

内部に触覚受容器を持つ人間型柔軟指

多田 泰徳^{*1} 細田 耕^{*1*2} 浅田 稔^{*1*2}

Anthropomorphic Soft Fingertip with Tactile Receptors in the Skin

Yasunori Tada^{*1}, Koh Hosoda^{*1*2} and Minoru Asada^{*1*2}

The manipulation ability of robotic fingers is too less than the human's ability. One of the reasons is that the sensing ability of the robotic finger is too poor. Tactile sensing is useful for obtaining the information about the object and contact conditions. To improve the manipulation ability of robotic fingers, this paper proposes a design of an anthropomorphic soft fingertip with distributed tactile receptors. The fingertip consists of two silicon rubber layers of different hardness containing two kinds of receptors, strain gauges and PVDF (polyvinylidene fluoride) films. The structure of the fingertip is similar to that of a human's; it consists of a bone, an inner, an outer layer, and randomly distributed receptors inside. Experimental results demonstrate the sensing ability of the fingertip: it can discriminate five different materials by pushing and rubbing the objects.

Key Words: anthropomorphic finger, soft finger, tactile sensor, material discrimination, distributed receptors

1. はじめに

人間は様々な物体を器用に適応的に操ることができる。ロボットハンドにそのような器用さや適応性を持たせるためにたくさんの研究が行われてきた [1] が、その能力は人間のそれに比べてまだ圧倒的に低いと言わざるをえない。この理由の一つに既存のロボットハンドのセンシング能力が小さいということが挙げられる。既存の触覚センサは接触位置および接触力、滑りやテクスチャなど、それぞれの触感に特化して作られており、それらを組み合わせて、人間のように複数の触感を検出できる小型のロボットハンドを作ることが難しいためである。Taddeucci et al. [2] は分布型触覚センサ、振動センサ、温度センサを持ったロボット指を開発しているが、センサ素子が少なく、人間と同じ程度の操作能力を実現するためのセンシング能力はない。人間と同等のセンシング能力を持たせるには、触覚の分解能を高くし、微小変位の振動から大変形まで観測できるセンサ素子を使い、人間の皮膚のような柔軟性を実現する必要がある [3]。特に人間の皮膚は柔軟で硬さの異なる皮膚の中に、異なる種類の触覚受容器が異なる深さに多数存在しており、この構造によって高いセンシング能力が得られるのではないかと考えられる。

そこで本論文では、複数種類のセンサ素子を様々な深さ、方向に埋めることによってセンシング能力を高めた人間型柔軟指を提案する。ここで人間型と呼ぶのは2つの理由からである。一つはセンシング能力の向上を期待して、柔軟指の構造が人間の指に似ているということであり、もう一つは、人間が多数の触覚器官の正確な位置を自分自身が知らないにもかかわらず、様々な動作を通して学習することで器用な動作が可能になるのと同じように、センサ素子の配置が未知でもロボットが自身の経験を通して作業が実現できることを目指しているということである。

本論文では、2章で既存の触覚センサについての調査および、人間の触覚器官についての簡単な紹介を行い、人間型柔軟指の設計について述べる。そして3章で作成した柔軟指を異なる種類の物体に押し付けたり擦ることで物体を識別し、この柔軟指が高いセンシング能力を持つことを示す。

2. 人間型柔軟指の設計

2.1 既存の触覚センサの能力と限界

既存の触覚センサは力センサのように一点にかかる力を計測するものや、分布型触覚センサのように接触部位および接触力を計測するものがある [4]。人間のように器用な動作をさせるには、接触状態についてのより多くの情報が得られた方が良く、それには分布型触覚センサが有効であると考えられる。今までに提案された分布型の触覚センサ素子として導電性感圧ゴム [5] や、光導波路型触覚センサ [6]、コンデンサアレイ [7]~[9]、LC回路センサ [10]、超音波センサ [11]、感圧抵抗センサ [12]、導電

原稿受付

^{*1}大阪大学大学院工学研究科 知能・機能創成工学専攻

^{*2}阪大フロンティア研究機構

^{*1}Dept. of Adaptive Machine Systems, Graduate School of Engineering, Osaka University

^{*2}HANDAI Frontier Research Center

性ファブリック [13], 導電性ゲル [14] といったものが研究されている。しかし, これらの触覚センサは接触位置や接触力を計測することを目的に作られており, 操りなどの器用な動作に必要な滑りや転がりを検知できるように作られていない。

