Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

バイオメカニズム学会誌, Vol. 17, No. 3 (1993)

解　説

# 人　工　触　覚

下　条　　誠*

## 1．はじめに

人工触覚とは如何なるものであろうか．人工視覚，人工聴覚については，本特集でも述べられているように，人間の感覚を代行するための様々な方式の研究開発が行われている．これらの研究からすると人工感覚とは，人間の感覚代行を行うためのセンサ技術と人間への情報伝達技術であるらしい．しかしながら，これまで筆者は主にロボット用等の触覚センサを研究してきたことにあるのかも知れないが，人工触覚では人間の触感覚を代行する義手用の触覚センサ以外では，その研究開発例が非常に少ないように思える．幅広く考えれば，車椅子に座っていて皮膚感覚が無いために生じる，じょく瘡を予防する圧力センサも欠損した皮膚感覚の代行の意味からは人工触覚と考えられるのかも知れない．このような観点から本解説では，人工触覚として触感覚代行装置を幅広く考え，従来からある触覚センサの研究の中から，人間の皮膚感覚を工学的に作る試みに利用できそうな研究開発例を基に解説したいと思う．また，情報伝達方式についても若干の解説をしたい．

## 2．人工触覚への課題

人工触覚とは，まずは人間の皮膚感覚を工学的に作ることになるのだろう．しかしながら，「人間の皮膚感覚はすばらしい．これまで開発されていかなる触覚センサもかなわない」とHollerbachが述べているように[1]，その実現は遠いゴールとしてあるのが現状であろう．この人間の皮膚感覚をセンサとしての検出機能と形状特性に分けて考えてみる．

検出機能として皮膚の感覚受容器の機能をみると，感覚は主に4つの種類に分類される．すなわち，触圧覚，温覚，冷覚，痛覚である．接触感，くすぐたい感じ，湿った感じなどはこれら4つの変形か複合したものだと言われている．例えば，湿った感じは冷覚と圧覚が合成されたものとされている[2]．

また，検出器の形状としてみると皮膚は，薄く，柔軟で，広い面積をカバーし，かつ高密度に感覚器が配置されている．人間の皮膚の薄さ，柔軟性等は言うまでもないであろう．検出器の密度としては，空間分解能が高い指先で1㎜$^2$当たり50個の感覚受容器があり，感覚受容器からの信号を大脳皮質の感覚野まで伝達する神経線維は，1㎜$^2$当たり1本と言われている[3]．これが，指先の空間分解能は1～2㎜程度である原因であろうか．この触覚に関する感覚受容器の数は，身体全体で触圧覚（マイスナー小体，パチニ小体）が$10^7$個，痛覚（自由終末端）が$2\times10^6$個，温点が$3\times10^4$個，冷点が$2.5\times10^5$個あるとされている[4]．また，中枢への神経伝達線維本数は$10^6$本で受容器と信号線との比，いわば情報伝達圧縮比は10となっている．通信容量としてみると，触覚は$10^6$ (bit/s)と言われている．ちなみに視覚は$10^7$ (bit/s)，聴覚は$10^5$ (bit/s)，嗅覚は$10^3$ (bit/s)，味覚は$10^3$ (bit/s)である[4]．

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，皮膚という柔軟な薄いシート状の形状に高密度で配置されている構造となっている．検出器の機能に関してこれを工学的に作ることはさして問題はないであろう．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，また温度に対しても体温を境として，高い温度に反応するも

平成5年5月30日受付
＊生命工学工業技術研究所
〒305　茨城県つくば市東1－1
キーワード：触覚（tactile），触覚センサ（tactile sensor），複合覚（complex sense），皮膚感覚（tactile sensation），触覚情報伝達（tactile display）



NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)



の，低い温度のものと役割が分かれている．しかし，これをセンサとして実現する場合は，荷重と温度検出素子を組み合わせれば可能と思われる．また，いくつかその様な試みも行われている．しかしながら，センサを次に示すような条件で実現させるのは現代の技術では非常に難しい．

(1) センサは，人間の皮膚のように薄く，柔らかく，広い面積が覆える．
(2) センサは，各種の検出器が高密度に配置されている．
(3) センサは，衝撃などの物理的外力，油汚れなどの化学的汚染に対して耐久性がある．

人工触覚を開発する上での重要なことは，このような薄型・柔軟性と言った形状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構造・材料の問題と，多数の検出器からの多量のデータを如何に処理するかという情報処理の問題にあるのではないだろうか．

