内部にセンサ素子を持つ人間型柔軟指の開発とそれを利用した適応的操りの実現

大阪大学大学院工学研究科
知能機能創成工学専攻

多田 泰徳

2005 年 10 月

主査　細田 耕　　助教授
副査　石黒 浩　　教授
　　菅沼 克昭　教授
　　浅田 稔　　教授

概要

人間が行う器用な把握や操作をロボットにも行わせようと，今までたくさんの研究が行われてきた．しかし，人間の持つ器用さに比べるとロボットハンドのそれは圧倒的に劣ると言わざるを得ない．その理由の一つとして，既存のロボットハンドは制御に用いているセンサ情報が少ないということがあげられる．例えば，人間が物体を掴むときには触覚だけでなく，視覚からも物体や接触状態についての情報を用いることで適応的に物体を掴んでいると考えられる．対照的に従来のロボットハンドの多くは，あらかじめ用意された実験環境のモデルとわずかなセンサ情報を使って制御している．そのため，様々な情報を利用する人間に比べて能力が劣っていると考えられる．

そこで本研究では，ロボットハンドに人間のような器用な動作を行わせることを目的とし，それを実現するための方法を提案する．前述のように人間は視覚と指先感覚によって，物体の特徴認識や把持状態の知覚を行っている．しかし，同様のことをロボットハンドに行わせようとしてもその指先感覚が劣るために実現することができない．したがって，ロボットハンドのセンシング能力を向上させる必要がある．本研究では人間の触覚器官の構造を参考にし，2 層のシリコンゴム内部に，2 種類の触覚センサ素子を様々な位置や方向に配置した人間型柔軟指を提案する．このような構造にすることで，同じ種類のセンサ素子であってもそれぞれ異なる応答特性を持つようになり，それによってセンシング能力が向上すると考えられる．そして，作製した柔軟指のセンシング能力を示すためにテクスチャの異なる物体識別実験を行い，5 種類の物体を識別できることを示す．

ところで，器用な動作を行わせるには触覚センサだけではなく，視覚センサなども利用し，物体やその接触状態についての情報を統合して制御する必要がある．しかし，柔軟指のセンサ素子の配置は設計者が把握できないため，その出力とほかのセンサ出力の関係をキャリブレーションすることは難しい．そこでロボットに何らかのタスクを行いながら，触覚センサと視覚センサの関係を獲得させる方法を提案する．本研究では物体の把持に重要な感覚である滑りに注目し，これを触覚センサと視覚センサで捉えることでそれらの関係をニューラルネットワークに学習させる．そしてニューラルネットワークを利用した把持力制御実験を行い，触覚センサを用いる利点を示す．

目 次

図 目 次

表 目 次

第1章　序論

1.1　研究背景と目的

ロボットハンドで物体を器用に把握したり操作する研究は今までたくさん行われてきた [1]．しかし，人間の持つ器用さに比べるとロボットハンドのそれは圧倒的に劣ると言わざるを得ない．その理由の一つとして，既存のロボットハンドは制御に用いているセンサ情報が少ないということがあげられる．例えば，人間が物体を掴むときには視覚から物体の形状のほか，滑りやすさなど表面状態を接触前に予想し，さらに接触してからは接触力だけでなく，対象物の柔軟性や滑りなどを知覚し，それらの情報を用いることで適応的に物体を掴んでいると考えられる．対照的に従来のロボットハンドの多くは，あらかじめ用意された実験環境のモデルを用い，力覚センサから得られる接触力などわずかなセンサ情報を使って制御している．そのため，様々な情報を利用する人間に比べて能力が劣っていると考えられる．

そこで本研究では，ロボットハンドに人間のような器用な動作を行わせることを目的とし，それを実現するための方法を提案する．前述のように人間は視覚と指先感覚によって，物体の特徴認識や把持状態の知覚を行っている．同様に，ロボットハンドと視覚センサを組み合わせ，物体の形状などを認識することができる．しかし，従来のロボットハンドに搭載されている指先感覚を検出するセンサは，力覚センサや滑りセンサがほとんどで，テクスチャなど物体の様々な特徴を検出できるセンサは用いられていない．したがって，ロボットハンドに器用な動作を行わせるためには，まず，ロボットハンドの指先感覚を向上させる必要がある．ロボットハンドの指先感覚を向上させるには，人間のように触覚の分解能を高くし，微小変位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 [2] と考えられる．そこで，まず人間の触覚器官と既存の触覚センサの構造を比較し，触覚センサの構造を変えることでセンシング能力を改善できる可能性があることを示す．次に，そのような触覚センサを利用する場合に起こるセンサキャリブレーションの問題を示し，それを解決する一つの方法を提示する．

1.2　触覚センサの構造によるセンシング能力の違い

人間の触覚器官と既存の触覚センサの物理的構造を比較してみると，まず，人間は柔軟な皮膚の内部に異なる応答特性を持つ触覚受容器が異なる深さに多数配置されている [3]．また表皮，真皮，皮下組織で組織の硬さが違うことと，皮膚は平面ではなく凹凸があるために外力に対して応力集中が起こる．そして，応力集中する部分に触覚受容器が配置されており，皮膚の変形を敏感に検出できる [4]．このような触覚器官の構造を持つために，人間は高いセンシング能力を持っていると考えられる．それに対し，多くの触覚センサはロボットフィンガの核となる硬い部材表面に一様にセンサ素子を貼り付け，それを柔軟な素材で覆っている．触覚センサがこのような構造になっている理由は2つ考えられる．一つは設計者にとって硬い部材表面にセンサ素子を一様に貼り付けるのは簡単だが，柔軟な素材内部に一様に配置することは難しいという触覚センサの製作上の理由である．そしてもう一つの理由は，センサ素子を一様に配置することで，センサ信号のキャリブレーションを容易にするということである．

このような単純な構造を持った触覚センサは，接触力や接触位置といった単純な情報の検出に特化しており，対象物体のテクスチャやぬめり感など様々な触覚情報を同時に得ることができない．これが既存の触覚センサのセンシング能力が低い一つの原因と考えられる．したがって，触覚センサの構造を人間の触覚器官の構造に近づけることで，センシング能力を向上させられると期待できる．

1.3　複数種類のセンサを用いた接触状態の把握

器用な動作を行わせるためには，触覚センサを改良して指先感覚を向上させるだけでなく，視覚センサなどから物体やその把持状態に関する情報を集め，それらを統合して制御に用いる必要がある．各センサ情報を統合するために，多くのロボットシステムでは，各センサ出力を設計者が定めた座標系にキャリブレーションし，その座標系上で制御器を設計している．この方法は，既存の触覚センサのように単純な構造ならばセンサ素子の出力を設計者が理解しやすく，キャリブレーションすることは難しいことではない．ところが，人間の触覚器官の構造を模倣した触覚センサ，すなわち，柔軟性があり，多数のセンサ素子が異なる深さに配置された触覚センサは，ある接触状態に対するセンサ素子の出力が複雑になり，設計者がキャリブレーションすることが難しくなる．

人間がどのように知覚器官の出力信号を物体の認識や接触状態に結び付けているかについて考えてみると，人間の持つ知覚器官からの信号は先天的にキャリブレーションされているのではなく，自分自身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

ことで，知覚の信号と刺激の関係を獲得していると考えられる．そして，人間は様々な接触状態を認識し，それに適応して器用な動作を行っている．したがってロボットシステムにおいても，触覚センサや視覚センサを設計者がキャリブレーションするのではなく，ロボットが何らかのタスクを行いながら，各センサの出力する信号の意味を獲得することが可能であると考えられる．

1.4　本論文の構成

本研究では，ロボットハンドに器用な動作を行わせることを目指している．それにはロボットハンドの指先感覚を向上させる必要があることから，人間の触覚器官を参考にした柔軟指を提案する．そして柔軟指と視覚センサを用いた物体の操りの方法を提案する．

本論文の構成を以下に示す．第 2 章では分布型触覚センサの従来研究について概観する．現在研究されている分布型触覚センサはおもに接触位置や接触力，そして滑りを観測している．そこで観測の目的ごとに，どのような触覚センサが提案されているかを紹介する．またこれらの目的以外に，触覚センサを用いて物体を識別したり，摩擦係数を推定する研究についても紹介する．

第 3 章では，まず，本研究で用いる人間型柔軟指を提案する．柔軟指は 2 層のシリコンゴムで作られており，その内部に 2 種類のセンサ素子を様々な位置，方向に埋めてある．この構造のため，同じ種類のセンサ素子であっても埋められた位置や方向によって応答特性が変化することから，柔軟指はセンシング能力が高くなると期待される．そして，柔軟指のセンシング能力を示す実験として，テクスチャの異なる物体を識別する実験を 2 種類の方法で行う．一つは，柔軟指を対象物体に押しつけたり，こすった時の各センサ素子出力を設計者が考慮し，識別に有効なセンサ素子を選択して物体識別を行う方法である．もう一つは，線形判別法を用いることで全センサ素子を使って物体を識別する方法である．

第 4 章では提案する柔軟指を用いて物体を操る方法を提案する．柔軟指はその構造のため，センサ出力を設計者がキャリブレーションすることは非常に難しく，ロボットが自律的に触覚センサの出力と接触状態の関係を獲得する必要がある．本研究では基礎的な実験として，物体の操りに重要な感覚である滑りを視覚センサと触覚センサで捉えることで，それらのセンサ間の関係をニューラルネットワーク上に獲得させる．そして，獲得したニューラルネットワークを用いて把持力の制御を行い，物体を滑り落さないように持ち上げられることを示す．さらに，同様の実験を視覚センサのみで行った場合と比較し，触覚センサを用いる利点を示す．

最後に 第 5 章で本論文をまとめる．また今後の課題について述べる．

第2章　触覚センサの関連研究

多くの既存研究でさまざまな種類の触覚センサが提案されている．それらの研究では，マニピュレーションにおいて特に重要な，接触力，接触位置，滑りといった感覚を検出するものが多い．また少数ではあるが，温度センサや硬さセンサを搭載した触覚センサも提案されている．さらに，それらを利用して，接触した物体を識別するといった研究が行われている．本章では既存の触覚センサの研究を，その触覚センサの目的に応じて，接触力および接触位置を検出するセンサ，滑りセンサ，触覚センサのそれ以外の利用法に分けて紹介する．また，本研究で提案する触覚センサの位置付けを示す．

2.1　接触力，接触位置を検出する分布型触覚センサ

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 [5]．ロボットに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．したがって，ここでは分布型触覚センサを扱った研究について，使用している素子の種類ごとにまとめる．

2.1.1　導電性物質

曲面を持ったロボットに分布型触覚センサを取り付けるには，触覚センサにも伸縮性や柔軟性が必要となる．そこで導電性ゴム，導電性ゲル，導電性ファブリックといった素材を用いた触覚センサが提案されている．導電性ゴムや導電性ゲルを用いた触覚センサでは，接触時に導電性物質の抵抗値が変化する事を利用して接触力に変換する．Shimojo et al. [8] は導電性ゴムを用いた触覚センサを提案している．この触覚センサは 1mm ピッチで 64×64 の計測点があり，さらに触覚センサが検出した圧力を視覚イメージとして出力することができる．また下条ら [6] は球面のようにシート状の感圧ゴムで覆うのが難しい形状に対して，液状の導電性ゴムに浸す事で一様な厚さの導電性ゴム層を生成することを提案している (**Fig. 2.1** 参照)．下条，谷保 [9] は 2 層で 2×2 の導電性ゴムの触覚センサ

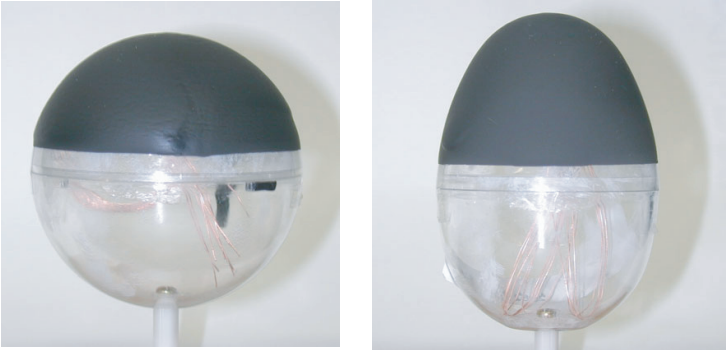


Fig.2.1 下条ら [6]

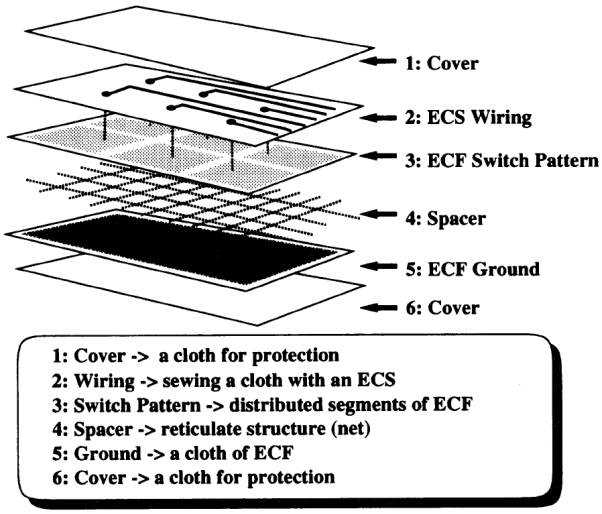


Fig.2.2 稲葉ら [7]

を用い，荷重点重心位置を検出した．ほかに Kerpa et al. [10] や中本ら [11] はアレイ状に電極を持つフレキシブルなシートの周りを導電性ゴムで覆った触覚センサを提案している．また導電性ゴムに似た素材として導電性ゲルを用いた Tajima et al. [12] の研究がある．導電性ゲルはその他の導電性物質よりも軟らかく，曲面を覆いやすいという利点がある．以上の触覚センサは狭い範囲に適用するなら配線量の問題は少ないが，ロボット全身を覆うような場合には配線が非常に多くなるという問題がある．稲葉ら [7] はロボットの全身を覆うための触覚センサとして導電性ファブリックを提案している (**Fig. 2.2** 参照). 導電性ファブリックは各素子の大きさをあまり小さくできず，また on-off スイッチであるためセンシング能力は低いが，配線が導電性ファブリック内にあるため配線量が問題にならないという利点がある．また星，篠田 [13] は硬さの異なる 2 層のウレタンを導電性ファブリックではさみ，それらをコンデンサとみなした触覚センサを提案している．

2.1.2 コンデンサおよびコイル

接触力をコンデンサの静電容量の変化から観測する触覚センサがある [14, 15, 16, 17]. これらの研究ではマトリクス状に配置した素子から接触力のほか接触位置を検出することができる．特に Voyles et al. [16] はセンサ素子を微細加工技術を用いて製作し，また Hakozaki and Shinoda [17] のセンサ素子は LSI 上に，センサ素子と素子をドライブし，外部と通信を行うための回路を製作しているため非常に小さい．

また，コンデンサとコイルからなる LC 回路を用いた触覚センサもある．Nilsson [18] や Futai et al. [19] は LC 回路を用いて，$M \times N$ のマトリクス配線に通常は必要となる MN 本の配線を入力と出力の 2 本の配線で行う方法を提案している．また篠田らのグループが行っている研究 [20, 21] では，LC 回路をセンサ素子としてだけでなく，電源供給や外部への信号伝達をワイヤレスで行うためにも使用している．大量のセンサ素子を用いる場合に，通常の配線では配線量が膨大になるが，この方法ではその問題が起こらないという利点がある．そして彼らはセンサ素子を人工皮膚にランダムに埋めたテレメトリックスキンを提案している [20](**Fig. 2.3** 参照).

さらに CMC (Carbon Micro Coil) をシリコンゴムに埋めた触覚センサが本間らによって提案されている [22, 23](**Fig. 2.4** 参照)．この触覚センサはそれ自体が巨大なネットワーク状の LCR 回路になっており，インピーダンスの変化から触覚センサの変形を検出できると期待される．

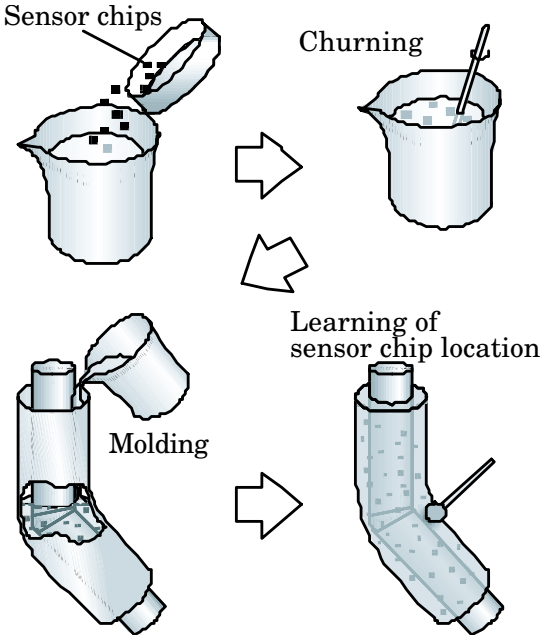


Fig.2.3 Hakozaki et al. [20]

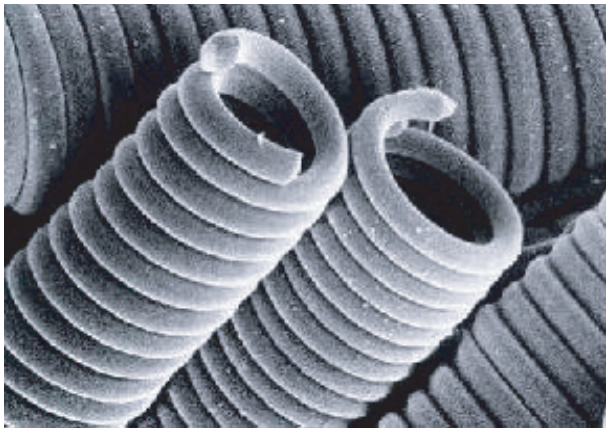


Fig.2.4 本間ら [22]

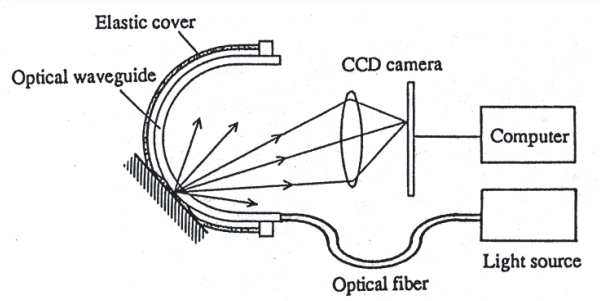


Fig.2.5 Maekawa et al. [24]

2.1.3 光学式

ロボットフィンガを柔軟な素材で製作し，接触した時の変形をフィンガ内部の視覚センサで観測する事で，接触位置や接触力を検出する研究がある．Maekawa et al. [24] ならびに前川ら [25] は半球面光導波路を用いた触覚センサを提案している (**Fig. 2.5** 参照)．光導波路は変形が起こらなければ光が漏れることはないが，接触によって変形が起こると光が外部に散乱する．そして散乱光を PSD (Position Sensitive Detector) で観測することでその変形を観測する．PSD は CCD カメラなどに比べ高速 ($0.5\mu s$) に光を観測できるという利点がある．また，Hristu et al. [26] は柔軟なロボットフィンガの内部にターゲットマークを描き，接触によって移動するターゲットマークをフィンガ内部のビデオカメラで観測することで，接触点と接触力を検出した．ほかに神山ら [27] は透明な弾性体内部の異なる深さにマーカーを配置し，接触時の変形によるマーカー位置の移動を CCD カメラで観測することで，3 次元の力ベクトルを計測した (**Fig. 2.6** 参照).

2.1.4 複合センサ

異なる種類の触覚センサを搭載して，同時にさまざまな触覚情報を得ようとする研究に Lazzarini et al. [28] がある．彼らはダイナミックセンサ，アレイセンサ，力/トルクセンサという 3 つのセンサを搭載したロボットフィンガを提案している．ダイナミックセンサはスティック・スリップの振動を検出し，アレイセンサは接触イメージを検出し，力/トルクセンサは法線力と接線力を検出する．また Engel et al. [29] は微細加工技術を用いてフレキシブル基板上に温度センサ，曲率センサ，熱伝導率センサ，硬さセンサを搭載したマトリクス状の触覚シートを提案している (**Fig. 2.7** 参照).

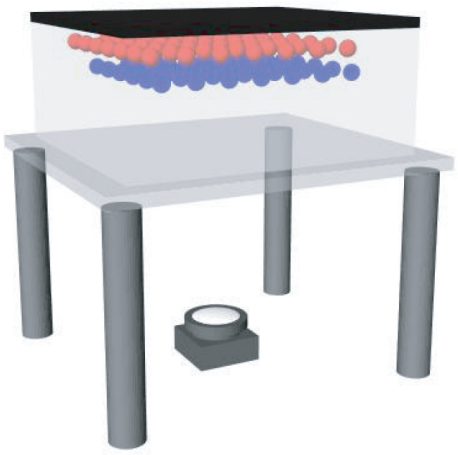


Fig.2.6 神山ら [27]

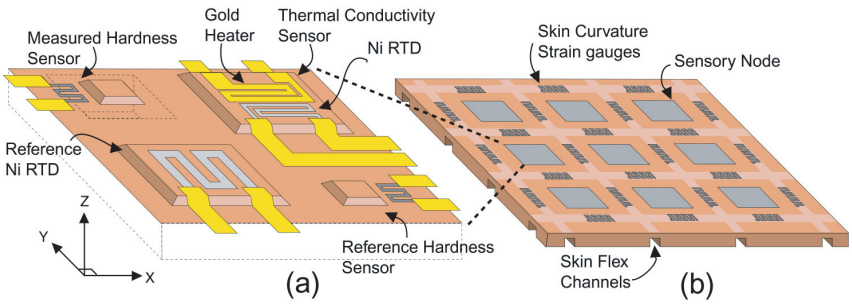


Fig.2.7 Engel et al. [29]

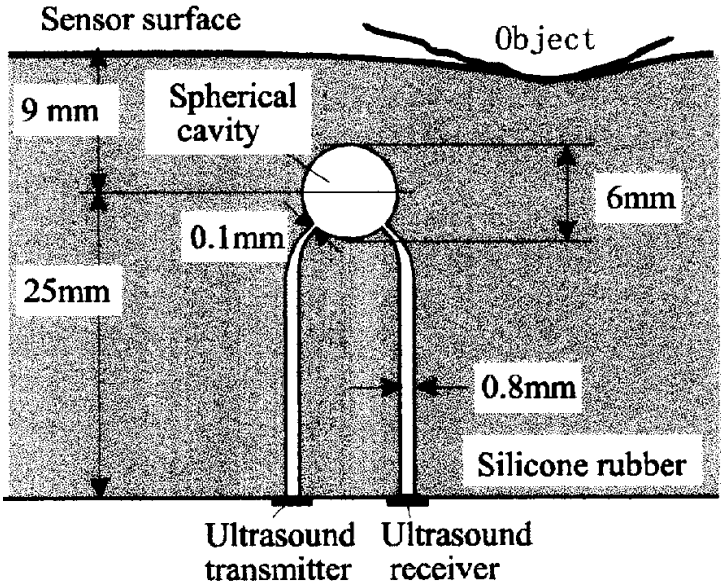


Fig.2.8 Shinoda et al. [32]

2.1.5 超音波センサ

Hutchings [30] は表面を高分子弾性体で覆った，超音波センサ式分布型触覚センサを提案している．そして物体が接触したときの弾性体の変形によって，超音波の反射波が戻って来る時間の変化を検出することで触覚イメージを出力した．ほかに超音波を用いた触覚センサの研究として Shinoda et al. [31] がある．このセンサは半球の頂上部分に超音波の発信素子があり，台座部分に受信素子がある．そして接触時に，xyz 各軸の変形を 3 次元で観測し，また傾きによる変形を 2 次元で観測することができる．また Shinoda el al. [32] の ARTC (Acoustic Resonant Tensor Cell) も超音波を用いている (**Fig. 2.8** 参照)．このセンサはシリコンゴムの内部にある球状の共鳴空間に超音波を送り，反射した超音波を観測する．そして接触などにより共鳴空間が変形すると，超音波の共鳴周波数が変化することから変形量を検知することができる．なお，この研究は分布型触覚センサではなく，単一のセンサ素子として用いている．

2.1.6 その他

以上とは異なるセンサ素子を用いた触覚センサに以下の研究がある．Dargahi et al. [33] や保東，下山 [34] は触覚センサに PVDF (polyvinylidene fluoride) フィルムを力センサとして用いている．また，Li and Wen [35] は水晶発信子の共鳴周波数の変化を圧電素子で観

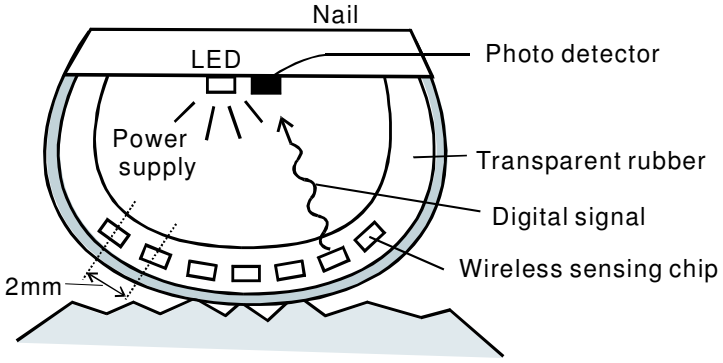


Fig.2.9 K. Yamada et al. [36]

