を試みるものである。しかしながら、未だ風合いとの十分な対応は確認されていない。このような背景を基に、現在、ヒトの曖昧な触感を計測・評価するシステムの開発が切に望まれている。

高分子圧電材料の一種である PVDF (Polyvinylidene Fluoride) フィルムは、出力電圧特性がヒトの皮膚感覚受容器の一つであるパチニ小体の出力特性と類似していることが知られている⁽⁷⁾。近年、筆者らはこれに着目し、PVDF フィルムを用いた触覚センサとロボットフィンガを統合した能動センシングシステムを開発した⁽⁴⁾。センサで対象物表面をなぞることにより PVDF フィルムから得られる出力信号が主要な数種の触覚感性量と対応関係を有することを明らかにした。さらに、PVDF フィルムは圧電効果と同時に焦電効果も有しており、温度変化に対しても電圧を発生する⁽⁸⁾。筆者らはこれに着目し、ヒトの温冷感識別原理に基づいた PVDF フィルムの焦電効果を利用したセンサシステムを開発、加熱したセンサを対象物表面に接触させることにより得られた焦電効果による出力信号がヒトの温冷感と対応関係を有することを明らかにした⁽⁵⁾。ところで、ヒトの皮膚は機械的刺激や温度刺激を検出することができ、我々は対象物に対し指や手のひらを能動的に動かし、欲しい情報に応じた動作を行うことによって、これらの刺激を得て振動感や温冷感などの様々な手触り感を知覚している。したがって、ヒトの触感を十分に表現するためには、触感に関与する振動および温度の情報を収集することが必要不可欠であるといえる。以上のことより、これまでに開発さ

れたセンサを基に PVDF フィルムの圧電と焦電の両効果を利用したセンサシステムを製作することで、単一のセンサによる振動感および温冷感の情報収集が実現され、様々な触覚感性量の定量評価や総合評価が可能となると考えられる。

本研究は以上に鑑み、手触り感計測用センサシステムの開発を目的とし、PVDF フィルムの圧電効果と焦電効果を利用した能動触覚センサシステムを開発するものである。センサシステムは PVDF フィルムを用いたセンサおよびヒトの触動作を考慮した能動センシング駆動機構から構成される。対象物には布を用いる。具体的には始めに、予備実験として、手触り感の異なる 6 種類の布についてヒトの触覚による判別試験を行う。続いて、本提案のセンサシステムを製作する。判別試験を行った布について、製作したセンサシステムによる計測実験を行い、得られたセンサ出力結果とヒトの手触り感との関係について考察し、センサシステムによる振動感および温冷感の情報取得の可能性について検討する。

2. ヒトの触覚による布の判別試験

ヒトの触覚による判別能力の調査および製作したセンサシステムによる計測結果の考察のための準備として、ヒトの触覚による布の判別試験を行った。対象物には手触り感の異なる 6 種類の布、A, B, C, D, E, F を用意した。各試料の物性値を表 1 に示す。ただし、EMC は圧縮率を示し、0.5gf/cm² 圧縮荷重時の厚さに対して 50gf/cm² 圧縮荷重時に圧縮された変位の割合を示す。

被験者に提示した試料の寸法は 200mm×200mm である。厚さ 5mm のアクリル板を試料台とし、この上に試料を置き被験者に提示した。まず始めに、被験者に 6 種類の布を同時に全て提示し、以下の動作を用いて特徴を覚えてもらった。

