

# 触覚センシング

下 条 誠

2007 年 3 月版

# 目次

|              |                          |          |
|--------------|--------------------------|----------|
| <b>第 1 章</b> | <b>触覚の生理・心理学</b>         | <b>1</b> |
| 1.1          | 皮膚構造と触覚受容器               | 1        |
| 1.2          | 触覚の情報量                   | 2        |
| 1.3          | 触覚の空間分解能                 | 2        |
| 1.4          | 機械的刺激の感度と分解能             | 3        |
| 1.5          | 時間分解能                    | 4        |
| 1.6          | 表面凹凸判別                   | 4        |
| 1.7          | ずれの検知                    | 5        |
| 1.8          | 温度特性 [2]                 | 6        |
| 1.9          | ハプティクス知覚による材質感認識         | 6        |
| <b>第 2 章</b> | <b>触覚の工学的実現</b>          | <b>9</b> |
| 2.1          | 触覚センサの概要                 | 10       |
| 2.1.1        | ロボット用センサの大別（内界センサと外界センサ） | 10       |
| 2.2          | 検出方式による分類                | 10       |
| 2.2.1        | 機能による分類                  | 11       |
| 2.3          | 触覚センサの機能による分類            | 13       |
| 2.4          | 力覚センサ                    | 15       |
| 2.5          | 接触の検出（位置と強度）             | 15       |
| 2.5.1        | シート状触覚センサ                | 16       |
| 2.5.2        | 自由曲面を被覆できる触覚センサ          | 18       |
| 2.6          | 多軸力への対応                  | 22       |
| 2.6.1        | 弾性体変形のカメラ計測による多軸力センサ     | 22       |
| 2.6.2        | 光導波路と触覚子を用いた 3 軸触覚センサ    | 22       |
| 2.7          | すべりの検出                   | 22       |
| 2.7.1        | 振動による滑り検出                | 23       |
| 2.7.2        | 弾性体内部応力変化による滑り検出         | 24       |
| 2.7.3        | 弾性体内部歪分布変化を用いた滑り検出       | 24       |
| 2.7.4        | 感圧ゴムを用いた CoP センサによる滑り検出  | 25       |
| 2.8          | 材質の検出                    | 25       |
| 2.8.1        | 硬さ覚センサ                   | 26       |
| 2.8.2        | 複合感覚センサ                  | 27       |
| 2.8.3        | 歪み速度検出型触覚センサ             | 27       |
| 2.8.4        | ずれ覚センサ                   | 28       |

---

|             |                               |           |
|-------------|-------------------------------|-----------|
| 2.9         | 曲面および大面積被覆型触覚センサ . . . . .    | 28        |
| 2.9.1       | 3次元構造を用いた情報処理型触覚センサ . . . . . | 29        |
| 2.10        | アクティブセンシング型触覚センサ . . . . .    | 29        |
| 2.11        | おわりに . . . . .                | 30        |
| <b>参考文献</b> |                               | <b>31</b> |

# 目次

|      |                                                         |    |
|------|---------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | 皮膚の構造と機械受容器 . . . . .                                   | 2  |
| 1.2  | ヒトの無毛部皮膚機械受容器の分類 . . . . .                              | 3  |
| 1.3  | 体表部における触2点弁別閾 (Weinstein, 1968) . . . . .               | 4  |
| 1.4  | 体表部における圧覚の閾値 (Weinstein, 1968) . . . . .                | 5  |
| 1.5  | 4つの機械受容器の周波数閾値特性 (Bolanowsky et al., 1988) . . . . .    | 6  |
| 1.6  | 体表部における温・冷覚の弁別閾値、(Stevens, et al.,(1998) 改変清水 . . . . . | 7  |
| 1.7  | ハプティクスによる材質感の認識 . . . . .                               | 8  |
| 2.1  | ロボット用センサの大別 . . . . .                                   | 11 |
| 2.2  | 検出方式（機械的，抵抗値変化） . . . . .                               | 12 |
| 2.3  | 検出方式（静電容量，電荷変化，光学方式） . . . . .                          | 12 |
| 2.4  | 検出方式（光学方式） . . . . .                                    | 13 |
| 2.5  | 触覚センサ機能による分類 . . . . .                                  | 14 |
| 2.6  | 6軸力覚センサ（4本はり方式） . . . . .                               | 15 |
| 2.7  | ビデオ出力型触覚センサ . . . . .                                   | 16 |
| 2.8  | ワイヤ縫込み型触覚センサ） . . . . .                                 | 17 |
| 2.9  | 圧感受性インクを用いた触覚センサ . . . . .                              | 17 |
| 2.10 | 荷重分布中心位置と総荷重検出触覚センサ） . . . . .                          | 18 |
| 2.11 | 触覚センサスーツ . . . . .                                      | 19 |
| 2.12 | 電磁誘導を用いた分散型触覚チップ . . . . .                              | 19 |
| 2.13 | 指先曲面に形成した触覚センサ . . . . .                                | 20 |
| 2.14 | 高速シリアルネットワークを用いた触覚センサ . . . . .                         | 20 |
| 2.15 | 網目状センサの構造 . . . . .                                     | 21 |
| 2.16 | 遅延回路を活用した省配線型触覚センサ . . . . .                            | 21 |
| 2.17 | 弾性体変形をマーカ変位から計測する触覚センサ . . . . .                        | 22 |
| 2.18 | 光導波路を用いた3軸触覚センサ . . . . .                               | 23 |
| 2.19 | 振動検出（加速度センサ）型滑り検出 . . . . .                             | 23 |
| 2.20 | 弾性体内部変形型滑り検出 . . . . .                                  | 24 |
| 2.21 | 歪センサを埋め込んだ弾性フィンガ . . . . .                              | 25 |
| 2.22 | 感圧ゴムを用いた CoP センサによる滑り検出 . . . . .                       | 26 |
| 2.23 | 触運動と複数のセンサによる材質判別システム . . . . .                         | 26 |
| 2.24 | 弾性体内部に歪ゲージと PVDF を埋め込んだセンサ . . . . .                    | 28 |

## 第 1 章

# 触覚の生理・心理学

### 人間の触覚のメカニズム

人間の五感のうち視・聴・味・嗅覚は集中した感覚器官であるが、触覚は全身に分布している唯一の感覚器官である。また皮膚は身体で最も大きな器官で全体重のほぼ 1/6 を占める。本解説ではまずこの触覚の主に生理・心理学について述べる。

#### 1.1 皮膚構造と触覚受容器

図 1.1 に皮膚構造と触覚受容器の配置を示す。皮膚の構造は表皮 (Epidermis)、真皮 (Dermis)、皮下組織 (Subcut) からなる。表皮は手掌での厚さ約 0.7mm 程である。真皮は厚さ 0.3-2.4 mm 程で強い繊維性結合組織である。また手掌のようにかなりの摩擦力を受ける部位での表皮と真皮の境界では、下方へ突出する表皮のヒダ (表皮隆起) と、上方に突出する真皮乳頭とが噛み合って表皮と真皮の癒着を強めている。皮下組織は、緩い網状の疎性結合組織である。通常は真皮と固く結合し骨膜、筋膜、腱膜とは緩く結合している [1]。この皮膚の手掌面内にはおよそ 17,000 の機械受容器がある。これら機械受容器の種類としては、皮膚変形刺激に対する、(1) 応答の時間変化の違いと、(2) 受容野の広さの特徴から次のように分類されている [2],[3]。まず、ステップ状に皮膚を押し込むと受容器は刺激に応じて発火しパルスを出力する。このとき 刺激の強度に応じて発火する遅順応型 (Slowly Adapting: SA) と、 刺激の時間変化に応じて発火する速順応型 (Fast Adapting: FA) とがある。また受容野の特徴からは I 型と II 型にわけられる。I 型は受容野が狭く境界が明瞭である。

II 型は受容野が広く境界が不明瞭である。よって、これら特徴の組合せとして SAI, SAII, FAI, FAII の 4 つのタイプに分類されている。これら機能的分類と形態学的に同定された受容器、即ちメルケル細胞 (Merkel cell) (SAI)、ルフィニ終末 (Ruffini endings) (SAII)、マイスナー小体 (Meissner corpuscles) (FAI)、パチニ小体 (Pacinian corpuscles) (FAII) がそれぞれ対応するものと現在のところ推定されている。メルケル細胞は、狭義のメルケル細胞と神経終末であるメルケル触覚円板が一体となったものである。表 1.1 には機械受容器の特性による分類を、図 1.2 には受容器の特性をまとめたものを示す。

表 1.1: 皮膚感覚受容器の分類

|                  | 順応遅い<br>(静圧力応答)         | 順応はやい<br>(速度加速度応答)        |
|------------------|-------------------------|---------------------------|
| 受容野狭い<br>(受容器浅い) | SAI(Merkel)<br>メルケル細胞   | FAI (Meissner)<br>マイスナー小体 |
| 受容野広い<br>(受容器深い) | SAII(Ruffini)<br>ルフィニ終末 | FAII(Pacinian)<br>パチニ小体   |

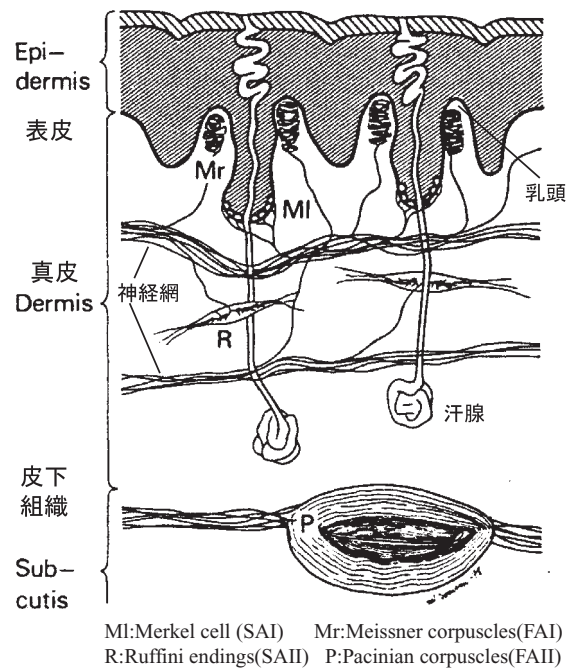


図 1.1: 皮膚の構造と機械受容器

## 1.2 触覚の情報量

この感覚受容器の数は全身体では  $10^7$  個、痛覚（自由神経終末）が  $2 \times 10^6$  個、温点が  $3 \times 10^4$  個、冷点が  $2.5 \times 10^5$  個あるとされている。また大脳皮質への神経伝達繊維本数は  $10^6$  本で感覚受容器と信号線数の比は 10 となっている [6]。感覚受容器の密度が高いとされる指先の例では大脳皮質の感覚野に伝達する神経線維は  $1\text{mm}^2$  当り 1 本といわれている。このことは指先での空間分解能が 1~2mm 程度とされていることに関係すると思われる。通信容量からみると、触覚は  $10^6 (\text{bit/s})$  であるといわれている [6]。ちなみに、視覚は  $10^7 (\text{bit/s})$ 、聴覚は  $10^5 (\text{bit/s})$ 、嗅覚は  $10^3 (\text{bit/s})$ 、味覚は  $10^3 (\text{bit/s})$  である。さすがに視覚は多いが、触覚もその 1 割程度もあり、なかなか多くの情報を担っている。

## 1.3 触覚の空間分解能

皮膚感覚の空間的弁別能については、代表的なものとして、1) 2 点弁別能、2) 継時 2 点弁別能がある [2]。

1. 2 点弁別能では、コンパスのような器具を用いて空間的に離れた 2 点刺激を加え、これが 1 点か 2 点かを識別できる最も短い距離を計測する方法である。図にはウェインシュタインの結果を示す [8]。例えば指先では 2mm、前額部では 25mm、背中では 70mm ほどの値となる。
2. 継時 2 点弁別とは、コンパスの両端を順々に呈示した 2 つの点が同じ位置であるか否かを判断させる方法である。この結果は 2 点弁別能の値と高い相関を示す。だが値としてはより小さくなる。例えば指先では 1.5mm、前額部では 5mm、背中では 12.5mm ほどの値である。触覚の空間分解能の特徴は、場所により感度がはっきりと異なることである。空間的鋭敏さは指先で最大で、手首に向かうにつれて低下する。例えば指先での 2 点弁別能は 2mm、手掌では 10mm 程である。

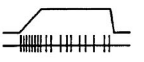
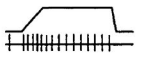
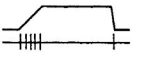
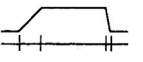
|                                     | SAI                                                                                 | SAII                                                                                | FAI                                                                                  | FAII                                                                                  |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 受容器                                 | Merkel                                                                              | Ruffini                                                                             | Meissner                                                                             | Pacinian                                                                              |
| 順応性                                 | 遅い                                                                                  | 遅い                                                                                  | 速い                                                                                   | 速い                                                                                    |
| 受容野の境界                              | 明瞭                                                                                  | 不明瞭                                                                                 | 明瞭                                                                                   | 不明瞭                                                                                   |
| 平均的受容野面積 <sup>4)</sup>              | 11.0 mm <sup>2</sup>                                                                | 59.0 mm <sup>2</sup>                                                                | 12.6 mm <sup>2</sup>                                                                 | 101.0 mm <sup>2</sup>                                                                 |
| 受容器当たりの抹消感覚機構 <sup>4)</sup>         | 4-7                                                                                 | 1                                                                                   | 12-17                                                                                | 1                                                                                     |
| 皮膚表面からの相対的深さ                        | 浅い                                                                                  | 深い                                                                                  | 浅い                                                                                   | 深い                                                                                    |
| 形状・寸法 <sup>2)</sup>                 | 卵円形 (6-12 $\mu$ m)<br>触覚円板(直径 7 $\mu$ m,<br>厚さ 1 $\mu$ m)                           | 紡錘形<br>(長さ 0.5mm・2mm)                                                               | 楕円体(長軸:40-100<br>$\mu$ m,短軸:30-60 $\mu$ m)                                           | 楕円体(長軸:<br>2.0~45mm,短<br>軸:10~20mm)                                                   |
| 手掌面における神経支配密度 <sup>3)</sup>         | 25% (4250 本)                                                                        | 19% (3230 本)                                                                        | 43% (7310 本)                                                                         | 13% (2210 本)                                                                          |
| 空間加算特性 <sup>12)</sup>               | なし                                                                                  | --                                                                                  | なし                                                                                   | あり                                                                                    |
| 時間加算特性 <sup>12)</sup>               | --                                                                                  | あり                                                                                  | なし                                                                                   | あり                                                                                    |
| 皮膚表面温度影響 <sup>12)</sup>             | あり                                                                                  | あり(100Hz 以上)                                                                        | なし                                                                                   | あり                                                                                    |
| 感覚発生に必要なパルス数 <sup>6,19)</sup>       | 連続パルス(20 程度)                                                                        | 少しでは関与なし                                                                            | 単一パルス                                                                                | 連続パルス                                                                                 |
| 触神経電気刺激による発生感覚 <sup>18)</sup>       | Pressure                                                                            | --                                                                                  | Tapping(1Hz)<br>Flutter(10Hz)<br>Vibration(50Hz)                                     | Tickling/Vibration                                                                    |
| 周波数レンジ                              | 0.4-100Hz                                                                           | 0.4-100Hz                                                                           | 10-200Hz                                                                             | 70-1000Hz                                                                             |
| 最小閾値(周波数)                           | 10 $\mu$ m(50Hz)                                                                    | 3 $\mu$ m(50Hz)                                                                     | 6 $\mu$ m(40Hz)                                                                      | 0.1 $\mu$ m(250Hz)                                                                    |
| 機能的特徴                               | 強度検出<br>空間パターン検出<br>皮膚曲率検出                                                          | 皮膚の引っ張り検出                                                                           | 速度検出<br>空間パターン検出<br>皮膚曲率変化検出                                                         | 加速度検出<br>振動検出                                                                         |
| 刺激(皮膚変形)と<br>応答(発火頻度) <sup>6)</sup> |  |  |  |  |
| 神経線維                                | 伝導速度が速い(40-70m/s)、太い直径(8-13 $\mu$ m 以上)の有髄神経線維。<br>体性感覚野まで 2 つ程度の中継で伝達。             |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |

図 1.2: ヒトの無毛部皮膚機械受容器の分類

## 1.4 機械的刺激の感度と分解能

機械的刺激は皮膚に変位を与える。刺激として、定常、速度一定、加速度一定などの与え方がある。定常刺激に対する感覚を圧覚とし、振動刺激に対する感覚を振動覚とすると次に示すような特性がある。

1. 圧覚：図には剛毛（フォンフライの毛）を用いて触刺激を加えたときの力の閾値を示す。鼻、上唇、額などは感度が高く、大腿、脛などでは感度が低い。
2. 振動覚：振動刺激に対する感度が振動覚である。Bolanowski らは図 1.5 に示すような 4 種の機械受容器の振動閾値の周波数特性を計測した [11]。この閾値については刺激子の面積、身体部位、刺激 ON 時間、皮膚温など多くのパラメータの影響を受ける。刺激としては皮膚変位を取り、1  $\mu$ m を 0dB とし示してある。SAI は非常に低い周波数 (数十 Hz) において最も感度が高く 100Hz 程度まで広がって

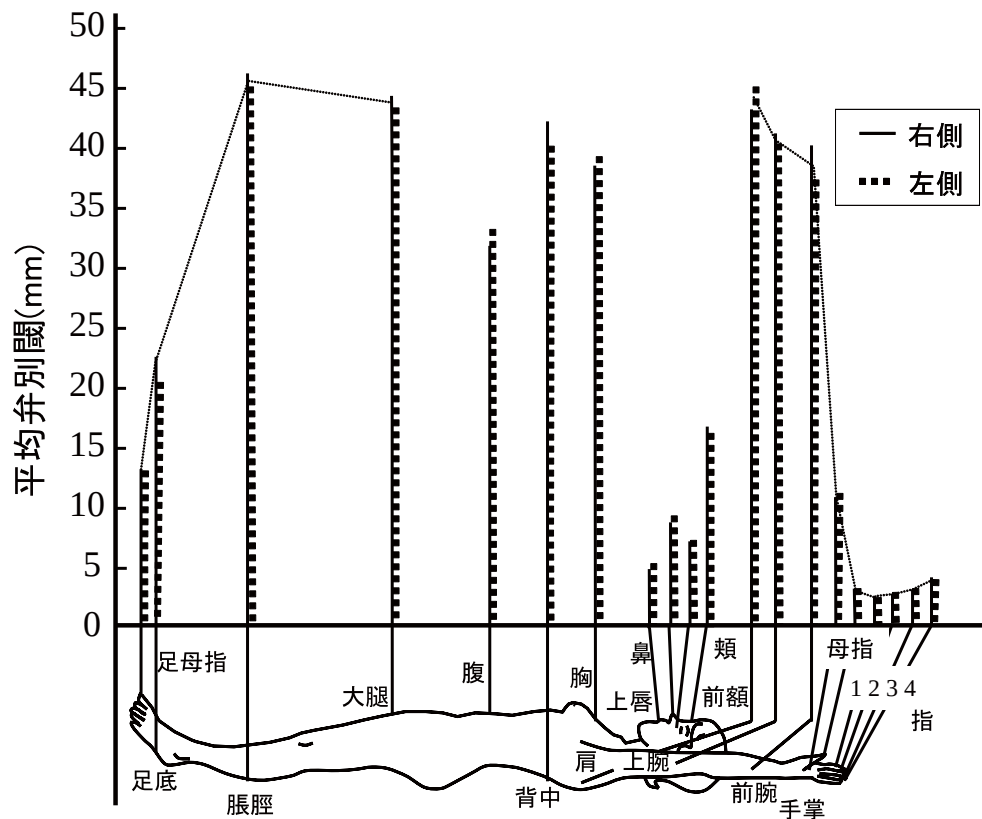


図 1.3: 体表部における触 2 点弁別閾 (Weinstein, 1968)

いる。皮膚が緩やかに動いているように感じられる低い正弦周波数では、SA タイプの受容器が決定的な情報を担っていると考えられる。FAI は数 Hz から 100Hz 程度まで広がっている。5Hz~40Hz の周波数のパタパタした感じ (flutter) の検出は FAI が担っていると思われる。FAII は 250Hz 当たりで最小値を持つ U 字型の特性を示し、最小閾値は  $0.2 \mu\text{m}$  以下となる。なお  $1 \mu\text{m}$  程度の閾値を持つのは FAII のみである。このことから我々が日常生活で微小刺激の存在を感じるのは主にこの FAII によるものであろう。

## 1.5 時間分解能

触覚の時間分解能とは、2 つの刺激提示時間間隔が短くなった場合にそれが 2 つであることを区別できる最小時間間隔を指す。加える刺激の強さによって変化し、強い場合は 10ms 程度、弱くすると 50ms 程度との報告がある。また、5 秒間で知覚できる連続刺激は 9 つまでとの報告もある [3]。

## 1.6 表面凹凸判別

人間が検出可能な表面凹凸についての幾つかの研究がある。Johansson[12]) らは人間の指先検知能力をドットパタンの直径が  $50 \mu\text{m}$  では  $6 \mu\text{m}$ ,  $500 \mu\text{m}$  では  $1 \mu\text{m}$  の凸を検出可能としている。また、表面の細かな凹凸の判別には対象と指先との相対的運動が必要で、対象物が動く受動触と、指先を動かす能動触との実験結果に実質的な差はないとしている。滑り検出については Srinivasan ら [13] は、平面のみ及び  $1 \mu\text{m}$  ドッ



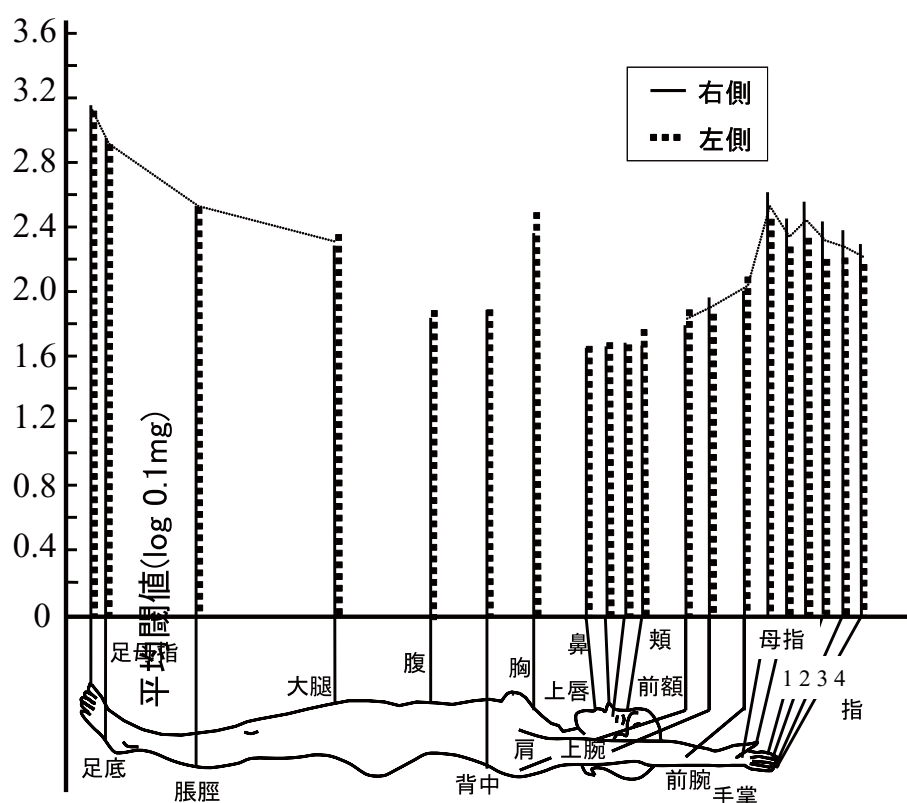


図 1.4: 体表部における圧覚の閾値 (Weinstein, 1968)

トボタン付平面などの試験片を用いて実験を行った。その結果、被験者は滑りの有無に関わらずこれら試験片の引張り方向を検知できるが、しかしドットパターンが無いと滑り状態は検知できないことを示した。これはSAIIの作用により方向を判別し、FAI, FAIIにより滑りによって生ずる振動を検知しているのではないかとしている。K.O.Johansson[9]も同様に、表面状態（アラサ）の検出は、その違いによる振動パターンの差異をFAI, FAIIの発火の相違によって検出しているとの仮説を報告している。

## 1.7 ずれの検知

皮膚感覚の一つとしてずれを検知する能力がある。このずれについて井野らは粗さのあるアルミ平板を用いた結果について報告している[15]。ずれの検知能力は指先に対する変位方向によって変わり、その閾値は縦<斜め<横の順である。即ち縦方向のずれに対して感覚が鋭くなっている。またその閾値は移動速度によって変わり、速度が大きいほど小さな変位量での検知が可能としている。例えば、指先縦方向の結果として0.2mm/sでは50  $\mu$ m, 4mm/sでは20  $\mu$ mである。回転については、21.6deg/sでは0.046deg/s, 0.72deg/sでは0.265deg/sである。ずれの検知に関わる受容器としてSAIIがある。SAIIの特徴は横方向へ皮膚を引っばったときに鋭い感度を示す。この時皮膚を引っばる方向が重要である。即ち特定の方向に引っばれば求心性発火は増加するが、他の方向では発火を減少させる[6]。このSAII受容器の主たる役割は、皮膚内、および皮膚と深部組織の間に生じる横方向の張力の方向と強さに関する情報を提供することと考えられる。

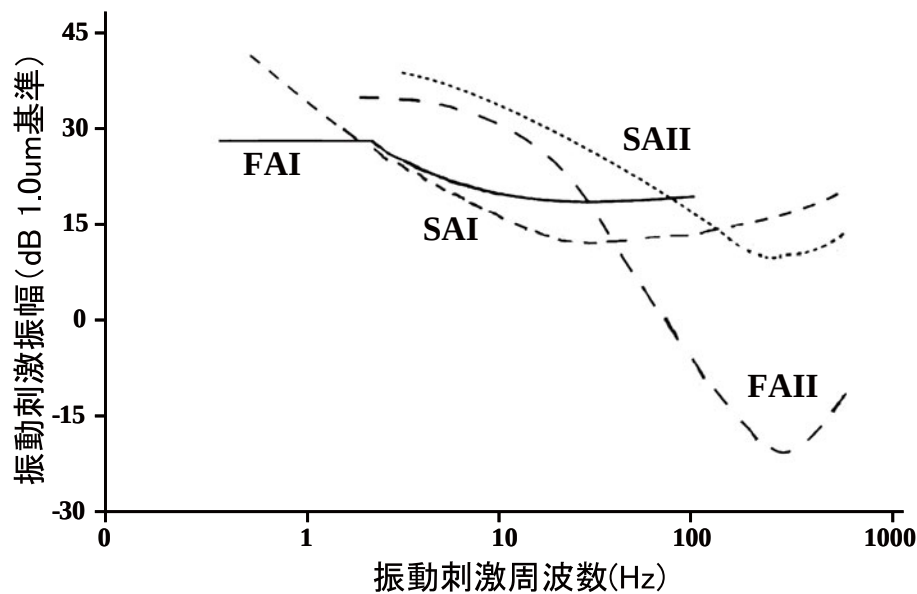


図 1.5: 4つの機械受容器の周波数閾値特性 (Bolanowsky et al., 1988)

## 1.8 温度特性 [2]

ヒトの場合温度感覚は、皮膚上の冷点と温点によって検出される。その受容器は未だ完全には解明されていないが神経線維の自由神経終末といわれている。この2種の受容器が示す発火頻度曲線は温度に対して鐘状をなし、冷覚では29℃、温覚では43℃あたりで最大値を示す。冷点と温点の密度を比較すると冷点の方が明らかに多く、手の表面には1cm<sup>2</sup>当たり1-5個の冷点が存在するが温点は0.4個程度である。ぬるめの湯に浸かると始めは温感を生ずるが時間が経過するとこの感覚はなくなる。これはこの温度に対して順応したためである。このように温度感覚は体表面温度の変化によって生じる。図には、Stevens らによる体表部における温・冷覚の弁別閾値を示す。これは体表温度が33度のとき温度を上下させ温感と冷感が生じる。

## 1.9 ハプティクス知覚による材質感認識

従来触覚は、圧力、温度、振動などの物理的刺激とそれに対応する皮膚感覚受容器の同定、並びに刺激の物理量と感覚量との関係付けなど、主に受動的認識機構としての研究が行われてきた。外界の認識に対しても、皮膚感覚受容器からの情報が脳の体性感覚野にその位置関係が忠実にマッピングされていること、すなわち体部位再現性 (somatotopy) から皮膚受容器からの情報がそこに再現されることで外界を認識されたとする、どちらかといえば受動的な枠組で考えられていた。しかしながら、材質・表面状態などの物性情報認識のためには、ただ単に手指を押し当てるのではなく、手で対象を探る、または指でなぞる等の何らかの意図に基づいた探索的な要素が必要となる。例えば、人間は触運動を用いることによって、ガラス表面の1μmのアラサも検知可能となる。Gibson はこのような触覚知覚における皮膚感覚と運動感覚との統合をアクティブタッチとしてその重要性を述べてる1)。しかしながら Gibson は、探索的触運動を行うとき手などを動かす筋肉への運動指令が、同時に体性感覚野へも投射されていること（遠心性コピー情報）をあまり重要視していおらず、例えば人に手をガイドしてもらいながら触運動を行った場合と自主的に行った場合での違いを説明し得なかった。このような経緯から、皮膚感覚受容器情報、筋肉・関節角等の運動感覚情報、それと遠心性コピー