測するマトリクス状の触覚センサを提案している．この触覚センサはマトリクス状だが，各素子のスキャンが不要なため高速に接触位置を検知することができる．K. Yamada et al. [36] は VLSI 上にセンサ素子と太陽光発電素子および発光素子を搭載し，ワイヤレスで給電と通信を行える触覚センサを提案している (**Fig. 2.9** 参照)．このセンサは外力が加わることによって，フォトダイオードに入る光量が変化することから，法線力と接線力を計測できる．Inoue and Hirai [37] は柔軟な半球の底面にマトリクス状の圧力センサを配置した触覚センサのモデル化を行い，対象物が接触したときの傾きと押し付け量を圧力分布から求めた．また井上，平井 [38] は同じ触覚センサを用い，回転および転がり接触したときの圧力分布をモデル化した．ほかに，前野，佐藤 [39] は遠隔環境への触感覚の伝達を目的として，人間の指を触覚センサとするために，爪にひずみゲージを貼り，その値から法線力，接線力を検出した．また，佐々木ら [40] はシリコンゴム中に空気室を作り，その内圧の変化から接触力を検出するセンサを提案している．Kaneko and Horie [41] はひずみゲージを用いた触覚センサに対し，センサ出力が飽和せず，また小さなセンサ出力を増幅させるために AGC (Auto Gain Controller) を用いることを提案している．また，ひずみゲージアンプを交流電源で駆動することで，出力信号を重畳し 1 つの A/D コンバータでセンサ出力を観測している．齋藤ら [42, 43] は柔軟なシリコンゴムで覆った 4 軸力センサを製作し，接触時の変形量とインピーダンスを推定した．Murakami and Hasegawa [44] および村上ら [45] は，6 軸力覚センサをシリコンゴムで覆った上，爪をつけたロボットフィンガを用い，微小な段差や面接触と線接触の識別，エッジの検出を行っている．

Table 2.1 Classification of slip sensors

detecting type	detecting method	
displacement of slip	encoder:	rotation of roller
	image:	center of pressure
vibration of slip	surface roughness:	asperity of surface
	stick/slip:	vibration

2.2 滑り検出センサ

滑りは物体の把持や操り動作において非常に重要な現象である．例えば，質量や摩擦係数のわからない物体を持ち上げる場合には，滑りを検出し，それによって把持力を制御するという制御アルゴリズムをすぐに思いつくだろう．そして，このような制御を行うために滑りを検出する触覚センサが研究されている．

1990 年代以前の滑り検出センサの研究は山田 (陽) によって **Table 2.1** のように分類されている [46]．それによると，まず滑り変位を検出するか，滑り振動を検出するかで分類され，前者はさらにエンコーダ式かイメージ式かで分類される．エンコーダ式はロボットフィンガに取り付けた回転体の回転から滑りを検出するもので，イメージ式は分布型の圧覚センサなどを使い，力の中心が移動するのを観測する事で滑りを検出している．一方の滑り振動を検出するタイプは，表面粗度を検出するものとスティックスリップを検出するものに分類される．前者は表面の凹凸が滑りによって変化するのを観測するセンサで，後者は PVDF フィルムやひずみゲージ出力の変化を観測するセンサである．

しかし，現在では著者の調べた限りイメージ式とスティック・スリップを検出する手法の研究のみ行われている．その理由として，エンコーダ式は対象物体が柔軟だった場合に滑りと対象物体の単なる変形とを区別できないという欠点があり，また表面粗度を観測する手法では装置の小型化が難しく，多指ロボットハンドのような小型のロボットに搭載するのが難しいということが考えられる．そこで，ここではイメージ式とスティック・スリップ検出式に分類される研究について使用しているセンサ素子ごとにまとめる．

2.2.1 PVDF フィルム

圧電素子である PVDF フィルムはひずみ変化に反応することから，滑りが発生したときの振動を直接観測できるため，滑りセンサとして用いられることが多い．滑りの判定は，単純に素子の出力の大きさから検出する研究や，なんらかの信号処理を行って判定する研究がある．

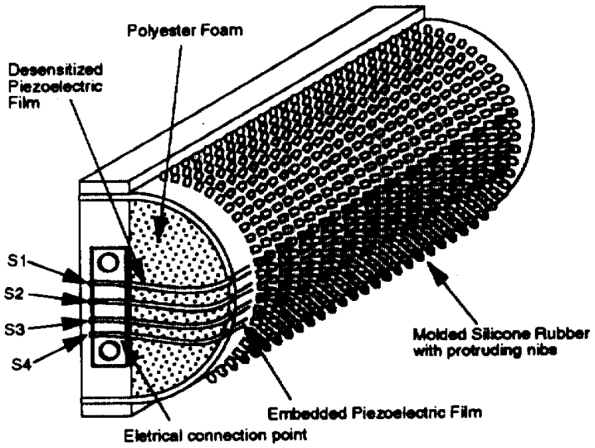


Fig.2.10 Son et al. [47]

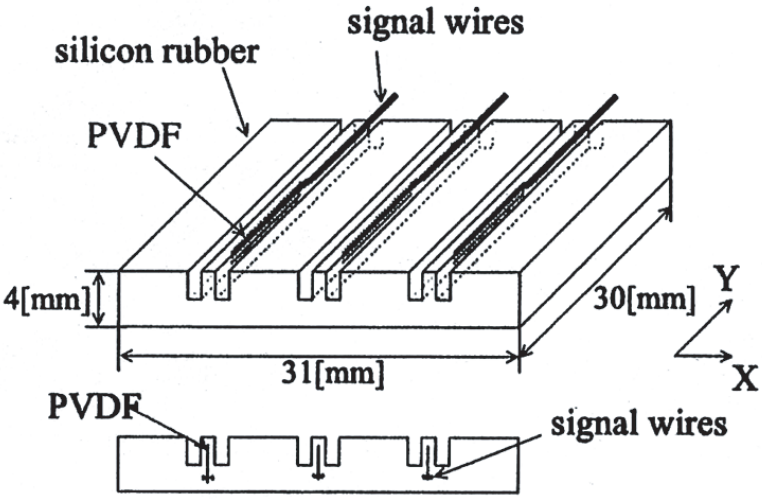


Fig.2.11 Y. Yamada et al. [48]

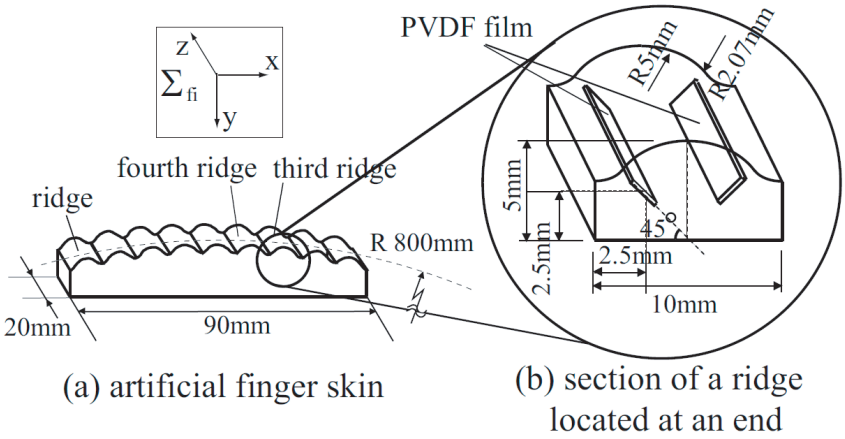


Fig.2.12 Fujimoto et al. [49]

センサ素子の出力の大きさから滑りを検出している研究には次のものがある．Son et al. [47] は突起のある半円筒のシリコンゴム製の指に PVDF フィルムを 4 枚埋めた触覚センサを提案し，その出力変化から滑りを判断している (**Fig. 2.10** 参照)．Jockusch et al. [50] は柔軟で突起のある指先に FSR (force sensing resistor) と PVDF フィルムを持つ触覚センサを製作し，PVDF フィルムの出力が閾値を超えたら滑りとして検出している．これらの研究では滑りの判定が簡単である代わりに，触覚センサが単に物体に接触した状態と，滑りが発生した状態を完全には区別できないという欠点がある．

一方，センサ信号を処理している研究には次のものがある．O'Brien and Lane [51] は水中で使用するグリッパに力センサと滑りセンサを搭載した．そして，滑っているときと単に接触しているときの PVDF フィルム出力を周波数解析すると，特徴に大きな差があることから滑りだけを判定することができるとした．Y. Yamada et al. [52] ならびに山田 (陽) ら [48] は凹凸のあるシリコンゴム板の凸部に PVDF フィルムを貼った触覚センサを提案している (**Fig. 2.11** 参照)．そして，滑ったときはインパルス状の信号が出力されるだけなのに対し，接触や転がりが発生したときにはインパルス状の信号の後に逆方向の出力があることから，センサ信号の時間変化を観測することでこれらを区別している．また，把持力制御を行い滑りセンサとして有効であることを示している．

人間は非常に感度の高い触覚器官を持つことから，人間の指の形状を模倣した触覚センサが提案されている．Fujimoto et al. [49] は人間の指紋形状を模したシリコンゴムに PVDF フィルムを埋めた触覚センサを提案している (**Fig. 2.12** 参照)．指紋のそれぞれの峰部には 2 枚の PVDF フィルムが埋められており，その 2 枚の出力を周波数フィルタに通した値，および 2 枚の出力の差から初期滑りを検出できることを示し，またそれをニュー

ラルネットワークに学習させて滑り検出を行った．山田 (大) ら [53] は同様の触覚センサを用い，指紋の峰内部の 2 枚の PVDF フィルムの出力の差とその累積値から，固着，滑り，非接触を判別した．

以上の研究では PVDF フィルムをひずみの変化を検出するために利用したが，Canepa et al. [54, 55] は PVDF フィルムを法線力，接線力センサとして用いている．そして滑りが発生するときのそれらの力をニューラルネットワークに学習させることで滑りの検出を行っている．

ところで，Howe and Cutkosky [56] は円筒状の指にゴムの層を作り，その内部に 2 枚の PVDF フィルムを配置した触覚センサを提案している．そして，触覚センサを物体の上で動かしたときのひずみ変化，すなわちテクスチャを観測している．この研究では滑り検出について言及していないが，物体上を動かしたときのひずみ変化の観測は滑り検出であるともいえるのでここに紹介しておく．

2.2.2　ひずみゲージ

ひずみゲージは静的なひずみを検出するため，動的な変化である滑りを直接検出することはできない．しかし，ひずみの時間変化を観測することで滑りを検出することが可能である．Maeno et al. [57] はシリコンゴムで作製した曲面を持つ指に，ひずみゲージを一様に並べた触覚センサを提案した (**Fig. 2.13** 参照)．そして触覚センサを物体に接触させ，接線方向に力をかけたときのひずみゲージ出力の変化から stick エリアと slip エリアを求め，stick/slip エリアの変化から滑りそうになったら把持力を制御するという実験を行った．また木村ら [58] はシリコンゴムの半球内に直線上に並べたひずみゲージ列を十字に交差させた触覚センサを提案している．この構造は **Fig. 2.13** の触覚センサを十字に交差させたもので，同様の方法を用いて stick/slip エリアを求め，把持力制御を行った．また類似の研究として，D. Yamada et al. [59] は人間の指紋を模したシリコンゴム製の指を製作した．指紋の峰には 2 枚のひずみゲージが埋められており，これらの出力の差の速度と加速度から初期滑りを検出している．そして検出した初期滑りの情報を用いて把持力制御を行っている．

ほかに，Sano et al. [60] ならびに佐野ら [61] は遠隔操作ロボットの触覚センサとして，波状のシリコンゴムの指内部にスプリングを複数配置し，スプリングにひずみゲージを取り付けた触覚センサを提案した (**Fig. 2.14** 参照)．このスプリングは人間の触覚受容器であるマイスナー小体に相当するものである．そして滑りが発生するとひずみゲージ出力が大きく変化することからこれを検出している．また，Saliba and Seguna [62] はゴム層の

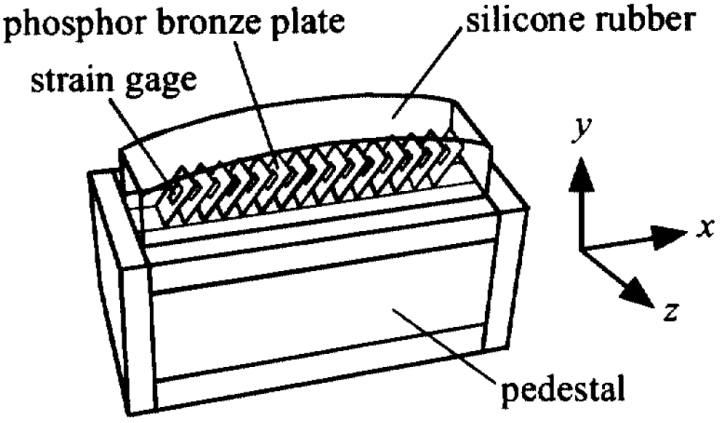


Fig.2.13 Maeno et al. [57]

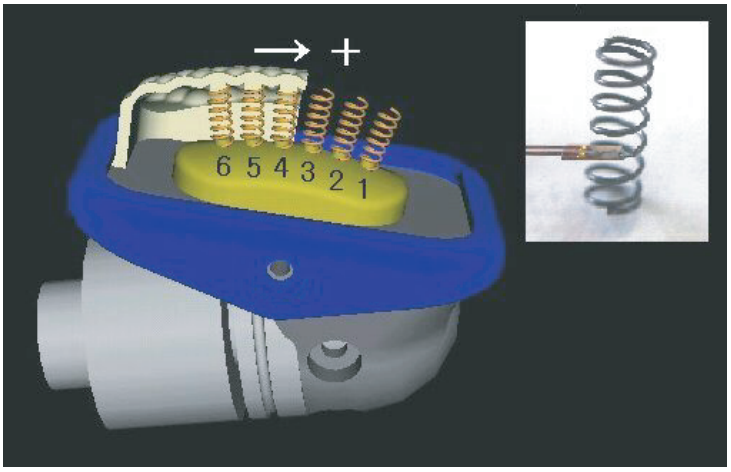


Fig.2.14 Sano et al. [60]

表面に力センサと滑りセンサとしてひずみゲージを貼り付けたグリッパを製作し，ひずみゲージ出力の変化の大きさから滑りを検出することで把持力制御を行った．

2.2.3　複合センサ

Y. Yamada and Cutkosky [63] ならびに山田 (陽)，カトコウスキー [64] は 3 軸力覚センサと PVDF フィルムを持つ半球の触覚センサを用いた触覚センサを提案している (**Fig. 2.15** 参照)．ほかの研究にあるように PVDF フィルムを用いれば滑りを検出することは可能であるが，その滑りが並進滑りなのか回転滑りなのかを識別することができない．この研究では，滑りセンサと力覚センサの情報を使うことでこれらを識別することを可能にしてい

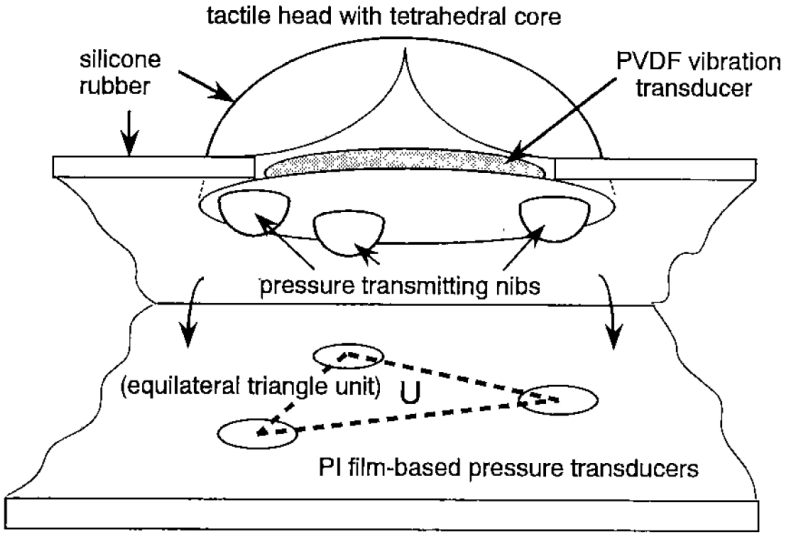


Fig.2.15 Y. Yamada and Cutkosky et al. [64]

る．また，本田ら [65] は6軸力覚センサを用いた3指ロボットハンドとステレオ視覚センサの情報を統合し，接触点の移動から滑りの検出を行っている．

2.2.4　その他

滑りを検出するにはひずみの時間変化を観測すればよいので，すでに示したセンサ素子以外の素子を用いた触覚センサが提案されている．Trembly and Cutkosky [66] は突起のついた半球状の柔軟な指先を作り，その内部に加速度センサ素子を2枚埋めた滑りセンサを提案している．そして，素子の出力が閾値を超えることで滑りを検出している．また，滑りが起こった瞬間の法線力，接線力から摩擦係数を推定することを提案している．富田ら [67] は半球状のゴム内の圧力変化を観測し，そのピーク周波数から滑りの速さを検出している．そして実験では滑りセンサの出力から把持力を制御し，物体の持ち上げを行っている．Shinoda et al. [68] は柔軟なゴムの内部の異なる深さに2つの空気穴を設け，その圧力変化を観測する触覚センサを提案している．そして2つの素子の出力をFFTにより周波数解析した結果から滑り速度を推定している．Holweg et al. [69] は導電性ゴムを用いたマトリクス状の触覚センサを用いて，滑りを検出する2種類のアルゴリズムを提案している．一つは，接触力の中心位置の変化を周波数解析する方法で，もう一つは法線力の変化を検出する方法である．前者の方法は滑りの予測が可能だが，後者はそれができない．一方，前者は全センサ素子の出力を読み出すのに60msかかることから，それより速い滑りを予測することができないが，後者は滑りの速さに影響されないという特徴があ

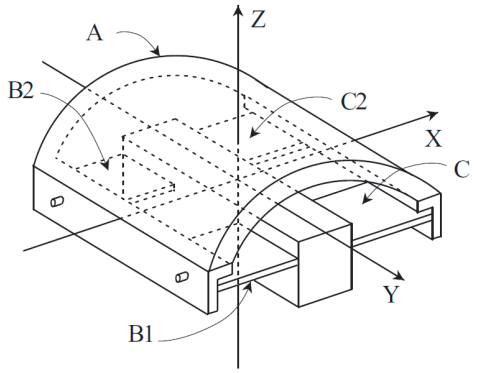


Fig.2.16 Saito et al. [72]

る．吉海ら [70] は ARTC を用いた触覚センサによる滑り検出を提案している．初期滑りが発生すると触覚センサにおける応力分布が変化し，それを ARTC で観測することで滑りセンサとしている．そして応力変化から滑りを予測し，把持力の制御を行った．長谷川ら [71] は力覚センサを持つロボットフィンガで物体を操ったときの滑りを，力覚センサ出力の周波数解析結果から検出した．齋藤ら [72] は円弧状の梁と水平の梁を組み合わせた接触センサを用い，滑りが発生したときの振動を検出している (**Fig. 2.16** 参照)．Birglen and Gosselin [73] はロボットハンド表面に FSR を張った触覚センサを使い，FSR の出力変化とロボットハンドの動きの有無から滑りの検出を行っている．

またひずみの時間変化ではなく，ひずみの大きさに着目した研究もある．Melchiorri [74] は力覚センサと導電性ゴムを用いたマトリクス状の接触力センサを使用したロボットハンドを用いて滑り検出と制御を行っている．ただし，摩擦係数既知，かつ法線力，接線力も測定可能なため，並進滑りが発生しそうな状態は簡単に判定できる．回転滑りの検出では力覚センサの出力と，触覚センサから求めた力の中心の情報を使って検出と制御を行っている．また，Tsujiuchi et al. [75] は 3 軸の力覚センサをマトリクス状に配置した触覚センサを提案している (**Fig. 2.17** 参照)．そして力の中心位置の変化から滑りを検出している．しかし，力覚センサの小型化には限界があり，ロボットハンドに適用するのは難しい．Ikeda et al. [76] は光学式の触覚センサを提案している (**Fig. 2.18** 参照)．指先となる柔軟な半球を物体に押し付け，そのときの変形をビデオカメラで捉える．そして，その変形を偏心度，接触面半径として観測し，滑り余裕を求める．滑り余裕が目標値に一致するように把持力を制御することで，未知物体でも滑ることなく把持を行っている．

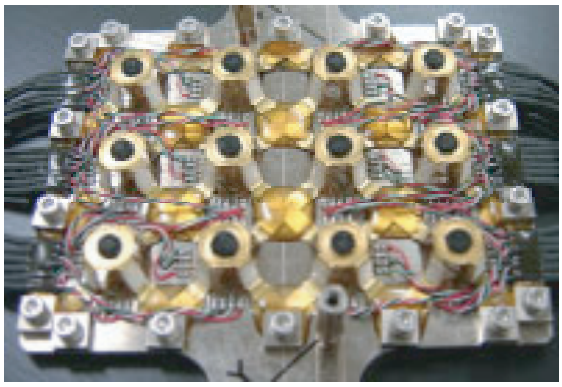


Fig.2.17 Tsujiuchi et al. [75]

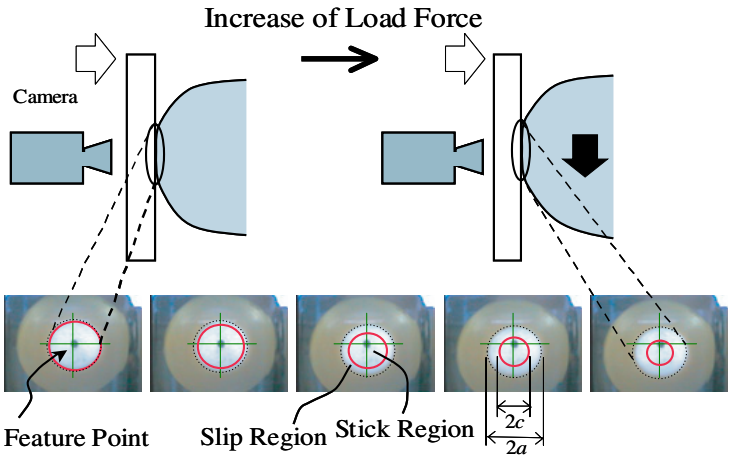


Fig.2.18 Ikeda et al. [76]

2.3 触覚センサのその他の利用法

触覚センサを用いて，単に接触力や滑りを検出する以外に，物体を識別するなど触覚情報を応用した研究がある．Dario et al. [77] は触覚アレイセンサ，ダイナミックセンサ，温度センサを持つロボットフィンガと視覚センサを用いて，対象物の形状，熱伝導率，硬さ，テクスチャを観察し，決定木を用いたクラスタリングでそれらを識別した．また Taddeucci et al. [78] は同じロボットシステムを用いて，各センサ情報をニューラルネットワークに学習させることで，決定木を用いずに物体の識別を行った．ほかに渡邊ら [79] は on-off スイッチをマトリクス状に配置した触覚センサを用いて物体形状の判別を行った．

物体のテクスチャを観測するセンサには，安彦ら [80] の圧電アクチュエータを用いた触覚センサがある．この触覚センサが物体に接触したときの共振周波数の違いから物体の材質を識別し，また物体内部に異なる物質がある場合にその有無を判別した．ほかに圧電素子を物体に接触させたときに生じる電圧の違いから物体を識別する研究 [81] や，圧電素子で超音波を発生させ，反射波の到達時間と物体の電気特性から物体の材質や厚さ，硬さを検出する研究 [82] もある．また，Mukaibo et al. [83] は硬さの異なる 2 層のシリコンゴムの間にひずみゲージを埋めたロボットフィンガと力覚センサと用い，物体をこすったときのひずみゲージ出力の周波数成分の違いや，接線力の違いから物体のテクスチャや硬さを判別できることを示した．ところで物体の摩擦係数を計測するには法線力と接線力から求める方法が一般的だが，Nakamura and Shinoda [84] および Maeno et al. [85] は柔軟な触覚センサが物体に接触したときの応力分布が，対象物体の摩擦係数によって異なることに注目し，それぞれ別の触覚センサを用いて摩擦係数を推定した．

ヒューマノイドロボットの中には，人間とインタラクションするために触覚センサを持っているものがある．そして人間がどのように触れたかを判別する研究も行われている [86, 87, 88, 89, 90, 91]．

2.4 本研究で提案する触覚センサ

以上で紹介した既存の触覚センサはほとんどの場合，あらかじめ設計者が何を検出させたいか考慮し，それに基づいて設計されている．そして触覚センサはおもに物体を操作するときの接触状態の検出に用いられることから，設計者は触覚センサの役割を接触位置や接触力，あるいは滑りの検出に限定している．また，触覚センサの構造は単純で，センサ素子が同じ深さに一様に配置されているため，様々な触覚情報を検出する能力に欠けている．