- (i) 右手の手のひらで対象物に触れる
- (ii) 右手の人差し指で対象物表面を一方向になぞる

この動作はヒトが温冷感や振動感を評価する際に行う一般的な動作の一つである⁽⁹⁾。なお、(i)および(ii)の動作を行うにあたり、被験者には温度や粗さなど具体的にどのような特徴を覚えてもらうかは指定せず、覚える特徴は各被験者の判断に委ねた。また、被験者には触覚による情報のみで判別を行うようにするため、アイマスクをつけてもらい試験を行った。(i)および(ii)の動作は特徴を覚えるまで何度でも行って良いとし、試料間の比較も行って良いとした。特徴を覚えてもらった後、6 種類の布の配置を並べ替えて被験者に再度提示し、同様に(i)および(ii)の動作を行ってもらい、覚えた布の A～F のどれに対応するか回答を得た。ただし、配置の並べ替えの仕方は被験者ごとにランダムにした。被験者は 17 名 (平均 46.9 才, 23～66 才)、実験環境は室温 22.9℃ (21.0～25.0℃)、湿度 61.6%RH (41～

Table 1 Properties of measurement samples.

Sample	A	B	C	D	E	F
Material	Cotton 100%	Linen 100%	Polyester 100%	Nylon 100%	Silk 100%	Wool 100%
Thickness [mm]	0.66	1.24	1.30	0.10	0.12	0.60
Weight [mg/cm ²]	16.7	26.3	25.5	5.8	5.6	20.2
EMC [%]	45.9	31.3	17.8	25.8	29.9	34.3
Thermal conductivity [W/(m·K)]	0.426	0.306	0.298	0.211	0.196	0.382

75%RH) であった。

得られた結果を表 2 に示す。表より、すべての布に対して 50%以上の正解率が得られたことがわかる。ヒトは触覚により対象物の特徴を抽出することができ、それらの特徴を用いて判断を行うことができるといえる。また、試験終了後、被験者に(i)および(ii)の動作を通じて覚えた布の特徴を尋ねると、粗さややわらかさ、厚み、触ったときの温度など、各被験者から複数個の回答を得た。これより布の判断に対して振動感と温冷感がどちらも有効であることが確認できる。

3. センサシステム

これまでに筆者らにより開発されたセンサ⁽⁴⁾⁽⁵⁾を基に、振動感および温冷感に関する情報が取得可能な、PVDF フィルムの圧電効果と焦電効果を利用した能動触覚センサシステムを試作した。

図 1 にセンサの構造を示す。センサはロボットフィンガの先端に装着されている。センサはアクリルブロックと厚さ 5mm の加硫ゴムを積層したものを母材とし、その周りにニクロム線を貼り付けた銅箔テープ、PVDF フィルム、保護を目的としたアセテートフィルムを巻きつけた層構造となっている。ニクロム線はセンサ表面を加熱するために用いられる。さらに、センサ側面にはセンサ表面温度を測定するためにサーミスタが貼り付けられている。

ロボットフィンガはバイモルフ型圧電素子とアルミ板をつなげた片持ちはりから構成されている。バイモルフ型圧電素子に電圧を印加することで、先端に搭載したセンサを対象物表面に押し付けることができる。また、アルミ板根元には押付けにより発生した接触力を測定するために、半導体ひずみゲージが貼り付けられている。

図 2 にセンサシステムの概略図を示す。前述したセンサを搭載したロボットフィンガの基底部分がステッピングモータで駆動される X 軸スライダに取り付けられている。実験室内には実験環境の温度を測定するためにサーミスタが設置されている。PVDF フィルムから得られた出力信号は A/D カードを通してコンピュータに取り込まれ、解析が行われる。なお、H8 マイクロコンピュータを用いてセンサの加熱・温度制御および力制御が行われる。また、X 軸スライダは専用のコントローラを用いて制御が行われる。ただし、X 軸スライダ用のコントローラと H8 マイクロコンピュータとはデジタル I/O ポートでつながれており、互いの制御のタイミングを合わせることができる。計測の際、対象物は図 2 に示すように、左端をクリップで固定されて試料台の上に置かれる。

Fig.1 Geometry of sensor.

Fig.2 Sensor system.