このような触覚を工学的に作ろうとする試みは，主にロボット用の触覚センサとしてこれまで多くの研究開発が行われてきた．表1には，人間の皮膚のような柔軟性，薄型化，分布型・大面積化が可能かどうかと言う視点から，これまでに提案されている検出方式ごとの比較を行ったものである．これを見てみると柔軟性・薄型化・大面積化の3条件を満足するものとしては，感圧導電性ゴム，感圧塗料，圧電性高分子のような高分子材料が浮かび上がってくる．しかし，これら高分子材料にも，精度，履歴特性などの点に関して弱点があり，満足のいく材料はないのが現状であろう．また，半導体シリコンセンサを分散配置させる方法もあるが，柔軟性，耐環境性，配線処理，組立などの問題があり，将来的にはわからないが，現状では実用的ではないと思われる．

## 3．触覚センサの現状

触覚センサに関しては，これまでに主にロボット用のセンサとして研究開発が行われてきた．以下では，これまでに研究開発が行われた触覚センサの中から，前節で述べた人間の皮膚

表1　触覚センサの検出方式

| 検出方式 | 感圧材料 | 精度 | 柔軟 | 薄型 | 分布型 | 大面積 | 備　　考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 各種ｽｲｯﾁ | ｽｲｯﾁ | × | × | × | △ | △ | on-off特性，高い信頼性 |
| | 触子+ｺｲﾙ | ○ | × | × | △ | △ | |
| 抵抗変化型 | 感圧導電性ｺﾞﾑ | × | ○ | ○ | ○ | ○ | 耐衝撃性、加工性良<br>履歴現象に難 |
| | 半導体ｼﾘｺﾝ | ○ | × | ○ | ○ | × | 耐環境性に難 |
| | 感圧塗料 | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | 耐久性?、ｺﾈｸﾀ? |
| 容量変化型 | 弾性体+電極 | ○ | × | △ | ○ | ○ | 小型化に難<br>ｼｰﾙﾄﾞが必要 |
| 電荷変換型 | 圧電性高分子 | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | 静荷重検出に難<br>検出回路に難、温度補償 |
| 光変換型 | 光導波弾性体 | △ | × | × | ○ | △ | 電気ﾉｲｽﾞ強い<br>空間分解能に難 |
| | 光ﾌｧｲﾊﾞｰ+光散乱 | △ | △ | ○ | ○ | △ | |
| 磁気変換型 | 磁気ｺﾞﾑ+磁気抵抗 | △ | △ | ○ | ○ | ○ | 多方向力検知可能<br>実績？ |



NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)



感覚のような薄型・柔軟性・高密度および複合覚を目指した触覚センサの現状について述べる.

3.1 曲面への装着が可能な触覚センサ

これまでに触覚センサとしては, 様々なものが研究開発されてきた. それぞれ高分解能, 高精度型など各種の特徴があるが, 指型などの曲面への装着を考慮したもの, もしくは柔軟性, 薄型等の条件を満足するようなセンサは数少ない.

Begejは, 図1に示すように長さ21㎜で直径約15㎜の指型に256点の計測点を配置したセンサを報告している[5]. 光導波型の弾性体で指型を覆い, 加圧力による光導波弾性体からの光散乱を指型内部256点に配置した光ケーブルで検出するものである. 計測点は, 指先13×13㎜の範囲に169本, あと残りは指側面に配置している. 感圧範囲は0～0.4N／エレメント, 周波数応答範囲は0～200Hzとしている. Jenstormらは, 図2に示すように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を報告している[6]. センサは, 光ファイバーを縦横2層に重ね, ワイヤー層ではさんだ構造のセンサである. ワイヤー層は, センサに圧力が加わった時に光ファイバー層のファイバーに波状に曲げを加えるためのものである. 光ファイバーで