本研究では，触覚センサに何を検出させるかをあらかじめ決めず，また様々な触覚情報を検出できるようになることを期待して，応答特性の異なる 2 種類のセンサ素子を硬さの異なる 2 層の柔軟な素材の様々な位置や方向に埋めた人間型柔軟指を提案する．応答特性の異なる 2 種類のセンサ素子を用いることで，同じ刺激に対して異なる信号が得られるようになり，1 種類のセンサ素子を用いるよりも情報量が増加する．また，柔軟指を硬さの異なる 2 層構造にすることで外部と内部でひずみ方が変化し，接触時のひずみの違いを検出しやすくなると考えられる．そしてセンサ素子を深さの異なる各層に配置することで，同じ種類のセンサ素子でも異なる信号が出力され，同じ深さだけにセンサ素子が配置された場合よりも情報量が増加すると期待される．また，2 層にすることで，センサ素子の配置が柔軟指の浅い位置，あるいは深い位置に偏るのを防ぐことができるという作製上の利点がある．提案する柔軟指のように，センサ素子の配置が一様ではない触覚センサに篠田らのグループが提案しているテレメトリックスキン [20] がある．しかし，彼らの研究ではセンサ素子の開発は行っているが，それを用いてどのように触覚センサとして利用するかについて述べていない．本研究では，柔軟指によってセンシング能力が向上し，また柔軟指を搭載したロボットにタスクを行わせることで，触覚センサの持つ役割を自律的に獲得することを目指している．

第3章　人間型柔軟指とその物体識別能力

3.1　緒言

前章で紹介したように，従来の分布型触覚センサのほとんどは，硬い部材の表面にセンサ素子がマトリクス状などのように一様に配置され，それを柔軟な素材で覆っている．このような構造にする理由は二つ考えられる．一つは，硬い部材表面にセンサ素子を一様に貼るのは簡単だが，柔軟な素材内部に一様に配置することは難しいためであり，もう一つは，一様に配置したセンサ素子は設計者にとってキャリブレーションが容易だからである．そして触覚センサで検出できる触覚情報は接触位置や接触力といった単純な情報だけの場合が多い．また滑りセンサも研究されているが，それらのセンサでは滑りしか検出することができない．このように既存の触覚センサは各触覚情報に特化して設計されているため，様々な触覚情報を得ることができず，センシング能力が低いと考えられる．そこで高いセンシング能力を持つ人間の触覚器官を参考にし，触覚センサの構造を人間のそれに近づけた人間型柔軟指を提案する．またそのセンシング能力を示すために，柔軟指による物体識別実験を 2 種類の方法で行う．一つは設計者が物体識別に有効なセンサ素子を選択する方法で，もう一つは統計的にセンサ素子出力を処理する方法である．

3.2　人間型柔軟指の提案

3.2.1　人間の触覚器官の構造に基づいた設計

まず，高いセンシング能力を持ち，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 [3] 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. 3.1** 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

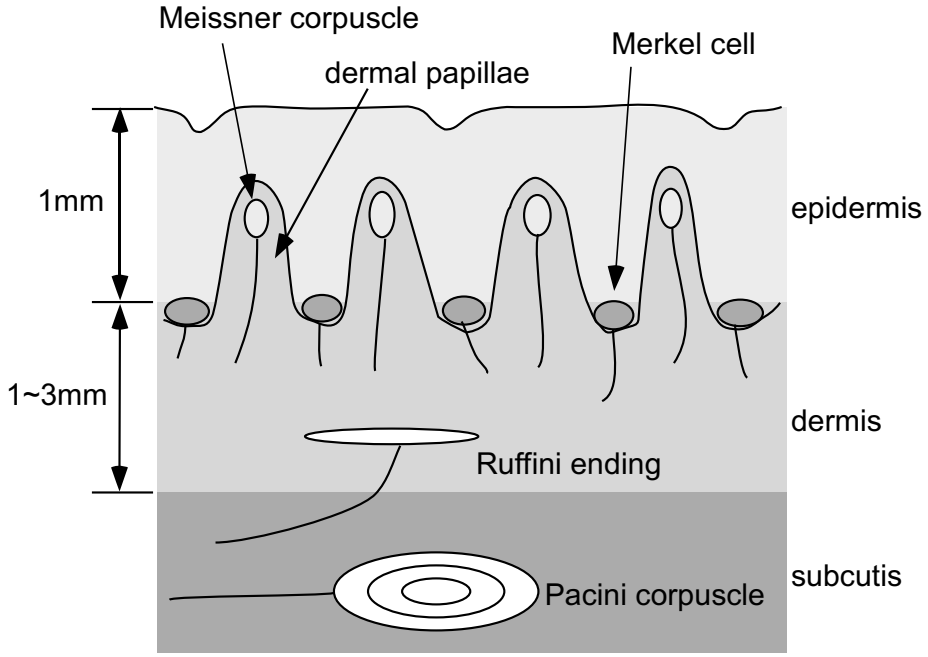


Fig.3.1 A cross sectional view of the human fingertip (modified from [3])

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一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，ロボットフィンガと物体間に発生する滑りや転がりの制御など，ロボットフィンガ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，ロボットフィンガを人間の指と同じように柔軟な素材で作り，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なロボット

フィンガ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，より高いセンシング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，また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センシング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，従来の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．

3.2.2 人間型柔軟指の構造

Fig. 3.2 に提案する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 フィルムとひずみゲージを用いている．PVDF フィルムはピエゾ効果によりひずみの速度に敏感であるのに対し，ひずみゲージは静的なひずみを計測する．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硬さの異なる皮膚に相当することがわかる．また PVDF フィルムおよびひずみゲージはその応答特性から，それぞれ人間の触覚受容器であるマイスナー小体，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．このように，硬さの異なる 2 層のシリコンゴム中にセンサ素子が存在することで，同じ種類のセンサ素子でも応答特性が変化し，さらに，異なる応答特性を持つ 2 種類のセンサを用いることでより情報量が増加すると期待できる．ところが，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．

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ひずみゲージは，柔軟指と物体間の局所的な静的ひずみを計測するが，内部層の深い位置にあるひずみゲージは柔軟指全体にかかる力を計測する．また，PVDF フィルムはひずみの速度に反応し，静的なひずみ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

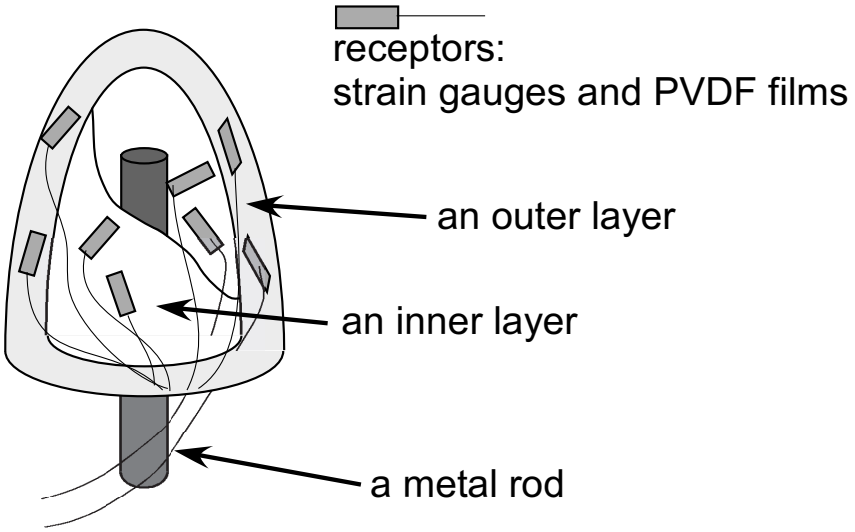


Fig.3.2 A cross sectional view of the developed anthropomorphic fingertip

振動に対して異なる信号を出力する．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．

3.2.3　人間型柔軟指の作製

柔軟指の作製は次の手順で行う．まず，柔軟指の型を作製する．型の設計は CAD ツール (Autodesk 製 Inventor) で行い，NC フライス (ローランド ディージー製 MDX-500) を用いて型の材料であるケミカルウッドを切削した．そして **Fig. 3.3** に示すように，柔軟指の型に金属棒，ひずみゲージ (共和電業製 KFG-5-350-C1-11N30C2)，PVDF フィルム (東京センサ製) を入れる．そこに液体状のシリコンゴム (信越化学工業社製 KE-1316) 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真空ポンプを用いて減圧することであらかじめ消泡しておく．そして型ごと恒温器で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ひずみゲージ，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．

Fig. 3.4 は完成した柔軟指で，直径は 25[mm]，長さは 55[mm] である．この柔軟指の各層に 6 枚ずつのひずみゲージと 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知ることはできない．なお，センサ素子の数は柔軟指を作製する難易度が高くならないようにするため合計で 24 枚に決定した．

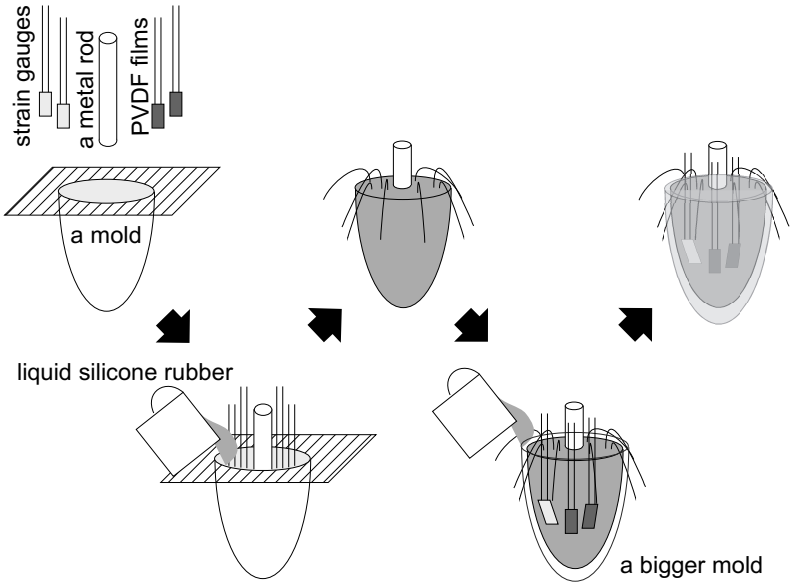


Fig.3.3 A procedure to make the anthropomorphic fingertip

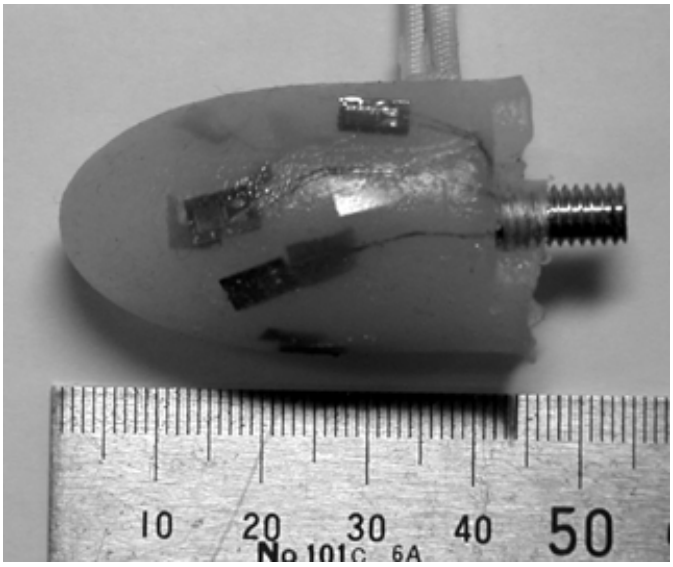


Fig.3.4 A photo of the completed fingertip

3.3　設計者の選択したセンサ素子による物体識別

提案した柔軟指のセンシング能力を示すため，ここでは柔軟指による物体識別実験を行う．作製した柔軟指は **Fig. 3.5** に示す 3 自由度ロボットフィンガ (安川電機製) に取りつけられている．各センサ素子の出力はアンプで増幅後，A/D コンバータ (富士通製 RIF-01) を通してホストコンピュータ (Pentium III 450[MHz]) に送られる．この実験装置を用いて，柔軟指を紙，コルク，ビニル，2 種類の木材というテクスチャの異なる物体に対し，押し付けおよびこする動作を行ったときのセンサ素子の信号から，これらの物体の識別を行う．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，次にひずみゲージのみ，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，最後にひずみゲージと 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こするという動作を行う．この動作を行ったときのセンサ出力例を **Fig. 3.6** 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] まで物体をこすっている．この図から分かるようにひずみ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こす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 フィルムはこす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，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，別の予備実験により，ロボットフィンガを動かしたことによる振動であることを確認している.

3.3.1　押し付けによる物体識別

Nakamura and Shinoda[84] および Maeno et al.[85] 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，摩擦係数が異なるテクスチャの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ひずみゲージの出力から物体を識別し，柔軟指に埋められたひずみゲージのセンシング能力を示す.

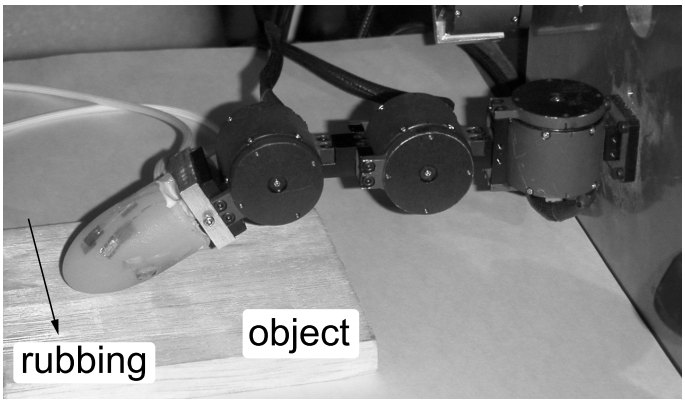


Fig.3.5 A robot finger equipped with the anthropomorphic fingertip

先に示した 5 つの物体に対して， **Fig. 3.6** 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ひずみ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 no. 10 のひずみゲージの出力が 0.15[V] になるようにフィードバック制御を行っている．このときの押し付け力は約 1.0[N] である．ただし，ひずみ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ひずみゲージ no. 6 の出力の平均と標準偏差を比較した結果を **Fig. 3.7** に示す．また別のひずみゲージ出力として，内部層のひずみゲージ no. 8 の出力の平均と標準偏差を **Fig. 3.8** に示す．これらの図から分かるように物体によってひずみ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，ひずみ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．標準偏差が大きな値になるのは，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．

3.3.2　こすりによる物体識別

次に，物体をこすったときの 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] に示した物体をこすっているときの PVDF フィルム出力である．なお，こす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フィンガを位置制御することでこすり動作を実現している．力制御を行わないのは，こすったときのスティックスリップやこすりによりひずみ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

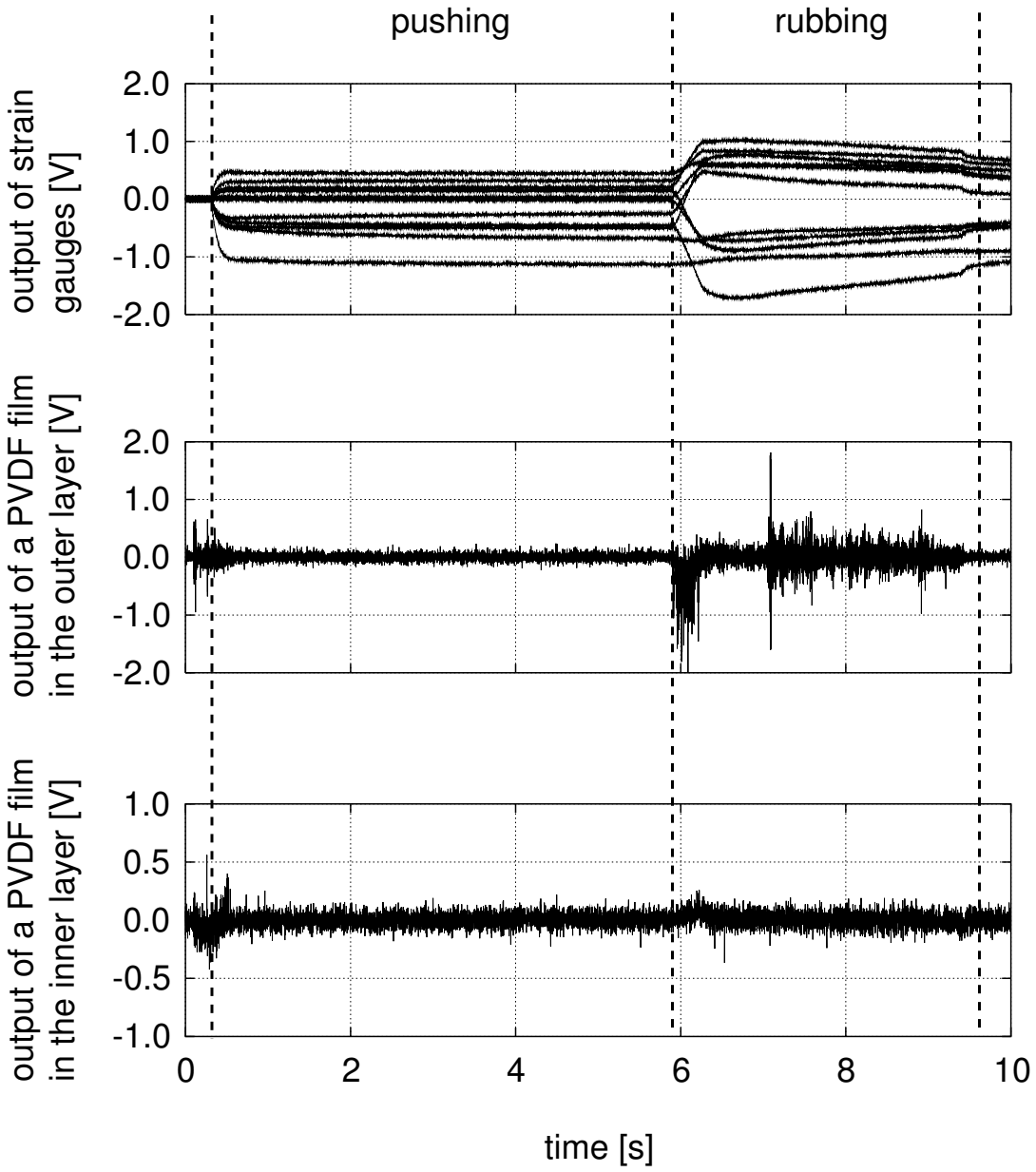


Fig.3.6 Outputs of receptors through pushing and rubbing the object

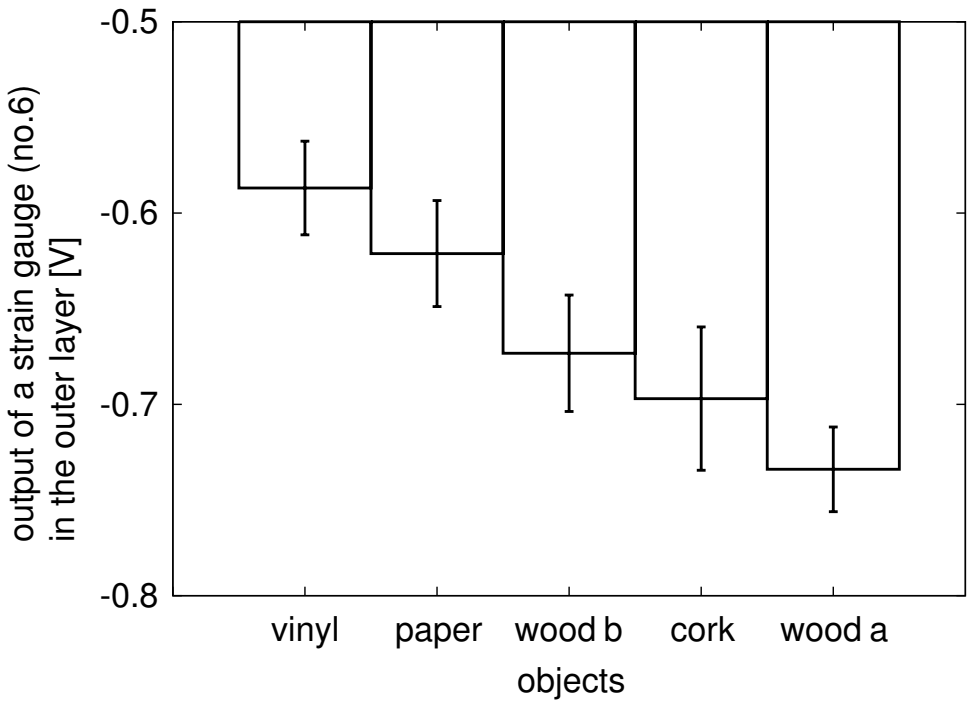


Fig.3.7 Results of pushing experiments: comparing output of a strain gauge no. 6

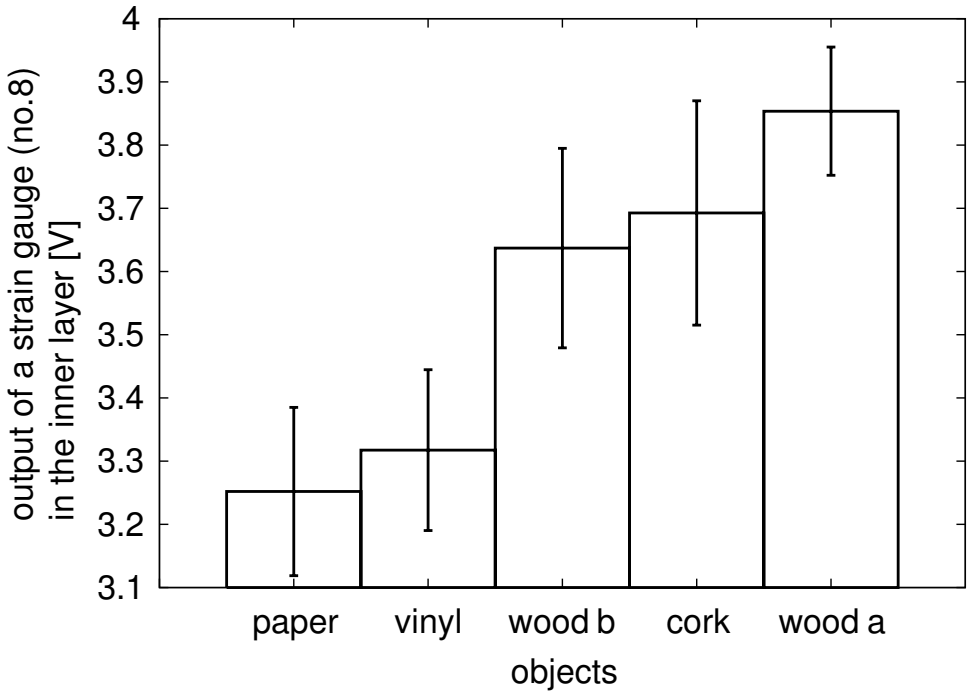


Fig.3.8 Results of pushing experiments: comparing output of a strain gauge no. 8

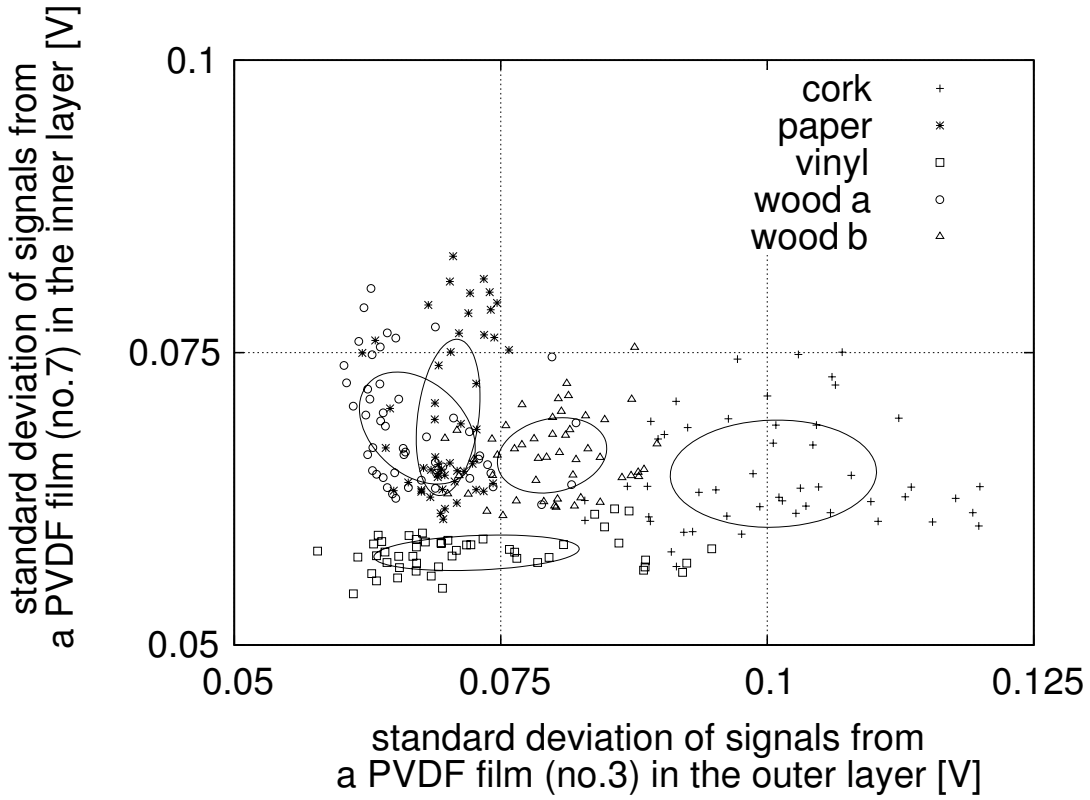


Fig.3.9 Results of rubbing experiments: comparing no. 3 with no. 7

Fig. 3.9，**Fig. 3.10** に示す． **Fig. 3.9** は横軸に外部層 no. 3 の PVDF フィルム出力の標準偏差，縦軸に内部層 no. 7 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. 3.10** 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 をこすったときの標準偏差である．また，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，物体をこすったときの各 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. 3.9** 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み合わせを示した **Fig. 3.10** 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

