

第7節 五感センサ

1. センサとは

ヒトの感覚は俗に、視覚、聴覚、触覚、嗅覚、味覚の五感といわれているが、さらには、平衡感覚や、筋紡錘のような筋肉内の感覚器も存在する。ヒトを含めた動物は、このような感覚器によって得た情報を脳・神経系に伝え、情報処理し、処理結果に応じた行動を選択することにより、多様で複雑な環境中で生存していくことができる。感覚器の受容細胞は閾値や順応などの性質をもち、また、受容細胞が受け取る刺激はアナログ量であるが、神経系を伝わるのはパルスであるので、ここで一種の変換を行っている。さらに、多くの感覚で、感覚器は単に検出した情報を脳に伝えるだけでなく、平滑化や感度調節などの情報処理を脳に達する以前の局所的な神経系で行っていると考えられている。例えば、視覚の受容器である網膜では、一種の平滑化や空間微分・時間微分が行われている¹⁾ことが知られている。状況を判断し自動で動く機械をつくる場合には、動物の感覚器の動きを工学的に模したセンサを用いることになる。

センサは、温度や力などの物理量や、物質の種類や濃度などの化学的な量を取り扱いやすい形に変換する装置である。多くの場合、出力としては処理方法が確立されている電気信号が選ばれる。センサがトランスデューサとも呼ばれ、主に計測器に使われていた時代には、センサ出力はアナログ量であり、それを用いてメーターなどを駆動して、人間が出力を読んでいた。しかし、コンピュータの進歩と時代の変化による自動化の要請の高まりにより、センサ出力はデジタル化されマイクロプロセッサにより処理されるようになった。さらに、ロボットへの応用に代表されるような小型化、低消費電力化の要求により、センサと処理部が一体化したスマートセンサが注目されるようになった。このように、センサは局所的な変換・情報処理能力も取り込み、ますます動物の感覚器に近づいている。

2. 現代のセンサに求められる特性

小型、低消費電力なセンサの必要性が増している理

由についてももう少し考えてみる。理由の一つとして、人間社会へのロボット技術応用が実用化段階²⁾に入り始めたことが挙げられる。従来の産業用ロボットは、工場などのロボットが働くために完全に整備され、規格化された環境で動いていた。このため、ロボットではあらかじめ決められた動きを正確に再現することが重視され、センサの重要性は比較的低かった。しかし、これからのロボットが活躍することが期待されている家庭や道路、病院などに代表される人間社会は、「乱雑」である。例えば、家庭では、テーブルや椅子の位置は頻繁に変わるし、床の上に物が散らばっているかもしれない。また、人間が自由に歩き回ったりする。このような「乱雑」な環境でロボットが働くためには、多種多様なセンサを用いて、環境の情報を取得することが必要となる。人間社会で働くロボットは、人間と同程度のサイズをもち、ケーブルで繋がれていない自立型が望ましいため、エネルギー源としてはバッテリーを用いることになる。そのため、センサにも小型、低消費電力といった特性が必要となる。別の理由として、センサネットワーク³⁾が注目を集めていることも挙げられる。これは、環境中に多数のセンサをばら撒いてネットワーク化することにより、空間的な情報を得たり、環境自体を知能化したりしようという考え方である。ここでも、センサは目立たないように小型化が必要であり、また、バッテリーが主なエネルギー源となるため、低消費電力化も重要な課題となる。

3. MEMS センサ

このように、現代では小型、低消費電力なセンサの必要性が増している。また、これはセンサ全般にいえることであるが、高精度、高信頼性、低コストであることも大事である。MEMS/NEMSを含むシリコン加工技術は検出部(センサ素子)とその処理回路を同一チップ上に作成可能であり、上記の要請を満たすセンサを作成するための有力な手法である。生物がタンパク質などの生体材料を用いてつくっている感覚器と類似の機能を工学的にはシリコンを材料とする加工技術を用いることで作成可能となる。特に、MEMS技術を用いてシリコンに「構造」をもたせたセンサはMEMSセン