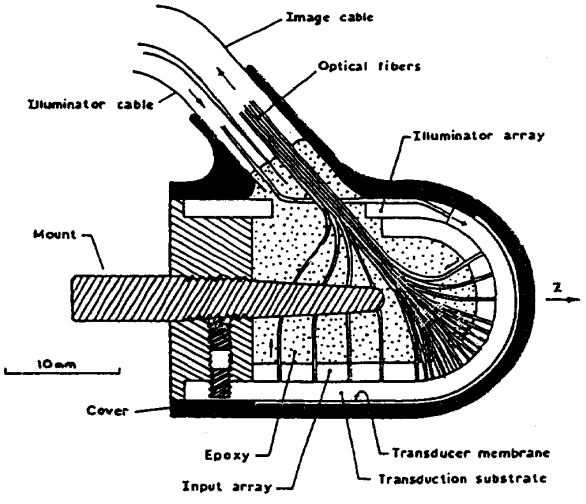



図1 光導波弾性体と光ファイバーを用いた触覚センサ[5]

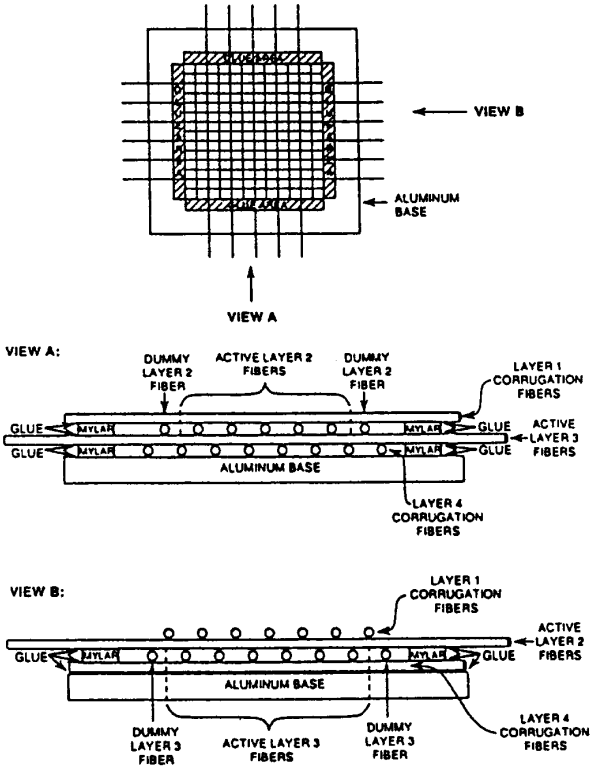



図2 光ファイバーを縦横2層組合せた触覚センサ

布を織り, 触覚センサとして利用することも考えられる. 基礎実験用として, 5×6の光ファイバーを組み合わせた実験を行っている. 計測範囲は, 5g～400g／エレメント, 力の分解能は0.2g, 周波数応答範囲は250Hzとしている. その欠点として, 面方向荷重位置計測の再現性が良くないとしている. さらにこの方式では, 面圧力が加わった状態での計測では, 面の端面情報から面情報を逆算するCTの手法が必要となり計算コストの点で実用上問題があると思われる. 図3には, 小林らによって小型の半導体型センサをロボットの指先に取り付けた写真を示す[7]. 検出素子の大きさは2㎜角で, 検出面に垂直な1軸方向の力を検出する. 図4には, 下条らによって報告された高密度フレキシブル型圧力分布イメージャのシステム構成図を示す[8]. センサは, 高密度な感圧部を持ち, 薄いシート状で柔軟性があり, しかもセンサ出力をビデオ信号としたことで圧力分布状態をリアルタイムでモニターできる特徴がある. センサの特徴は, ①感圧部が0.7㎜の薄いシート状で柔軟性があり, ②圧力



NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)



とを示している.

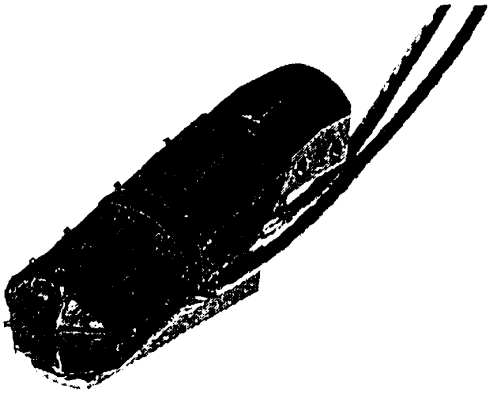


図3　小型半導体圧力センサを取りつけた指[7)]