センシング方法としては、始めにセンサ表面を一定温度に加熱し、続けて、温冷感および振動感計測のためにヒトの触動作を考慮した以下の 2 種類のセンシング動作を行う。

- (I) 温冷感計測：センサを対象物に接触させ、静止させる（焦電効果による出力信号の検出）
- (II) 振動感計測：対象物表面をセンサでなぞる（圧電効果による出力信号の検出）

温冷感計測のために、始めに(I)の動作を行い焦電効果による出力信号の検出を試みる。続いて(II)の動作を行い圧電効果による出力信号の検出を試みる。なお、センサの加熱方法には、実験環境の温度とセンサ表面の温度の差を一定に保つ制御方法を用いた。これにより、実験環境の温度変化に依存しない焦電効果による出力信号を得ることができる⁽⁵⁾。実験においては温度差を 10℃に設定した。また、(I)の接触動作では、ヒトの温冷感評価時の触動作調査結果に基づいた接触圧力の軌道制御⁽⁵⁾を用いた。(II)のなぞり動作では、センサの走査速度を 75mm/s、接触圧力を 1.96 kN/m²とした。なお予備調査により、これらはヒトがなぞり動作で用いる条件の範囲内であることを確認している。

4. 信号処理方法

4・1 温冷感計測に関する実験

温冷感計測に関する実験により PVDF フィルムから得られる出力波形の代表例を図 3 に示す。本計測実験では図 3 のようにピークを持つ出力波形を得ることができた。また、試料によってピークの大きさは異なっていた。

Table 2 Identification scores through touch sensation.

		Response in percent [%]					
		A	B	C	D	E	F
Stimulus	A	58.8	5.9	23.5	0	5.9	5.9
	B	0	94.1	0	0	5.9	0
	C	11.8	0	64.6	5.9	11.8	5.9
	D	0	0	5.9	76.5	17.6	0
	E	23.5	0	5.9	11.8	52.9	5.9
	F	5.9	0	0	5.9	5.9	82.3

ここで、加熱時の PVDF フィルムから得られる出力波形には圧電と焦電の両効果による成分が含まれている。したがって、本実験では焦電効果による出力信号の抽出が必要である。そこで、センサの加熱を行った場合と行わない場合の出力波形の比較を行った。センサの加熱を行わない場合はセンサ接触時に温度変化が生じないため、得られる出力波形は圧電効果のみによる成分と見なすことができる。図 3 に示した試料と同一の試料に対して、センサの加熱を行わないで同様の実験をした際に得られる出力波形を図 4 に示す。図 3 と図 4 を比較すると、センサの加熱を行わない場合の出力波形は加熱時に見られるようなピークを持たず、出力波形全体の大きさも非常に小さいことがわかる。これは全ての試料について同様であった。そこで、圧電効果による成分は無視できるほど小さく、得られた出力信号をそのまま焦電効果による出力信号と見なすこととした。

出力波形に見られるピークに着目し、温冷感評価に用いるセンサ出力の抽出を行った。得られた出力信号データから最大値 5 点の平均を求め、温冷感評価に用いるセンサ出力 V_p とした。 V_p は以下の式で与えられる。

$$V_p = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 V_{\max}(k) \quad (1)$$

ここで、 $V_{\max}(k)$ は計測により得られた全ての出力信号データを大きいほうから並べた際、先頭から k 番目のデータを示す。

4・2 振動感計測に関する実験

図 5 に振動感計測に関する実験により得られる出力波形の代表例を示す。本実験では、図 5 に見られるように、低周波数成分の大きなゆがみの上に高周波数成分の信号が重なった出力波形を得ることができた。また全ての試料について、類似した大きなゆがみの成分は確認されたが、高周波数成分の特徴は試料によって様々であった。

ここでも温冷感計測に関する実験と同様に、加熱時の PVDF フィルムから得られる出力波形には圧電と焦電の両効果による成分が含まれている。本実験において計測目標とする情報は振動に関する情報である。したがって、圧電効果による出力成分に着目する必要がある。図 5 に示した試料と同一の試料に対して、センサの加熱を行わないで同

Fig.3 Typical output signals by experiment through contact (motion I)).