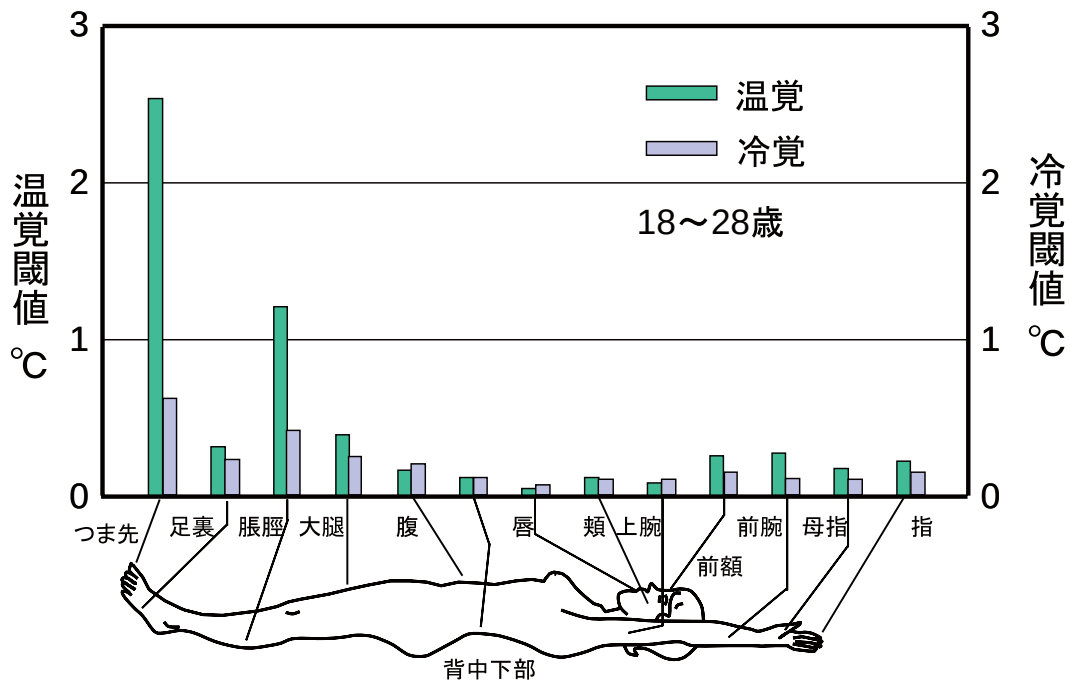


図 1.6: 体表部における温・冷覚の弁別閾値、(Stevens, et al.,(1998) 改変清水

情報との組み合わせから、現在では人間の触知覚モードを5種に分けている2)。この中で能動的ハプティクス知覚といわれるものが近年ロボット工学における触覚を用いた認識の方式として利用され始めているものである。このハプティクス知覚を材質認識を例に図 1.7 を用いて説明する。この図は Taylor<sup>3)</sup> および岩村<sup>4)</sup> の図に修正・加筆したものである。我々が対象の材質を認識する場合、まず硬さ、表面状態、温度特性などを調べ、それらを統合した知覚像とこれまでの経験による記憶像との照合を基に判断を行っている。この過程を大まかに分けると、対象理解のための探索的戦略をつくり手指に探索的運動を行わせる行動生成部分と、手指部受容器からの情報から知覚像の形成を行い、記憶像の照合を行う感覚情報処理部分とに大別される。まず行動生成部は、

1. 押す・撫でるといった探索行動戦略の決定、
2. 手指の動作・力の入れ方などの探索動作の制御と運動アルゴリズムの生成、
3. 探索動作に関わる個々の筋活動の制御を行い、手指に触運動等の探索的運動を行わせる。

次に感覚情報処理部では、

1. 手指の運動に伴い皮膚と対象との力学的相互干渉による発生する皮膚感覚受容器からの情報 (温度変化、振動、変形、測方向力) と、
2. 手指運動による筋・関節からの運動感覚情報が、
3. 手指の運動制御系にフィードバックされると同時に、
4. 遠心性コピー情報とが統合され知覚像の形成が行われ、
5. その知覚像とこれまでの経験による記憶像との照合を行うことによって材質の判別が行われる。
6. そして照合が一致すれば材質が判別されたとし、一致しなければ探索行動のループを再度繰返すことになる。

すなわち、探索戦略の決定→行動→検証→戦略の変更というループを経て対象の材質の認識を行うことになる。このような手順は触覚センサを用いた物性情報認識技術に対しても有用な知見を与えてくれるものと考えられる。

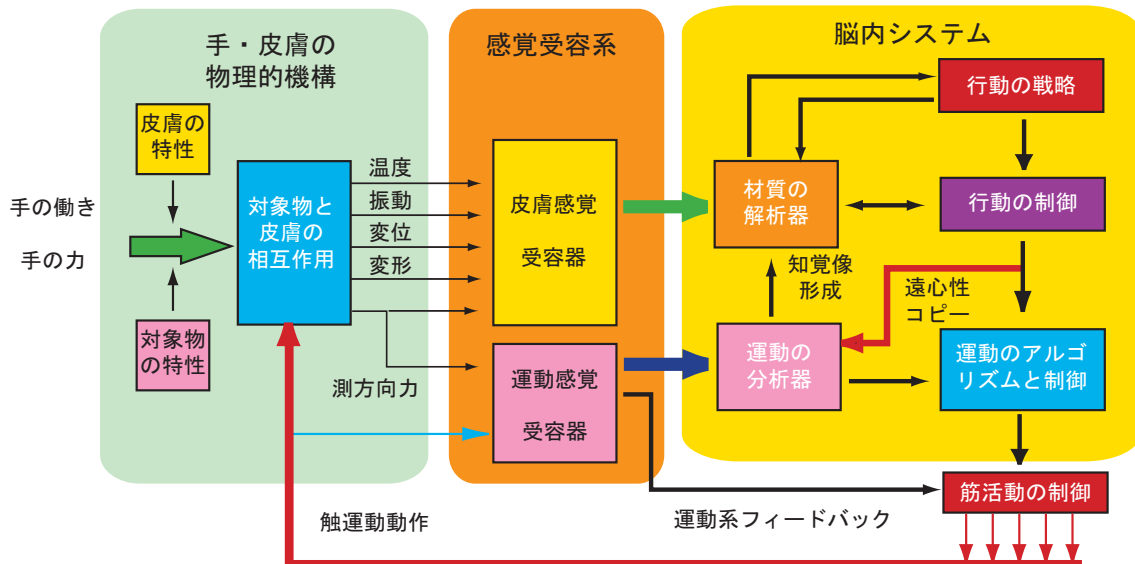


図 1.7: ハプティクスによる材質感の認識

## 第2章

# 触覚の工学的実現

### 触覚の工学的実現

究極の触覚センサとはなんだろう。研究者の夢からすると人間の皮膚だろうか。但し、人間の皮膚感覚はこれまでに開発されたいかなる触覚センサよりも素晴らしい。そのゴールはまだ遠いのが実状であり、その実現は遠いゴールとしてあるだろう。だが、工学的有用性を考えた場合、人間の皮膚感覚に近い必要はない。例えば材質感などは電気抵抗、機械インピーダンスなど、皮膚感覚とは違う物理量を計測して解析した方がより合理的に思える。しかしながら、皮膚の持つ柔らかさ、薄さ、大面積性などの形態的な特性、および数ミクロン程度の表面粗さを知覚できるメカニズムなど、いまだに人間の皮膚をあるときには目標に、あるときには皮膚から学ぶことが多いと思われる。本解説では、このような観点に立ち触覚センサを考えてみたいと思う。この人間の皮膚感覚については前章で述べた。また皮膚の形状・材質からみると、皮膚は薄く、柔軟で、広い面積をカバーし、かつ高密度に感覚受容器が配置されている。最近、この皮膚については皮膚の物理的構造自体が巧妙な情報選択機能を行っていることが明らかになってきた。例えば皮膚の指紋及び多層構造などによる受容器近傍の応力の拡大作用、空間周波数フィルタリング効果等があげられる [40]。このように人間の皮膚感覚は、センサとして考えてみると複数の検出器が、皮膚という柔軟で薄いシート状の中に高密度で配置された構造となっている。検出器の機能に関してはこれを工学的に作るのはさして困難ではないと思われる。人間の感覚受容器は、荷重の変化に反応するもの、振動に敏感なもの、体温より高い温度に反応するもの、体温より低い温度に反応するもの等役割が分れている。これらをセンサとして実現するのは可能で、実際に実現した例もある。しかしながら、以下のような条件で実現させるのが現在の技術では非常に困難であると考えられる。

1. センサは、皮膚のように柔らかく、薄く、広い自由曲面を覆える。
2. センサは、各種検出器が高密度に配置されている。
3. センサは、物理的・化学的な破壊に対して耐久性がある。

皮膚感覚センサを開発する上で重要なことは、このような薄型・柔軟性といった形状・材質的制約条件の下で検出素子を如何に高密度に配置するかという問題と、高密度に配置した場合に多数の検出器からの配線の処理、そして多量データの情報処理の問題がある。また、ロボット用のセンサとしては、接触する前に検出する近接覚、フィードバック制御に必要な高速性が求められる。これらのことをまとめると以下になる。

1. 自由曲面への装着が困難である。ロボット等各種機械システムには自由曲面が多く存在し、センサの取付けが難しい。
2. 多数の配線処理が困難である。各種機械システム全体を覆う場合、多くの検出素子を分散配置する必要があり、その配線数は膨大なものになり、その配線処理が困難である。

3. 処理時間がかかる．検出素子の走査と情報処理のため，検出素子の増大とともに応答遅れが生じてしまう．ロボット制御では通常  $1\text{kHz}$  程度の制御ループで用いているため， $1\text{ms}$  以内の応答性が必要である．
4. 接触して初めて情報が取れる．このためアプローチ動作では対象物に衝突してしまうか，低速度での動作となる．
5. 標準的センサがない．このためソフトウェアの蓄積が困難であり触覚を必要とする応用分野での研究開発の効率低下，触覚を必要とするシステムの普及・発展の妨げとなっている．

このような触覚を工学的に作ろうとする試みは主にロボット用触覚センサの開発としてこれまでに多くの研究開発が行われてきた．以下ではその内容について述べる

## 2.1 触覚センサの概要

現在，産業界で活躍しているロボットの多くは単純な繰り返し動作型で，環境の変化に応じて適切な処置を行う能力を持つものは少ない．これに対して，ロボットに各種の感覚を付加し，適応能力を高めた智能ロボットを開発する試みがある．このような智能ロボットに必要な感覚として重要なものは，視覚と触覚である．視覚は全体的な環境認識を行い，触覚は接触状態における動作制御を行う．それぞれ不可欠な相補的役割を持ったセンサである．視覚センサには，テレビカメラ等のように完成度が高いセンサが存在する．しかし，触覚センサは，作業内容，装着スペース等の装着環境によってそれに適したセンサを選択するため，各種の特徴を持ったセンサが開発されている．そのため，汎用で標準的なセンサがないのが現状である．本節では，触覚センサの概要と開発されたセンサと応用について解説する．

### 2.1.1 ロボット用センサの大別（内界センサと外界センサ）

ロボット用のセンサは，内界センサと外界センサとに大別される [23]．図 2.1 にその分類を示す．

1. 内界センサとは，ロボットの内部状態を検出するセンサである．手指等の制御のために各関節の角度検出を行うロータリエンコーダ，トルクセンサ等は内界センサにあたる．
2. 外界センサとは，ロボットが外部環境の認識，外部の対象物との相互関係を検出するセンサである．視覚・触覚センサは外界センサである．例えば，ロボットが手指等を用いて対象物を把持，操りを行うときには，視覚センサを用いて対象物の位置，形状等を認識し，触覚センサを用いてあやつり力の制御等を行う．外界センサには，視覚センサ，触覚センサのほか，近接覚センサと力覚センサがある．近接覚センサは，センサと対象物の相対位置が数センチメートル程度の場合の距離を検出し，対象物の存在確認，接近制御，衝突防止等に利用される．力覚センサは，手指肩等の関節が受けるトルクおよび軸力を計測するためのセンサであり，各関節に取付けて計測を行う 6 軸型力覚センサとして市販されている．これらの力情報は，ロボットがはめ合い動作など細かなハンドリングを行う場合など，制御機へのフィードバック情報として必要不可欠な情報である．

以下では，この外界センサの中の主に触覚センサについて述べる．

## 2.2 検出方式による分類

ロボットの触覚センサは，作業内容，装着スペース等の装着環境によってそれに適したセンサを選択する．この結果各種の特徴を持ったセンサが開発されている．触覚センサは接触状態を主に電気信号に変換するための検出器を必要とする．例えば ON/OFF の検出ならばスイッチ，接触力ならば歪ゲージなどが手近なもので

| ロボット用センサ | センサ           |     | 備考            |
|----------|---------------|-----|---------------|
| 内界センサ    | ロボット内部状態検出センサ |     | 各関節角度・トルク計測など |
| 外界センサ    | 視覚センサ         | 非接触 | 対象物の位置・形状計測   |
|          | 近接覚センサ        |     | 近距離(数 cm)計測   |
|          | 触覚センサ         | 接触  | 接触力分布検出など計測   |
|          | 力覚センサ         |     | 関節力計測         |

図 2.1: ロボット用センサの大別

あろう。ここでは、接触状態を電気信号に変換する検出方式からセンサ进行分类する。

### 2.2.1 機能による分類

触覚センサの検出機能によって以下のような分類ができる。検出機能としては、接触情報、圧力情報、すべり情報等が主なものである。その他、温熱覚、硬さ覚などがある。

1. 接触覚型触覚センサとは、対象物との接触状態を ON-OFF 情報として検出するセンサである。対象物の検知、衝突の検知等に使われる。単純で扱い易く信頼性の高いセンサを簡単に構成できる利点がある
2. 圧覚型触覚センサとは、対象物との接触状態を接触圧力を連続量として検出するセンサである。対象物を把持、操作した時に指に加わる力を検出するために使われる。通常触覚センサと呼ぶ場合は、圧覚型触覚センサを指す場合が多い。
3. すべり覚センサとは、センサと対象物との相対的なすべりを検出するセンサである。ハンドが対象物を把持したときに適当な把持力を定める場合、対象物がすべり落ちないことが最低の条件となる。すべり覚センサはこのすべりを検出するセンサで、安定な把持等を実現するために使われるセンサである。
4. この他、把持対象物の材質感の計測のため、温熱覚センサ、硬さ覚センサがある。温熱覚センサは、発熱層と温度センサを組合わせ、接触時の熱伝導性を測定するもの等がある。硬さ覚センサは、押込み量と反力から計測するもの、接触型振動子を押して共振周波数の変化から計測するもの等がある。

この電気量への変換方式としてこれまで様々な方式が試みられている。その方式によって触覚センサの大よその特性が決まってしまう。以下にこれまでに利用されてきた方式についてその概略を述べる。

1. 機械的変位方式：バネ等の機械的構造の変位、変形から接触力を検出する方式である。機械的構造は、寸法、構造を変えることで感度を変えることが割合と自由にできる利点がある。
2. 抵抗値変化方式：歪ゲージ、感圧導電性ゴム等の接触力を加えると、その電気抵抗値が変化する特性を利用した検出方式である。抵抗値変化を検出する回路は、静電容量型、電荷検出型の回路と比較して簡単なため、検出系の電気回路が単純化できる利点がある。そしてセンサの出力インピーダンスが低いため、比較的電氣的雑音に強い特徴がある
  - (a) 歪ゲージは、線状の金属抵抗体が伸び縮みによる抵抗値の変化から歪測定を行なうもので構造体の歪から応力を計測する。構造が単純で、高精度であるため、荷重測定、変位測定などに広く用いられる。
  - (b) 感圧導電性ゴムは、シリコンゴム等の中に炭素粒子等の導電性粒子を均一に拡散させてものである。



荷重によるゴム体積減少に伴う、導電性粒子の相互接触の増加による電気抵抗の変化から荷重を計測する。感圧導電性ゴム等の有機高分子材料は、柔軟性、加工性、大面積化が容易であるだけでなく、衝撃などによっても破損しないなど無機物では望みえない特徴を持っている。欠点としては、ゴム自体が粘弾性を有するため応力・抵抗値特性にヒステリシス特性がある。