検出素子が4,096個，1㎜ピッチでマトリクス状に高密度で配置してあり，③現在普及している画像情報処理用のハード及びソフトが利用でき画像センサと圧力分布センサが信号レベルで統一的に処理可能となり，④圧力分布状態が実時間でテレビモニターで観測できる，などの特徴がある．測定例として，図5に洋服のポケット（50㎜×45㎜）の圧力分布測定画像を示す．生地が同系統の色・柄であるため，ポケットの部分が視覚ではほとんど区別がつかないが，接触による圧力分布パターンとして，生地の重なり部分の位置形状，およびポケットの中に入っている紙クリップのような内部構造まで検知できるこ

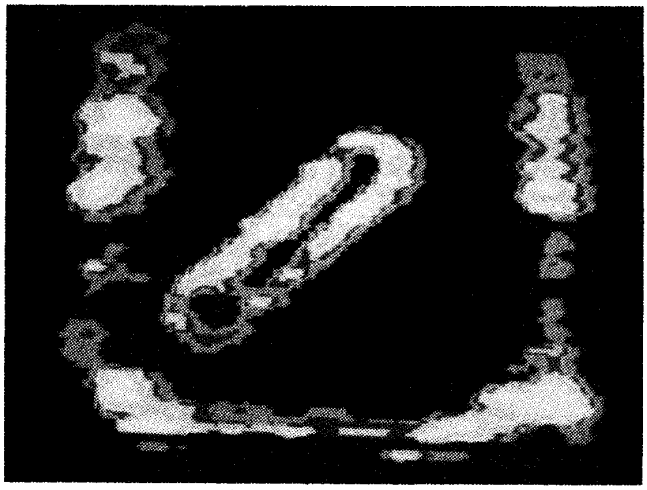


図5 圧力分布画像測定例.
（洋服のポケットの中の紙クリップ像）

3.2 複合覚を備えた触覚センサ

Darioらは，シート状に加工した高分子材料であるポリフッ化ビニリデン（PVDF）を用いて，図6に示すような直径28㎜で長さが40㎜の寸法に形成した触覚センサを報告している[9)]．このセンサは，深部感圧エレメントと表層感圧エレメントの2層構造から成るセンサである．深部感圧エレメントは7×5のマトリクス状にエレメントが配置され感圧感度は高いとしている．表層エレ

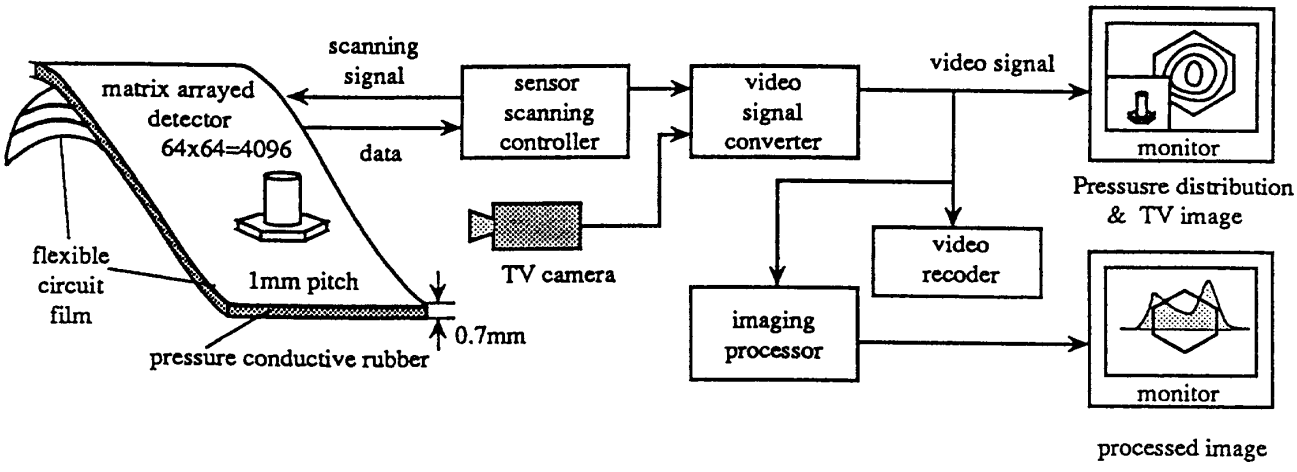



図4　高密度フレキシブル型圧力分布イメージャシステム図[8)]



NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)