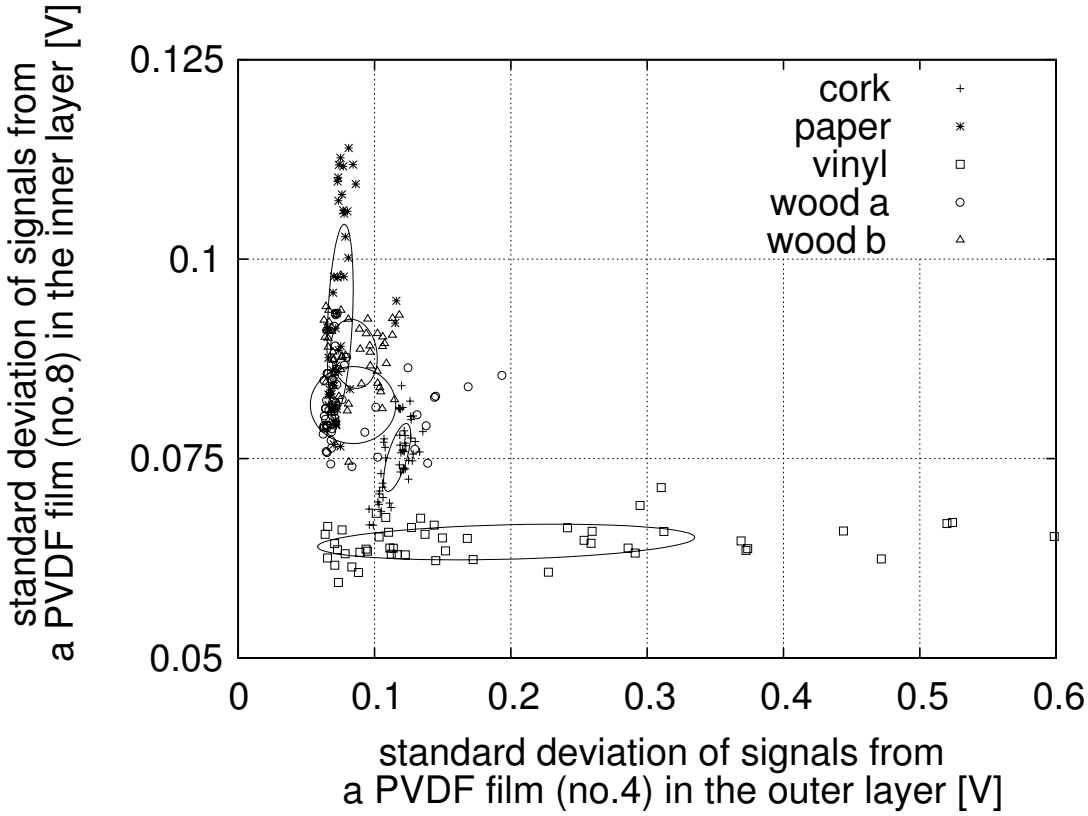


Fig.3.10 Results of rubbing experiments: comparing no. 4 with no. 8

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. 3.9** 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. 3.10** の外部層の PVDF フィルムだけでは全く識別ができないが，どちらの図でも内部層の 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．この例のように，同じ種類のセンサ素子でも異なる層，すなわち異なる深さに配置されることで出力される信号が多様になり，それらを組み合わせることでより多くの情報が得られる．

ところで，前述のようにロボットフィンガはこすったときのスティックスリップやこすりによるひずみ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可能性がある．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，ロボットフィンガが正確な位置，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．

3.3.3　押し付けとこすりを組み合わせた物体識別

物体をこす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と，こすったときの両方の情報を使って物体を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. 3.6 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 no. 6 のひずみゲージ出力の平均を垂直軸に，こす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. 3.11** である．図中の楕円体は各物体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．

3.3.1 節および 3.3.2 節の実験では 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．しかし物体をこするような動作では，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製したが，それぞれ本実験で示したのと同様の結果が得られた．

3.4　フィッシャーの線形判別法による物体識別

前節では設計者が物体の識別に使用するセンサ素子を決定していた．しかしこの方法では，全てのセンサ素子の組み合わせを考慮しなくてはならず非常に手間がかかる．また，3 次元座標系に表現するため，全てのセンサ素子出力を使って物体を識別することができなかった．そこでフィッシャーの線形判別法 (Fisher's linear discriminant method) [92] を用いて物体識別を行うことを提案する．この手法により，全センサ素子を用いた物体識別が可能になるほか，一部のセンサ素子を用いる場合において，物体識別に有効なセンサ素子を選択する指針を得ることが期待できる．

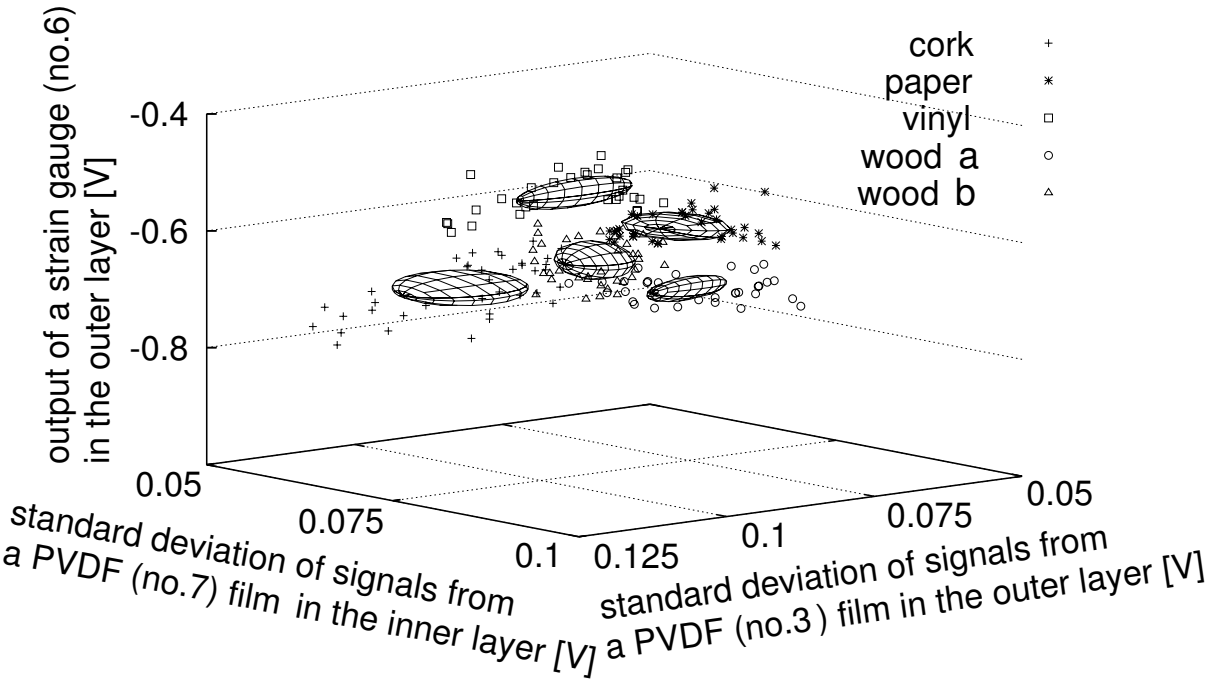


Fig.3.11 Results of pushing and rubbing experiments

3.4.1 フィッシャーの線形判別法

フィッシャーの線形判別法は，特徴空間上の 2 クラスのパターンの分布からこの 2 クラスを判別するのに最適な 1 次元軸を求める手法である．(3.1) 式は判別の評価値 $Js(\boldsymbol{A})$ を示し，この値が最も大きくするような 1 次元への変換ベクトル $\boldsymbol{A}$ を求める．この評価値はクラス間変動とクラス内変動の比であり，この値が大きいほど，クラス間の距離が離れており，判別が容易になると考えられる．

$$Js(\boldsymbol{A}) = \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} \frac{(\tilde{m}_1 - \tilde{m}_2)^2}{n_1 \tilde{\sigma_1}^2 + n_2 \tilde{\sigma}_2^2} \tag{3.1}$$

ここで n_i は各クラスのパターンの個数，$\tilde{m}_i$，$\tilde{\sigma_i}^2$ はそれぞれ 1 次元への変換後のクラス内の平均および分散の値である．そして，求めた変換ベクトル $\boldsymbol{A}$ を用いて多次元データを 1 次元軸上に変換し，(3.2) 式から求められる 2 クラス間の境界点 w_0 と比較することで，どちらのクラスに判別する．

$$w_0 = -\frac{\tilde{\sigma}_2^2 \tilde{m}_1 + \tilde{\sigma}_1^2 \tilde{m}_2}{\tilde{\sigma}_1^2 + \tilde{\sigma}_2^2} \tag{3.2}$$

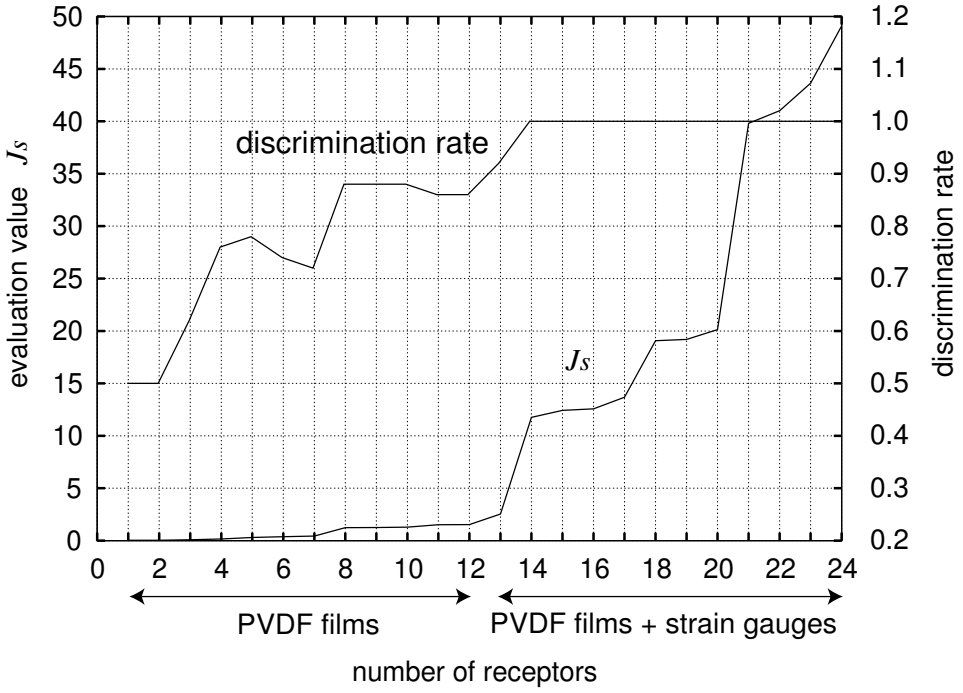


Fig.3.12 Relation between the discrimination rate and the number of the receptors

3.4.2　センサ素子の個数と判別率の関係

フィッシャーの線形判別法を用いることで，物体識別に用いるセンサ素子の個数を任意に変えることが可能になる．そこで，物体識別に用いるセンサ素子の個数が判別率，および線形判別法の評価値 Js にどのような影響を与えるかを示す．ここでは，例として紙と木材 a の識別を線形判別法で行う．使用する実験データは前節の実験で得た，柔軟指を押しつけたときのひずみゲージの値と，こすった時の PVDF フィルム出力の標準偏差を用いる．なお，前節の実験では物体ごとに 50 回の試行を行っているので，そのうち 25 回分のデータを用いて変換ベクトル $\boldsymbol{A}$ を求め，残り 25 回分のデータを判別が正しく行われたかどうかを検証するために用いる．

使用するセンサ素子の個数を一つずつ増やし，フィッシャーの線形判別法を適用したときの判別率と評価値 Js の変化を **Fig. 3.12** に示す．図の横軸は用いたセンサ素子の個数を示しており，1 から 12 までは PVDF フィルムのみを用いている．そして 13 から 24 では 12 枚の PVDF フィルムに加え，ひずみゲージを用いて判別を行っている．また左の縦軸は評価値 Js を示し，右の縦軸は判別率を示している．まず評価値の変化を見ると，使用する素子の個数が少ない場合には非常に小さいが，素子の個数が増えるにつれ増加する．ただし，増加の割合は一定ではなく，センサ素子によってほとんど変化しない場合

Table 3.1 Discrimination rates of each object

	cork	paper	vinyl	wood a	wood b
12 PVDF films	1.00	0.92	0.96	0.76	0.96
12 strain gauges	0.92	0.92	1.00	1.00	1.00
all receptors	1.00	0.92	1.00	0.96	0.96

と，急激に変化する場合があることが分かる．次に判別率の変化を見ると，使用するセンサ素子が 1 個だけの時には 0.5 だが，使用するセンサ素子を増やすにつれ判別率は増加し，14 個 (PVDF フィルム 12 枚およびひずみゲージ 2 枚) のセンサ素子を用いた段階で判別率が 1.0 になり，紙と木材 a を確実に識別できるようになった．ところで，この図においてセンサ素子の個数が 12 個まで，すなわち PVDF フィルムのみ用いた場合には識別率も評価値も低いが，ひずみゲージも用いることでこれらは急激に増加している．前節の **Fig. 3.9** ∼**3.11** に示した結果においても，紙と木材 a は PVDF フィルムのみでは識別できず，ひずみゲージを加えることで識別が可能になっており，本節の結果は前節の結果と一致する．さらに，判別率の変化は単調増加ではなく，センサ素子を増やすことで逆に判別率が減少する場合があるということ，ならびにセンサ素子によって評価値の増加量が異なることから，物体識別に有効なセンサ素子と，逆に悪影響を及ぼす素子があると考えられる．これについては 3.4.3 節に詳述する．

以上のように，識別に用いるセンサ素子の個数を増やせば，判別率も評価値も増加し識別が容易になる．そこで，PVDF フィルム 12 枚のみ，ひずみゲージ 12 枚のみ，そして全センサ素子 24 枚を用いて 5 つの物体の識別を行った場合の判別率を **Table 3.1** に示す．この表より，PVDF フィルムのみを用いた場合は木材 a の判別率が低いが，ひずみゲージのみ，あるいは 24 枚全てのセンサ素子を用いた場合には高い判別率を示している．ところで，この結果では 12 枚のひずみゲージを用いた方が，24 枚のセンサ素子を用いるよりも判別率が 1.0 になる物体が多いという結果になった．これは各試行における微妙な接触状態の違いにより，振動に敏感な PVDF フィルムの出力がノイズとなったと考えられる．

3.4.3 物体識別に有効な素子の選択

3.4.2 節の結果より，物体識別に有効なセンサ素子とそうではないセンサ素子があると考えられる．したがって，全センサ素子を使えば 5 つの物体を識別することは可能だが，物体識別に有効な素子だけを選択すれば，もっと少ないセンサ素子で物体を識別できるよ

Table 3.2 Rank order of transition of evaluation values Js in PVDF films

objects		receptor number large transition of Js $\Longleftarrow$							$\Longrightarrow$ small transition of Js				
cork	paper	10^*	12	4	3^*	8^*	$5^\dagger$	7	$1^\dagger$	11	2	$6^\dagger$	9
	vinyl	3^*	7	$1^\dagger$	10^*	2	9	4	12	8^*	11	$5^\dagger$	$6^\dagger$
	wood a	10^*	3^*	8^*	12	4	9	11	7	$1^\dagger$	$6^\dagger$	$5^\dagger$	2
	wood b	8^*	3^*	10^*	4	$1^\dagger$	$5^\dagger$	12	9	2	$6^\dagger$	7	11
paper	vinyl	11	7	9	8^*	10^*	2	4	3^*	$6^\dagger$	$5^\dagger$	12	1
	wood a	8^*	11	$5^\dagger$	4	$6^\dagger$	7	3^*	10^*	$1^\dagger$	9	12	2
	wood b	2	3^*	11	$6^\dagger$	8^*	10^*	$5^\dagger$	4	$1^\dagger$	9	12	7
vinyl	wood a	8^*	10^*	12	7	9	11	2	4	3^*	$5^\dagger$	$1^\dagger$	$6^\dagger$
	wood b	8^*	9	7	2	12	10^*	11	4	$1^\dagger$	$6^\dagger$	3^*	$5^\dagger$
wood a	wood b	11	8^*	3^*	10^*	4	12	$6^\dagger$	2	$1^\dagger$	$5^\dagger$	7	9

うになるはずである．ここでは有効なセンサ素子を選択する方法として，**Fig. 3.12** のように用いるセンサ素子の個数を増やしていったときに，評価値 Js の増加が大きかったセンサ素子が有効であると仮定し，各物体間について評価値の変化を調べた．**Table 3.2** は PVDF フィルムの中で評価値の増加が大きかった順に左からセンサ素子の番号を並べたものである．また **Table 3.3** は同様に，ひずみゲージの中で評価値の増加が大きかった順に左からセンサ素子の番号を並べたものである．これらの表より，評価値の増加が大きいセンサ素子は，識別する物体によって異なることがわかる．そこで，全体的に評価値の増加が大きかったセンサ素子と，逆に増加が小さかったセンサ素子を PVDF フィルムおよびひずみゲージからそれぞれ 3 枚ずつ選択する．ここでは増加の大きかったセンサ素子として，PVDF フィルムは no. 3, 8, 10 を選択し，ひずみゲージは no. 4, 8, 9 を選択した．これらは表中において “*” を付している．また増加の小さかったセンサ素子として，PVDF フィルムは no. 1, 5, 6 を選択し，ひずみゲージは no. 3, 5, 10 を選択し，表中において “†” を付した．

そして増加の大きかった 6 個のセンサ素子，および増加の小さかった 6 個のセンサ素子を用いて 5 つの物体の識別を行い，判別率を比較した結果が **Table 3.4** である．この表より，評価値の増加が大きかったセンサ素子で物体を識別した場合には判別率が高いが，増加の小さなセンサ素子で識別した場合には判別率が低いことがわかる．したがって，評価値 Js の増加が大きなセンサ素子は物体識別に有効であると言える．

Table 3.3 Rank order of transition of evaluation values Js in strain gauges

objects		receptor number large transition of $Js \Longleftarrow$							$\Longrightarrow$ small transition of Js				
cork	paper	7	8^*	2	4^*	$10^\dagger$	$3^\dagger$	9^*	12	11	6	1	$5^\dagger$
	vinyl	4^*	7	6	12	9^*	1	2	11	$5^\dagger$	8^*	$10^\dagger$	$3^\dagger$
	wood a	12	7	9^*	8^*	$10^\dagger$	4^*	$3^\dagger$	11	1	$5^\dagger$	6	2
	wood b	7	12	8^*	9^*	4^*	11	2	$10^\dagger$	$5^\dagger$	1	$3^\dagger$	6
paper	vinyl	4^*	6	12	8^*	$5^\dagger$	$3^\dagger$	7	9^*	1	2	$10^\dagger$	11
	wood a	2	9^*	1	11	8^*	12	7	$3^\dagger$	4^*	$10^\dagger$	6	$5^\dagger$
	wood b	4^*	9^*	$5^\dagger$	6	2	1	11	$10^\dagger$	7	8^*	12	$3^\dagger$
vinyl	wood a	7	8^*	9^*	4^*	$10^\dagger$	6	1	$5^\dagger$	2	$3^\dagger$	12	11
	wood b	8^*	6	11	1	$5^\dagger$	9^*	$3^\dagger$	4^*	$10^\dagger$	12	7	2
wood a	wood b	4^*	9^*	7	11	2	$10^\dagger$	$5^\dagger$	6	$3^\dagger$	1	8^*	12

Table 3.4 Comparing the selected receptors with discrimination rates

	cork	paper	vinyl	wood a	wood b
large transition of Js	0.96	1.00	0.96	1.00	1.00
small transition of Js	0.56	0.64	0.68	0.56	0.32

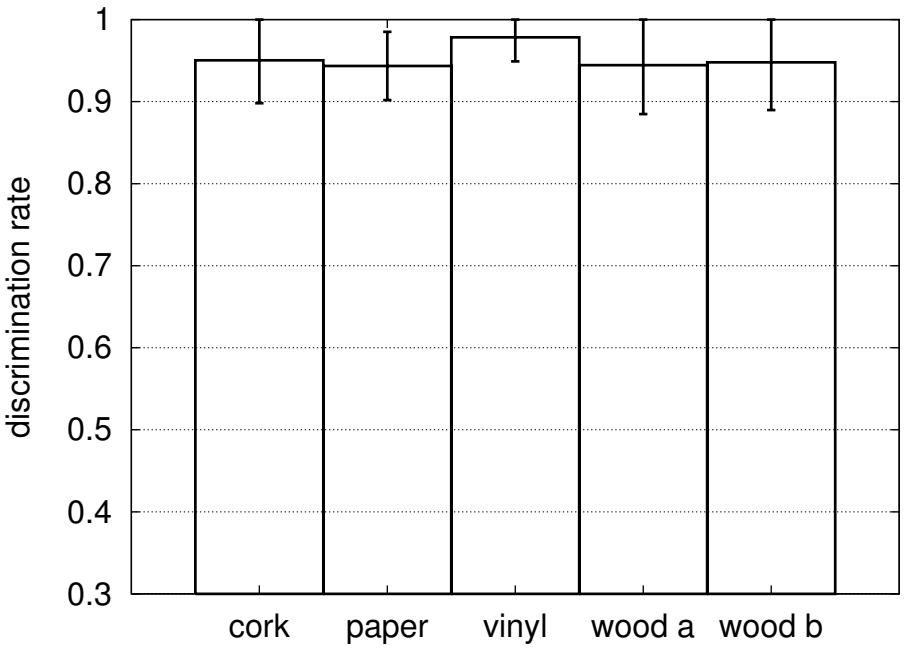


Fig.3.13 Discrimination rates using 12 receptors

3.5　耐故障性の検証

柔軟指には合計 24 枚のセンサ素子を用いているため，それらの一部が損傷しても残りのセンサ素子によってセンシング能力を維持できる可能性がある．そこで，24 枚中 12 枚のセンサ素子のみ正常な場合，および 6 枚のみ正常な場合の判別率を求めた．24 枚から 12 枚を選択する全ての組合せについて判別率を求め，その平均と標準偏差を **Fig. 3.13** に示す． **Table 3.1** に示した全てのセンサ素子が正常だった場合の判別率とこの図の判別率の平均を比較すると，センサ素子が減ったことにより判別率が低下しているものの，正常な場合とほとんど変わらない判別率を維持している．同様に 6 枚のセンサ素子を選択する全ての組合せについて判別率を求めた結果を **Fig. 3.14** に示す．この場合は判別率がかなり下がるが，それでも全て正常な場合の約 8∼9 割の判別率を示している．以上のことから，柔軟指はセンサ素子が冗長に存在するために耐故障性に優れているといえる．

3.6　結言

本章ではセンシング能力の高いロボットフィンガとして人間型柔軟指を提案した．柔軟指は人間の指のように硬さの異なる 2 層のシリコンゴムで作られており，その中に触覚受

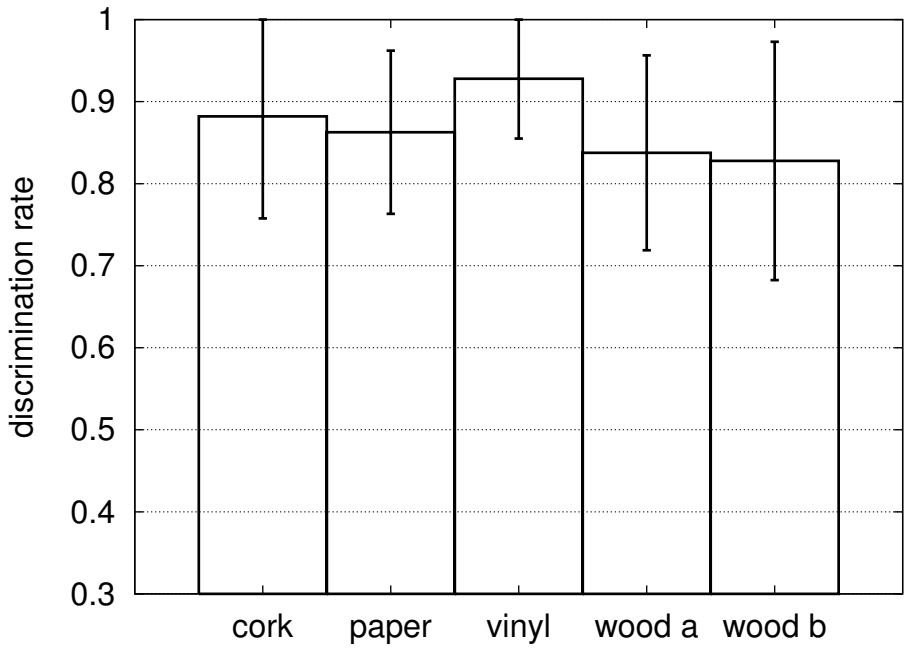


Fig.3.14 Discrimination rates using 6 receptors

容器の役割をする PVDF フィルムおよびひずみ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，こす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 種類の木材というテクスチャの異なる物体を識別し，柔軟指のセンシング能力を示した．