また, ほとんどの触覚センサはロボット表面に取りつけてある。その理由の一つは, ロボット指が基本的に金属のような硬い材料で作られており, センサ素子をロボット指の深い位置に埋め込むことができないからである。硬いロボット指は, 操作対象の物体の位置をロボット指の姿勢から簡単に求めることができるため制御がしやすい。しかし, そのためにセンサ素子をロボット表面に取りつけるしかなく, それが既存のロボット指の触覚能力を制限する要因になっていると考えられる。

一方で, 柔軟な材料にセンサ素子を埋め込み, 滑りや摩擦係数といったマニピュレーションに必要な情報を獲得している研究もある。例えば, 柔軟な材料の異なる深さに埋めたセンサ素子の情報から, 対象物体の動く速度や, 対象物体が触覚センサにどの程度押し付けられているかを検出 [15] したもののや, 人間の指紋を模擬した凹凸を持つ柔軟な触覚センサを使って初期滑りを検出 [16] [17], 柔軟な触覚センサを対象物体に押し付けたときに発生する垂直応力と剪断応力から対象物体の摩擦係数を推定 [18] するといったものがある。これらの論文で示されているように, 柔軟なロボット指にセンサ素子を埋め込むことによって, 滑りや摩擦係数といった情報を獲得できることが分かっている。しかし, 多数のセンサ素子をロボット指に埋め込むことは難しく, そのような構造を持つロボット指の研究はあまり行われていない。著者らの知る限り, 篠田らのグループ [20] [21] が柔軟な材料にセンサ素子をランダムに分布させた人工皮膚を提案しているだけである。しかし, 彼らの研究では一つのセンサ素子の特性についてのみ研究しており, 複数のセンサ素子の信号を利用することについて言及していない。

2.2 人間の触覚に基づいた設計

ここで器用な操りを行える人間の指について考えてみる。人間の皮膚や触覚についての知見は岩村 [22] によって詳しくまとめられている。それによると皮膚は Fig. 1 のように表皮 (Epidermis), 真皮 (Dermis), 皮下組織 (Subcutis) という硬さの異なる 3 層で構成される。そして, マイスナー小体 (Meissner corpuscle), メルケル細胞 (Merkel cell), ルフィニ終末 (Ruffini ending), パチニ小体 (Pacini corpuscle) という 4 種類の触覚受容器が存在する。これらの受容器は種類によって異なる深さにあり, また外部刺激に対してそれぞれ異なる応答をすることが分かっている。この構造により, 人間は接触位置や接触力, 滑り, テクスチャなど様々な感覚を知覚することができると考えられる。そして人間はこれらの受容器からの情報を使って器用な操りを実現している。それは当然のことながら先天的にキャリブレーションされているのではなく, 自分が様々な動作を行い, その結果得られる外部刺激を学習することによって獲得していると考えられる。

ところが, 多くのロボットでは設計者がセンサ情報をキャリブレーションし, その結果をロボットのセンシングモデルとして制御系に組み込んでいる。そしてロボットを動かす際には, モデル化できなかった情報を様々な制御手法で補償することによ

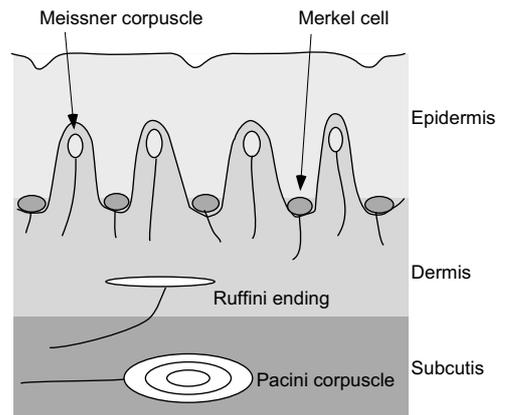


Fig. 1 A cross sectional view of the human fingertip (modified from [22])

り正確な動作を実現している。このような設計手法ではキャリブレーションに手間がかかることから, 既存の多くのロボットは硬い表面に様にセンサ素子を整列させ, 設計者がキャリブレーションをしやすくしている。ロボットに行わせるタスクが簡単なものなら, このような手法は有効である。しかし, 質量や材質, 形状が未知の対象物を操るようなタスクでは, ロボット指と物体間に発生する滑りや転がりの制御など, ロボット指と物体との相互作用を取り扱う必要がある。その結果, 従来のように硬いロボットを使い, センサ情報をキャリブレーションした制御では, モデリング誤差や外乱に対するロバスト性が欠けてしまう。