メントは5個の感圧部があり，その表面は表層エレメントの裏に配置された面状発熱体により常に加熱されている．そのため対象物にふれるとPVDFの持つピロ効果のため熱移動の検出が可能で温覚センサとしても利用可能としている．また，伊福部もポリフッ化ビニリデンを用いて圧力と温度を検出可能な触覚センサを開発している[10]．

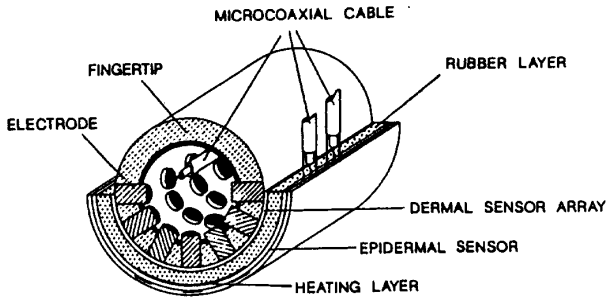



図6 圧覚，温冷覚を備えた複合型触覚センサ[9]

### 3.3 皮膚の構造を利用した触覚センサ

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た．Fearingらは，連続弾性体の中の歪センサからなる触覚センサの応答に関する理論的解析を行っている[11]．彼らによれば，柔らかいセンサは，センサを動かさないでもエッジ等曲面の検出も可能であるとしている．また，格子状の圧力分布が加わった時の弾性体カバーの下に配置された1次元アレイセンサの出力を計算すると，センサの深さに対応する特定の空間周波数の格子状圧力入力に対して，検出される応力が2～3倍に増幅されるとことから指紋が応力増幅器の役割をはたしているとの仮説を提案している．

篠田らは，深さ方向に検出器を配置した時の構造特性による触覚情報処理方式について面白い報告を行っている[12]．即ち，圧力分布の空間周波数が構造体内部に伝搬して行くにつれゲインが低下し，その減衰の程度が空間周波数によって異なることから，構造体の適当な深さ2点の周波数パワー比から，表面の空間周波数を計測している．図7にはセンサの構造を示す．周波数パワーは構造体に穴をあけ，音波として計測している．

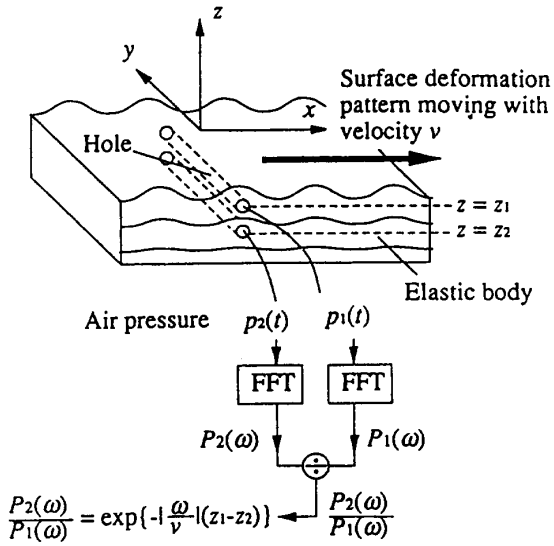



図7 深さ方向の構造特性による情報処理を活用した触覚センサ[12]

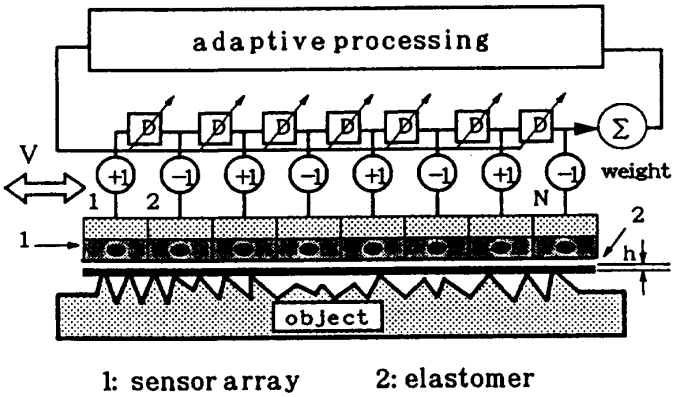



図8 表面方向の検出器配置による情報処理を活用した触覚センサ[13]

下条らは，表面方向に検出器を配置した時の検出器アレイ構造と素子間の遅延時間による触覚情報処理方式について興味ある報告している[13]．即ち，検出素子アレイで空間フィルタが構成されるとし，素子間の情報の伝達遅延時間と触運動による空間フィルタ特性の変化に着目し，触運動を用いて積極的にフィルタ特性を計測対象に合うように変化させ，表面アラサを検



NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)



出する方式を開発している．図8にはセンサ構造を示す．

## 4．触覚伝達機構

人工触覚は，ロボットへの応用よりも上肢切断者のための義手の触覚機能の代行を行うこととすれば，如何に触覚センサで検出した触覚情報を人間にフィードバックするかは重要な問題である．この時，指先などの触感覚を，数点の接触感覚として人間の肩などの部位に機械的圧力，振動で情報を伝達することはそれほど難しくはないと思われる．図9にはMannらが，上腕のソケットに取り付けた振動子を示す[14]．これはEMGによる制御を行うことを目的として開発されたBoston Armの曲げ角度のフィードバック用に開発されたものである．しかし，接触のパターンなど2次元的情報を人間に情報伝達する場合，どのようにして人間に情報伝達を行うかは，難しい問題となる．斎田は，ソレノイド型振動刺激素子を用いて，少ない刺激素子数で接触位置の動きを人間に提示可能な方式の基礎実験結果を試みている[15]．これは，仮現運動と言う人間の錯覚特性を用いる方法で，2点刺激の時間間隔をずらすことであたかも2点間を刺激が移動しているような感覚を提示する方法である．また，電気刺激を用いた提示方法が機構的制御的に扱い易いことから，電気パルス刺激を用いる試みがなされている．谷江らは，人間の錯覚であるファントムセンセーションを利用し，刺激の強度差による刺激像の定位位置を制御する基礎実験を試みている[15]．最近では，泉らが3点の電極を肩に取り付け，ファントムセンセーションを利用して，肩の広い範囲に移動する刺激像を提示する方式を開発している[17]．

また，指先に触感覚を提示する研究は，視覚代行装置として文字情報を圧電型振動素子マトリクス状に配置して振動感覚として提示する研究は，視覚聴覚情報の伝達手段としてが行われている．この他，触感覚を提示する方法には様々な方法が考えらえており，図10に示す方式について大道らによって検討されている[18]．例えば，電気方式は小型・高密度に優れ，機械方式は伝達の精度・確度に優れるとされている．

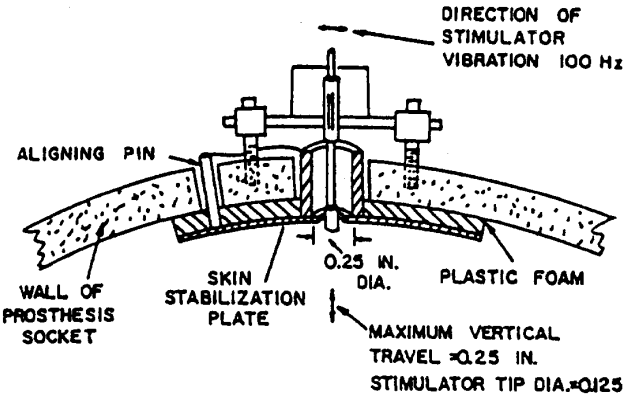



図9 人間への情報伝達のため，上腕のソケット部に取り付けた振動子の構造．[14]

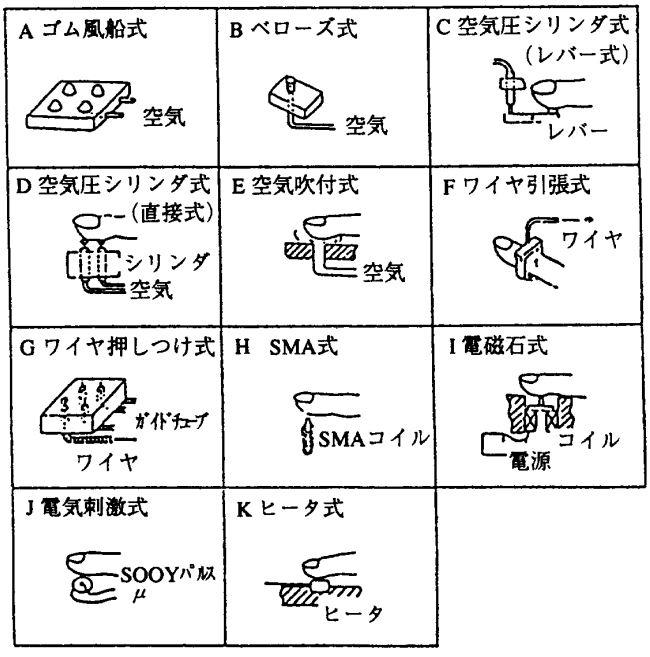



図10 触感覚の呈示方式の種類[18]