物体識別の手法として，設計者が全てのセンサ素子出力を考慮して，物体識別に用いるセンサ素子を選択する方法と，フィッシャーの線形判別法を用いて任意の個数のセンサ素子を用いる方法を示した．前者の方法では，識別に用いる 3 つのセンサ素子を選択する手間がかかるほか，物体ごとの分散楕円は重なりが無いものの，各試行のセンサ出力を見ると分散楕円の外側にあるデータも多く，完全な識別は難しい．一方，フィッシャーの線形判別法を用いた方法では，全センサ素子を識別に使用でき，また 5 つの物体を完全に識別することができた．さらに，物体識別に有効なセンサ素子とそうではないセンサ素子を評価値から判断することが可能になった．また，柔軟指が耐故障性に優れていることを示した．

第4章　柔軟指と視覚を用いた適応的操りの実現

4.1　緒言

ロボットハンドに器用な動作を行わせるには，触覚センサだけではなく視覚センサなどからも物体や把持状態についての情報を集め，それらの情報を使って制御を行う必要があると考えられる．しかし，柔軟指に埋められたセンサ素子の配置は設計者が把握できないため，各センサ素子出力と視覚センサの関係をキャリブレーションすることが非常に難しい．そこで，人間が経験を積むことでタスクをこなすことができるようになるのと同じように，柔軟指を用いたロボットに物体を操らせるなどのタスクを行わせることで，触覚センサ出力と視覚センサ出力の関係を自律的に獲得させる方法が考えられる．ロボットが物体を操るときに観測される情報は接触位置や接触力，滑りなど様々だが，ここでは物体把持に重要な感覚である滑りとその方向に注目し，これを視覚センサと触覚センサで観測することで，これらの関係をニューラルネットワークに獲得させる．そして，学習したニューラルネットワークが出力する滑り情報を用いて把持力制御実験を行う．

4.2　柔軟指と視覚を用いた滑り感覚の学習

4.2.1　センサ間の関係の自律的学習

本研究では **Fig. 4.1** に示すロボットシステムを対象とする．ロボットシステムは触覚センサを持ったロボットハンドと視覚センサで構成される．ロボットハンドは上下に移動可能で，物体を持ち上げることができる．そして視覚センサはロボットハンドと物体の動きを観測しており，ロボットハンドの移動方向と，ロボットハンドと物体の相対運動についての情報を出力する．また，触覚センサは力の方向と滑りを検出する能力を持っているが，センサ出力はキャリブレーションされていない．また，視覚センサと触覚センサの関係は未知である．

多くの既存研究では，設計者がセンサ出力を世界座標系へキャリブレーションし，また

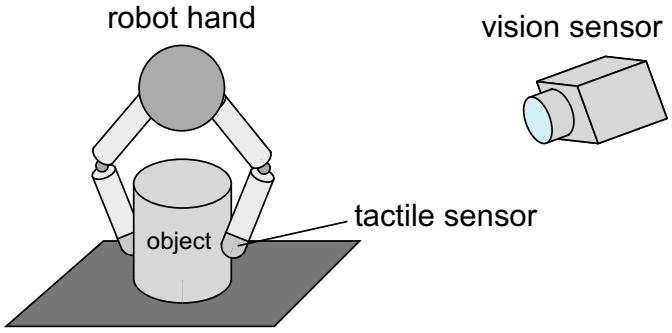


Fig.4.1 Robot system

設計者は世界座標系上で制御則を考えてロボットにタスクを行わせている [93, 94, 95]．しかし自律エージェントである人間について考えてみると，当然のことながら，たくさんの感覚器官からの信号を第三者が世界座標系へキャリブレーションしているのではなく，成長過程で自分自身が経験を繰り返すことで感覚器官の関係を自律的に獲得し，タスクをこなすことが可能になると考えられる．したがってロボットにおいても，タスクを通してセンサ間の関係を獲得できれば，センサのキャリブレーションは不要になると期待できる．

ここで使用するロボットシステムでは，視覚センサはロボットハンドと物体のマクロな動きを観測できるが，ロボットハンドの接触面におけるミクロな接触状態の変化を観測できない．一方，触覚センサはミクロな接触状態を観測できる．そこで，ロボットが物体を持ち上げる動作を行ったときに，視覚センサで検出されるマクロな接触状態の情報を用いて，触覚センサの出力する信号と接触状態の関係をニューラルネットワークに獲得させる．これによって，学習後のニューラルネットワークは触覚センサによってミクロな接触状態を出力できるようになると考えられる．

4.2.2　ニューラルネットワーク

Fig. 4.2 に提案するニューラルネットワークを示す．ロボットハンドが物体を持ち上げる動作をしたときの視覚センサと触覚センサ出力がニューラルネットワークに入力され，それらの関係はヘッブ則を元にした学習則によって学習される．この学習により，視覚センサで観測されるロボットハンドと物体間の相対運動の情報を教師信号として，触覚セン

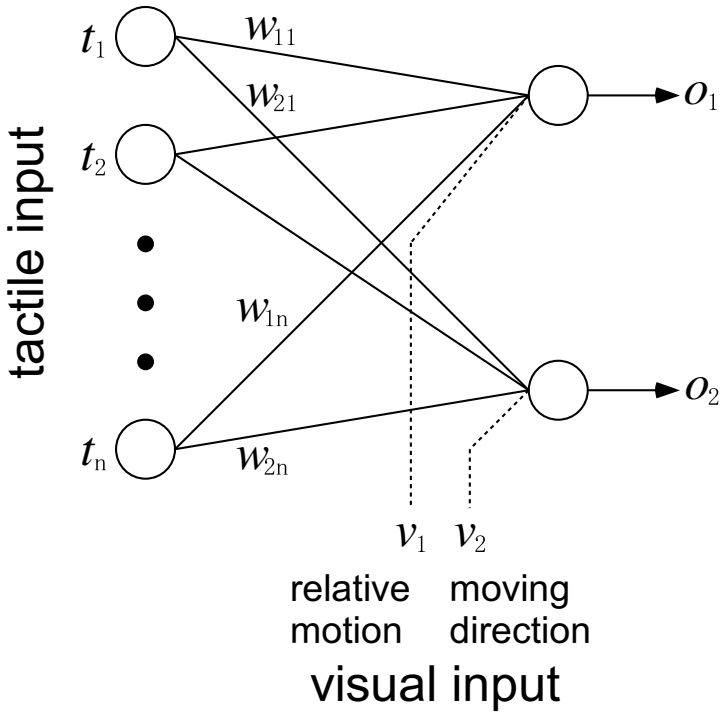


Fig.4.2 A proposed neural network

サとの関係を獲得させる．そして学習後は，触覚センサによるミクロな接触状態を出力できるようになると期待できる．

このニューラルネットワークは次のように動作する．まず，触覚センサの出力は，各センサ素子の最大出力値で正規化され，触覚センサノード t_n に入力される．また同時に，正規化されたセンサ値の絶対値も同様に t_n に入力される．つまり，触覚センサノードには 1 つのセンサ素子につき，符号ありと符号なしの 2 つの正規化値が入力される．次に，視覚センサの出力は視覚センサノード v_i に入力される．視覚センサノード v_1 には，ロボットハンドが動いたときに，物体との間で相対運動がなかった場合に 1 が入力され，あった場合には -1 が入力される．また，v_2 にはロボットハンドが上に移動した場合には 1 が入力され，下に移動した場合には -1 が入力される．以上の視覚センサノードへの入力をまとめると **Table 4.1** のようになる．表中の “no move” はロボットハンドや物体の動きが視覚センサで観測されなかったことを示す．そして，触覚センサノードと視覚センサノードは接続重み w_{ij} で接続され，ニューラルネットワーク出力 o_i を次式で求める．

$$o_i = f(\sum_j t_j w_{ij} + v_i) \tag{4.1}$$

Table 4.1 The output of the vision sensor

	relative motion (slipping)	no relative motion	no move
v_1	-1	1	0
	moving down	moving up	no move
v_2	-1	1	0

ここで $f(x)$ は次の飽和関数である．

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x > 1 \\ x, & |x| < 1 \\ -1, & x < -1 \end{cases} \tag{4.2}$$

接続重み w_{ij} は次式で更新する．

$$\Delta w_{ij} = \alpha\ r\ t_j v_i - \beta w_{ij} \tag{4.3}$$

$$r = (|w_{ij}| + \delta)/(\sum_j |w_{ij}| + \delta) \tag{4.4}$$

ここで α は学習率，β は忘却率，δ は任意の微小な正の値である．また r は可変学習率であり，接続重み $|w_{ij}|$ と全接続重みの合計 $\sum_j |w_{ij}|$ の比で変化する．この可変学習率は，関係の強いノード間の学習は加速し，逆に関係の弱いノード間の学習は減速させる役割がある．そして，この可変学習率と忘却項によって，ネットワーク出力への影響が小さいノードの接続重みは 0 に収束する．

以上の学習によって，触覚センサと視覚センサの関係がニューラルネットワーク上に獲得される．そして，触覚センサは視覚センサよりも敏感なため，マクロな相対運動がなくても触覚センサにより接触状態の変化を検出できる．また，視覚センサ出力がニューラルネットワークに入力されなくとも，触覚センサからの入力があれば学習後のニューラルネットワークは接触状態を出力できる．

4.3　実験

提案するニューラルネットワークによって，ロボットハンドと物体間の接触状態を自律的に獲得できることを示す実験を行う．また，学習したニューラルネットワークを用いることで，視覚センサからの入力がなくとも，触覚センサによってロボットハンドと物体間の接触状態を出力でき，把持力を制御できることを示す実験を行う．この実験において，前章で作製した柔軟指を触覚センサとして用いる．

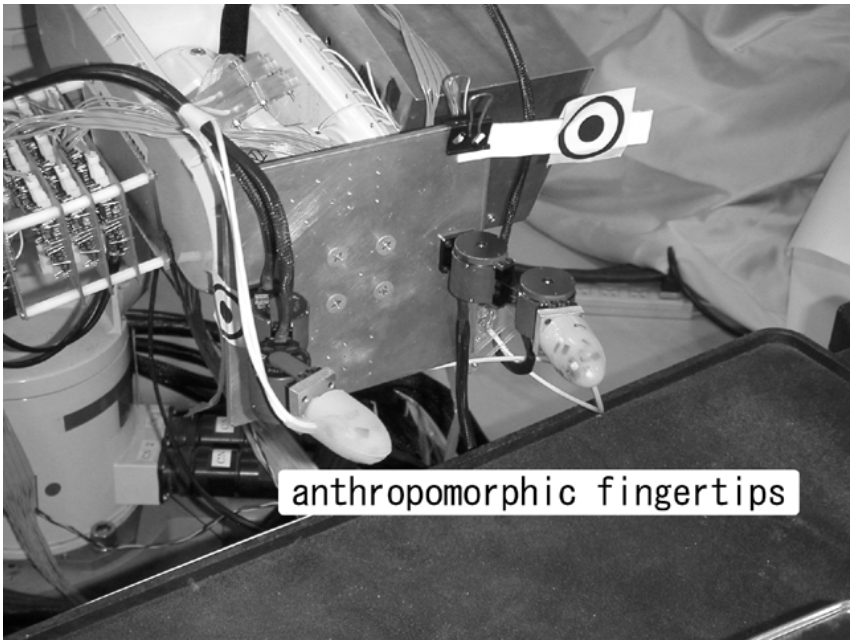


Fig.4.3 Developed anthropomorphic fingertips are mounted at end of a robot hand

4.3.1 実験装置

Fig. 4.3 , **Fig. 4.4** に実験装置を示す．前章で作製した柔軟指は **Fig. 4.3** のように，各指 2 自由度を持つロボットハンド (安川電機製) の先端に取り付けられている．ただし，本研究では把持力の制御のみ扱うため，ロボットハンドは 1 自由度のグリッパとして制御される．さらに，A/D コンバータのチャンネル数の制限のため，片方のロボットフィンガの触覚センサのみ実験に用いる．触覚センサのひずみゲージおよび PVDF フィルムの出力はそれぞれアンプで増幅され，A/D コンバータ (富士通製 RIF-01) を通してホストコンピュータ (Pentium III 450[MHz]) に送られる．ロボットハンドシステム全体は **Fig. 4.4** のように，ロボットハンド，ロボットアーム (三菱重工製 PA-10)，視覚センサであるビデオカメラで構成されている．ロボットハンドはロボットアームによって上下に移動することが可能で，物体を持ち上げることができる．また，視覚センサは物体とロボットハンドの動きを観測しており，トラッキングビジョン (富士通製 TRV-CPW5) を用いることで，ロボットハンドと物体の相対運動とロボットハンドの移動方向を出力する．なお，触覚センサと視覚センサのサンプリングレートはそれぞれ 1ms と 33ms である．本実験において，物体はプラスチック製のジョッキを用いる．その空重量は 450g で容量は 400ml である．また，このジョッキは上部と下部で外径が異なり，上部がわずかに細くなっている．

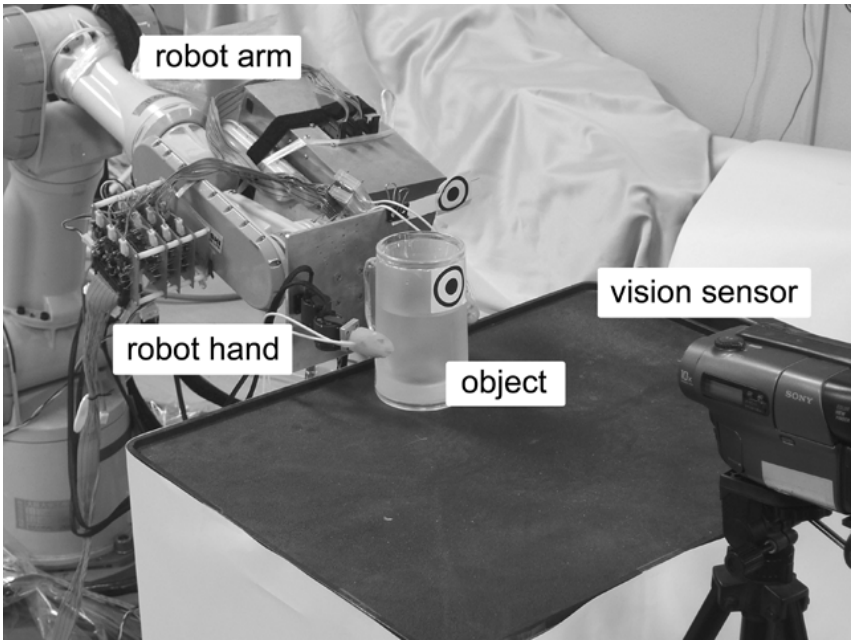


Fig.4.4 Experimental equipment consists of a robot hand, a robot arm, and a vision sensor

4.3.2　ニューラルネットワークの学習

ニューラルネットワークは，ロボットハンドが物体を持ち上げる動作と，物体上を下に移動する動作を行ったときのセンサデータを使って学習される．これらの動作は設計者により決められた動作であり，物体を持ち上げる動作は次のように制御される (**Fig. 4.5** 参照).

1. ロボットハンドを物体下部に移動し，把持力を増加させながらロボットハンドを上方に移動する．
2. ロボットハンドの把持力が十分になるまでは物体上を滑る．
3. 把持力が十分になると物体が持ち上がる．

一方，ロボットハンドを下に移動する動作では次のように制御される (**Fig. 4.6** 参照).

1. ロボットハンドを物体上部に移動する．
2. ロボットハンドの関節は固定したままロボットハンドを下方に移動させる．
3. ロボットハンドは物体下部に移動するまで物体上を滑る．

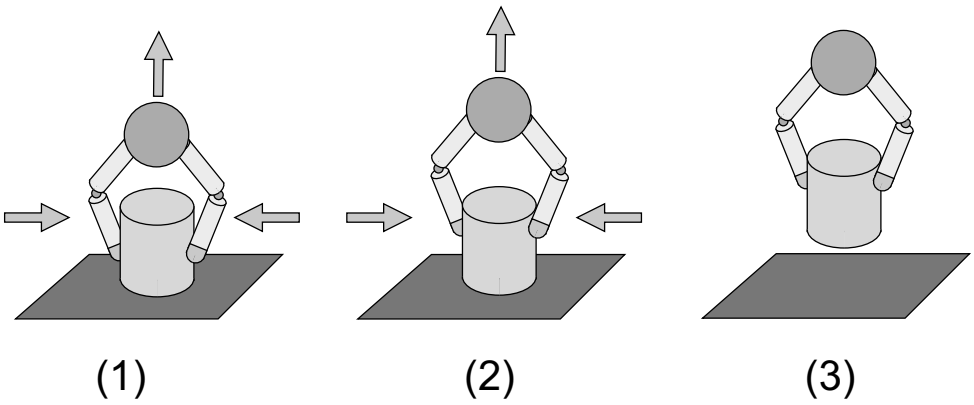


Fig.4.5 The robot hand moves upward at learning phase.

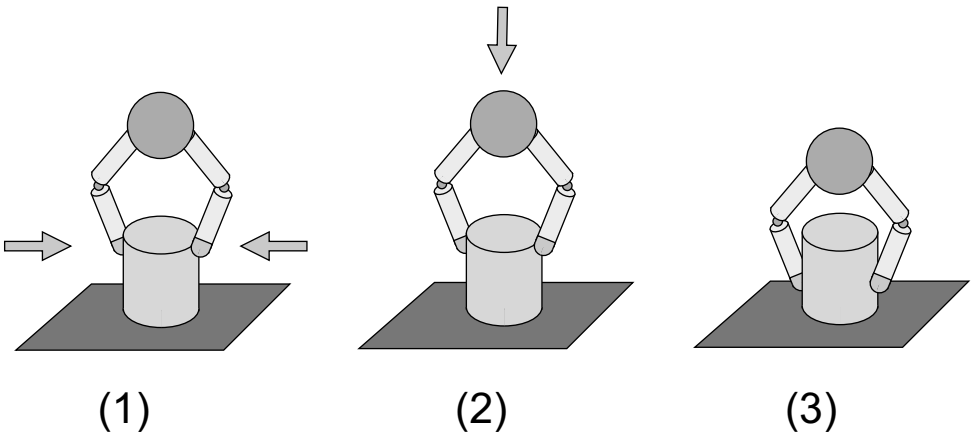
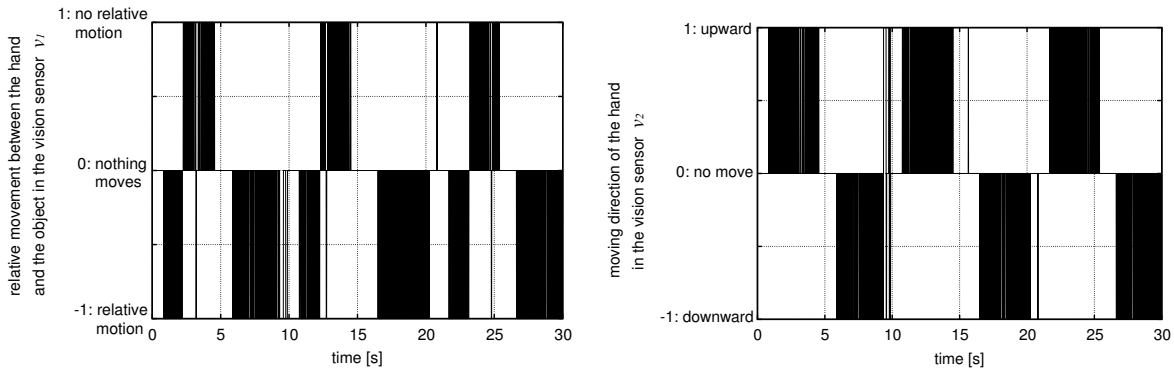


Fig.4.6 The robot hand moves downward at learning phase.

ロボットハンドはこの 2 つの動作を順に繰り返し，同時にニューラルネットワークはセンサ間の関係を学習する．触覚センサであるひずみゲージと PVDF フィルムの出力は各素子の最大出力値で正規化され，触覚センサノード t_n に入力される．また，その絶対値も t_n に入力される．つまり，各センサ素子の出力は符号ありと符号なしの 2 種類の正規化値が触覚センサノードに入力される．センサ素子はひずみゲージと PVDF フィルムの両方で 24 素子あるので，触覚センサノードは 48 ノードある．なお，接続重みは学習開始時にすべて 0 に初期化される．

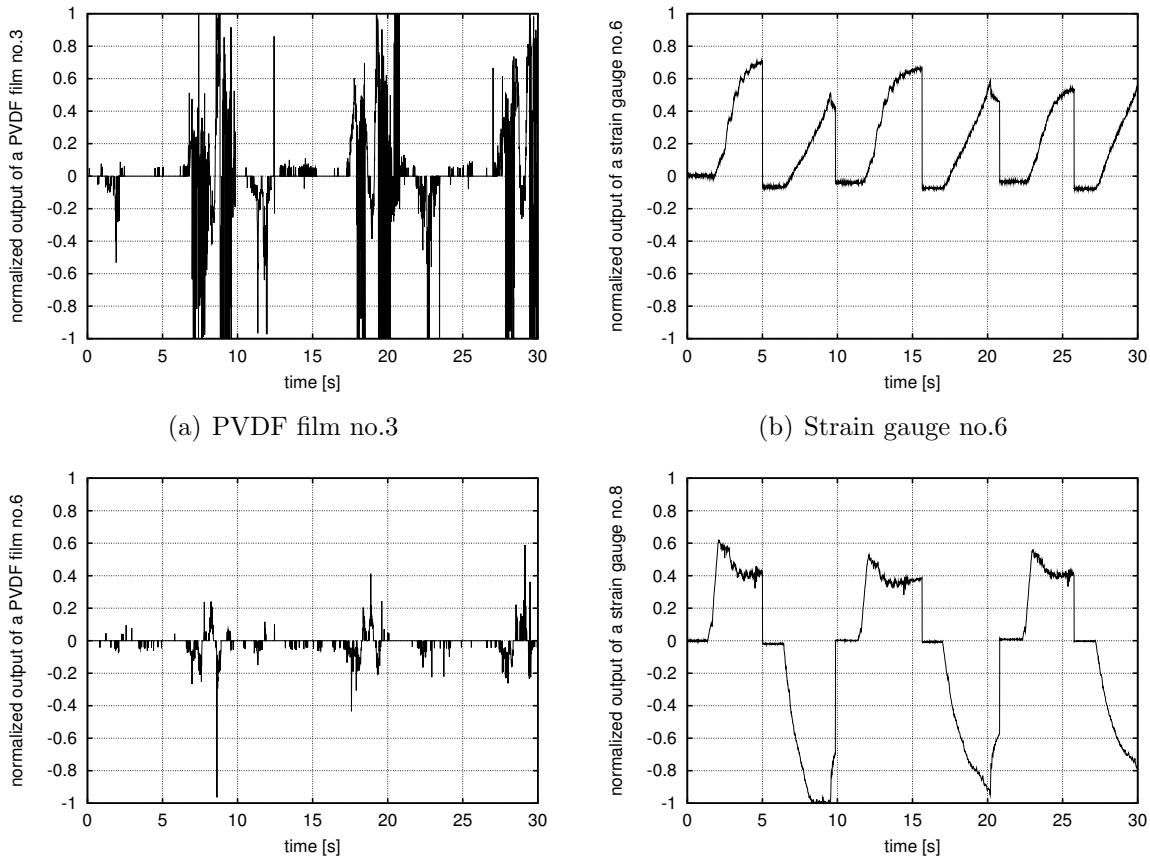
本実験ではロボットハンドを上下に移動する動作を交互に 7 回繰り返し，ニューラルネットワークを学習させた．この動作を行ったときの典型的なセンサ出力を **Fig. 4.7** , **Fig. 4.8** に示す．これらの図では学習の 1 回目から 3 回目のセンサ出力を表している．なお，PVDF フィルムの出力は，事前に調べたバックグラウンドノイズよりも小さい出力