Fig.4 Output signals by experiment through contact without heating the sensor on the sample shown in Fig.3.

様の実験をした際に得られる出力波形を図 6 に示す。図 6 より、加熱を行わない場合の出力波形は大きなゆがみ成分は見られないが、高周波数成分の特徴が図 5 の出力波形と類似しているように見える。そこで、図 5、6 の出力波形に対しパワースペクトル密度を求め、高周波数成分についての比較を行った。求められたパワースペクトル密度を図 7 に示す。図 7(a) が図 5 に示したセンサを加熱した場合に得られた出力波形から求めたパワースペクトル密度、図 7(b) が図 6 に示したセンサの加熱を行わない場合に得られた出力波形から求めたパワースペクトル密度を示す。図 7 より、高周波数成分は定性的にも定量的にも類似していることがわかる。このような高周波数成分の類似は全ての試料について確認することができた。

加熱を行った場合の出力波形に見られる大きなゆがみ成分は焦電効果による出力成分であると考えられる。温冷感計測に関する実験により、センサがなぞり始める前にすでにセンサ表面は対象物表面と数秒間接触を続けている。これによりセンサがなぞり始める前の対象物表面の温度分布は、センサと接触している面は実験環境の温度より高い温度で、遠くなるに連れて実験環境の温度と等しい状態になっているといえる。したがってセンサが対象物表面をなぞることにより常にセンサの熱は対象物に奪われる。その結果、PVDF フィルムに焦電効果が生じ、出力波形に緩やかなカーブの出力成分が含まれると考えられる。以上より、焦電効果による出力成分は大きなゆがみ成分のみであり、その他は圧電効果による出力成分と考えることとした。

Fig.5 Typical output signals by experiment through slide (motion II)).

Fig.6 Output signals by experiment through slide without heating the sensor on the same sample shown in Fig.5.

Fig.7 Power spectrum densities calculated from output signals by experiment through slide, (a): with heating (output shown in Fig.5), (b): without heating (output shown in Fig.6).

各出力波形の高周波数成分の特徴に着目し、信号処理を通し振動感評価に用いるセンサ出力を求めた。特に、センサ出力を求めるためにヒトの皮膚感覚受容器の特性を考慮した信号処理方法を用いた。皮膚感覚受容器の中でもマイスナー小体およびパチニ小体は速い振動刺激に応答する⁽⁷⁾。マイスナー小体は100Hz以下の振動刺激に対して敏感に働き、パチニ小体は100～500Hzの振動刺激に対して敏感に働く。また、これまでの研究において、田中はPVDFフィルムを用いたセンサで対象物表面をなぞることにより得られる出力信号について、100～500Hzのパワースペクトル密度の分布比が特定の触覚感性量と強い相関関係を持つことを明らかにしている⁽⁴⁾。以上を鑑み、各試料について得られた出力信号データから20～100Hzのパワースペクトル密度の総和を求め、センサ出力 P_m とした。さらに、100～2000Hzのパワースペクトル密度の総和に対する100～500Hzのパワースペクトル密度の総和の割合を求め、センサ出力 Rs とした。 P_m 、 Rs は次式により与えられる。

$$P_m = \sum_{f=20}^{100} P(f) \quad (2)$$

$$Rs = \frac{S_a}{S_b}, \quad S_a = \sum_{f=100}^{500} P(f), \quad S_b = \sum_{f=100}^{2000} P(f) \quad (3)$$

ここで、 $P(f)$ は周波数 f [Hz]におけるパワースペクトル密度を表す。ただし、周波数解析に用いた出力信号データはセンサが一定速度で対象物表面上を移動する0.2～1.2 sに得られたデータである。