## 5．おわりに

人工触覚について主に現在の触覚センサの研究を中心に述べた．人工触覚に関しては，人間の感覚代行以外にも，人間が遠隔作業を行う場合の触覚フィードバック用の触感覚センサとして，水中での作業，宇宙空間での作業，外科手



NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)



術など様々な応用分野があり，現在も引き続き研究が行われている分野である．よってセンサ部分に関しては近い将来良いものが出来るのかも知れない．しかし，一番の問題点は如何にして触覚情報を伝達するかであろう．処理された触覚情報のエッセンスだけを人工神経を通して神経系の伝達すること，もしくは磁気刺激法を用いて直接大脳皮質の感覚野に情報伝達する手法が将来可能となるのかも知れない．

## 参考文献


1) Hollerbach, J. M.: ロボットハンドと触覚センサ，MITの人工知能，パーソナルメディア社，301-328 (1987).
2) Geldard, F：皮膚感覚，世界科学大事典，講談社，Vol. 15, 138 (1977).
3) Harmon L. D. : Tactile sensing for robot, Recent Advances in Robotics, John Wiley & Sons, 389-424 (1985).
4) 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, 18-25 (1986).
5) Begej, S. : Fingertip-shaped optical tactile sensor for robotics applications, Proc. Int. Conf. Robotics and Automation, 1752-1757 (1988).
6) Jenstorm, D. T. and Chen C. L. : A fiber optics microbend tactile sensor array, Sensors and Actuators, Vol. 20, 239-248 (1989).
7) 小林光男，鷲沢忍：シリコンを構造材料とする3軸触覚センサ，電子情報通信学会論文誌，C-Ⅱ, Vol. J74-C-Ⅱ, No. 5, 427-433 (1991).
8) 下条，石川，金谷：高密度フレキシブル圧力分布イメージャ，機論(C編)，Vol.57, No.537, 1568-1574 (1991).
9) Dario, P., De Rossi, D., Domenici, C., and Francesconi, R. Ferroelectric polymer tactile sensors with anthropomorphic features. Proc. Int. Conf. Robotics. Washington, D. C., 332-340 (1984).
10) 伊福部達：材質感の認識センサ，センサ技術，Vol. 14, No. 1, 31-33 (1984).
11) Fearing, R. S., and Hollerbach, J. M. : Basic solid mechanics for tactile sensing. Int. J. Robotics Res. Vol. 4, No. 3, 40-54 (1985).
12) Shinoda, H. et al. : A Tactile Sensor Using Three-Dimensional Structure, 1993 IEEE Proc. Robotics and Automation, Vol. 1, 435-441 (1993).
13) 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, 309-316 (1991).
14) Mann, R. W. and Reimers, S. D. : Kinesthetic sensing for EMG controlled 'Boston Arm', IEEE Trans., Man-Machine System, MMS-11-1, 110-115 (1970).
15) 斎田真也：触刺激における仮現運動，製品科学研究所報告，No. 95, 65-70 (1982).
16) 谷江和雄ほか：電気パルス刺激による強度差ファントムセンセーション像の位置弁別特性，SICE論文集，Vol.15, No.4, 505-512 (1979).
17) 泉隆ほか：麻痺上肢補助における感覚フィードバックのための移動感覚の呈示方式，電子情報通信学会論文誌D, Vol.J70-D, No.8, 1625-1632 (1987).
18) 伊福部編：医療福祉機器の高度化技術に関する調査研究報告，日本機械工業連合会・医療福祉機器研究所，126 (1992).




**下条誠**（しもじょう まこと）
昭和48年電通大・機械卒．昭和51年東工大・大学院精密機械システム専攻了．同年通産省工業技術院製品科学研究所に入所，現在に至る．主任研究官．その間，60年9月から1年間スタンフォード大学客員研究員を勤める．福祉機器開発の研究，触覚センサシステムの研究開発に従事．59年度計測自動制御学会論文賞受賞．日本機械学会，計測自動制御学会，日本ロボット学会，日本人間工学会各会員．



NII-Electronic Library Service