しかし, ロボット指を人間の指と同じように柔軟な素材で作る, その中に異なる種類の触覚センサ素子を様々な位置に埋め込み, さらにロボット自身が経験を通してセンシングモデルを獲得することができれば, 人間と同じように器用な動作が可能になるロボット指になると期待できる。触覚センサの柔軟性は把持の安定性を向上させ, ロボットが衝突した際の衝撃を弱めることができる。さらに硬い触覚センサよりも, より高い触覚能力を得ることが期待できる。これはセンサ素子間に存在する柔軟な素材がフィルタの役目を果たしたり, センサ素子の位置や方向によって出力信号が異なるため, たとえ同種のセンサ素子でも異なる情報を得ることができるからである。つまり, 柔軟な素材に埋め込まれたたくさんのセンサ素子は冗長性だけでなく, 従来のように一様に並べたセンサ素子を使った触覚センサでは得られない触覚能力を持つことが期待できる。そして, ロボットに学習能力を持たせることで, 従来触覚センサの設計手法よりもロバストな制御が可能になり得る。

2.3 人間型柔軟指の構造

Fig. 2 に人間型柔軟指の構造を示す。柔軟指は金属棒と, 内部層, 外部層という 2 層のシリコンゴムからなる。外部層のシリコンゴムは内部層よりも少し硬くしてある。センサ素子には PVDF フィルムと歪ゲージを用いている。PVDF フィルムは piezoelectric 効果により歪の速度に敏感であるのに対し, 歪ゲージは静的な歪を計測する。ここで, 人間の指と比較すると金属棒は骨の役割を果たし, 2 層のシリコンゴムは皮膚に相当することがわかる。また PVDF フィルムおよび歪ゲージはその応答特性

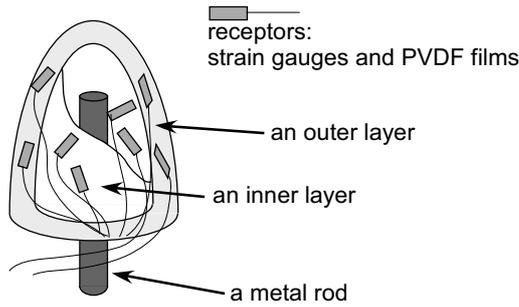


Fig. 2 A cross sectional view of the developed anthropomorphic fingertip

から、それぞれマイスナー小体、メルケル細胞に相当する。そしてこれらのセンサ素子は内部層、外部層それぞれの様々な位置、方向に埋めてある。この構造のため、設計者がセンサ素子の出力を接触力の大きさのような意味のある情報に変換することは非常に難しい。したがって、ロボットは人間が行うのと同じように、環境と相互作用しながら、センサ素子の出力を滑りや物体表面のテクスチャといった意味のある情報に結び付けるための学習をしなくてはならない。

Fig. 3 は完成した柔軟指で、直径は 25[mm]、長さは 55[mm]である。この柔軟指の内部層、外部層それぞれに 6 枚ずつの歪ゲージと PVDF フィルムが埋められており、合計で 24 枚のセンサ素子を持つ。前述の通り、各センサ素子の位置や方向は決められておらず、設計者もロボットもセンサ素子の配置を事前には知ることはできない。

センサ素子が異なる位置、方向に埋められていることで、同種のセンサ素子であっても、ある接触状態に対し、それぞれが異なる応答を示すようになると期待できる。例えば、柔軟指の表面近くにある歪ゲージは、柔軟指と物体間の局所的な静的歪を計測するが、内部層の深い位置にある歪ゲージは柔軟指全体にかかる力を計測する。また、PVDF フィルムは歪の速度に反応し、静的な歪は計測できないという特性があり、さらに PVDF フィルム間のシリコンゴムにより振動が減衰することから、同じ振動に対して異なる振動を検出する。このようにそれぞれのセンサ素子が異なる応答をするために人間型柔軟指のセンシング能力が高いものになると期待できる。

2.4 人間型柔軟指の作成

Fig. 4 に柔軟指の作成手順を示す。まず、柔軟指の型に金属棒、歪ゲージ、PVDF フィルムを入れる。そこに液体のシリコンゴムを流し込む。このとき、液体のシリコンゴムに含まれる気泡は減圧することであらかじめ消泡しておく。そして型ごと加熱しシリコンゴムを固化させる。この固化した部分が柔軟指の内部層になる。さらに固化した内部層と残りの歪ゲージ、PVDF フィルムを少し大きな型に入れ、最初の手順と同様に液体のシリコンゴムを流し込み、加熱することで固化させる。これにより 2 層構造の人間型柔軟指となる。