(a) Relative movement between the hand and the object in the visin sensor v_1

(b) Moving direction of the hand in the vision sensor v_2

Fig.4.7 Output of the vision sensor at learning phase



(a) PVDF film no.3

(b) Strain gauge no.6

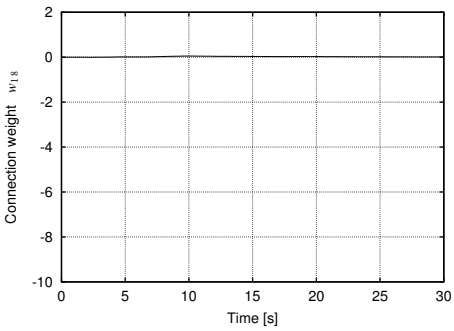
(c) PVDF film no.6

(d) Strain gauge no.8

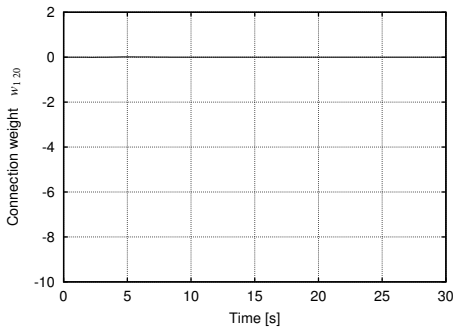
Fig.4.8 Output of the receptors at learning phase

だった場合には 0 としている． **Fig. 4.7(a)** に示す視覚センサ出力は **Table 4.1** で定義したように，ロボットハンドと物体間に相対運動があるときは $v1$ に -1 が出力され，無いときには 1 が出力される．またロボットハンドが上に移動したときは v_2 に 1 が出力され，下に移動したときには -1 が出力されている． **Fig. 4.7(a)** の視覚センサ出力 v_1 と **Fig. 4.8(a)** ， **Fig. 4.8(c)** の PVDF フィルム出力を比較すると，PVDF フィルム no. 3 は視覚センサ出力 v_1 が -1 になったときに大きな出力を示すが，PVDF フィルム no. 6 は小さな信号しか出力しない．これより PVDF フィルム no. 3 の出力はロボットハンドと物体間の相対運動，すなわち滑りに敏感であるが，no. 6 の PVDF フィルムは滑りにあまり敏感ではないと言える．また， **Fig. 4.7(b)** の視覚センサ出力 v_2 と **Fig. 4.8(b)** ， **Fig. 4.8(d)** のひずみゲージ出力を比較すると，ひずみゲージ no. 8 の出力は視覚センサ出力 v_2 と類似している．したがって，このセンサ素子出力は力の方向を検出すると考えられる．対照的に，ひずみゲージ no. 6 はロボットハンドの移動方向と関係なく出力されることから，接触力の大きさを出力していると考えられる．

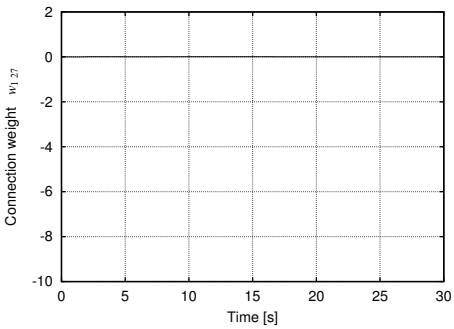
ニューラルネットワークはこれらのセンサデータによってセンサ間の関係を学習する．学習時の典型的な接続重みの変化として，ひずみゲージ no. 8 と PVDF フィルム no. 3 の接続重みの変化を **Fig. 4.9** に示す．これらの図は視覚センサ出力と関係の強いノードの接続重みだけ増加し，関係の弱いノードの接続重みは 0 に収束することを示している． **Fig. 4.9 (a)**∼**(d)** は視覚センサノード v_1 と接続しているノードの接続重みを示しており，この図では接続重み $w_{1\ 39}$ だけ学習が進み，それ以外のノードはほとんど 0 のままである．ここで $w_{1\ 39}$ は PVDF フィルム no. 3 の符号なしの正規化値との接続重みを示しているが，同じ素子の符号ありの正規化値との接続重み $w_{1\ 27}$ は 0 のままである．これは相対運動の有無を出力する視覚センサ出力 v_1 は，PVDF フィルム出力の符号とは関係が無く，その大きさにだけ関係があるためである．一方， **Fig. 4.9 (e)**∼**(h)** は視覚センサノード v_2 との接続重みを示しており，接続重み $w_{2\ 8}$ だけが増加し，ほかの接続重みは 0 に収束した．$w_{2\ 8}$ はひずみゲージ no. 8 の符号ありの正規化値との接続重みを示している．そして同じ素子の符号なしの正規化値との接続重み $w_{2\ 20}$ が 0 に収束している．視覚センサノード v_2 はロボットハンドの移動方向を示しており，方向は符号のない信号では表現できないため，符号のあるノードとの接続重みである $w_{2\ 8}$ との接続が強化されたのである．以上の学習結果から，同じセンサ素子であっても，符合の有無によってその役割が変化し，獲得される接続重みもまったく異なるものになることがわかる．そして，ニューラルネットワークは触覚センサと視覚センサの中で，応答特性の似ているノード同士の接続を自律的に強化することがわかる．



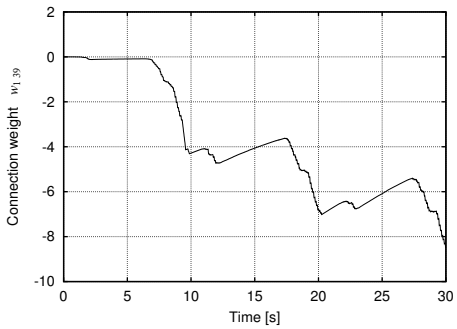
(a) $w_{1\ 8}$: connecting with the strain gauge no.8 (singed value)



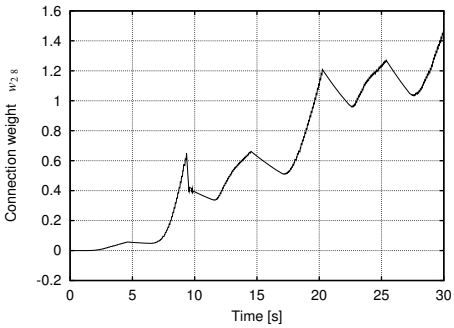
(b) $w_{1\ 20}$: connecting with the strain gauge no.8 (unsigned value)



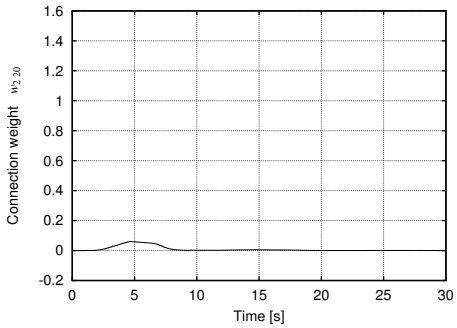
(c) $w_{1\ 27}$: connecting with the PVDF film no.3 (signed value)



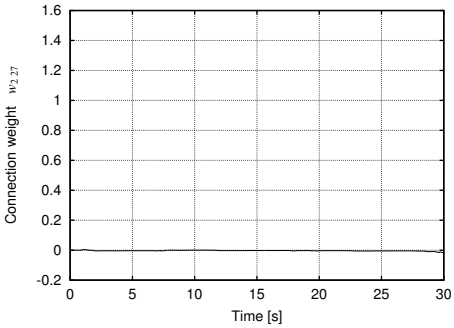
(d) $w_{1\ 39}$: connecting with the PVDF film no.3 (unsigned value)



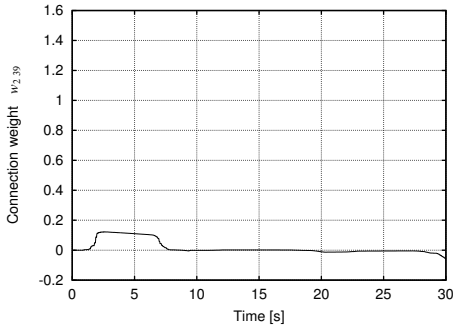
(e) $w_{2\ 8}$: connecting with the strain gauge no.8 (singed value)



(f) $w_{2\ 20}$: connecting with the strain gauge no.8 (unsigned value)



(g) $w_{2\ 27}$: connecting with the PVDF film no.3 (singed value)



(h) $w_{2\ 39}$: connecting with the PVDF film no.3 (unsigned value)

Fig.4.9 Connection weight between the vision sensor and the tactile sensor

4.3.3 学習後のニューラルネットワーク出力

学習後のニューラルネットワークが触覚センサからの入力だけで接触状態を出力できることを示す．また，触覚センサが視覚センサでは検出できないミクロな接触状態の変化を検出していることを示す．本実験で，触覚センサが視覚センサの役割を果たすことを示すため，視覚センサノード v_i は常に 0 とする．ただし，実験データの解析のため，視覚センサデータの記録は行っている．

学習時と同様に物体を持ち上げる動作を行ったときの視覚センサ出力 v_1 と，ニューラルネットワーク出力 o_1 を **Fig. 4.10** に示す．なお，この実験において，約 4.5[s] でロボットハンドを停止し物体を持ち上げたままにしている．この図から，視覚センサ出力 v_1 が -1 を出力しているとき，すなわち，物体上を滑っているときにニューラルネットワーク出力 o_1 も -1 を出力していることがわかる．しかし，視覚センサ出力 v_1 が 1 を出力しているとき，すなわちロボットハンドと物体に相対運動がないときには，ニューラルネットワーク出力 o_1 は 0 のままである．これは視覚センサ出力 v_1 と強い接続重みを持つ PVDF フィルムは滑りに敏感だが，相対運動がないときには滑りが発生せず，PVDF フィルムが反応しないためである． **Fig. 4.11** は **Fig. 4.10** の $0.7 \sim 1.1$[s] を拡大した図である．この図より，ニューラルネットワーク出力 o_1 は 0.78[s] で滑りを検出しているのに対し，視覚センサは遅れて 0.94[s] に滑りを検出している．また， **Fig. 4.12** は視覚センサ出力 v_2 とニューラルネットワーク出力 o_2 を比較した図である．この図より，ニューラルネットワーク出力 o_2 は視覚センサ出力 v_2 と同じように応答することがわかる．したがって，ニューラルネットワーク出力 o_2 はロボットハンドの移動方向を出力できる．さらに，その出力は視覚センサよりも速く立ち上がることがわかる．また，持ち上げ動作終了時刻である約 4.5[s] で視覚センサ出力は 0 になっているが，ニューラルネットワーク出力 o_2 はその後も出力が続いている．これは，視覚センサは物体やロボットハンドのマクロな動きを検出するため，停止した状態ではその状態を検出できないが，触覚センサは物体に接触していれば接触状態を出力できるからである．

以上より，触覚センサからの入力のみ用いたニューラルネットワークは，柔軟指に発生した相対運動，すなわち滑りを検出でき，またロボットハンドの移動方向，すなわち柔軟指にかかっている力の方向を出力できると言える．さらに，触覚センサはミクロな接触状態の変化を検出できるため，マクロな動きを検出する視覚センサよりも速くその変化を検出できる．また，視覚センサはマクロな動きが無いと接触状態を出力できないが，触覚センサを用いれば，接触している限りその状態を出力できる．しかし，ロボットハンドの把持力が十分で，物体との間に相対運動が無い状態は，ミクロな接触状態の変化が発生しないため，それを検出することができない．

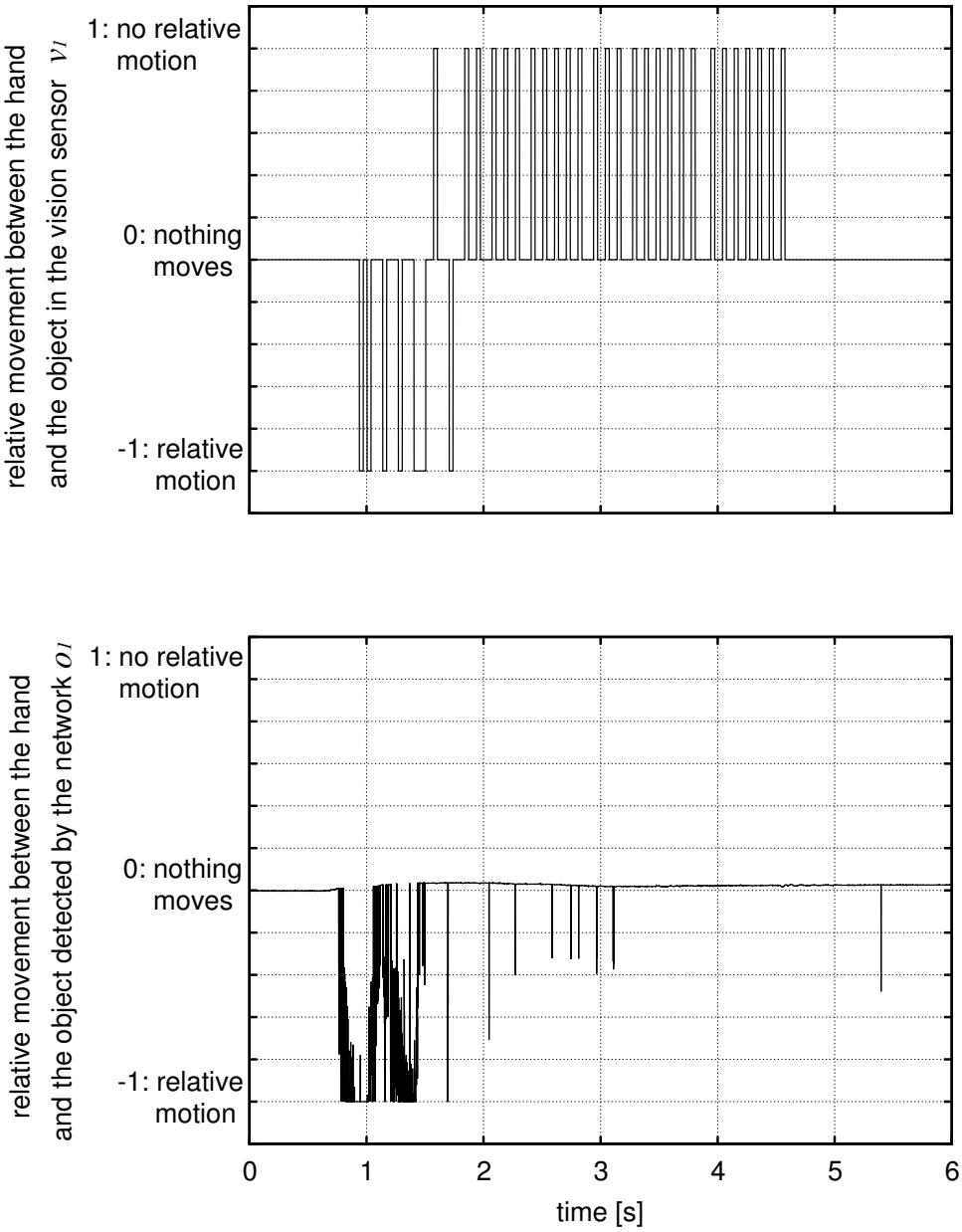


Fig.4.10 Comparing v_1 with o_1 when the robot hand moves upward at after learning

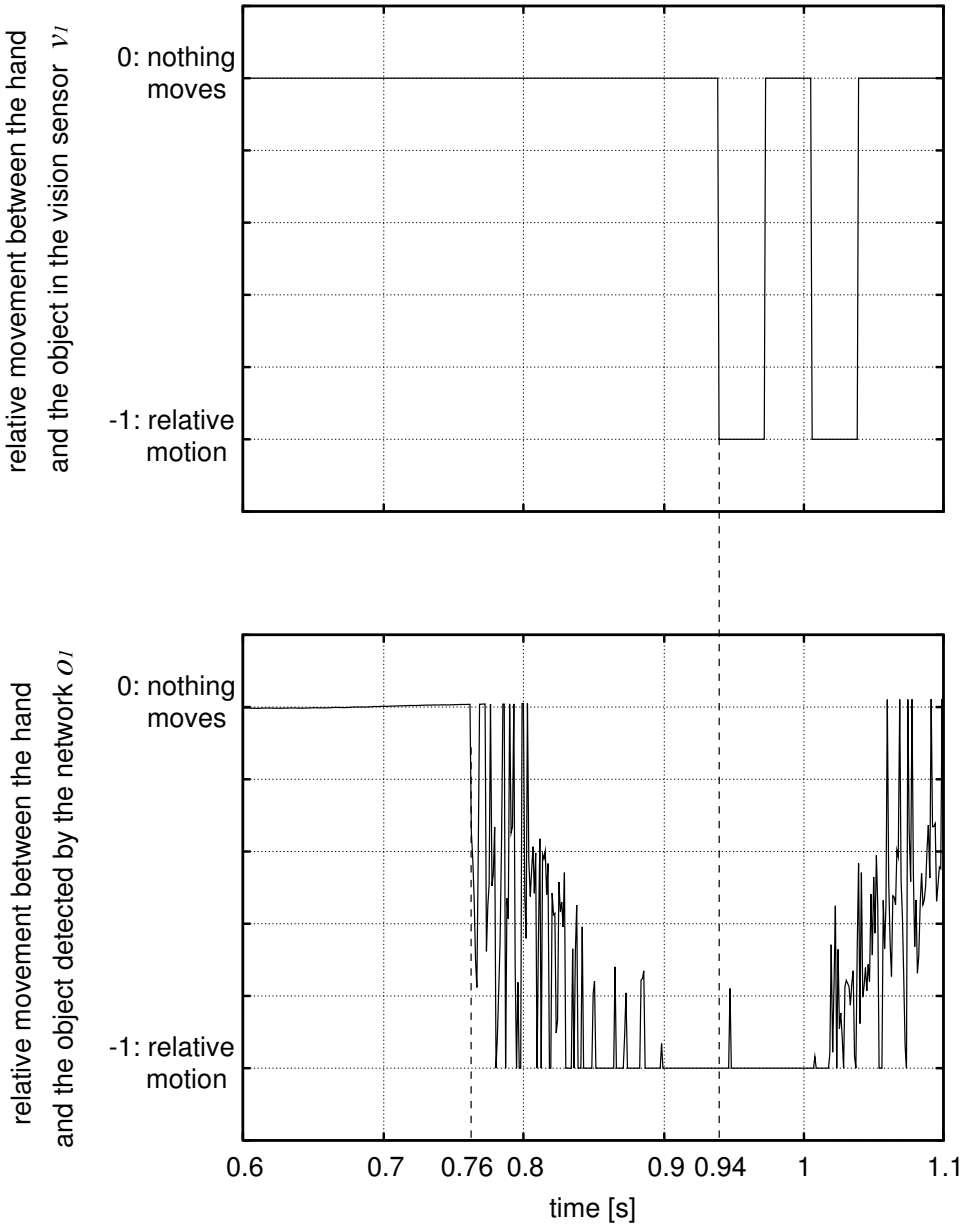


Fig.4.11 Comparing v_1 with o_1 from 0.6s to 1.1s

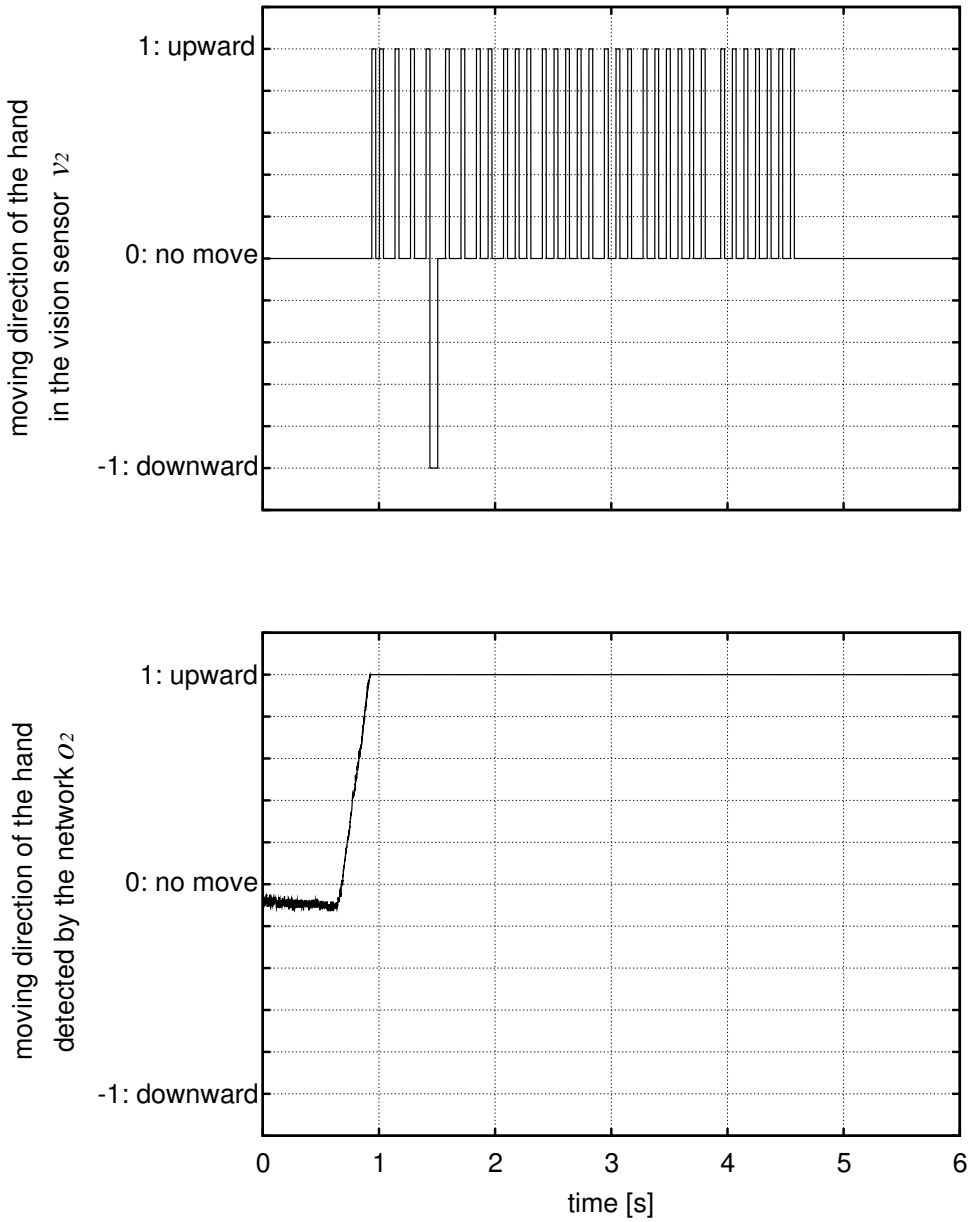


Fig.4.12 Comparing v_2 with o_2 when the robot hand moves upward at after learning

4.3.4 把持力制御実験 1

ロボットハンドの制御器を **Fig. 4.13** のように構築することで，ニューラルネットワークは触覚センサの情報を使ってロボットハンドを制御することが可能になる．そこで，ここではロボットハンドの把持力を触覚センサの出力から制御する実験を行う．また，同じ実験を視覚センサでも行い，それらを比較する．

ロボットハンドの把持力 f をニューラルネットワークの出力 o_1 を使って次式で更新する．

$$\Delta f = \eta(d - o_1) \tag{4.5}$$

ここで d は目標値，η は任意の係数である．実験において，触覚センサが視覚センサの役割を果たすことを示すために，視覚センサノード v_i は常に 0 を入力する．ただし，実験結果の解析のため，視覚センサ出力の記録は行っている．

実験の手順は，まず，ロボットハンドを物体下部に移動させ，物体を持ち上げることができない程度の弱い力で物体に接触させる．次にロボットハンドを上方に移動させ，同時に把持力を (4.5) 式によって制御する．本実験では目標値 d を 0 とした．これはニューラルネットワーク出力 o_1 が相対運動の発生を検出しないこと，すなわち，滑りが発生しないことを意味する．ここで目標値を $d = 1$ としないのは，視覚センサからの入力がないニューラルネットワークはロボットハンドと物体間に相対運動が無い状態を観測できないためである．

触覚センサを使う利点を示すため，同じ実験を視覚センサのみ使用して行った場合と比較する．視覚センサのみ使用する場合は把持力を次式で更新する．

$$\Delta f = \eta(d - v_1) \tag{4.6}$$

そして，触覚センサを使用した場合と，視覚センサを使用した場合で実験を行い，ロボットハンドと物体間の相対運動を検出しなくなるまでの時間を比較した．その実験結果を **Fig. 4.14** に示す．この図は実験を行ったときの視覚センサ出力 v_1 を示している．**Fig. 4.14 (a)** は触覚センサを用いて把持力制御を行った場合， **Fig. 4.14 (b)** は視覚センサのみを用いて行った場合の結果である．この図を見ると触覚センサを用いた場合には 1.35s で視覚センサ出力が 1 を示し，この時点で相対運動が無くなったことがわかる．一方，視覚センサを用いて制御した場合には 1.65s になって相対運動が無くなっている．したがって，触覚センサで視覚センサと同様の把持力制御ができるだけでなく，視覚センサよりも速く制御を行え，発生する滑りを少なくできることがわかる．