サと呼ばれている。

センサには、検出したい量に応じて材料自体が反応する性質を利用したものと、「構造」を作成し、「構造」の変化を利用するものがある。シリコンは、常温では理想的な弾性体とみなすことができるので、MEMS 技術を用いてシリコンを加工することにより、「構造」を利用した検出部をもつ優れたセンサが作成可能となる。そのため、MEMS センサは、圧力や加速度など、力学的な量の検出が一番得意である。しかし、共振構造を作成し、物質の吸着による共振周波数変化をみることにより、嗅覚・味覚に相当する化学的な量の検出も可能となる。また、シリコン材料の熱特性に注目した、材料自体の性質を利用した MEMS センサも存在する。シリコンの電気伝導度の温度依存性を利用することにより、温度検出、さらには赤外線検出なども可能となる。この場合には、熱絶縁に優れた構造をつくるために MEMS 技術が使われており、このようなセンサも一般的には MEMS センサと呼ばれている。

MEMS センサに使われる代表的な検出原理を文献 4) に倣って、以下のように分類する。

(1) ピエゾ抵抗効果(応力検出)

加わった応力によって、金属や半導体の電気伝導度が増加する現象である。半導体では特に大きな感度があり、ダイアフラム上に配線を行うことによって圧力センサを作成できる。また、重りを配置した梁上に配線を行うことにより加速度センサが作成できる。さらに、能動的にセンサの一部を振動させ、それに働くコリオリ力を検出することにより、角速度センサを作成するといったことも可能である。

(2) 容量変化(変位検出)

MEMS 技術により作成した可動構造に電極を取り付けることにより、微小なコンデンサを作成し、その容量変化を計測することによって可動電極の変位を検出する方法である。圧力センサや触覚センサとして利用可能である。

(3) 共振周波数変化(変位検出、質量検出)

両端固定梁や片持ち梁をアクチュエータにより振動させ、その共振周波数を測ることにより、(両端固定梁の場合)両端の変位、梁に物質が吸着することによる質量変化などを検出する。

(4) 温度による電気伝導度変化(温度検出)

半導体の電気伝導度は温度に大きく依存する。通常

は高温になるほど増加するが、逆の性質をもつものも存在する。この性質を利用すれば温度センサになる。また、赤外線吸収による温度変化を検出することにより、赤外線センサとしても利用可能である。

以上は検出原理であるが、センサに能動的に変化を与え、その反応によりセンシング能力を向上させるアクティブセンシングの考え方をを用いると、以下の能動的原理もセンサの原理の一部となる。

(1) アクチュエータ

アクチュエータをセンサと組み合わせて利用することにより、共振周波数変化やコリオリ力検出のための振動を起こさせることができる。将来はさらに、構造を積極的に変化させることによるセンサの感度やレンジなどの調節に使えるかもしれない。駆動原理としては、静電力、電磁力、圧電効果、熱などが挙げられる。

(2) ヒータ

MEMS 技術により、基部と独立したヒータが容易に作成できる。これは熱容量が微小なため、短時間で大きく温度を変化させることができる。この温度変化を積極的に利用することにより、温度に依存する量のアクティブセンシングが可能となる。

MEMS センサは、初期のものは単に検出部がシリコン上につくられたただだったが、しだいに増幅器や AD コンバータが同一チップ上に組み込まれるようになった。近年では、温度補償を行うための論理回路や、キャリブレーションのためのメモリまで組み込んだセンサが研究され商品化もされている。特に、CMOS 回路技術とセンサを組み合わせ、1 チップ上に集積化を行う研究が多数発表されている。

4. MEMS センサの例

MEMS センサとして圧力センサ、加速度センサ、ジャイロセンサ、温度センサ、赤外線センサなどが既に商品化されている。これらの解説は本書の他の部分に譲り、ここでは研究段階の MEMS センサや、MEMS センサへの応用が期待される技術の中で特徴的なものを取りあげる。