3. 人間型柔軟指のセンシング能力

作成した柔軟指を Fig. 5 に示す 3 自由度ロボット指に取りつけた。そして柔軟指を紙、コルク、ビニル、2 種類の木材に対

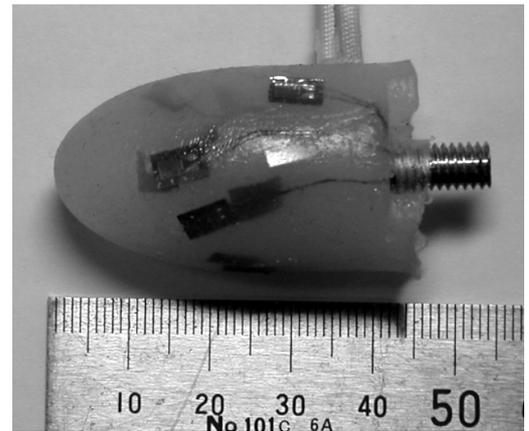


Fig. 3 A photo of the completed fingertip

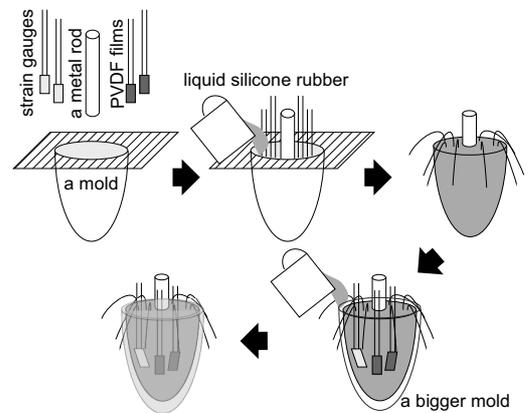


Fig. 4 A procedure to make the anthropomorphic fingertip

し、押し付けおよび擦る動作を行ったときのセンサ素子の信号から、これらの物体を識別することで柔軟指のセンシング能力を示す。まず、これから行う実験における触覚センサの出力例を示し、次に歪ゲージのみ、および PVDF フィルムのみのセンサ出力から物体識別を試み、最後に歪ゲージと PVDF フィルム両方の出力を用いた物体識別を試みる。そしてこれらの実験により、1 つの触覚素子を使った場合と、複数の触覚素子を使った場合で物体の識別能力に差が見られることを示す。

実験では柔軟指を一定力で物体に押し付け、続いて決められた軌道に沿って物体を擦るといった動作を行う。この動作を行ったときのセンサ出力例を Fig. 6 に示す。柔軟指は実験開始時には物体に接触しておらず、約 0.3[s] の時に物体に接触し、約 5.9[s] まで一定の力で押し付けている。その後、柔軟指はあらかじめ決められた軌道に沿って約 9.4[s] まで物体を擦っている。この図から分かるように歪ゲージは物体に接触している間はずっと出力があるのに対し、PVDF フィルムは接触した瞬間や擦っているときに振動が見られるが、停止しているときには振動が見られない。また、外部層の PVDF フィルムは擦っているときに比較的大きな振動が見られるのに対し、内部層の PVDF フィルムはごく小さな振動しか見られない。なお、別の予備実験により、柔軟指が物体に接触する前の外部層の PVDF フィルムの振動はロボット指を動かしたことによる振動であることを確認し