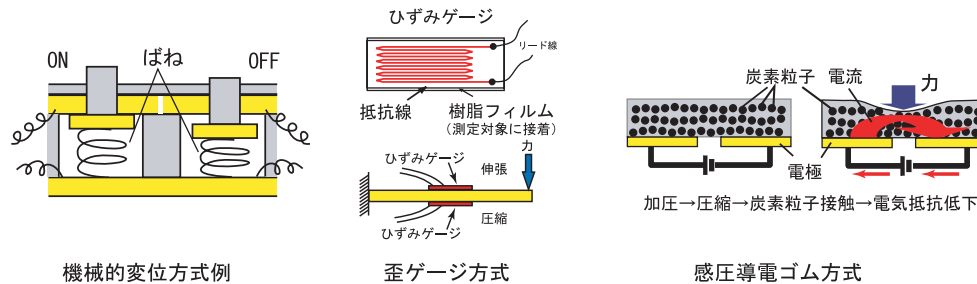


図 2.2: 検出方式（機械的，抵抗値変化）

3. 静電容量変化方式：弾性を有する誘電体を2枚の電極ではさみコンデンサーを形成し、加圧力による誘電体の変位によって静電容量が変化する特性を利用した検出方式である。弾性体を替えることによって感度の調節が可能である。また、空間分解能を高めることは、検出エレメントの面積が小さくなり、静電容量が小さくなることから、原理的に高分解能型センサの実現は困難である。例えば検出エレメントの面積を  $16\text{mm}^2$ 、電極間隔を  $0.25\text{mm}$ 、弾性体の誘電率を4とするとこのエレメントの静電容量は  $0.2\text{pf}$  と非常に小さな値となり、センサ配線の浮遊容量、外部導体との浮遊容量による誤差が大きくなる。静電容量変化の検出は、発信回路を構成し周波数変化を、ヘテロダイン検波等を用いて検出する方式が一般的である。
4. 電荷変化方式 (PVDF, PZT)：強誘電体の結晶に圧力を加えると結晶表面に電荷が生じるpiezo効果を利用した検出方式である。素材としてはポリフッ化ビニリデン (PVDF) を用いる方式が多く、その他 PZT 等を用いた例もある。検出感度を高く取れること、機械・電気的特性が良いこと等の利点がある。欠点としては、検出器からの出力が加圧力の微分的応答を示すため、繰り返し荷重の測定は可能だが、静的な荷重の検出は困難であること、電荷として出力されるためチャージアンプが必要になることである。この他、PVDF にはピロ効果があるため温度によっても電荷を発生するため、温度の影響を補正することが必要である。
5. 光学方式：弾性体の変形による光反射率の変化、光を通す光導波板の散乱率の変化、弾性体中のマーカの変位計測等を用いる方法である。光方式は、他の電気的方式と比較して電磁誘導等による電気的雑音に強い利点がある。

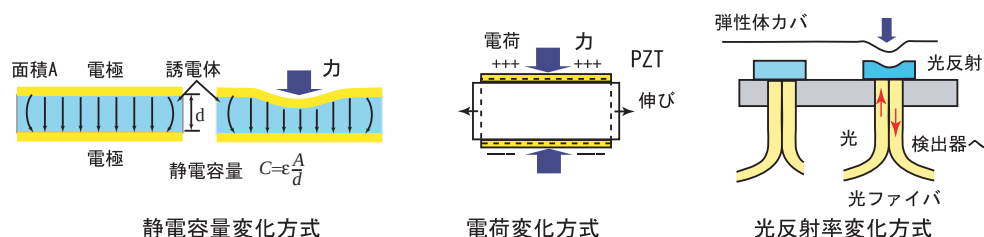


図 2.3: 検出方式（静電容量，電荷変化，光学方式）



- (a) 反射率の変化方式：入射光，反射光用の2本の光ファイバーを対にして受圧面の下に配置する方法で，圧力による受圧面の変形による反射光量の変化から圧力を検出する方法である。
  - (b) 光導波板の散乱率変化方式：光導波板と白色弾性体を用い，加圧力による白色弾性体と光導波板の接触面積の変化を CCD 等の光学系で観測する方法である．光導波板の端面からの入射光は光導波板の中で全反射を繰り返して進んで行くが，加圧力によって白色弾性体が光導波板と接触すると全反射条件が崩れ，光が散乱しその部分が光って見える．すなわちこの散乱光のパターンからセンサと対象物の接触状態を計測しようとするものである。
  - (c) 光ファイバーからの光散乱方式：光ファイバーが曲げられることによって光の透過率が減衰する特性を利用したセンサである。
  - (d) 弾性体変位計測：光透過性の3次元弾性体の外力による変形を，弾性体中に入れた赤，青などのマーカをカメラで計測することから変形を計測し，加わった外力を計測する方式である。
- この他，受圧面に弾性ピンが配置され，これが加圧力により変位して弾性ピン下にある発光－受光素子間の光路を遮断し，その光量変化から加圧力を検出する方法もある。
- 6. 圧抵抗効果方式：半導体結晶に圧力を加えるとその電気抵抗が変化する圧抵抗効果を用いて接触力・抵抗値変換素子として利用する方法である．半導体結晶を用いているため，通常の集積回路の製作技術の利用が可能で，感圧部分であるダイアフラムとその信号処理回路まで一体化して製作可能な利点がある．これら半導体集積型のセンサは，シリコンチップを用いてセンサを形成しているためセンサに柔軟性がないこと，耐環境性に問題があること，パッケージングが難しい等の問題がある。
  - 7. 磁気変化方式：磁気感应型の磁気抵抗素子と微小磁石を混合した弾性体を組み合わせ，弾性体の変形による磁場の変化を磁気抵抗素子の出力変化として検出する方式である．磁気双極子の空間的変位を測定することから，検出器を工夫することによって，原理的に6自由度の変位を計測可能であり，センサ表面の法線，接線，トルク等の力が検出可能となる．しかし，鉄などの磁性体を扱えない欠点がある。

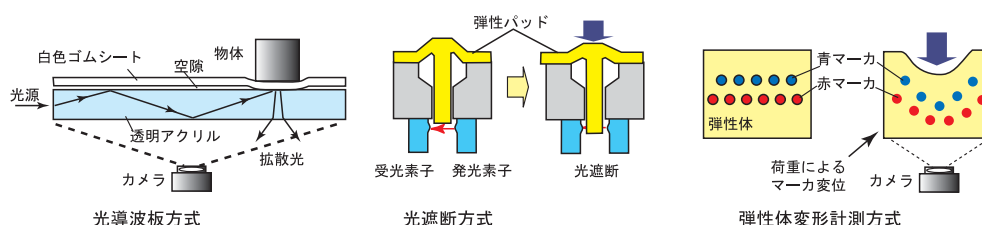


図 2.4: 検出方式（光学方式）

## 2.3 触覚センサの機能による分類

現在までに多くの触覚センサが開発されてきた．ここではこれまでに開発されたセンサの幾つかを紹介する．

どのような触覚センサを開発するかは，その利用目的，その必要性による．例えば，物体をつかんだときの (1) 把持位置・姿勢の判別，(2) 加える力の判別，(3) 滑らないように確実に保持，(4) 材質の判別，などに分けられる．これは，組立において把持物体の位置を基に，力の加減を行い，スムーズなはめ合い動作を実現し，余分な力を加えて壊さないようにするためにも必要である．但し，現状では産業応用において，このような目的を考慮した触覚センサを用いた例は多くない．一つにはセンサに投資するコストと得られる効果の関係の価格対効果の問題があること，そして触覚センサが本当に必要とされる多機能・多指ハンドの開発が発展途

上に有り、産業応用に用いられるものが、まだ少ないためと思われる。一方、組立において力の加減の検出にはロボットの各関節軸力を検出する力覚センサが多く使われている。そしてこれからの産業応用の一つの姿として、ロボット等の全身を覆うような触覚センサの利用がある。これは、産業用マニピュレータ全体をセンサで覆い、衝突安全性の向上を図る用途、また人間がマニピュレータを触りながら動作を教示する用途、そしてヒューマノイド型ロボットと人間が直接触れ合いながら情報をやり取りするヒューマンインターフェースとしての触覚の利用など様々な応用可能性があると思われる。

図 2.5 には触覚センサの測定量によって分類したものを示す。測定量として、接触の検出、滑りの検出、材質の検出、近接の検出とした。これらは、触覚センサが対象物と近づき接触したときに計測できる値である。接触の検出では、接触位置と強度の計測が主となる。これらは通常、分布する値である。また、従来の触覚センサは、主に法線方向力のみを検出するものが多かった。しかし対象物の把持制御では法線方向力のみでなく、滑りに関係する接線方向力の検出を求める要求も多い。この滑りの検出では、滑りそのものを検出する方法と、滑りによって発生する振動を検出する方法、またセンサ自体の弾性体内部の応力歪状態から検出する方法がある。最後の近接覚は、近距離(数 cm 程度)での対象物の存在を検知するセンサである。触覚は接触して初めて情報が取れる。このためアプローチ動作では対象物に衝突してしまうか、低速度での動作となる。そこで、触覚センサの領域を拡大して、近接センサを利用することにより、ラスト数 cm の距離での効果的な制御が可能であろう。従来は視覚で位置を推定しても、衝突を恐れ低速度で接近するしかなかったが、近接覚センサを利用することで確実に近距離に接近したことを検知できる。よって、より高速なアプローチ、よりソフトな接触が可能となるとと思われる。

| 計測量                        | 特 徴                 | 備 考                                                |
|----------------------------|---------------------|----------------------------------------------------|
| 接触の検出<br>・分布量<br>・位置<br>・力 | 曲面・大面積への対応          | 自由曲面の被覆、広い面積も覆える、薄型・軽量・省電力が望ましい。                   |
|                            | 配線問題への対応            | 分布計測→検出素子の分散配置→配線数の増加<br>省配線化もしくはワイヤレス対応の要求        |
|                            | 多軸力への対応             | 法線・接線方向力、6 軸力( $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ )の検出 |
| 滑りの検出                      | 滑り振動より検知            | 滑り振動(加速度)、スティックスリップ                                |
|                            | 弾性体内部応力・歪状態より検知     | 表面荷重分布の弾性体厚み方向変化、接触対象物との摩擦係数の変化による弾性体内部での歪変化、等の利用  |
|                            | 接触面変化より検知           | 初期局所滑り領域の検出                                        |
| 材質の検出                      | 硬さの検出               | 接触子振動数変化                                           |
|                            | 温覚の検出               | 熱伝導計測(ペルチェ素子)                                      |
|                            | 複合覚                 | 歪と振動など異なる物理量計測からの判別                                |
| 近接の検出                      | 近距離(数 cm 程度)での対象物検知 | 反射型フォトインタラプタ、超音波、静電容量、渦電流などの利用                     |

図 2.5: 触覚センサ機能による分類

以下では、まず産業用に広く利用されている力覚センサについて簡単に触れ、次に触覚センサの最近の研究開発事例を基に述べる。

## 2.4 力覚センサ

力覚センサは、各関節に加わる軸力即ち、直交座標系の3軸方向の力と3軸回りのモーメントを検出する。このため6軸力センサと呼ばれる。力覚センサの位置、及びロボットのリンク系の姿勢が既知とすれば、それに加わる荷重の大きさ、方向と作用点の位置が計測可能となる。力覚センサの動作原理は外力によって発生する構造体の変形を利用する[24]。構造体変形の計測には、フォトセンサ等の光学系を利用するものもあるが、現在は歪みゲージを利用したものが多い。変形体の構造としては、ビーム型と並行平板型に大別できる。ビーム型の例を図2.6に示す。これは4本梁の全ての側面に歪みゲージを貼付け、梁の変形から軸に加わる力( $x, y, z$ 軸方向力、及び各軸回りモーメント)を計測する。これは荷重を伝える2つの剛体の間を変形が起りやすいビーム構造とし、ビームに歪みゲージを貼り付け、歪みを計測することから外力を計測する。この場合、検出感度を上げるためにはビーム剛性を低くする必要がある。するとセンサ剛性が低下してしまい、センサ変位によって検出精度の低下、及びロボットの制御精度の低下につながる。また、並行平板型は、2つの剛体を一對の平行な薄板で連結した構造であり、薄板に歪みゲージを貼り付けて外力を計測する。

力覚センサの適用例としては、部品加工で発生するバリ取りやグラインダ作業がある。これはロボットの手先に6軸センサを取り付け、仮想コンプライアンス制御を行わせている。過負荷に対するメカニカルストップを標準で装備することむろん、作業中に発生する振動、温度、湿度、塵埃等の悪環境への対応が重要となる。

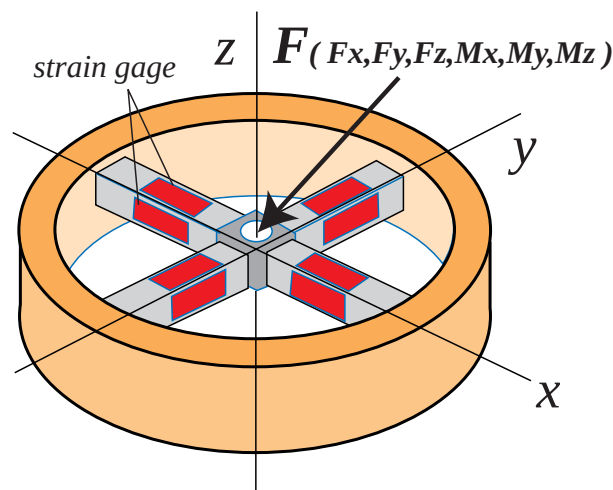


図 2.6: 6 軸力覚センサ (4 本はり方式)

## 2.5 接触の検出 (位置と強度)

人間とロボットとの共生を考えた場合、ロボットの身体に人間が直接触れたことをロボットが認識し、適切な反応を返すことが必要となるであろう。このようなロボットの全身をおおうようなセンサでは、薄く、ある程度3次元的な自由変形がセンサ自身に要求される。また、指先などの自由曲面等にセンサが装着可能であることが必要である。

### 2.5.1 シート状触覚センサ

圧力分布計測の要求は、体表面での圧力分布の計測として以前からあり、開発されたセンサは、椅子、ベッド、靴製品などの設計支援、快適性評価等の研究に利用されている。人体などに取付けるため、センサは薄く柔らかく自由曲面にも装着可能であり、かつ比較的大面積化が可能なセンサであることが求められている。その一つとして、小型のロードセルを多数並べて各ロードセルからのデータをスキニングによって取り込む方法がある。ロードセルは、圧力による内部構造体の微小変形をひずみゲージで計り、加圧力を計測するものである。この方式は、感度もよく、長年の実績があり信頼性の高い計測が行える点に特長がある。しかし、ロードセル毎にひずみアンプが必要となるため、装置が大型・複雑で高価となり、また多数のケーブルを必要とするなどの難点がある。

#### 感圧導電ゴムを用いた方式

感圧導電ゴムは圧力を電気抵抗に変換する。その構造は、シリコンゴムの中に導電体である炭素粒子を均一に分散させたものである。炭素粒子は、無荷重のときに互いに離れているが、力が加わるとシリコンゴムが圧縮され、炭素粒子は相互に接触してそれに沿って電流が流れる。即ち、圧力の増加に伴い炭素粒子の相互接触数が増加し電気抵抗が減少する。感圧導電ゴムは、柔軟性、加工性、大面積化が容易であるだけでなく、衝撃などによっても破損しないなどの特徴を持っている。但し、ゴム自体が粘弾性を有するため応力・抵抗値特性にヒステリシス特性があるため定量的な計測に問題がある。この感圧導電ゴム利用した例を示す。センサ部の構造は、縦横に電極を印刷したフィルムで感圧導電ゴムを挟んだ3層構造である。縦横の電極が交叉した部分が圧力の検出部となる。縦横電極を順次走査を行う [25]。但し、検出部間の電流回り込みがあるため、その防止回路を必要とする。図 2.7 には猫の足底圧を測定した例を示す。これは猫に側方向の力を加え足の反射反応を足底圧から計測した。足底と指先の爪による圧力が観察される。センサはシート状の構造で厚さは 0.7mm、柔軟性がある。測定部は 4096 個の検出点が  $64 \times 64$  のマトリクス状に 1mm 間隔で配置されている。この例ではセンサ出力はビデオ信号として出力されるため、測定は VTR 録画によりデータの保存ができ、かつハードウェア・ソフトウェアが安価に利用できるビデオ画像処理装置を用いて解析が可能である。

同じ感圧導電ゴムを用いた例として図 2.8 には手袋に縫付けた例を示す [26]。手袋の黒い部分がセンサ部であ

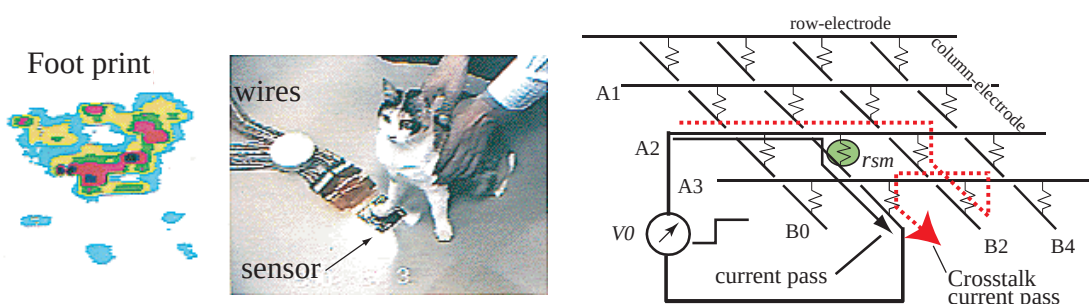


図 2.7: ビデオ出力型触覚センサ

る。また、図 2.8 に示すように感圧導電性ゴムに金メッキ線を縫いつけることによって感圧構造を作り、手袋状に成形した。金メッキ線の縦線と横線の交点が感圧点となる。荷重を加えると、この交点での上下方向の抵抗値の減少から加圧力を計測する。このようにするによって、電極行と電極列の交点において圧力検出点が構成される。計測点数は、各指先 4 点、各指腹 3 点、親指 10 点、掌 46 点の総計 103 点である。センサは薄く柔軟



であり、また構造上横方向力に対しても強い利点がある [?].