5. 実験結果および考察

ヒトの触覚による判別試験を行った6種類の布に対して、製作したセンサシステムによる計測実験を行った。なお、計測は各試料につき5回行った。

得られたセンサ出力を分布図で示したものを図8に示す。図8(a)が P_m と Rs の関係、図8(b)が P_m と V_p の関係を示す。(a)、(b)のどちらの図においてもセンサ出力は試料ごとにまとまって分布していることがわかる。また、図8に示したセンサ出力の分布図と表2で示したヒトの触覚による判別試験の結果とを比較すると、得られたセンサ出力結果はヒトの触覚による判別試験の結果と似た傾向を示していることがわかる。さらに、各試料の手触り感と図8を比較すると、 P_m および Rs が小さいほど厚みがあり、やわらかくなめらかな布であることがわかった。また、 V_p が小さいほど温かいと感じる布であることがわかった。

以上より、得られたセンサ出力は試料ごとに固有の特徴を有しており、ヒトの手触り感と関連性を有することが確認された。

6. 結 言

本研究では、手触り感計測用センサシステムの開発を目的とし、PVDF フィルムの圧電効果と焦電効果を利用した能動触覚センサシステムの開発を行った。

センサシステムはPVDFフィルムを用いたセンサとヒトの触動作を考慮した能動センシング駆動機構から構成された。センサ表面を一定温度に加熱し、始めに温冷感計測用にセンサを対象物に接触させる動作を行い、焦電効果による出力信号を検出する。続いて振動感計測用に対象物表面をなぞる動作を行い、圧電効果による出力信号を検出する。それぞれのセンシング動作について検討し、得られた出力

Fig. 8 Distribution of sensor outputs, (a): Rs vs. P_m , (b): V_p vs. P_m
(■: A, ◆: B, ▲: C, ⊙: D, □: E, ○: F)

データから信号処理を通し特徴量を求め、評価に用いるセンサ出力として提案した。あらかじめヒトの触覚による判別試験を行った6種類の布に対し、製作したセンサシステムを用いて計測実験を行った結果、得られたセンサ出力結果は手触り感と関連性を有することが確認され、製作したセンサシステムによる振動感および温冷感の情報取得の可能性が明らかになった。

今後は、様々な手触り感について官能評価を行い、本研究で開発したセンサシステムによる計測結果と比較・検討を行い、種々の触覚感性量の定量評価および総合評価について研究を行う予定である。

文 献

- (1) M.H. Lee, H.R. Nicholls, Tactile sensing for mechatronics - a state of the art survey, *Mechatronics*, Vol. 9, No. 1 (1999), pp. 1-31.
- (2) M. Leineweber, G. Pelz, M. Schmidt, H. Kappert, G. Zimmer, New tactile sensor chip with silicone rubber cover, *Sensor and Actuators A*, Vol. 84 (2000), pp. 236-245.
- (3) M. Ohka, Y. Mitsuya, I. Higashioka, H. Kabeshita, An experimental optical three-axis tactile sensor for micro-robots, *Robotica*, Vol. 23 (2005), pp. 457-465.
- (4) M. Tanaka, Measurement and valuation of touch sensation (Texture measurement on underclothes), *JSAEM Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 12 (2002), pp. 53-58.

- (5) Y. Tanaka, M. Tanaka, S. Chonan, Measurement and valuation of tactile warmth using a PVDF sensor, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, in press.
- (6) S. Kawabata, *The Standardization and Analysis of Hand Evaluation (Second Edition)*, (1980), The Hand Evaluation and Standardization Committee, The Textile Machinery Society of Japan.
- (7) G.M. Shepherd, *Neurobiology (Third Edition)*, (1994), pp. 272-273, Oxford University Press.
- (8) J. Dargashi, Piezoelectric and pyroelectric transient signal analysis for detection of the temperature of a contact object for robotic tactile sensing, *Sensors and Actuators A*, Vol. 71 (1998), pp. 89-97.
- (9) S.J. Lederman, R.L. Klatzky, The hand as a perceptual system, In: *The Psychobiology of the Hand*, edited by K.J. Connolly, (1998), pp. 16-35, Mac Keith Press.