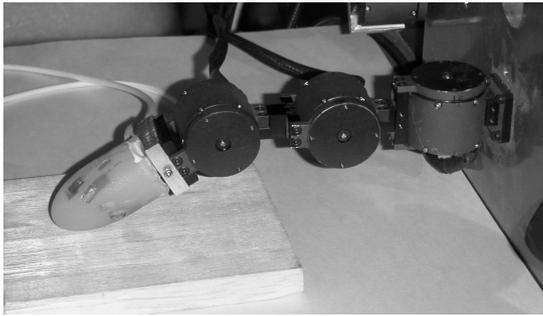


Fig. 5 A robot finger equipped with the anthropomorphic fingertip

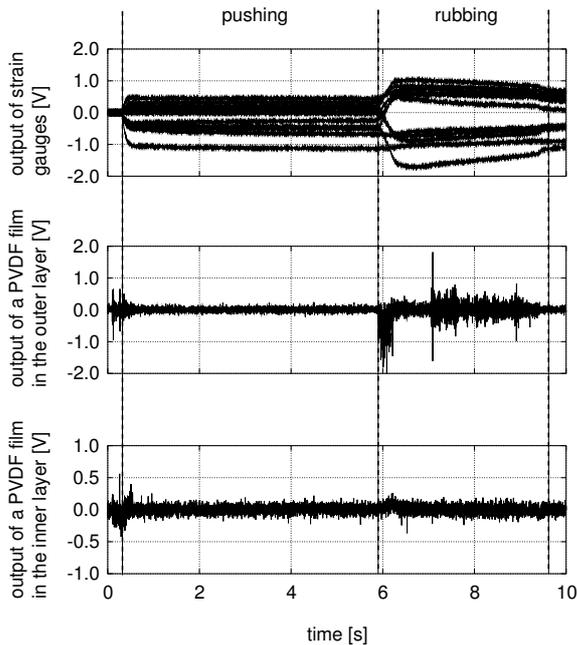


Fig. 6 Outputs of receptors through pushing and rubbing the object

ている。

3.1 押し付けによる物体識別

Nakamura and Shinoda [18] は柔軟な触覚センサを物体に接触させたときの垂直応力と剪断応力の大きさの違いにより、物体の摩擦係数を推定できることを報告している。つまり、摩擦係数の異なる物体に柔軟な触覚センサを押し付ければ発生する応力は物体ごとに異なり、その応力を柔軟な触覚センサで観測することで物体を識別することが可能である。そこで、柔軟指を物体に押し付けたときの歪ゲージの出力から物体を識別し、柔軟指に埋められた歪ゲージのセンシング能力を示す。

先に示した5つの物体に対して、Fig. 6の動作をそれぞれ50回ずつ行い、図の約1~6[s]に示した一定力で押し付けているときの歪ゲージ出力を比較する。押し付け力を一定にするため、内部層に埋められたある1枚の歪ゲージの出力が0.15[V]になるようにフィードバック制御を行った。このときの押し付け力は約1.0[N]である。ただし、歪ゲージの出力と押し付け力の大きさの関係をキャリブレーションしていないのでこの値は大まか

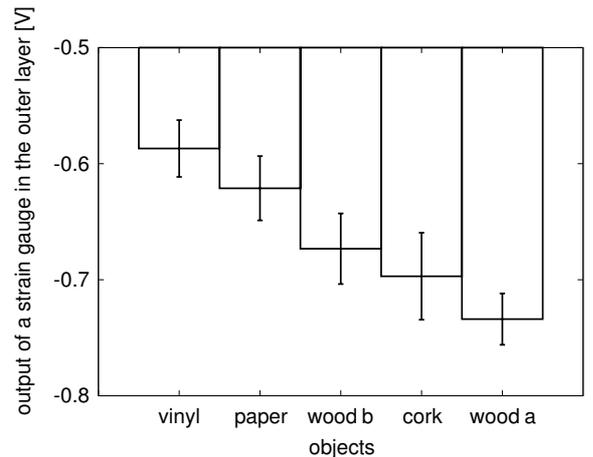


Fig. 7 Results of pushing experiments

な値である。そして、押し付けているときの外部層に埋められたある歪ゲージ出力の平均と標準偏差を比較した結果を Fig. 7に示す。この図から分かるように物体によって歪ゲージの出力に傾向の違いが見られる。しかし、各物体の標準偏差に重なりがあるため、歪ゲージの出力だけでは大まかな物体の分類のみが可能である。標準偏差が大きくなるのは、試行ごとに接触位置が微妙に変化し、接触条件が異なるためだと考えられる。

3.2 擦りによる物体識別

次に、物体を擦ったときの PVDF フィルムの出力から物体を識別し、柔軟指に埋められた PVDF フィルムのセンシング能力を示す。ここで用いるセンサデータは、前節で柔軟指に行わせた動作のうち、約6~9[s]に示した物体を擦っているときの PVDF フィルム出力である。なお、擦っているときの柔軟指の押し付け力は制御せず、あらかじめ決めた軌道に沿ってロボット指を位置制御することで擦り動作を実現している。力制御を行わないのは、擦ったときのスティックスリップや擦りにより歪ゲージ出力が変化し、押し付け力を正確に一定に保つことが難しいためである。そして内部層と外部層に埋められた2枚の PVDF フィルム出力の標準偏差を全試行分プロットした図を Fig. 8, 9に示す。Fig. 8は横軸に外部層 No.3の PVDF フィルム出力の標準偏差を示している。別の PVDF フィルムを比較した例として、Fig. 9は外部層 No.4と内部層 No.8の PVDF フィルム出力の標準偏差を示している。図中の記号はそれぞれコルク、紙、ビニル、木材 a、木材 bを擦ったときの標準偏差である。楕円は各物体の標準偏差の分布の分散楕円を示す。