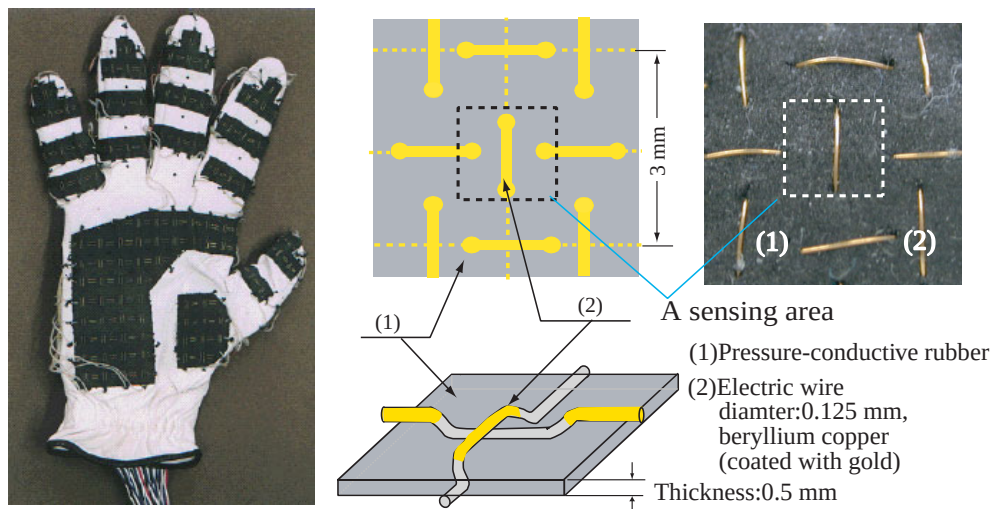


図 2.8: ワイヤ縫込み型触覚センサ

### 圧感受性インクを用いた方式

感圧素材を薄膜ストライプ状に印刷しセンサを構成したものがある．感圧原理は薄膜状に形成した感圧部の凹凸部分の接触面積が圧力により変化し，接触面積の増減に伴い電極間相互の接触抵抗が変化することから圧力を計測していると思われる．図 2.9 にその構造を示す．図では説明のため凹凸を誇張してある．検出部はフィルム状で 0.1mm 程度と薄く，また印刷により形成できるので高い空間分解能を実現することも可能である．図では測定例としてタイヤの接地パターンを示す [28]．この他，歯の噛み合い計測に利用した報告がある．口内の歯形に合わせるようにセンサを馬蹄型に成形し，1.27mm 間隔で XY グリッドが，縦 52 本横 44 本，計 96 本印刷されている．この方式の欠点としては，原理的に接線方向力が加わる用途には不向きと思われる．また，フィルム上に印刷を行うため，2 次元平面で被覆不可能な自由曲面への装着は困難であり，また接触面が大きく変形するような計測にはフィルムに皺が発生し，その取り扱いに注意が必要であろう．

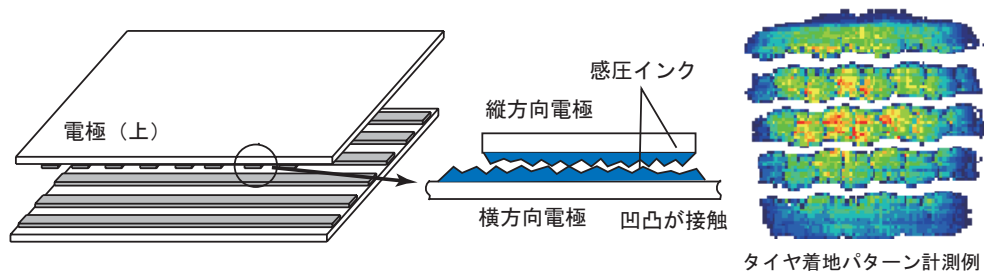


図 2.9: 圧感受性インクを用いた触覚センサ

### 荷重分布中心位置と総荷重検出センサ

この他、薄型シート状で簡単な構造でありながら接触位置とその力が計測可能なセンサの報告がある [29]. センサ構造は図 2.10 に示すように、面状抵抗体で感圧導電性ゴムを挟んだ 3 層構造で 2 次元的なポテンショメータを構成している. その特徴としてセンサからの出力線は 4 本のみである. センサからの配線処理の問題

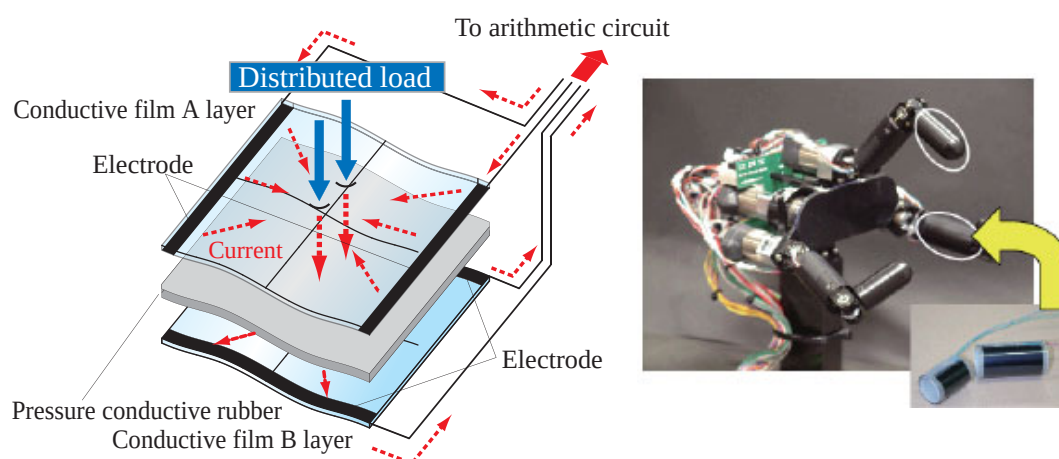


図 2.10: 荷重分布中心位置と総荷重検出触覚センサ

は触覚センサをロボットの指等に装着する場合実装上大きな問題となる. 例えば  $20 \times 20$  個のセンサを配置する場合センサからの配線数が 40 ( $20+20$ ) 本程度となり, 配線束が太く曲げ難くなること, 指内部への配置も空間的に困難である. また最近の実験から, このセンサを用いてすべり状態の検出が可能であり, 実際にロボットハンドへ装着して滑りに基づいた把持力制御を行なった実験結果がある.

### 2.5.2 自由曲面を被覆できる触覚センサ

人間とロボットとの共生を考えた場合, ロボットの身体に人間が直接触れたことをロボットが認識し, 適切な反応を返すことが必要となるであろう. このようなロボットの全身を覆うセンサでは, 薄くてある程度 3 次元的な自由変形がセンサ自身に要求される. また, 指先などの自由曲面等にセンサが装着可能であることが必要である.

#### 触覚センサスーツ

そのような考えの下で開発された例として図 2.11 に示すような触覚センサスーツがある [37]. センサは, 網目状のスペーサを導電性シートで挟み, 導電性繊維で配線を構成したものである. 導電性シートは, 化学メッキによって金属を付着させた導電性ファブリックである. 計測原理は, スペーサを介して離れている導電性シートが, 加圧力によってたわみ, 接触導通することから加圧力を検知する構造となっている. 実験では, 人間型ロボット (体長 68cm) にスーツを着せるように装着している. 感圧特性は ON/OFF 型に近い. また各検出点から配線が出ているため配線数は多い.

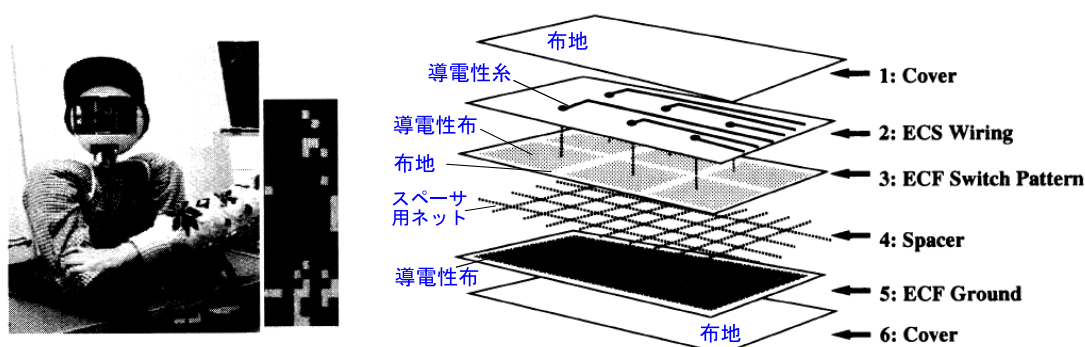


図 2.11: 触覚センサスーツ

### 電磁誘導を用いた分散型触覚チップ

図??その構造を示す。これは無配線で電力の供給と信号の伝送が可能なセンサチップを成形材料に混入し、かくはん後任意形状に成形するというアイデアである。触覚素子への配線が存在しないことから柔らかく、丈夫な皮膚が得られるとしている。センサチップへの電力の供給は、チップ上のコイルと、皮膚底部に配置されたコイルとの誘導結合を介して行う。センシングコイルの長さが加圧力に応じて変化するため、それによってチップの共振周波数 $\omega$ が変化する。この信号を外部のコイルとの誘導結合を介して観測することで加圧力を検出する。試作機では、コイルの一辺の長さは40mm、駆動周波数は1MHz程度である。触覚チップの位置は、外部から加圧を行い、学習によって同定していくとしている。

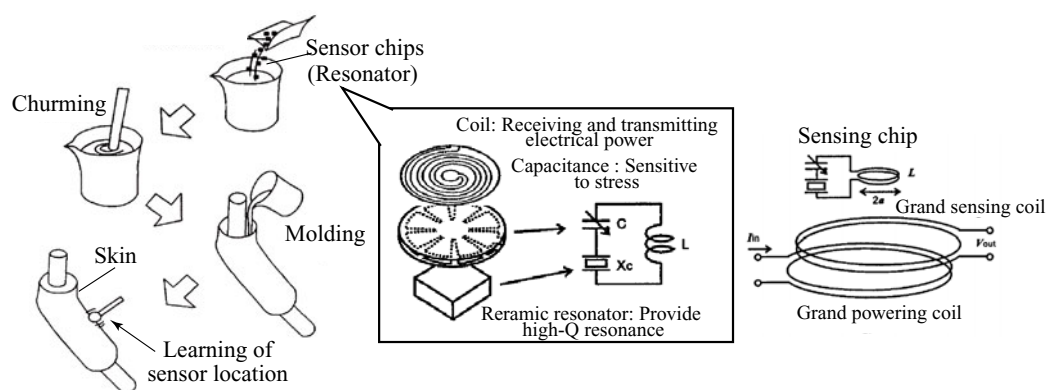


図 2.12: 電磁誘導を用いた分散型触覚チップ

### 光導波板を用いた方式（指先装着）

指型などの比較的小さな自由曲面への装着を考慮したものは数少ない。例として図 2.13 に示すように指先に取り付けたゴムカバーに覆われたアクリル樹脂などの光を通す半球殻の端面から光を照射し、ゴムカバーが接触するとその部分の半球殻から光が散乱することから、この発生する位置を受光素子 (PSD) 等で検出することで接触位置を計測する方法の報告がある<sup>13)</sup>。このタイプのセンサは、限られた空間内で受光素子に結像させる光学系の構成が難しいと思われる。

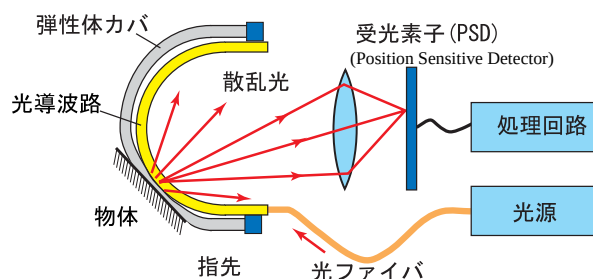


図 2.13: 指先曲面に形成した触覚センサ

### 高速シリアルネットワークを用いた触覚センサ

検出部は、図 2.14 に左上示すように、荷重による発泡ウレタンの変形を反射型フォトインタラプタで計測する構造である。これを図左下のように、何個かまとめ触覚センサシートという単位とする。それぞれのセンサシートは LED スwitch を 8ch 持っており、それぞれの ch で 4 個のセンサの値を得ることができるため、 $32(8 \times 4)$  個のセンサの値を読みとることができる。特徴として切り貼り実装が可能としている。即ち、「複数のセンサとそれらのデータを省配線で伝えるための通信機能を備えたセンサシートを単位として、それを複数枚組み合わせることで曲面に実装する」実装方法である。

それぞれのセンサシートは、単体でも、複数貼り合わせてもセンサとして機能できる。また、これらセンサシートは切断したり、折り曲げたりすることでセンサの実装密度を変化できるようにする。このようにすることで、1 種類のセンサシートでシステム全体を覆うことを可能とする。ここでシリアル伝送には MPU(8051)