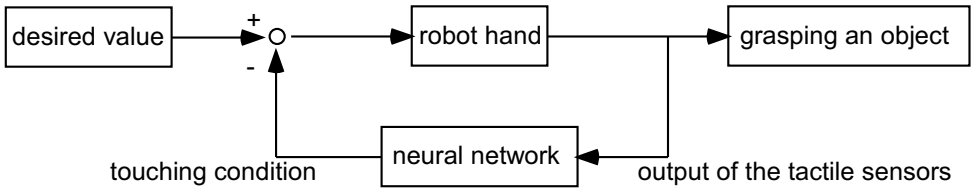


Fig.4.13 A block diagram for robot hand controller

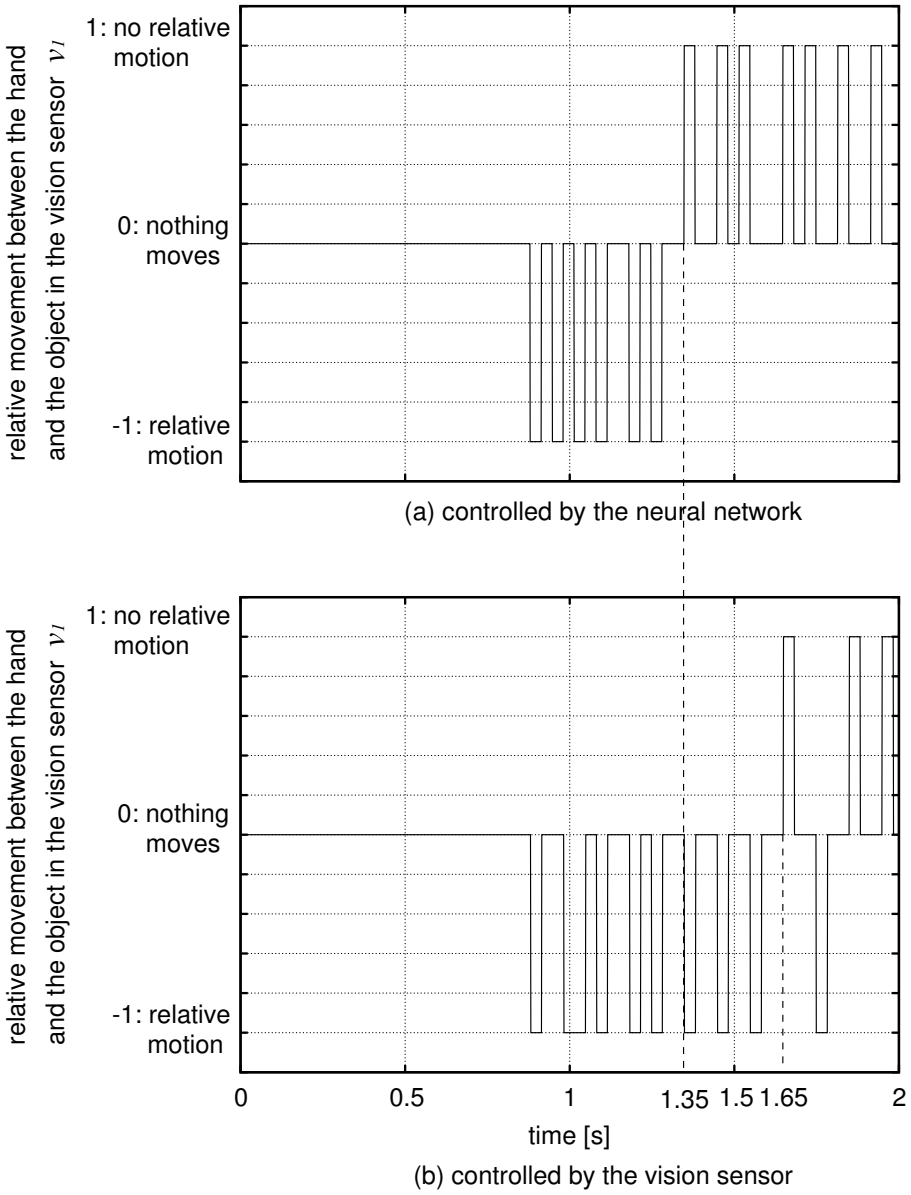


Fig.4.14 Comparing of amount of slip in vision sensor

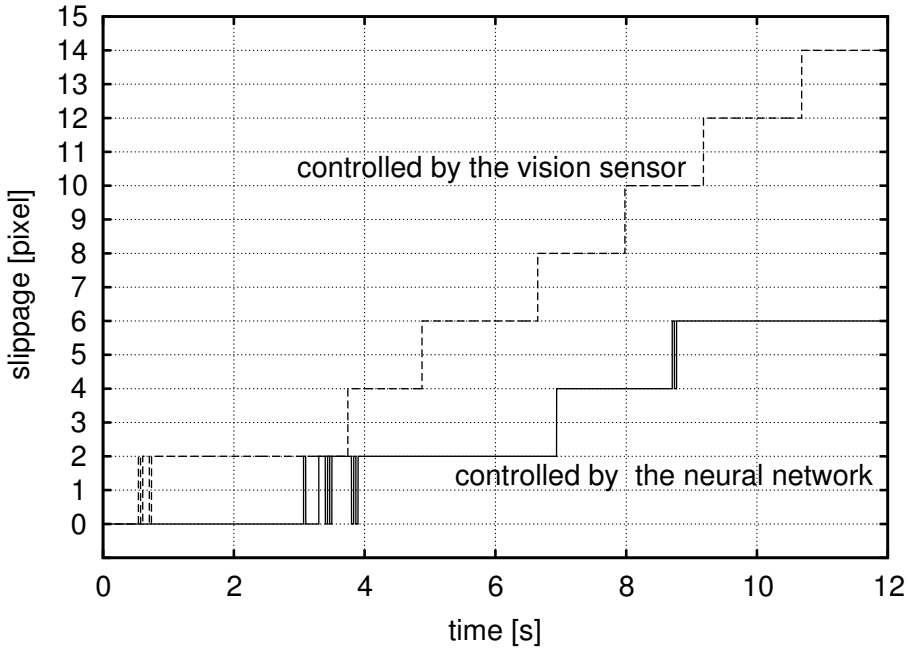


Fig.4.15 Slippage observed in the vision sensor

4.3.5 把持力制御実験 2

ニューラルネットワークによる把持力制御のためのもう一つの実験を示す．この実験では持ち上げた物体を落とさないように把持力制御を行う．実験の手順は，まず，対象物体である空のジョッキをロボットハンドで持ち上げる．次に，ジョッキに水を注ぐことで重量を増加させる．そしてジョッキを滑り落とさないように (4.5) 式 で把持力を制御する．この実験においても触覚センサの利点を示すため，同様の実験を視覚センサのみ使用して行った結果と比較する．

実験開始約 1s 後に水をジョッキに注ぎ始めた場合の実験結果を示す． **Fig. 4.15** は視覚センサが観測した物体の移動量を示しており，この量が少ない程，滑りが少なかったことを示している．実線で示したのは触覚センサを使って把持力制御した場合で，点線は同じ実験を視覚センサのみで行った場合の結果である．この図より，触覚センサを用いた方が，物体の移動量が少ない，すなわち滑り量が少ないということがわかる．これは，触覚センサを用いた場合には，そのサンプリングレートである 1ms ごとに接触状態を検出でき，同時に把持力が制御されるのに対し，視覚センサでは 33ms ごとに相対運動を検出している上，視覚センサ上で 1 ピクセル以上動かないと滑りと判定されないためである．よって，この実験においても，触覚センサを用いたニューラルネットワークによる把持力制御が，視覚センサを用いたそれよりも速く制御でき，滑りも少なくなることがわかった．

4.4　結言

ロボットハンドに器用な動作を行わせるには，触覚センサの情報だけではなく，視覚センサの情報も組み合わせて制御を行う必要があると考えられた．しかし，柔軟指に用いられている触覚センサは設計者がキャリブレーションすることが難しいため，本章ではロボットハンドにタスクを行わせ，そのときの触覚センサ出力と視覚センサ出力をニューラルネットワーク上に学習させることで，それらのセンサ間の関係を獲得させることを提案した．実験においてロボットハンドは物体上を上下に移動する動作を繰り返し，それを観測している視覚センサと触覚センサの関係を獲得した．そして，学習後のニューラルネットワークを使うことで，視覚センサからの入力がなくとも触覚センサだけで接触状態を出力できることを示した．また，視覚センサはロボットハンドと物体間のマクロな相対運動が無いとその状態を検出できないが，触覚センサは物体とのミクロな接触状態を検出できるため，より敏感に接触状態の変化を出力できることを示した．さらに，ニューラルネットワーク出力を使った把持力制御実験では，ロボットハンドと物体間に発生した滑りを検出して，滑りがなくなるように把持力を制御することができた．また，触覚センサは視覚センサよりも速く滑りを検出できることから，視覚センサを使った把持力制御よりも滑り量を減らすことができた．

第5章　結言

本論文では，人間のように器用な動作が可能なロボットハンドを実現することを目的とした．器用な動作には視覚や指先感覚などたくさんの情報が必要だが，従来のロボットハンドは指先感覚が特に不足していると考え，指先感覚を向上させるために人間型柔軟指を提案した．また柔軟指は設計者によるキャリブレーションが困難なため，ロボット自身にタスクを行わせ，そのときの各センサ出力からそれらの関係を学習する方法と提案した．

第1章，第2章では既存の触覚センサについて概観し，その物理的構造を人間のそれに近づけることで，センシング能力を向上させられる可能性があることを指摘した．またそのような触覚センサをロボットで用いるには，ロボット自身が触覚センサ出力と接触状態の関係を学習しなくてはいけないことを指摘した．

第3章では人間型柔軟指を提案し，そのセンシング能力を示すため，テクスチャの異なる物体の識別実験を行った．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，その内部に触覚センサ素子として，ひずみゲージとPVDFフィルムが12枚ずつ様々な位置や方向埋められている．このような構造のため，同じ種類のセンサ素子であっても埋められた位置によって応答特性が異なり，ある外部刺激に対して各センサ素子が異なる応答を示すようになる．さらに2種類のセンサ素子を用いることで情報量が増加し，従来の触覚センサよりもセンシング能力が向上すると期待された．

センシング能力を示すための物体識別実験では，テクスチャの異なる5つの物体に柔軟指を押し付け，こするという動作を繰り返し，そのときのセンサ出力からそれらの物体を識別した．識別には2つの方法を用いた．一つは，設計者がすべてのセンサ素子出力を考慮し，物体識別に適した3つの素子を選択する方法である．この方法でも物体を識別できるものの，センサ素子の選択に手間がかかるという問題があった．そこで，もう一つの物体識別の方法として，フィッシャーの線形判別法を用いた．この判別法を用いることで任意の個数のセンサ素子を識別に用いることが可能になり，全センサ素子を用いて5つの物体を識別することができた．また，物体の識別に有効なセンサ素子とそうではないセンサ素子を判別法の評価値から選ぶことが可能になった．

第4章では柔軟指と視覚を持つロボットハンドに，それらのセンサの関係を自律的に獲得する手法として，ロボットハンドに物体上を移動する動作を行わせたときのセンサ出力

をニューラルネットワーク上に学習させる方法を示した．ロボットシステムは柔軟指を搭載した2指ロボットハンドと視覚センサで構成されており，視覚センサはロボットハンドと物体の動きを観測している．そしてニューラルネットワークには視覚センサと触覚センサの信号が入力され，ヘッブ則によってこれらの関係を学習した．これにより視覚センサで観測されていたロボットハンドと物体間のマクロな接触状態の変化と，触覚センサで観測されるミクロな接触状態の関係が獲得された．その結果，触覚センサは物体とのミクロな接触状態を検出できるため，視覚センサよりも敏感に接触状態の変化を出力できることを示した．そして，学習したニューラルネットワークを用いた把持力制御実験を2種類行い，触覚センサの検出した滑りによって把持力を増加させることができた．実験は触覚センサを用いた場合と，視覚センサのみ用いた場合で比較した．その結果，どちらの実験でも触覚センサを用いることで，視覚センサよりも速く接触状態の変化を検出でき，滑りの発生を抑えられることを示した．

今後の課題として次のことが考えられる． 第3章ではテクスチャの異なる物体を識別することで柔軟指のセンシング能力を示したが，べたべた感やさらさら感など様々な触感を識別できるかを示し，この触覚センサのセンシング能力の限界について調査する必要があるだろう．また，本研究では1本の柔軟指のセンシング能力を示しているが，柔軟指は個体によってセンサ素子の配置が異なり，センシング能力にも個体差があると考えられる．個体によってどの程度，センシング能力に差が発生するのか検証する必要がある．さらに，本研究ではオフラインで物体の識別を行っているが，物体の識別が重要になる場面は，例えばロボットハンドで物体を操るときに，その物体のテクスチャに応じて制御則を切替えるといった場面である．そのような場面で柔軟指を用いることを考慮し，オンラインで識別する方法が必要である．

第4章で示したニューラルネットワーク出力は，ロボットハンドと物体間の相対運動の有無とロボットの移動方向の2つのノードがあったが，本研究では相対運動の有無のみ用いて，把持力制御実験を行っている．したがって，移動方向を出力するノードを用いたタスクを行い，その有効性を示す必要がある．また，この実験において視覚センサ出力は設計者によって定義されていた．人間を始めとして，生物は誕生した瞬間からすべての感覚器官の情報を効率よく利用しているのではなく，自分自身で様々な経験を積みながら感覚器官の情報を利用できるようになると考えられる．したがって，ロボットにおいても設計者によって定められた視覚センサ出力を用いずに，ローレベルな視覚センサ出力を用いて，センサ間の関係を獲得すべきであると考える．さらに，本研究では滑りの検出と把持力制御というごく簡単なタスクしか行っていない．器用な動作といえるもっと複雑なタスクへ適用する必要がある．

謝辞

本研究は，細田 耕助教授，浅田 稔教授のご指導のもとに行ったものであり，ここに深く感謝の意を表しお礼申し上げます．

細田先生にいただいた様々なアイデアにより柔軟指の研究を進めることができました．また浅田先生をはじめ，高橋 泰岳先生，荻野 正樹さん，田熊 隆史さん，吉川 雄一郎さんらには，ゼミにおいて私の研究を議論していただき，問題点を見つけ出すことができました．光永 法明さんや山崎 文敬さんには実験装置に関するアドバイスをいただき，高性能な実験装置を構築することができました．山崎 雄介さんや種治 芳尚さんには柔軟指の作製と実験を手伝ってもらいました．石黒 浩先生，菅沼 克昭先生には本論文の副査を勤めていただき，研究の問題点，研究者としての心構えを指導していただきました．また，研究以外にも浅田研究室のメンバーとのイベントは良い息抜きとなりました．最後に，両親や兄には生活の面でバックアップしていただき，また励ましの言葉のおかげでここまで研究を続けることができました．

本論文の提出にあたり，お世話になった多くの方々に対してここに記して謝辞とし，深く感謝致します．

平成 17 年 10 月 多田 泰徳

参考文献

[1] Antonio Bicci and Vijay Kumar. Robotic grasping and contact: A review. In *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 348–353, 2000.

[2] 篠田裕之. 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.

[3] 岩村吉晃. 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.

[4] 前野隆司, 小林一三, 山崎信寿. ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 63, No. 607, pp. 881–888, 1997.

[5] M. H. Lee and H. R. Nicholls. Tactile sensing for mechatronics – a state of the art survey. *Mechatronics*, Vol. 9, pp. 1–31, 1999.

[6] 下条誠, 金森克彦, 明愛国, 金森哉吏, 石川正俊. 液状化感圧ゴムを用いた自由曲面型接触センサの開発. 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会予稿集, p. 1G24, 2002.

[7] 稲葉雅幸, 星野由紀子, 井上博允. 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.

[8] Makoto Shimojo, Masatoshi Ishikawa, and Kikuo Kanayama. A flexible high resolution tactile imager with video signal output. In *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 384–391, 1991.

[9] 下条誠, 谷保勇樹. 2 次元分布荷重中心位置検出触覚センサ–センサ構成パラメータとセンサ特性について–. ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, pp. 2A1–N–107, 2005.

[10] Oliver Kerpa, Karsten Weiss, and Heinz Wörn. Development of a flexible tactile sensor system for a humanoid robot. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robots and Systems*, pp. 1–6, 2003.

[11] 中本裕之, 小坂宣之, 田路渡, 竹内昭, 前田正, 中村皆生, 中川志信, 小林太, 今村信昭, 白沢秀則. ユニバーサルロボットハンドのための高感度触覚センサ. ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, pp. 1P1–N–105, 2005.

[12] Ryosuke Tajima, Satoshi Kagami, Masayuki Inaba, and Hirochika 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.

[13] 星貴之, 篠田裕之. 非線形弾性を利用する触覚センシング. ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, pp. 2P1–N–104, 2005.

[14] R. S. Fearing. Tactile sensing mechanisms. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 3, pp. 3–23, 1990.

[15] David Johnston, Ping Zhang, John Hollerback, and Stephen Jacobsen. A full tactile sensing suite for dexterous robot hands and use in contact force control. In *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3222–3227, 1996.

[16] Jr. Richard M. Voyles, Gary Fedder, and Pradeep K. Khosla. Design of a modular tactile sensor and actuator based on an electrorheological gel. In *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 13–17, 1996.

[17] Mitsuhiro Hakozaki and Hiroyuki Shinoda. Digital tactile sensing elements communicating through conductive skin layers. In *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Automation*, pp. 3813–3817, 2002.

[18] Martin Nilsson. Tactile sensors and other distributed sensors with minimal wiring complexity. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 5, No. 3, pp. 253–257, 9 2000.

[19] Nobuyuki Futai, Kiyoshi Matsumoto, and Isao Shimoyama. Simulation, fabrication and evaluation of microinductor-based artificial tactile mechanoreceptor embedded

in PDMS. In *Proceedings of the 16th IEEE International Electro Mechanical Systems Conference*, pp. 206–209, 2003.

[20] Mitsuhiro Hakozaki, Hideki Oasa, and Hiroyuki Shinoda. Telemetric robot skin. In *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 957–961, 1999.

[21] Hiroyuki Shinoda and Hideki Oasa. Wireless tactile sensing element using stress-sensitive resonator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 5, No. 3, pp. 258–265, 2000.

[22] 本間将人, 昆陽雅司, 白土寛和, 前野隆司, 河邊憲次, 元島栖二. カーボンマイクロコイルを用いた触覚センサ (第 1 報：基本コンセプト). 第 22 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p. 1J15, 2004.

[23] 本間将人, 昆陽雅司, 前野隆司, 森田宏, 河邊憲次, 元島栖二. カーボンマイクロコイルを用いた触覚センサの機械-電気変換メカニズム. ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, pp. 1P2–N–106, 2005.

[24] Hiroshi Maekawa, Kazuo Tanie, Kiyoshi Komoriya, Makoto Kaneko, Chiyoharu Horiguchi, and Takao Sugawara. Development of a finger-shaped tactile sensor and its evaluation by active touch. In *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1327–1334, 1992.

[25] 前川仁, 谷江和雄, 金子真, 鈴木夏夫, 堀口千代春, 菅原武雄. 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.

[26] Dimitris Hristu, Nicola Ferrier, and Roger W. Brockett. The performance of a deformable-membrane tactile sensor: basic results on geometrically-defined tasks. In *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 508–513, 2000.

[27] 神山和人, 溝田晃, Kevin Vlack, 梶本裕之, 川上直樹, 舘暲. 光学式三次元触覚センサのロボットフィンガへの適用. ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, pp. 1P1–N–104, 2005.

[28] R. Lazzarini, R. Magni, and P. Dario. A tactile array sensor layered in an artificial skin. In *Proceedings of 1995 IEEE/RSJ Internaltional Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 114–119, 1995.

[29] Jonathan Engel, Jack Chen, and Xuefeng Wang. Technology development of integrated multi-modal and flexible tactile skin for robotics applications. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robots and Systems*, pp. 2359–2364, 2003.

[30] Brad L. Hutchings, Allen R. Grahn, and Russell J. Petersen. Multiple-layer cross-field ultrasonic tactile sensor. In *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2522–2528, 1994.

[31] Hiroyuki Shinoda and Shigeru Ando. A tactile sensor with 5-d deformation sensing element. In *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 7–12, 1996.

[32] Hiroyuki Shinoda, Kenichi Matsumoto, and Shigeru Ando. Acoustic resonant tensor cell for tactile sensing. In *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3087–3092, 1997.

[33] J. Dargahi, M. Parameswaran, and S. Payandeh. A micromachined piezoelectric tactile sensor for use in endoscopic graspers. In *Proceedings of 1998 IEEE/RSJ Internaltional Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1503–1508, 1998.

[34] 保東孝宏, 下山勲. 高分子圧電フィルムを用いた触覚センサ. 大 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1051–1052, 2001.

[35] Ping Li and Yumei Wen. An arbitrarily distributed tactile-sensor array based on a piezoelectric resonator. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 18, No. 2, pp. 152–158, 1999.

[36] Kouchi Yamada, Kenji Goto, Yoshiki Nakajima, Nobuyoshi Koshida, and Hiroyuki Shinoda. Wire-free tactile sensing element based on optical connection. In *Proceedings of the 19th Sensor Symposium*, pp. 433–436, 2002.

[37] Takahiro Inoue and Shinichi Hirai. Modeling of soft fingertip for object manipulation using tactile sensing. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robots and Systems*, pp. 2654–2659, 2003.

[38] 井上貴浩, 平井慎一. 半球型柔軟指の回転・転がり接触変形圧力モデル. 第 22 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p. 2J16, 2004.

[39] 前野隆司, 佐藤武彦. 爪のひずみを利用した触覚センサ. ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集, pp. 1A1–69–09, 2000.

[40] 佐々木大輔, 則次俊郎, 高岩昌弘. 空気圧検出型ソフト触覚センサの開発と応用. SICE システムインテグレーション部門講演会講演論文集, pp. 327–328, 2002.

[41] Makoto Kaneko and Ryuta Horie. Tactile sensor with automatic gain control. In *Proceedings of 2003 IEEE/RSJ Internaltional Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 25–30, 2003.

[42] 齋藤直樹, 佐藤俊之, 梶川伸哉, 岡野秀晴. 柔軟接触型 4 軸力センサの開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, pp. 1P1–H–10, 2004.

[43] 齋藤直樹, 佐藤俊之, 岡野秀晴. 柔軟接触センサの変形量算出と機械インピーダンスの推定. ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, pp. 1P2–N–103, 2005.

[44] Kouji Murakami and Tsutomu Hasegawa. Novel fingertip equipped with soft skin and hard nail for dexterous multi-fingered robotic manipulation. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 708–713, 2003.

[45] 村上剛司, 長谷川勉. 器用な多関節多指ロボットハンドのための柔軟被覆と爪を有する指先. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 5, pp. 616–624, 2004.

[46] 山田陽滋. 把握までのセンシング戦略その 2:滑りと静摩擦係数の検出〜表面粗さ情報の取得. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 7, pp. 959–965, 1993.

[47] Jae S. Son, Eduardo A. Monteverde, and Robert D. Howe. A tactile sensor for localizing transient events in manipulation. In *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 471–476, 1994.

[48] 山田陽滋, 森田裕之, 梅谷陽二. ロボットハンドのための指紋を備えた高周波微振動検出式滑り覚センサ. 計測自動制御学会論文誌, Vol. 36, pp. 473–480, 2000.

[49] Isao Fujimoto, Yoji Yamada, Takashi Maeno, Tetsuya Morizono, and Yoji Umetani. Development of artificial finger skin to detect incipient slip for realization of static friction sensation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pp. 15–20, 2003.

[50] Ján Jockusch, Jörg Walter, and Helge Ritter. A tactile sensor system for a three-fingered robot manipulator. In *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3080–3086, 1997.

[51] D. J. O'brien and D. M. Lane. Force and slip sensing for a dextrous underwater gripper. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1057–1062, 1998.

[52] Yoji Yamada, Hiroyuki Morita, and Yoji Umetani. Vibrotactile sensor generating impulsive signals for distinguishing only slipping states. In *Proceedings of 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 844–850, 1999.

[53] 山田大介, 前野隆司, 山田陽滋. 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. 日本機械学会誌論文集（C 編）, Vol. 70, No. 690, pp. 560–566, 2004.

[54] Gaetano Canepa, Matteo Campanella, and Danilo De Rossi. Slip detection by a tactile neural network. In *Proceedings of 1994 IEEE/RSJ Internaltional Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 224–231, 1994.

[55] Gaetano Canepa, Rocco Petrigliano, Matteo Campanella, and Danilo De Rossi. Detection of incipient object slippage by skin-like sensing and neural network processing. *IEEE Transactions on System, Man, Cybernetics–Part B: Cybernetics*, Vol. 28, No. 3, pp. 348–356, 1998.

[56] Robert D. Howe and Mark R. Cutkosky. Dynamic tactile sensing: Perception of fine surface features with stress rate sensing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 2, pp. 140–151, 1993.

[57] Takashi Maeno, Shinichi Hiromitsu, and Takashi Kawai. Control of grasping force by detecting stick/slip distribution at the curved surface of an elastic finger. In *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3896–3901, 2000.

[58] 木村竜司, 内山孝憲, 前野隆司. 把持力制御のための曲面状ひずみ分布センサの開発（十字状ひずみゲージ配列を有する球面状センサによる任意方向把持力制御）. 日本機械学会誌論文集（C 編）, Vol. 70, No. 689, pp. 83–88, 2004.