これらの図から、物体を擦ったときの各 PVDF フィルムの出力特性が異なることがわかる。これは接触点で発生した振動がシリコンゴムを伝わるときに、振動周波数によって減衰量が異なったり、センサ素子の位置や方向がそれぞれ異なるために検出しやすい振動に差があるためと考えられる。そして各 PVDF フィルムの出力に差があるために、Fig. 8では2つのセンサ素子の出力を組み合わせることで、紙と木材 a 以外の分散楕円は重なりがなくなり、コルク、ビニル、木材 b と紙もしくは木材 a の4種類の物体を識別することができる。別のセンサ素子の組

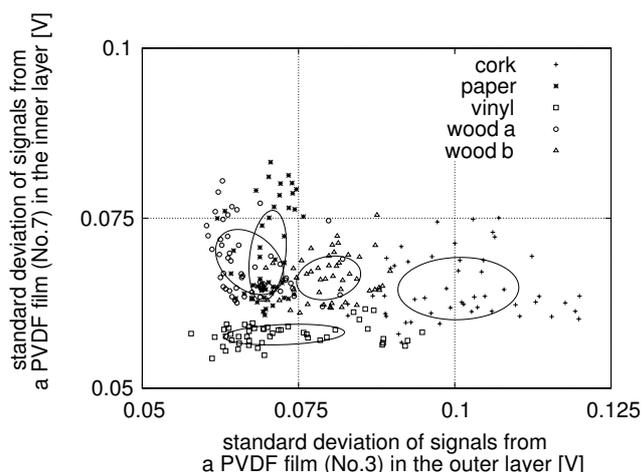


Fig. 8 Results of rubbing experiments —comparing No.3 with No.7

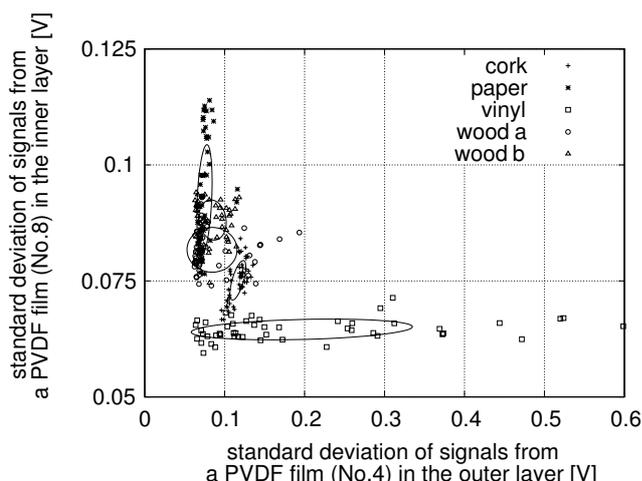


Fig. 9 Results of rubbing experiments —comparing No.4 with No.8

み合わせを示した Fig. 9 では分散楕円の重なりが大きいが、ビニル、コルクとそれ以外という識別ができる。ここで注目すべきことは、1つのセンサ素子だけでは識別できる物体が少ないが、複数のセンサ素子を組み合わせることで識別できる物体が増えるということである。例えば Fig. 8 の外部層の PVDF フィルムだけではコルクとそれ以外しか識別できず、また Fig. 9 の外部層の PVDF フィルムだけでは全く識別ができないが、どちら図でも内部層の PVDF フィルムを用いることで識別可能な物体が増えている。

ところで、前述のようにロボット指は擦ったときのスティックスリップや擦りによる歪ゲージ出力の変化によって、押し付け力を正確に制御することが難しいため力制御を行っていない。このため、センサ素子にかかる力が一定にならず、試行ごとのセンサ素子出力に大きな分散が生じていると考えられる。もしロボットを正確に力制御することが可能なら、試行ごとにセンサ素子にかかる力が異なるということがなくなるため、各試行におけるセンサ素子出力の分散はもっと小さくなり、1つのセンサ素子で物体を識別できるはずである。しかし、そのような正確な制御が不可能な場合でも、本実験のように、複数のセンサ素子を使用すれば物体を識別できる場合がある。本研究で用いる柔軟指のように、センサ情報と押し付け力の関係がキャリブレーションされておらず、ロボット指が正確な位置、力制御を行えない場合にはこの特徴は非常に重要である。