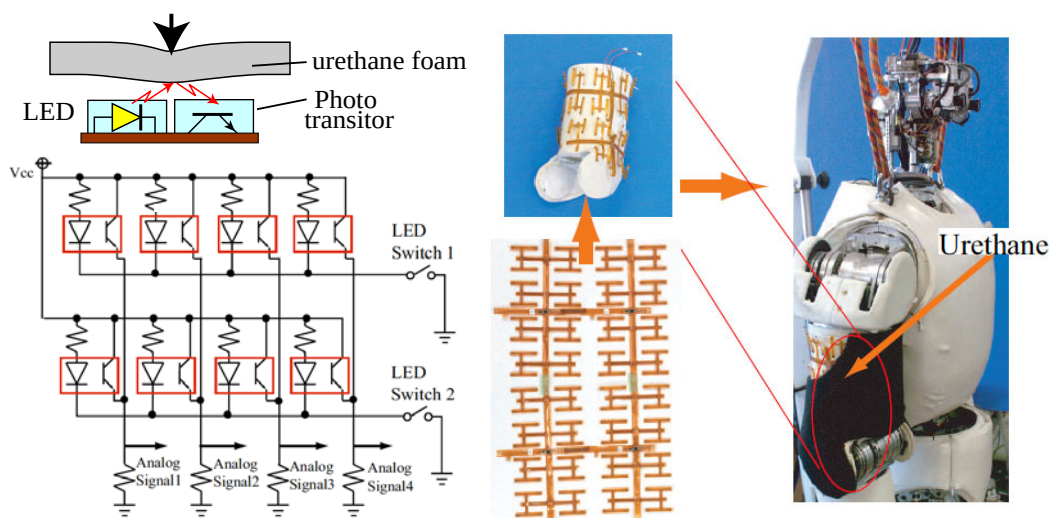


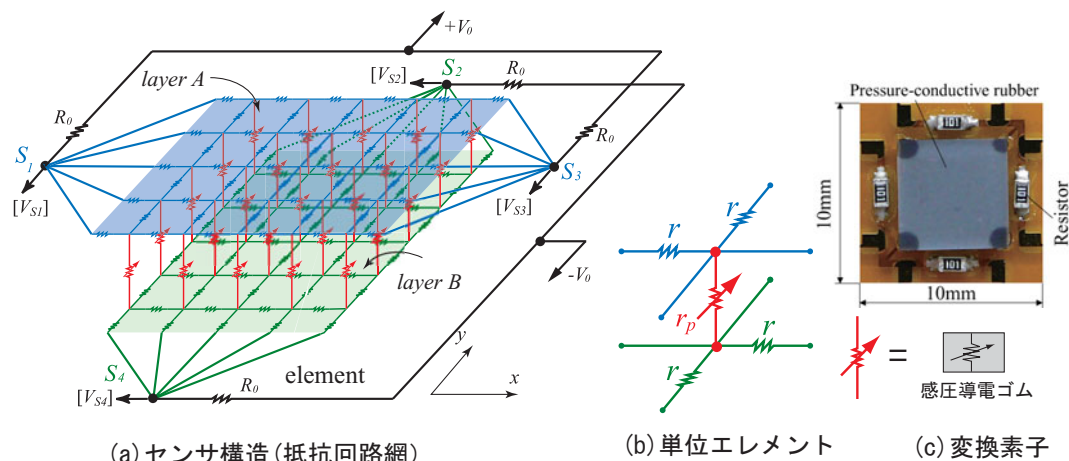
図 2.14: 高速シリアルネットワークを用いた触覚センサ

により SMBus を使用している。SMBus は、1 つのマスタが複数のスレーブを制御し、衝突の問題を回避し、リアルタイム性を確保することができる。触覚センサシートはアドレスを持つ SMBus スレーブである。SMBus マスタ自体はリング型のネットワークを構成し、ホストとリアルタイム通信を行なう。このように階層的なネットワーク構造とすることで、最大 65536 個 ( $32 \times 32 \times 64$ ) のセンサを高速かつリアルタイム、省配線で扱うことができるとしている。



### アナログネットワークを用いた網目状センサによる

センサは、網目状の構造を持ち、自由曲面を被覆可能で、2次元表面に加わる荷重分布の中心位置とその総荷重を検出できる。基本となるセンサ構造を図 2.15 に示す。センサは図 2.15(b) に示す単位エレメントを複数個並列に接続し、図 2.15(a) に示す電氣的境界条件を満たせばよい。単位エレメント間の配線は、隣り合う単位エレメントどうしを接続するのみでよい[?]. また、センサ構造は、アナログ回路網であるため、検出素子の個数、配置、センサ面積に係わらず、その応答速度はほぼ一定である。



検出素子 機能

図 2.15: 網目状センサの構造

### 遅延回路

図 2.16 に示すように遅延素子”D”を介して直列に検出素子”P”を接続した、はしご型回路を構成する。そこにパルス状の信号を入力すると、検出素子からの計測出力が順次出力側線に出力される。このためその出力順序により各検出素子からの計測値が取り出せる。

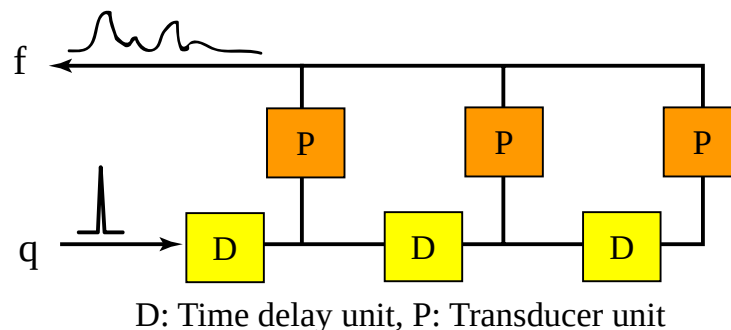


図 2.16: 遅延回路を活用した省配線型触覚センサ

## 2.6 多軸力への対応

従来の触覚センサでは、対象物の操作に必要な、操作力の計測、操作物体の形状等の計測に対応するため、接触面方向の力を検出するものでほぼ十分であった。しかしながら、より安定な把握、より巧緻な操りのため、すべり状態検出、接線方向力検出、振動検出、さらには接触状態における温度検出など、接触における多軸・多種成分の検出を行える触覚センサが開発されてきた。ここでは多軸力対応の触覚センサについて解説する。

### 2.6.1 弾性体変形のカメラ計測による多軸力センサ

弾性体変形から表面応力を計測する。図 2.17 左に示すように弾性体中に赤と青のマーカを入れ、荷重が加わったときの 3 次元変形をマーカの変位によって計測することで荷重を計測する。検証実験では、 $100 \times 100 \times 40\text{mm}$  の直方体透明シリコンゴム中に赤、青のマーカ (0.6mm) を 3mm 間隔で  $24 \times 24$  のマトリクス状に埋め込み、LED で照明を行い、CCD カメラによって計測している。弾性体表面に加わる力は、3 軸力  $f_x, f_y, f_z$  とし、その変形を計測する。分布荷重ではその線形結合となる。力分解能は 30gf, その方向角度は 5 度、空間分解能は 4mm とのことである。

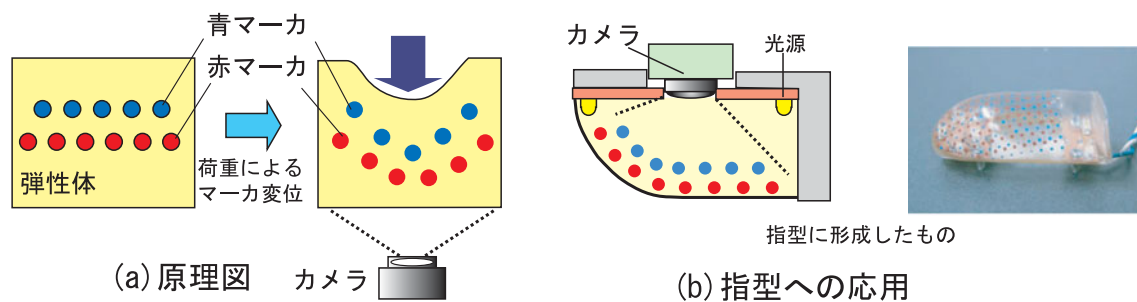


図 2.17: 弾性体変形をマーカ変位から計測する触覚センサ

### 2.6.2 光導波路と触覚子を用いた 3 軸触覚センサ

センサは、図 2.18 左に示すように円筒状の底部に円錐形の突起を 8 つ有する触覚子を光導波路近傍に配置した構造である。荷重が触覚子先端に加わると、触覚子の変位し光導波路と接触する。このとき触覚子底部の円錐状突起が外力の強度と方向に応じて変形する。この変形を CCD カメラによって計測し触覚子に加わった外力を計算する。実験では図右のように直径 27mm 程度の指先にこのセンサを取り付けたものを試作している。

## 2.7 すべりの検出

ロボットハンドによる把持作業では、滑り覚センサに対する要求が多い。これはハンドで対象物を把持したとき、把持力が不足すると物体がすべり始める。事前に対象物の重量とハンドとの摩擦係数がわかれば必要とする把持力は計算できる。またははじめから最大把持力で掴むことも考えられるが、対象物がガラスなどの場合、壊さないように出来るだけ少ない力で把持することが望ましい。このため、対象物を把持して持ち上げるときに、滑りが生じた時点でこの滑りを検出し把持力を調整するなどの制御を行うため、これまでに多くのすべり覚センサが研究開発されている 3)。

その検出方法としては、滑り変位を検出する方法、接触パターンの移動から滑りを検出する方法、そして滑り

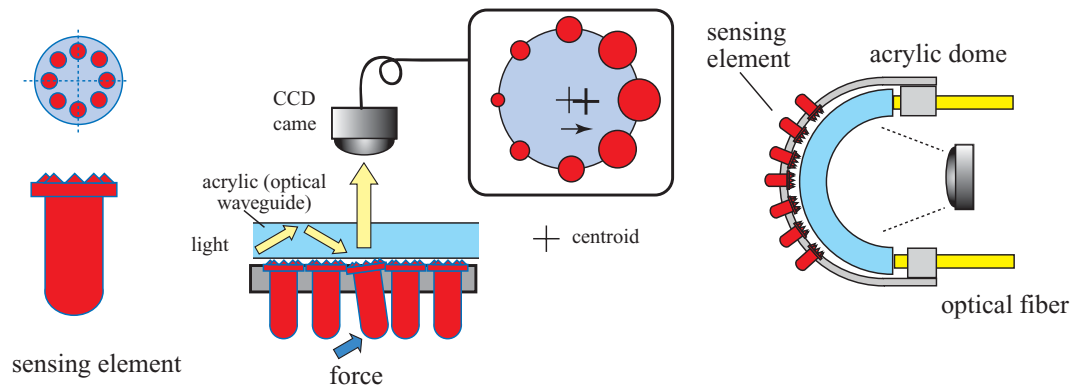


図 2.18: 光導波路を用いた 3 軸触覚センサ

に伴う振動を検出する方法がある。また、摩擦係数によって対象物との接触状態が変化することから指先内部の弾性体の応力歪状態を計測することで摩擦係数を推定する方法などがある。

滑り変位を検出する方法としては、把持面にローラ、ボール等を接触させその回転をエンコーダ等を用いて計測する方法である。接触パターンの移動では分布型触覚センサを用いて荷重重心移動を計算によって求め、その移動を滑りとしている方法が一般的である。この他滑りに伴うスティックスリップ振動を用いる方法がある。スティックスリップとは、ハンドと把持物体面が付着一滑りを繰り返し、振動しながら滑りが進行する現象である。この振動を加速度センサで検出し、バンドパスフィルタによって特異な振動成分を検出することで計測できる。

### 2.7.1 振動による滑り検出

小型の加速度計を指先に埋め込み、初期接触及びすべりを振動を用いて検出するものがある 7)。長さ 50mm、直径 25mm の半円筒形内部を多孔質ゴムで満たしたゴム膜で覆い、その中に小型加速度計を入れたものである。多孔質ゴムは機械系からの振動によるノイズを防ぐために用いている。センサが対象物に触れた時の振動から初期接触状態を検出する。また、把握を行うとき、過大な把握力は対象物に損傷を与え、過小な把握力はすべりにより対象物を落としてしまう。このために適切な把握力の制御が必要となる。対象物のすべりは振動を伴うため、初期の微小なすべり状態を加速度センサにより検出しようとするもの。欠点としては、接触位置、すべり位置の位置同定が困難であること、また初期接触の検出においては、接触速度による検出出力の強度差が大きく、低速度接触では検出できない場合がある。

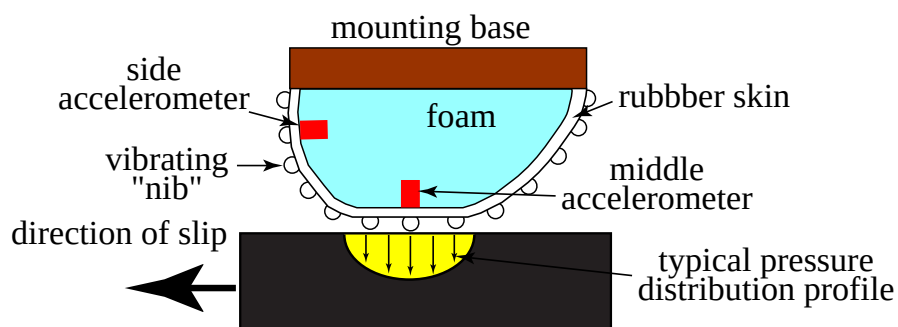


図 2.19: 振動検出（加速度センサ）型滑り検出

### 2.7.2 弾性体内部応力変化による滑り検出

弾性体内部応力の滑り発生に伴う変化を検出することで滑り検出を行なう方法である。図のような弾性体内部にある空洞中点の応力（接線方向）に注目する。ここで仮定として弾性体内の空洞が接触面の中央に位置していることとした。ここで接線方向力を加えて行く。するとその増大に伴い滑りが生じない時点では、接触面中央より左では圧縮、右では引張力が一様に増大するだけで、空洞中点の応力（接線方向）は変化しない。しかし滑りが生じると、接触面中央と空洞中点の位置が変化し、空洞中点の応力（接線方向）が変化する。これによって滑り検出をしている。

この空洞中点の応力の計測は音響共鳴の原理を用いる。この応力計測は、超音波送受信子を用い、弾性体内の空洞の共鳴周波数から計測する。送信子からのスイープされた超音波はパスを通じて共鳴空洞内に到達し、受信子で受け取られる（Fig. 2）。そして、外力が加えられ共鳴空洞が変形した場合、それが受信される超音波の共鳴周波数の変化として捉えられる。このとき、共鳴周波数の変化は共鳴空洞の形状が球ならば主応力の変化に対応し、直方体ならば3辺の長さの各方向の伸縮に対応している。検証実験では共鳴空洞が直方体になるように製作した。したがって各辺の長さの変化からxyz各軸方向の歪みが計算され、それを一般化フックの法則に代入することにより各軸方向の垂直応力を求めることができるとしている。

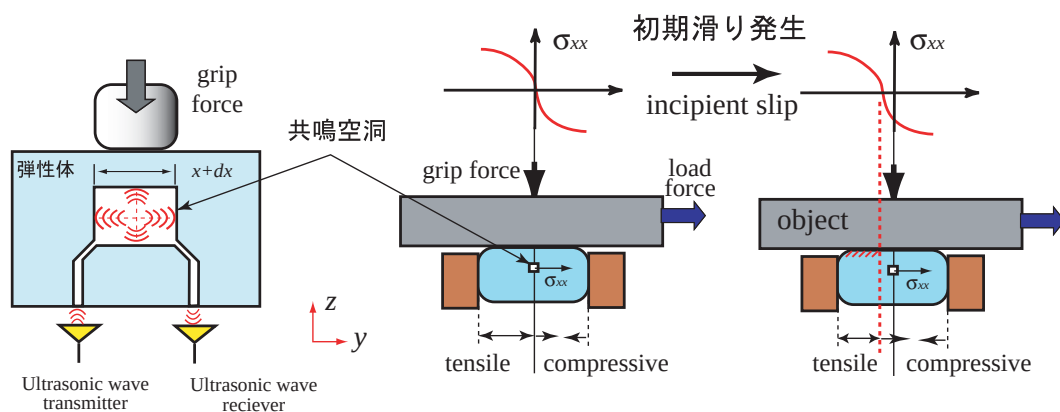


図 2.20: 弾性体内部変形型滑り検出

### 2.7.3 弾性体内部歪分布変化を用いた滑り検出

把持における滑りは、局所滑り領域の増大によって起こるとし、物体とハンドとの間の固着領域・局所滑り領域の大きさを検出することですべり覚センサを開発した試みがある。これは曲面状弾性体内部のせん断ひずみ分布を検出し、滑りが発生する前後におけるのせん断ひずみの差を求めれば、せん断ひずみがある値に達している固着領域と、せん断ひずみがある値に達していない滑り領域とを区別できることから、局所滑り領域の増大を検出可能とする。試作したセンサを埋め込んだ弾性フィンガを図 2.21 に示す。フィンガは、シリコンゴム内にひずみゲージを貼付したりん青銅薄板を 45 度に傾けて均一間隔に 15 枚配置してある。シリコンゴムおよびりん青銅板の縦弾性係数はそれぞれ 4.96 [MPa],  $1.35 \times 10^5$  [MPa], ポアソン比はそれぞれ 0.45 および 0.3 である。フィンガの奥行きは、10 [mm] である。またフィンガ表面の曲率半径はを 763 [mm] である。なお、本センサは質量 612 [gw] 程度の物体を持ち上げることを想定している。実験により、固着領域が増加傾向にあるのか、減少傾向にあるのかを把握することにより把持力を制御するという手法を用いて、重量および摩擦係数が未知の物体を、全体に滑りを生じさせることなく、また、過度な法線力を加えることもなく、