[59] Daisuke Yamada, Takashi Maeno, and Yoji Yamada. Artificial finger skin having ridges and distributed tactile sensors used for grasp force control. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 14, No. 2, pp. 140–146, 2002.

[60] Akihito Sano, Hideo Fujimoto, Kosuke Nishi, and Hideki Miyanishi. Multi-fingered hand system for telepresence based on tactile information. In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1676–1681, 2004.

[61] 佐野明人, 西恒介, 宮西英樹, 藤本英雄. 触覚情報に基づく遠隔臨場感多指ハンドシステムの構築. 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 2, pp. 164–171, 2004.

[62] M. A. Saliba and C. M. Seguna. A biologically inspired sensor for the prevention of object slip during robotic grasping and manipulation. In *Proceedings of the International Conference on Intelligent Manipulation and Grasping*, pp. 46–51, 2004.

[63] Yoji Yamada and Mark R. Cutkosky. Tactile sensor with 3-axis force and vibration sensing functions and its application to detect rotational slip. In *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 3550–3557, 1994.

[64] 山田陽滋, マーク R. カトコスキー. 3 軸力覚・振動覚を有する触覚センサの開発と物体の並進・回転滑り識別への応用. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 4, pp. 539–544, 1995.

[65] 本田久平, 長谷川勉, 松岡毅. 多関節多指ロボットハンドによる物体操作における滑り検出と計測. 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 7, pp. 913–919, 2001.

[66] Marc R. Tremblay and Mark R. Cutkosky. Estimating friction using incipient slip sensing during a manipulation task. In *Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 429–434, 1993.

[67] 富田豊, 多賀善明, 堀内敏夫. ゴムのスティック・スリップを用いたすべりセンサの開発. 計測自動制御学会論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 1–4, 1991.

[68] Hiroyuki Shinoda, Masahiro Uehara, and Shigeru Ando. A tactile sensor using three-dimensional structure. In *Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics a nd Automation*, pp. 435–441, 1993.

[69] E. G. M. Holweg, H. Hoeve, W. Jongkind, L. Marconi, C. Melchiorri, and C. Bonivento. Slip detection by tactile sensors: Algorithms and experimental results. In *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3234–3239, 1996.

[70] 吉海智晃, 但馬竜介, 加賀美聡, 篠田裕之, 稲葉雅幸, 井上博允. 音響共鳴型テンソルセル触覚センサによる滑り予知と把持動作への応用. 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 8, pp. 868–875, 2002.

[71] 長谷川泰久, 井岡隼人, 福田敏男. 多指ハンド・アームの物体操り作業における滑りの推定. ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集, pp. 2P2–l02, 2002.

[72] 齋藤直樹, 梶川伸哉, 岡野秀晴. 柔軟接触センサによる滑り検出について. ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集, pp. 1P1–3F–B5, 2003.

[73] Lionel Birglen and Clément M. Gosselin. Fuzzy enhanced control of an underactuated finger using tactile and position sensors. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2331–2336, 2005.

[74] Claudio Melchiorri. Slip detection and control using tactile and force sensors. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 5, No. 3, pp. 235–243, 2000.

[75] Nobutaka Tsujiuchi, Takayuki Koizumi, Akihito Ito, Hiroko Oshima, Yoshiro Nojiri, Yotaro Tsuchiya, and Shiro Kurogi. Slip detection with distributed-type tactile sensor. In *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 331–336, 2004.

[76] Atsutoshi Ikeda, Yuichi Kurita, Jun Ueda, Yoshio Matsumoto, and Tsukasa Ogasawara. Grip force control for an elastic finger using vision-based incipient slip feedback. In *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ Internaltional Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 810–815, 2004.

[77] P. Daio, M. Rucci, C. Guadagnini, and C. Laschi. An investigation on a robot system for disassembly automation. In *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robots and Systems*, pp. 3515–3521, 1994.

[78] D. Taddeucci, C. Laschi, R. Lazzarini, R. Magni, P. Dario, and A. Starita. An approach to integrated tactile perception. In *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3100–3105, 1997.

[79] 渡邊健士, 大久保賢一, 市川純章, 原文雄. 軟性触覚センサアレイシステムによる物体性状の類別. ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, pp. 1P2–N–101, 2005.

[80] 安彦成泰, 久保昌之, 下条誠. バイモルフ型圧電アクチュエータを用いた材質のセンシングに関する研究. ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, pp. 1P1–H–7, 2004.

[81] 一ノ瀬雄志, 木本晃, 信太克規. 材質識別のための圧電セラミックスを用いた新しい触覚センシング手法の提案. ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, pp. 2P1–N–103, 2005.

[82] 木本晃, 信太克規. 超音波・電気統合型触覚センサによる材質の硬さ検出. ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, pp. 2P1–N–102, 2005.

[83] Yuka Mukaibo, Hirokazu Shirado, Masashi Konyo, and Takashi Maeno. Development of a texture sensor emulating the tissue structure and perceptual mechanism of human fingers. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2576–2581, 2005.

[84] Katsuhiko Nakamura and Hiroyuki Shinoda. A tactile sensor instantaneously evaluating friction coefficients. In *Proceedings of TRANSDUCERS '01*, pp. 1430–1433, 2001.

[85] Takashi Maeno, Tomoyuki Kawamura, and Sen chieh Cheng. Friction estimation by pressing an elastic finger-shaped sensor against a surface. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 20, No. 2, pp. 222–228, 2004.

[86] Yukiko Hoshino, Masayuki Inaba, and Hirochika Inoue. Model and processing of whole-body tactile sensor suit for humanoid-robot contact interaction. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2281–2286, 1998.

[87] 宮下敬宏, 塩見昌裕, 石黒浩. 触覚を埋め込んだ柔らかい全身皮膚を持つコミュニケーションロボットの実現. 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p. 1A23, 2003.

[88] Hiroyasu Iwata and Shigeki Sugano. A system design for tactile recognition of human-robot contact state. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robots and Systems*, pp. 7–12, 2003.

[89] 田近太一, 宮下孝宏, 石黒浩. 全身触覚に基づく人間の位置・姿勢の検出. ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, pp. 1P1–H–32, 2004.

[90] 野田智之, 宮下隆宏, 石黒浩, 小暮潔, 萩田紀博. 全身分布触覚センサネットワークに基づく触行動特徴抽出. ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, pp. 2P1–N–102, 2005.

[91] 福嶋政徳, 増田良介. 圧覚と衝撃センサを用いたロボットの皮膚センサによる刺激の認識. ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, pp. 2P1–N–107, 2005.

[92] 石井健一郎, 上田修功, 前田英作, 村瀬洋. わかりやすいパターン認識, pp. 114–123. オーム社, 1998.

[93] T. Matsuoka, T. Hasegawa, and K. Honda. A dexterous manipulation system with error detection and recovery by a multi-fingered robotic hand. In *Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 418–423, 1999.

[94] Yasuyoshi Yokokohji, Moriyuki Sakamoto, and Tsuneo Yoshikawa. Vision-aided object manipulation by a multifingered hand with soft fingertips. In *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3201–3208, 1999.

[95] Tetsuyou Watanabe, Kensuke Harada, Zhongwei Jiang, and Tsuneo Yoshikawa. Object manipulation under hybrid active/passive closure. In *Proceedings of the 2005 IEEE Internal Conference on Robotics and Automation*, pp. 1025–1032, 2005.

[96] 岩村吉晃. 皮膚の構造. 大山正, 今井省吾, 和気典二（編）, 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, pp. 1178–1185. 誠信書房, 1994.

付 録A　人間の皮膚構造と触覚受容器

A.1　皮膚構造

人間の皮膚や触覚についての知見は岩村 [3], [96] 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. A.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．そして手掌や足底など無毛部の表皮は指紋，掌紋などの規則的な隆線がある．またその隆起部の下にある真皮は表皮部に突出して真皮乳頭 (dermal papillae) となる．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異なる深さに存在する．なお，これらの触覚受容器は機械的な刺激によって興奮することから機械受容器 (mechanoreceptor) とも呼ばれる．

A.2　触覚受容器の分類

前述した 4 種類の触覚受容器はその順応速度と受容野の広さから **Fig. A.2** に示した 4 つの型に分けられる．順応速度による分類では，与えられた外部刺激を感じなくなるまでの速さによって，刺激の始めと終りに応答する速順応型 (rapidly adapting : RA もしくは fast adapting : FA) と，刺激の間ずっと応答する遅順応型 (slowly adapting : SA) に分けられる．また，受容野の広さによる分類では，受容野が狭くその境界がはっきりしている I 型と，受容野が広く境界が不鮮明な II 型に分けられる．そして，マイスナー小体，メルケル細胞，ルフィニ終末，パチニ小体は **Table A.1** のように対応していると推定されている．

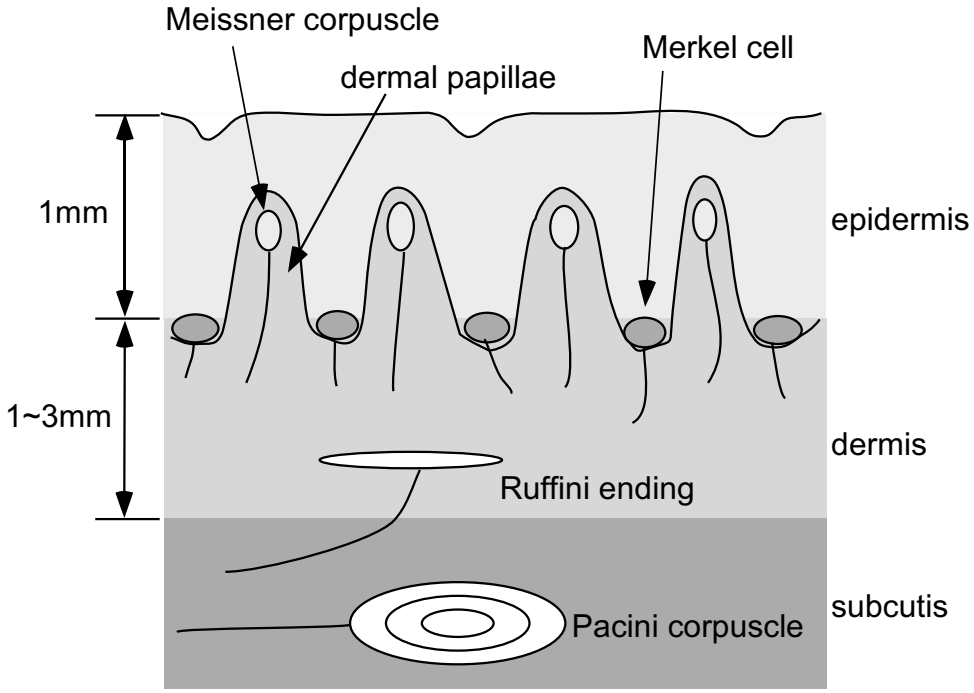


Fig.A.1 A cross sectional view of the human skin

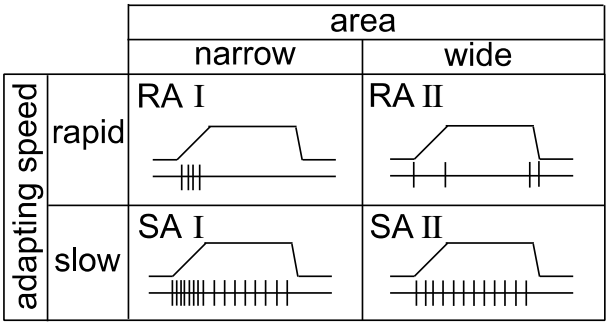


Fig.A.2 Characteristic of each receptor

Table A.1 Correspondence between the characteristic of the response and the mechanoreceptor

RA I	Meissner corpuscle	RA II	Pacini corpuscle
SA I	Merkel cell	SA II	Ruffini ending

A.3　触覚受容器の役割と分解能

4 つの型の受容野の広さと感度について次のことがわかっている．I 型受容器の受容野はほぼ円形または卵型で，直径 2∼4mm である．受容野の中には感度の最大点が複数存在し，その直下に受容器が存在すると推定される．また，I 型受容器は受容野を外れると急激に感受性が落ちる．一方，II 型受容器の受容野の直径は 7∼10mm ある．そして受容野のほぼ中心に感度の最大点が 1 点だけあり，周辺に向かって緩やかに減少する．受容野が広く，また境界が不鮮明なのは受容器が深い位置に存在するためと考えられる．

次に受容器の密度を比較すると，RA I 型と SA I 型受容器は指先でそれぞれ，140 個/cm^2，70 個/cm^2 であるのに対し，RA II 型と SA II 型はそれぞれ 30 個/cm^2，10 個/cm^2 である．つまり，非常に鋭敏で空間分解能の優れている指先には受容野の狭い I 型の受容器が密集していることがわかる．なお，空間分解能の低い手掌部では，RA I 型，SA II 型の受容器はそれぞれ 25 個/cm^2，10 個/cm^2 と密度がずっと低い．

ところで，4 種類の触覚受容器はそれぞれ反応しやすい刺激があることがわかっている．RA I 型受容器と RA II 型受容器は共に振動に敏感だが，反応する周波数が異なり，RA I 型受容器は 100 Hz 以下の振動に応答し，特に 40 Hz 前後で最も敏感である．一方，RA II 型受容器は 100∼300 Hz の周波数に特に良く応答する．そして，この周波数帯では 1μm 程度の皮膚変形で十分興奮する．また SA I 型受容器を刺激する実験により，この受容器は圧覚を検出すると考えられている．そして SA II 型受容器は皮膚を接線方向に引っ張ることで興奮することがわかっている．

付 録B　2クラスに対する線形判別法

B.1　フィッシャーの線形判別法 [92]

線形判別法は特徴空間をより次元の小さい部分空間に変換する方法である．パターン認識において最もよく利用されるのは2クラスに対する線形判別法でありこれをフィッシャーの線形判別法（Fisher's linear discriminant method）と呼ぶ．この方法は特徴空間上の2クラスのパターン分布からこの2つを識別するのに最適な1次元軸を求める手法である．ここではクラス内変動・クラス間変動比最大基準に基づくフィッシャーの方法について述べる．

クラス ω_i の変動を表す行列，変動行列（scatter matrix）$\boldsymbol{S}_i$ を

$$\boldsymbol{S}_i = \sum_{x \in \chi_i} (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{m}_i)(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{m}_i)^t \tag{B.1}$$

と定義する．ここで，$\boldsymbol{m}_i$ はクラス ω_i のパターン平均，n_i はパターン数である．変動行列 $\boldsymbol{S}_i$ は，クラス ω_i に属する特徴ベクトル $\boldsymbol{x}$ とクラス平均 $\boldsymbol{m}_i$ との差の二乗和の形で定義される．次に，2クラスの全特徴ベクトルを用いて，クラス内変動行列（within-class scatter matrix）$\boldsymbol{S}_W$ とクラス間変動行列（between-class scatter matrix）$\boldsymbol{S}_B$ を

$$\begin{aligned} \boldsymbol{S}_W &= \boldsymbol{S}_1 + \boldsymbol{S}_2 \\ &= \sum_{i=1,2} \sum_{\boldsymbol{x} \in \chi_i} (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{m}_i)(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{m}_i)^t \end{aligned} \tag{B.2}$$

$$\boldsymbol{S}_B = \sum_{i=1,2} n_i (\boldsymbol{m}_i - \boldsymbol{m})(\boldsymbol{m}_i - \boldsymbol{m})^t \tag{B.3}$$

と定義する．ここで $\boldsymbol{m}$ は全パターンの平均をあらわす．ここで d 次元特徴空間から1次元への変換をあらわす $(d, 1)$ 行列を $\boldsymbol{A}$ とする．このときパターン $\boldsymbol{x}$ を $\boldsymbol{A}$ により変換したパターンはスカラー量であり，これを y とする．

$$y = \boldsymbol{A}^t \boldsymbol{x} \tag{B.4}$$

と書ける．変換された空間でのクラス平均 $\tilde{m}_i$ は

$$\tilde{m}_i = \boldsymbol{A}^t \boldsymbol{m}_i \tag{B.5}$$

となる．変換後の空間上でのクラス内変動行列 $\tilde{\boldsymbol{S}}_W$，クラス間変動行列 $\tilde{\boldsymbol{S}}_B$ も同様に求めることができ，(B.4) 式，(B.5) 式を用いて

$$\tilde{\boldsymbol{S}}_W = \boldsymbol{A}^t \boldsymbol{S}_W \boldsymbol{A} \tag{B.6}$$

$$\tilde{\boldsymbol{S}}_B = \boldsymbol{A}^t \boldsymbol{S}_B \boldsymbol{A} \tag{B.7}$$

となる．このとき $\boldsymbol{A}$ は $(d, 1)$ 行列であるから $\tilde{\boldsymbol{S}}_W$，$\tilde{\boldsymbol{S}}_B$ はスカラー量であり，変換後の 1 次元空間におけるクラス平均と分散をそれぞれ $\tilde{m}_i$，$\tilde{\sigma}_i^2$ とおくと

$$\tilde{\boldsymbol{S}}_W = n_1 \tilde{\sigma}_1^2 + n_2 \tilde{\sigma}_2^2 \tag{B.8}$$

$$\tilde{\boldsymbol{S}}_B = \frac{n_1 n_2}{n} (\tilde{m}_1 - \tilde{m}_2)^2 \tag{B.9}$$

となる．ここで $n = n1 + n2$ である．

フィッシャーの方法の基本的な考えは，クラス間変動のクラス内変動に対する比を最大にする 1 次元軸を求めることにある．すなわち，変換後の空間において $\tilde{\boldsymbol{S}}_W$ がなるべく小さく，そして $\tilde{\boldsymbol{S}}_B$ がなるべく大きくなるように変換 $\boldsymbol{A}$ を定めることを意味する．このクラス内変動・クラス間変動比を $Js(\boldsymbol{A})$ と表すと

$$Js(\boldsymbol{A}) = \frac{\tilde{\boldsymbol{S}}_B}{\tilde{\boldsymbol{S}}_W} \tag{B.10}$$

$$= \frac{\boldsymbol{A}^t \boldsymbol{S}_B \boldsymbol{A}}{\boldsymbol{A}^t \boldsymbol{S}_W \boldsymbol{A}} \tag{B.11}$$

となる．この評価基準 $Js(\boldsymbol{A})$ を最大にする $\boldsymbol{A}$ を求める問題は

$$\tilde{\boldsymbol{S}}_W = \boldsymbol{A}^t \boldsymbol{S}_W \boldsymbol{A} = \boldsymbol{I} \tag{B.12}$$

という制約条件の下で

$$\tilde{\boldsymbol{S}}_B = \boldsymbol{A}^t \boldsymbol{S}_B \boldsymbol{A} \tag{B.13}$$

を最大化する変分問題に帰着する．$\boldsymbol{I}$ は $\tilde{d}$ 次元単位行列である．ただし，2 クラスに対する判別では $\tilde{d} = 1$ となるので $\boldsymbol{I}$ はスカラーである．λ をラグランジュ乗数とし

$$Js(\boldsymbol{A}) = \boldsymbol{A}^t \boldsymbol{S}_B \boldsymbol{A} - \lambda(\boldsymbol{A}^t \boldsymbol{S}_W \boldsymbol{A} - \boldsymbol{I}) \tag{B.14}$$

を $\boldsymbol{A}$ で偏微分して 0 と置くと，$\boldsymbol{S}_B$，$\boldsymbol{S}_W$ は対称行列であるから

$$\boldsymbol{S}_B \boldsymbol{A} = \lambda \boldsymbol{S}_W \boldsymbol{A} \tag{B.15}$$

を得る．したがって，$\boldsymbol{S}_W$ が正則であるならば

$$(\boldsymbol{S}_W^{-1}\boldsymbol{S}_B - \lambda\boldsymbol{I})\boldsymbol{A} = 0 \tag{B.16}$$

となるので，$\boldsymbol{S}_W^{-1}\boldsymbol{S}_B$ の最大固有値を λ_1 とすると

$$\max\{Js(\boldsymbol{A})\} = \lambda_1 \tag{B.17}$$

が得られる．また Js を最大にする $\boldsymbol{A}$ は最大固有値 λ_1 に対応する固有ベクトルとして求まる．

さらに (B.15) 式より

$$\begin{aligned}\lambda\boldsymbol{S}_W\boldsymbol{A} &= \boldsymbol{S}_B\boldsymbol{A} \\ &= \frac{n_1 n_2}{n}(\boldsymbol{m}_1 - \boldsymbol{m}_2)(\boldsymbol{m}_1 - \boldsymbol{m}_2)^t\boldsymbol{A}\end{aligned} \tag{B.18}$$

となり，$(\boldsymbol{m}_1 - \boldsymbol{m}_2)^t\boldsymbol{A}$ がスカラー量であることに注意すると

$$\boldsymbol{A} \propto \boldsymbol{S}_W^{-1}(\boldsymbol{m}_1 - \boldsymbol{m}_2) \tag{B.19}$$

となり，クラス内変動・クラス間変動比を最大にする変換行列 $\boldsymbol{A}$ が得られる．

B.2　境界点の決定

フィッシャーの線形判別法で注意しなくてはいけない点は，線形判別法で求まるのは空間（軸）のみであって，軸上に設けるべき識別のための境界は定まらないということである．境界を決定する方法として，以下の方法が考えられる．境界点を w_0 として，

1. 変換後のクラス平均の中点を境界とする方法.

$$w_0 = -\frac{\tilde{m}_1 + \tilde{m}_2}{2} \tag{B.20}$$

2. 変換後の各クラスごとの分散で内分する方法

$$w_0 = -\frac{\tilde{\sigma}_2^2\tilde{m}_1 + \tilde{\sigma}_1^2\tilde{m}_2}{\tilde{\sigma}_1^2 + \tilde{\sigma}_2^2} \tag{B.21}$$

あるいは標準偏差で内分する方法

$$w_0 = -\frac{\tilde{\sigma}_2\tilde{m}_1 + \tilde{\sigma}_1\tilde{m}_2}{\tilde{\sigma}_1 + \tilde{\sigma}_2} \tag{B.22}$$

3. 事前確率も考慮して内分を行う方法

$$w_0 = -\frac{P(\omega_2)\tilde{\sigma}_2^2\tilde{m}_1 + P(\omega_1)\tilde{\sigma}_1^2\tilde{m}_2}{P(\omega_1)\tilde{\sigma}_1^2 + P(\omega_2)\tilde{\sigma}_2^2}p \tag{B.23}$$

そして，2 つのクラス ω_i, ω_j を線形判別する変換行列 $\boldsymbol{A}_{ij}$ を用いて，未知のデータ $\boldsymbol{x}$ を変換したスカラー値 y がどちらのクラスに判別されるかを次式で決定する．

$$w_0 < y \Longrightarrow \boldsymbol{x} \in \omega_i \tag{B.24}$$

$$w_0 > y \Longrightarrow \boldsymbol{x} \in \omega_j \tag{B.25}$$

研究業績リスト

学術雑誌

1. 多田, 細田, 浅田. 内部に触覚受容器を持つ人間型柔軟指. 日本ロボット学会誌, 23(4):482–487, 2005.

2. K. Hosoda, Y. Tada, and M. Asada. Anthropomorphic Robotic Soft Fingertip with Randomly Distributed Receptors. *Robotics and Autonomous Systems*, accepted.

3. Y. Tada and K. Hosoda. Acquisition of Multi-Modal Expression of Slip through Pick-Up Experiences. *Advanced Robotics*, submitted.

国際会議

1. K. Hosoda, Y. Tada, and M. Asada. Internal Representation of Slip for a Soft Finger with Vision and Tactile Sensors. In *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 111–115. 2002.

2. Y. Tada, K. Hosoda, and M. Asada. Sensing the Texture of Surfaces by Anthropomorphic Soft Fingertips with Multi-Modal Sensors. In *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 31–35. 2003.

3. Y. Tada, K. Hosoda, and M. Asada. Sensing Ability of Anthropomorphic Fingertip with Multi-Modal Sensors. In *Proceedings of the 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems*, pp. 1005–1012, 2004.

4. Y. Tada, K. Hosoda, and M. Asada. Learn to Grasp Utilizing Anthropomorphic Fingertips together with a Vision Sensor. In *Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 486–491. 2005.

国内口頭発表

1. 多田, 細田, 浅田．視触覚センサを有する柔軟な指のための滑べりの内部表現．第 20 回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, 1G26, 2002.

2. 多田, 細田, 浅田．キャリブレーションされていない分布型触覚センサの製作．情報処理学会関西支部 支部大会 講演論文集, pp. 75–76, 2002.

3. 山崎, 多田, 細田, 浅田．複数の触覚を持つ柔軟指の製作．ロボティクスメカトロニクス講演会'03 予稿集, 1P1-3F-B6, 2003.

4. 多田, 細田, 浅田．分布型触覚センサを持つ人間型柔軟指の触覚能力．第 22 回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, 1J17, 2004.

5. 多田, 細田, 浅田．視覚と触覚を持つ人間型柔軟指による把持行動の獲得．第 10 回ロボティクスシンポジア予稿集, pp. 263–268, 2005.

6. 多田, 種治, 細田, 浅田．多層構造の柔軟指を用いた触行動による物体識別．ロボティクスメカトロニクス講演会'05 予稿集, 1P2-N-104, 2005.