3.3 押し付けと擦りを組み合わせた物体識別

物体を擦るという動作を行うには、当然、押し付けという動作も行うことになる。したがって、柔軟指を物体に押し付けたとき、擦ったときの両方の情報を使って物体識別することが考えられる。これは、前節で示した異なる特性を持つセンサ素子の出力を組み合わせることと同じであり、触覚能力の向上が期待できる。

Fig. 6 で示した動作における一定力で押し付けたときの外部層の歪ゲージ出力の平均を垂直軸に、擦ったときの外部層の No.3 および内部層の No.7 の PVDF フィルム出力の標準偏差を水平軸にプロットした図が Fig. 10 である。図中の楕円体は各物体

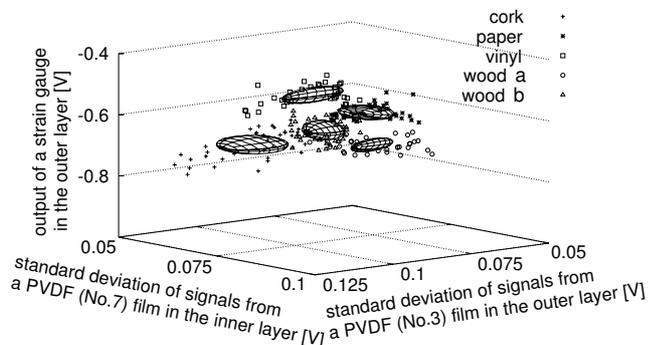


Fig. 10 Results of pushing and rubbing experiments

についてプロットした点の分散楕円を立体で表したものである。この図より、楕円体に重なりが生じていないことから本実験では5つの物体を識別することができた。

前節までの実験では1種類の触覚センサを使って物体を識別しようとしていた。しかし物体を擦るような動作では、それぞれの触覚センサの出力に物体識別に利用できる情報が含まれるはずである。そして、本実験で示したように異なる特性を持ったセンサ素子を組み合わせることで柔軟指のセンシング能力が向上する。なお、本実験で用いられたのと同様の構造の指を複数作成したが、それぞれ本実験で示したのと同様の結果が得られた。

4. おわりに

本論文ではセンシング能力の高いロボット指として人間型柔軟指を提案した。人間の指のように柔軟指は硬さの異なる2層のシリコンゴムで作られており、その中に触覚受容器の役割をする PVDF フィルム、歪ゲージが様々な位置、方向に埋められている。そして、この柔軟指を物体に押し付けたり、擦ることで得られる複数のセンサ素子の出力から、コルク、紙、ビニル、2種類の木材を識別し、柔軟指の触覚能力を示した。

センサ素子の配置が一様ではない上に柔軟であるため、設計者はセンサ素子の出力を柔軟指に起こっている物理現象と明示

的に結び付けることができない。したがって、ロボットが自分自身の経験を通して、センサ素子が出力する信号の意味を理解しなくてはならない。本論文の実験では、センサ素子の出力をどのように処理すべきか設計者が与えることで物体の分類を行った。しかしこのような分類は本来、ロボットが行うタスクに最適な分類方法をロボット自身の経験により獲得すべきである。例えば、ロボットに物体把持や操りといったタスクを行わせるときに、物体ごとに制御量を変化させなくとも、数種類の制御パターンでタスクの実行が可能なら各物体で分類するのではなく、制御パターンごとに分類すれば良いということをロボット自身が獲得すべきである。

著者らは人間型柔軟指で上述のような学習を研究することで、人間が獲得するマニピュレーションの発達プロセスを洞察するのに役立つと期待している。人間の指には数種類の触覚受容器が分布しており、触覚受容器で得られた情報によって複雑なタスクでも実行することができる。そしてこれらの触覚受容器からの情報は自分自身の経験によってタスクと結び付けているからである。