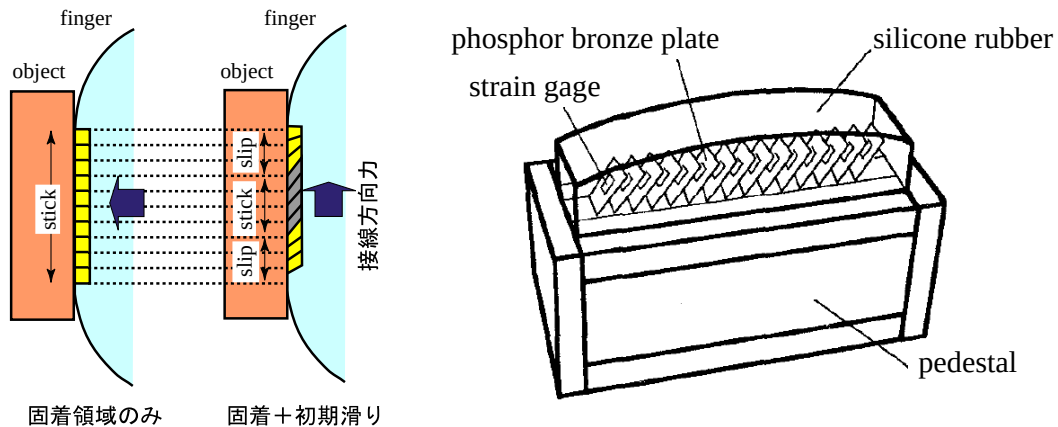


図 2.21: 歪センサを埋め込んだ弾性フィンガ

適切な力で把持し持ち上げられることを確認したとしている。

#### 2.7.4 感圧ゴムを用いた CoP センサによる滑り検出

ロボットハンドに容易に装着可能な触覚センサにより滑りの発生時における局所滑りを検出するセンサが報告された。報告では、荷重分布中心位置検出触覚センサによる滑り検出実験を行い、センサ出力変化により初期滑りを検出する方法について述べている。次に、把持物体に接線方向力がくわえられた際滑りを生じないように把持力を増す抗滑り制御方法の提案と検証実験について述べ、最後に摩擦係数や重さが未知である物体の把持力制御方法の提案とその検証実験について述べている。報告では、(1) センサ出力変化により滑り変位が生じる前に滑りの発生を検出可能であることを示した。(2) 把持対象物に滑りを生じないように把持力を増す抗滑り制御方法を提案した。(3) 滑りに応じて把持力を制御することで、未知物体の最適力把持を実現する把持力制御方法を提案した。(4) 物体の把持実験を行い、把持対象物の重さや表面の摩擦係数が未知であってもほとんど滑りを生じることなく適切な把持力が得られることを示した。また、把持したコップに水を注ぐ実験を行い、把持の最中に重さが変化する場合においても提案した制御系により滑りを生じることなく把持を行うことが可能であることを示した。

## 2.8 材質の検出

触覚センサを用いた材質・表面状態などの物性情報認識の研究の幾つかを示す。まず材質の判別を行った例として、触運動動作と複数センサ情報を統合したシステムがある 5)。このシステムは図 2.23 に示すような温度センサ、振動センサ、摩擦センサなどを備えたセンサヘッドを、なぞり速度・接触力各 3 種類ずつ、計 9 回対象にすりあわせ、その時に検出される温度変化、振動、摩擦、変形の情報を統合することによって、対象物の材質を検出している。振動センサはマイクロホンを利用し、なぞり運動に伴う振動を捉えている。温度変化検出はサーミスタを用いている。摩擦と変形はなぞり運動に伴うセンサヘッドの変位から計測している。識別アルゴリズムは、センサからの情報を温度変化率、振動の高・中・低周波成分など 8 種類の特徴量に分け、相互情報量基準に基づいて特徴量の逐次選択を行う方法を用いている。実験では、木材、金属、高分子材料、人間でも困難な紙質（画用紙、コピー紙、コート紙、デザイン紙等）及び布質の風合標準（紳士夏服用生地）を用い、ほぼ完全に判別できたとしている。また、人間の触感覚を通して材質感を提示する研究については、材質感を構成する物理的パラメータの推測とその材質感への寄与についての報告がある 6)。それによると材質感



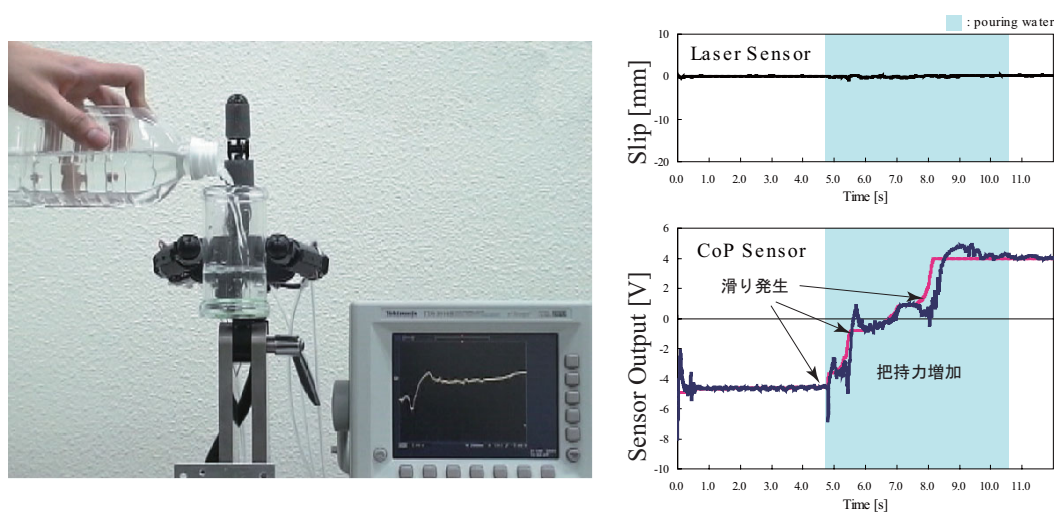


図 2.22: 感圧ゴムを用いた CoP センサによる滑り検出

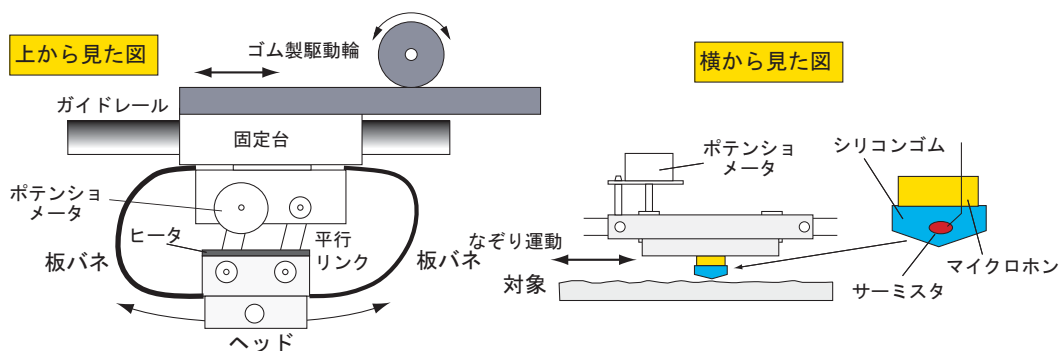


図 2.23: 触運動と複数のセンサによる材質判別システム

の判別には、温度変化パターン情報が深く関与し、また表面アラサ・粘着度といった物理量が寄与することが述べられている。また触運動による材質感の伝達情報量の違いについても述べられている。

### 2.8.1 硬さ覚センサ

その他、物性情報として対象の硬さをはかるセンサの報告がある 7)。これは振動子を対象に接触させた時に、有限長の振動棒の固有振動数が接触した物体の特性によって変化することを利用している。図 X 3 に示すようにセンサは、振動数の変化を検出器で捉え、強制帰還して振動子を駆動する構成となっている。接触圧を一定とした場合、検出器先端にある接触子を球とすると対象が硬い場合には接触面は小さくなり、スティフネス効果で共振周波数が上昇するとしている。接触子は半径 1.5mm の硬質ナイロン球を用いている。応用として、体内臓器の硬さ及び細胞の硬さ診断など医療分野の応用があげられている。

この他、感圧導電性ゴムを用い触覚センサが対象に接触したときの温度変化と、電気的特性を複合的に同時に検出することで材質識別を行わせようとする試みもある 8)。温度変化はヒータを用い自己加熱を行い接触による温度変化を計測し、電気的特性は楕形電極構造を用い電気的容量・インダクタンスを計測している。表面状態の検出についても幾つかの例を示す。

皮膚の機械的特性およびセンサの空間的配置が人間の触覚機能に大きな影響を及ぼすと言われている。最近このような弾性体構造を積極的に利用して情報処理を行わせようとする試みが出てきた。例えば、応力の空間

周波数分布が構造体深部に伝搬するにつれて周波数ゲインが低下し、その減衰率が空間周波数によって異なることから、構造体の深さ方向位置が異なる2点の周波数パワー比を計測し、表面の圧力分布の空間周波数を計測する方法が報告されている9)。このことから対象物表面をなでた場合、接触表面のあらさ、接触速度等が計測できるとしている。また、表面応力分布の広がり特徴が、弾性体内部の応力テンソルに反映されることを利用し、弾性体内部に球形空洞を設け、応力による空洞変形を音響の共鳴周波数の変化として捉え、応力テンソルの固有値を計測する方法がある10)。この方式を用いると表面に加わった応力分布が点状、線状、面状であるかの判別とその強度が計測できるとしている。またこの空洞形状を直方体とし、接触力による直方体の各軸方向の伸縮を共鳴周波数の変化として計測し、法線方向力と接線方向力の検出も可能としている11)。また、多数の圧力検出器をセンサ表面水平方向に配置し、各検出器出力を遅延回路を通して直列接続した構造の触覚センサを用いて、触運動によって表面状態を計測する報告がある12)。これは、多数の検出器からの出力を伝達遅延時間を与えて積和演算を行うことから、バンドパスフィルタ型の空間フィルタが構成されたとしている。そして対象表面をなぞるセンサの触運動速度によってフィルタ特性が変化し、特定の空間周波数が切出せるとしている。

### 2.8.2 複合感覚センサ

複合覚センサとして人間の触覚機構をまねた図5に示すような指先触覚センサがある8)。触覚センサは、深層と表在センサに別れ、その間にシリコンゴムと炭素皮膜インキで構成された発熱層から構成される。感圧素材はPVDFを用い、深層センサは35(7x5)個、表在センサは7個のセンシングポイントを有する。深層センサは、人間のSA受容器に対応する主に静的な接触情報を、表在センサは人間のRA受容器に対応する動的な接触情報を検出する為とし、人間の触覚機構を真似ることによって、接触力、表面荒さ、材質感そして温熱特性を計測可能としている。この他、感圧導電性ゴムを用い電極構造を工夫することによって、電気的容量、インダクタンスを同時に検出することで材質識別を行わせようとする試みもある9)。

#### 複合センサ(弾性体内部に歪ゲージとPVDFを埋め込んだ)方式

図2.24に人間型柔軟指の構造を示す。柔軟指は、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フィルムはピエゾ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。センサ素子が異なる位置、方向に埋められている。作成した柔軟指を3自由度ロボット指に取り付け、紙、コルク、ビニル、2種類の木材に対し、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させている。

### 2.8.3 歪み速度検出型触覚センサ

フィルム状ピエゾ素子を用いて接触面の変形速度を捕らえることから接触状況を検出する6)。センサの構造を図4に示す。長さ45mm、直径25mmの半円筒形内部をポリエステル構造体で満たし、多数のシリコン性の突起(長さ0.8mm、直径0.6mm)をつけたゴム膜で覆い、その中にフィルム状ピエゾ素子を入れたものである。ピエゾ素子はPVF2製で幅0.8mmで3.2mm間隔で4枚ゴム膜直下に埋め込まれている。対象物が触覚センサに触れるとゴム膜が変形しピエゾ素子に応力が加わる。ピエゾ素子はこの応力の変化速度に応じた出力を出すことから接触変形速度を検出することになる。たシリコン製の突起により対象物のすべりによる振動も検知可能であるとしている。本センサは周波数レンジとして10-50Hzを対象とし、通常の触覚センサのDC



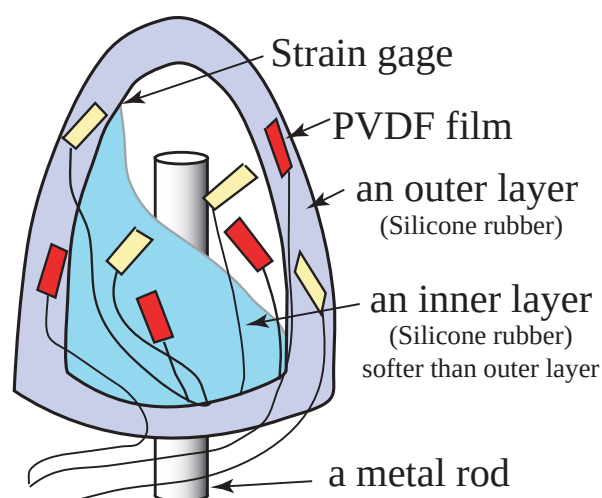


図 2.24: 弾性体内部に歪ゲージと PVDF を埋め込んだセンサ

～10Hz, 加速度型センサの 50-1000Hz の間を補完するセンサとして位置づけられる。

#### 2.8.4 ずれ覚センサ

人間が物体を把持したときに指先の皮膚のずれ感覚で重さを知覚し、把握力を変えるように、指先接触面の接線方向力の検出も重要とされている。これは摩擦係数が既知ならば剪断力（接触面の接線方向力）が計測可能となると事前にすべり発生が推定可能なため、より安定な把握が可能となる。この接線方向外力の検出方法として、図 2 に示すように硬質と軟質のシリコンゴムを 2 層構造とし、上層硬質ゴム部には駆動用コイルチップ 2 個、下層軟質ゴムには検出用コイルチップ 4 個を配置した構造を用いた例がある 4)。駆動用コイルには正弦波電圧を加え交流磁場を励起し、接線方向外力が加わり上層部が相対的に変位をすると、その変位を 4 個の検出用コイルの出力変化から計測し、外力の大きさと方向（並進・回転）を計測する方法である。

## 2.9 曲面および大面積被覆型触覚センサ

人間とロボットとの密な共生を考えた場合、ロボットの身体に人間が直接触れたことをロボットが認識し、適切な反応を返すことが必要となるであろう。このようなロボットの全身をおおうようなセンサでは、薄くてある程度 3 次元的な自由変形がセンサ自身に要求される。また、指先などの自由曲面等にセンサが装着可能であることが必要である。そのような考えの下で開発された例として図 6 に示すような触覚センサスーツがある。センサは、網目状のスペーサを導電性シートで挟み、導電性繊維で配線を構成したもので、加圧力によって導電性シートがたわみスペーサを介して導通することから接触を検知する構造となっている 10)。また、図 7 に示すように感圧導電性ゴムに金線を縫いつけることによって感圧構造を作り、手袋状に成形した例がある。センサは薄く柔軟なため人間の把持圧力分布計測が可能としている 11)。この他、薄型シート状で簡単な構造でありながら接触位置とその力が計測可能なセンサの報告がある 12)。センサ構造は図 8 に示すように、面状抵抗体で感圧導電性ゴムを挟んだ 3 層構造で 2 次元的なポテンショメータを構成している。また特徴としてセンサからの出力線は 4 本のみである。センサからの配線処理の問題は触覚センサをロボットの指等に装着する場合実装上大きな問題となる。例えば 20 x 20 個のセンサを配置する場合センサからの配線数が 40 (20+20) 本程度となり、配線束が太く曲げ難くなること、指内部への配置も空間的に困難である。ハンドへの実装では、図 9 に示すように硬質プラスチック芯にセンサを巻き付け、その外側をシリコンゴムでモールドした構造

となっている。また DC モータ動作環境時の電気雑音環境下での動作にも問題なしとしている。指型などの比較的小さな自由曲面への装着を考慮したものは数少ない。例として図 10 に示すように指先に取付けたゴムカバーに覆われたガラス性の半球殻の端面から光を照射し、指が接触するとその部分の半球殻から光が散乱することから、この発生する位置を受光素子 (PSD) 等で検出することで接触位置を計測する方法の報告がある (13)。これらのタイプのセンサは、ロボットの手指腕等の曲面に実現すること、またその情報処理機能として多数の感圧素子からの情報を高速・簡便に処理できることが必要である。

### 2.9.1 3次元構造を用いた情報処理型触覚センサ

皮膚の機械的特性およびセンサの空間的配置が人間の触覚機能に大きな影響を及ぼすことが言われている。ヒトの指の構造と触覚受容器の位置関係を出来るだけ忠実に有限要素法モデルに置換え、解析を行ってみると、触覚受容器は応力集中部分に存在すること、指紋等の形状が触覚受容器の特性に大きな影響を与えること等の報告がある (14)。また、触覚センサを構成する弾性体の計測に与える影響として、センサ表面上の圧力分布が弾性体内部では分布の広がりを生じ、弾性体内部に配置された検出器では正確には接触力分布を計測していない事があげられる。例えば触覚センサを保護するため、弾性体カバーで被覆したときの空間周波数特性について解析した結果では、カバーは通常ローパス型の空間周波数特性を有し持ち、0.2mm 程度のカバーでも空間周波数 2mm<sup>-1</sup> においてそのゲインは 0.4 となり、その効果は大きい (16)。これまでに、この現象も含めて弾性体構造内部における応力状態等に関して各種の解析が行われてきた (15)。また逆問題として捉え、センサ表面上の接触状態を推定する手法も提案されている (17)(18)。最近このようなセンサの弾性体構造を積極的に利用して情報処理を行わせようとする試みが出てきた。例えば、応力の空間周波数分布が構造体深部に伝搬するにつれて周波数ゲインが低下し、その減衰率が空間周波数によって異なることから、構造体の深さ方向位置が異なる 2 点の周波数パワー比から、表面の圧力分布の空間周波数を計測する方法を提案している (19)。このことから、対象物表面をなでた場合、接触表面のあらさ、接触速度等が計測できるとしている。また、表面応力分布の広がり特徴が、弾性体内部の応力テンソルに反映されることを利用し、図 11 に示すように弾性体内部に球形空洞を設け、応力による空洞変形を音響の共鳴周波数の変化として捉え、応力テンソルの固有値を計測する方法を提案している (20)。この方式を用いると表面に加わった応力分布が点状、線状、面状であるかの判別と、その強度が計測できるとしている。

## 2.10 アクティブセンシング型触覚センサ

触覚は、視覚や聴覚と異なり物体に触れ、動かすことによって初めて物体の形状、硬さ、表面状態等を検出できる感覚であり、動かすと言う能動性が重要な意味を持つ感覚である。人間の指先の空間分解能力は 2mm 程度だが、指を動かすことによって表面仕上げの専門家等は数ミクロン程度の粗さを検出できるのはこの能動性のおかげである。石川は、アクティブセンシングの意義を、対象の探索、対象の全体を知るためなどの局所性の回避、空間分解能の向上、センサの動特性の補償、物体の硬さなどの力学的特性の計測としている (21)。また、近年ハプティクスなる概念が言われてきている。これは元々人間の触覚による対象物知覚に関して言われている概念で、触受容器情報、筋・関節角度情報からの運動情報、そして人間が行う触動作によって生じる大脳皮質内の運動野から感覚野に向けての遠心性情報を総合して触知覚を行う概念を示したものである。このように元々人間の触知覚動作を説明する概念であるため、ハプティクスインターフェースなどマン・マシンインターフェースの方式の一つの概念と使われることが多い。これまでにアクティブセンシングについては多くの研究がある。例として、乳癌における腫瘍の検知・診断を目的に、腫瘍の可動性、深さ、大きさを、感圧センサマトリックスの触子を移動しながら押えつける力を変化させるなどして検出する方法がある

22). また, 昆虫の触角にヒントを得て, 線状の触子で物体に触れ, トルクを加えて触子を若干変形させ, 触子の根元に取付けた角度とトルクセンサから接触位置を検出する方法が提案されている 23). この他, 図 1 2 に示すような空間フィルタ型触覚センサを用いて, 触運動によって表面状態などを計測するセンサの報告がある 24). これは, センサ表面の水平方向に多数の検出器を配置し, 各検出器からの信号を伝達遅延時間を与えて積和演算を行うことからバンドパス型の空間フィルタが構成されたとした. このような構成を取ると, そのバンドパスフィルタの空間周波数選択特性が触運動によって変化し, 触運動速度によって特定の空間周波数が切出せるとしている.

## 2.11 おわりに

今後の研究開発の発展方向はその目的として何をゴールに設定しているかによる. 例えば, 把持操作における触覚センサを考えてみる. 近年人間の手が行うような巧緻な動作を人工的な多機能・多指ハンドを用いて実現させようとする研究が盛んになってきている. しかしながらその制御方式としての多指の協調的な制御を行わせるアルゴリズムの研究は研究途上であると思われる. 新たな触覚センサの開発は, この制御アルゴリズムの研究を通して, どのような触覚情報をどのぐらいの精度で, どの程度の頻度で必要かとの要求仕様があって初めて研究開発の方向が定まるのではないだろうか. 近年の電子技術, 集積化技術の進歩は目を見張るものがある. ひと昔前の大型コンピュータが現在では鞆の中に入れ簡単に持ち運べるようになった. 当然この2つの技術の恩恵はセンサ技術に対しても影響を及ぼし, 最近のセンサ技術は旧来の技術とはひと味違ったものに発展してきている. この流れは触覚センサに対しても例外ではない. 高機能演算素子の発達, 集積化技術の向上は, 人間の皮膚感覚を越えるような触覚センサを実現させることは近い将来であるかも知れない.

## 参考文献

- [1] 小川鼎三, 山田英智: “解剖学3 感觉器学”, 金原出版 (改定第 11 版), pp.95-128,1984.
- [2] Schmit, R.F. (岩村他訳): “感觉生理学第 2 版”, 金芳堂,1991.
- [3] S. J. LEDERMAN: “Skin and Touch”, Encyclopedia of Human Biology, Volume 7, pp.51-63 ,1991.
- [4] J.M. Loomis, S. J. LEDERMAN: “Tactual Perception”, In ”Handbook of perception and Human.
- [5] R S. Johansson and A. B. Vallbo: “Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand”, Trends Neurosc, 6,27, pp.27-32,1983.
- [6] 山田雅弘: “各感覚における神経情報処理の共通点・相違点”, 電総研調査報告,No.215, 18,1986.
- [7] J. C. Craig and K. B. Lyle: “A comparison of tactile spatial sensitivity on the palm and fingerpad”, Perception & Psychophysics, 63-2,pp.337-348,2001.
- [8] Weinstein, S. : “Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex, and laterality”, The Skin Senses, (Kenshalo, D.R., ed.), Charles C Thomas, Ill., U.S.A., pp.223-261, 1968.
- [9] K.O. Johnson: “Neural mechanisms of tactual form and texture discrimination”, Information processing in cutaneous mechanoreceptors, Federation Proceedings, 42-9, pp.2542-2547,1983.
- [10] J. R. Phillips, R. S. Johansson, and K. O. Johnson: “Responses of Human Mechanoreceptive Afferents to Embossed Dot Arrays Scanned across Fingerpad Skin”, The Journal of Neuroscience, 72(3), pp.827-839,1992.
- [11] S.J. Bolanowski, G.A.Gescheider, R.T.Verrillo, C.M.Checkosky: “Four channels mediate the mechanical aspects of touch”, J. Acoust. Soc. Am, 85(5), pp.1680-1694,1988.
- [12] R.S. Johansson, R.H. LaMotte: “Tactile detection thresholds for a single asperity on an otherwise smooth surface”, Somatosens. Res., 1, pp.21-31,1983.
- [13] R.H. Lamotte and M.A. Srinivasan: “Surface Microgeometry:Tactile Perception and Neural Encoding”, Information processing in the somatosensory system, wanner-gren Int. symp. series vol.7,Stokton press, pp.49-58,1989.
- [14] Hosoe, F. Odagawa, T. Shimizu, S., Ino, S.; Izumi, T., Tukahashi, M., Ifukube, T: “Development of a tactile sensor modelled after the shearing strain perception mechanism of the human tactile sense and its application”, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 30, Issue 5, pp.577-583,1994.
- [15] Y. Shimizu: “Temporal effect on tactile letter recognition by tracing mode”, Perceptual and Motor Skills, 55, pp.343-347,1982.
- [16] D. S. Alles: “Information Transmission by Phantom Sensations”, IEEE Trans. Man-Machine Systems, Vol.MMS-11,NO.1,March, pp.85-91,1970.
- [17] H.E. Torebjork, J.L. Ochoa: “Specific sensations evoked by activity in single indentified sensory

- units in man”, Acta Physiol Scand, 110:pp.445-447,1980.
- [18] 岡岡徹, 間野忠明: “単一神経線維電気刺激による臨床検査 単一神経線維電気刺激”, 臨床脳波, 29-9, pp.574-578, 1987.
- [19] 下条誠, 牧野了太, 小川博教, 鈴木隆文, 並木明夫, 斎藤敬, 國本雅成, 石川正俊, 満渕邦彦: “ロボットハンドからの接触感覚を触覚神経系経由により提示するシステムの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P2-E08, 2002.
- [20] 前野隆司, 小林一三, 山崎信寿: “バイオダイナミックス 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, 63, 607, pp.881-888, 1997.
- [21] 奈良高明, 前田太郎, 安藤繁, 館すすむ: “皮膚・機械受容器の動特性解析に基づく触覚提示原理に関する考察”, 日本 VR 学会第 5 回大会論文集, pp.299-302, 2000.
- [22] M. SHIMOJO, M. SHINOHARA, Y. FUKUI: “Human Shape Recognition Performance for 3D Tactile Display”, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Part A, 29, 6, pp.637-644, 1999.
- [23] 木下源一郎: “ロボット作業における検出情報の種類とその特徴”, 計測と制御, Vol.26, No.2, pp.99-102, 1987.
- [24] 緒方浩二郎, 柏木邦夫, 小野浩三: “力覚センサ”, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.9, pp.759-765, 1991.
- [25] 下条誠, 石川正俊: 高密度フレキシブル圧力分布イメージャ, 日本機械学会誌論文集 (C 編), Vol.57, No.537, pp.1568-1574, 1991.
- [26] 関喜一, 下条誠, 佐藤滋, 高橋昭彦: “高柔軟性をもつ把持圧力分布センサの開発”, 計測自動制御学会, Vol.31, No.9, pp.1528-1530, 1995.
- [27] M. Shimojo, A. Namiki, M. Ishikawa, R. Makino and K. Mabuchi: A tactile sensor sheet using pressure conductive rubber with electrical-wires stitched method, IEEE Trans. Sensors, vol.5, no.4, pp.589-596, 2004.
- [28] Tekscan, Inc: <http://www.tekscan.com/>
- [29] 石川正俊 下条誠: “感圧導電性ゴムを用いた 2 次元分布荷重の中心位置の測定方法”, 計測自動制御学会論文集, Vol.18, No.7, pp.730-735, 1982.
- [30] 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”, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.7, PP.959-965, 1993.
- [31] 井野秀一, 伊福部達ほか: “ヒト手指の柔軟性と感覚特性を考慮した触覚センサの試作”, 第 14 回日本ロボット学会学術講演会, PP.1077-1078, 1996.
- [32] 尾俣定夫: “硬さ測定用触覚センサ”, 超音波 TECHNO, Vol.9, No.3, pp.6-9, 1997.
- [33] Jae S. Son, Eduardo A. Monteverde, and Robert D. How: “A tactile sensor for localizing transient events in manipulation”, Proc.Int. Conf. Robotics and Automation, pp.471-476, 1994.
- [34] Robert D. How: “A force-refecting teleoperated hand system for the study of tactile sensing in precision manipulation”, Proc.Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1321-1326, 1992.
- [35] Paolo Dario, Giorgio Buttazzo: “A force-refecting teleoperated hand system for the study of tactile sensing in precision manipulation”, Robotics Research Vol.6, No.3, pp.25-48, 1987.
- [36] 李徳信, 信太克規: “容量一誘導型単一構造接触センサによる材質識別”, 計測自動制御学会, Vol.31, No.9, 1252-1257, 1995.
- [37] 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スーツの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.16, No.1, PP.80-86, 1998.
- [38] 前川仁, 小森谷清, 谷江和雄, 金子真ほか: “光導波型指先触覚センサに関する研究”, 第 10 回日本ロボット学会学術講演会, PP.651-652, 1992.

- [39] Fearing, R.S., Hollerbach, J.M.: “ Basic Solid Mechanics for Tactile Sensing ”, Int.J. Robotics Research, Vol.4, No.3, pp.40-54, 1985.
- [40] M. Shimojo: “ Mechanical Filtering Effect of Elastic Cover for Tactile Sensor ”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 13,1, pp.128-132, 1997.
- [41] Cameron, A., Daniel, R., Duaant-Whyte, H.: “ Touch and Motion ”, IEEE Proc. Robotics and Automation, pp.1062-1067, 1988.
- [42] Canepa, G., Morabito, M., Rossi, D., Caiti, A., Parisini, T.: “ Shape from touch by a neuralnet ”, IEEE Proc. Robotics and Automation, pp.1062-1067, 1988.
- [43] Shinoda, H. et al.: “ A Tactile Sensor using Three-Dimensional Structure ”, IEEE Proc. Robotics and Automation, Vol.1, pp.435-441, 1993.
- [44] H. Shinoda, K. Matsumoto and S. Ando: “ Acoustic Resonant Tensor Cell for Tactile Sensing ”, Proc. 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3087-3092, 1997.
- [45] 石川正俊: “ アクティブセンシングとロボットハンド ”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No.7, PP.959-965, 1993.
- [46] 菅野覚, 加藤一郎, 藤本浩志: “ 乳癌自動診断ロボットの開発 ”, 第9回日本ロボット学会学術講演会, PP.887890, 1996.
- [47] Kaneko, M.: “ Active Antenna ”, IEEE Proc. Robotics and Automation, Vol. 3, pp.2665-2671, 1994.
- [48] 下条誠, 石川正俊: “ 空間フィルタ形触覚センサを用いた能動センシング ”, 電子情報通信学会論文誌 C-II, Vol.J74-C, No.5, pp.309-316 (1991).