謝辞 本研究は文部科学省 21 世紀型革新的先端ライフサイエンス技術開発プロジェクト、およびカシオ科学振興財団の援助を受けた。

参 考 文 献

- [1] A. Bicchi and V. Kumar: "Robotics grasping and contact: A review", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.348-353, 2000.
- [2] D. Taddeucci, C. Laschi, R. Lazzarini, R. Magni, P. Dario, and A. Starita: "An approach to integrated tactile perception", Proc. of 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3100-3105, 1997.
- [3] 篠田: "皮膚の力学的構造に隠れている知能", システム制御情報学会誌, vol.46, No.1, pp.28-34, 2002.
- [4] M. H. Lee and H. R. Nicholls. "Tactile sensing for mechatronics - a state of the art survey -", Mechatronics, vol.9, pp.1-31, 1999.
- [5] M. Shimojo, M. Ishikawa and K. Kanayama: "A flexible high resolution tactile imager with video signal output", Proc. of 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.384-391, 1991.
- [6] 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.
- [7] R. S. Fearing: "Tactile sensing mechanisms", The International Journal of Robotics Research, vol.9, no.3, pp.3-23, 1990.
- [8] D. Johnston, P. Zhang, J. Hollerbach and S. Jacobsen: "A full tactile sensing suite for dexterous robot hands and use in contact force control", Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3222-3227, 1996.
- [9] M. Hakozaki and H. Shinoda: "Digital tactile sensing elements communicating through conductive skin layers", Proc. of the 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3813-3817, 2002.
- [10] M. Nilsson: "Tactile sensors and other distributed sensors with minimal wiring complexity", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.5, no.3, pp.253-257, 2000.
- [11] B. L. Hutchings, A. R. Grahn and R. J. Petersen: "Multiple-layer cross-field ultrasonic tactile sensor", Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2522-2528, 1994.
- [12] R. Lazzarini, R. Magni and P. Dario: "A tactile array sensor layered in an artificial skin", Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol.3, pp.114-119, 1995.
- [13] 稲葉, 星野, 井上: "導電性ファブリックを用いた全身被覆型触覚センサスーツ", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.1, pp.80-86, 1998.
- [14] R. Tajima, S. Kagami, M. Inaba and H. Inoue: "Development of soft and distributed tactile sensors and the application to a humanoid robot", Advanced Robotics, vol.16, no.4, pp.381-397, 2002.
- [15] H. Shinoda, M. Uehara and S. Ando: "A tactile sensor using three-dimensional structure", Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.435-441, 1993.
- [16] Y. Yamada, T. Maeno, I. Fujimoto, T. Morizono and Y. Umetani: "Identification of incipient slip phenomena based on the circuit output signals of PVDF film strips embedded in artificial finger ridges", Proc. of the SICE Annual Conference 2002, pp.3272-3277, 2002.
- [17] 山田, 前野, 山田: "指紋により接触/非接触・固着/滑り分布を検出する弾性ロボットフィンガの開発", 日本機械学会論文集 C 編, vol.70, no.690, pp.560-566, 2004.
- [18] K. Nakamura and H. Shinoda: "A tactile sensor instantaneously evaluating friction coefficients", Proc. of the 11th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, pp.1430-1433, 2001.
- [19] K. Yamada, K. Goto, Y. Nakajima, N. Koshida and H. Shinoda: "Wire-free tactile sensing element based on optical connection", Proc. of the 19th Sensor Symposium, pp.433-436, 2002.
- [20] M. Hakozaki, K. Nakamura and H. Shinoda: "Telemetric artificial skin for soft robot", Proc. of TRANSDUCERS '99, pp.844-847, 1999.
- [21] H. Shinoda and H. Oasa: "Wireless tactile sensing element using stress-sensitive resonator", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.5, no.3, pp.258-265, 2000.
- [22] 岩村: "ヒト触覚受容器の構造と特性", 日本ロボット学会誌, vol.2, No.5, pp.54-60, 1984.

多田 泰徳 (Yasunori Tada)

2002 年大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻博士後期課程単位取得退学。同年、同大学大学院工学研究科産学官連携研究員。2004 年同大学大学院工学研究科特任助手となり現在に至る。分布型触覚センサを持つ柔軟指の研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)

細田 耕 (Koh Hosoda)

1993 年京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了。同年大阪大学工学部助手。1997 年同大学大学院工学研究科助教授となり現在に至る。この間 1998 年から 1 年間イスチューリヒ大学客員教授。動的二足歩行、柔軟指による操り、共同注意の創発などロボット知能の工学的実現に関する研究に従事。博士 (工学)。IEEE, 計測自動制御学会, 機械学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)

浅田 稔 (Minoru Asada)

1982 年大阪大学大学院基礎工学研究科後期課程修了。同年、大阪大学基礎工学部助手。1989 年大阪大学工学部助教授。1995 年同教授となり現在に至る。この間、1986 年から 1 年間米国メリーランド大学客員研究員。日本ロボット学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会, 人工知能学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, 日本赤ちゃん学会, IEEE R&A, CS, SMC societies などの会員。NPO ロボカップ日本委員会会長, ロボカップ国際委員会副会長。(日本ロボット学会正会員)