(1) Fishbone 音響センサ⁵⁾

人間の聴覚系の蝸牛基底膜の構造に着目し、原理的に同じ構造をシリコンで実現したセンサである。蝸牛はカタツムリの殻のような構造をしており、聴覚器に入った音が、最終的にこの蝸牛に伝えられる。蝸牛内

の基底膜では、高音に対してはカタツムリの殻の入り口側に相当する部分が、低音に対しては奥が振動するというように、周波数に応じて異なった場所で振動が生じ、この振動を有毛細胞が神経パルスに変換している。図1に示す Fishbone 音響センサはこの原理をシリコンの機械的構造で実現しており、振動はピエゾ抵抗変化により検出する。原理上、完全な音響エネルギー変換効率や広周波数帯域をフラットにカバーする性質を有する。

(2) 触覚センサ

基本的には、圧力センサと同じ構造のダイヤフラムを多数、二次元的に並べれば触覚センサとなる。これは、多数の研究発表がされている。原理としては、ダイヤフラムが変形した際のピエゾ抵抗変化を用いるも

の(図2)⁶⁾と、微小コンデンサの容量変化を用いるもの(図3)⁷⁾が主流である。MEMS技術を使うことにより高密度な触覚センサが作成可能であるが、逆に大面積センサの作成は難しい。

(3) 振動型ガスセンサ

MEMS技術により機械的な振動子をつくり、振動子の上にガスを吸着する物質を乗せ、ガス吸着による共振周波数の変化を調べることによりガスの存在を検出するセンサである。例えば、図4に示すセンサ⁸⁾では、静電力により振動子を駆動し、検出電極の電気容量変化により動きを検出している。

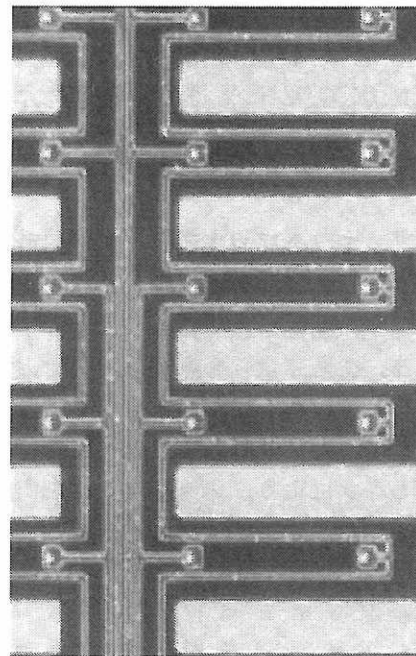
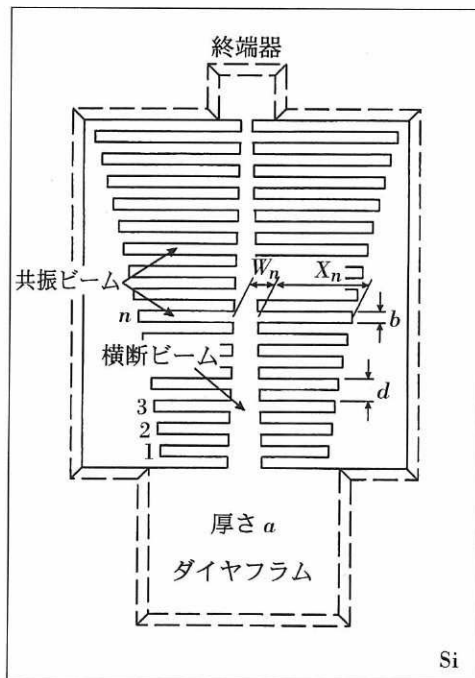


図1 Fishbone 音響センサの構造と写真⁵⁾

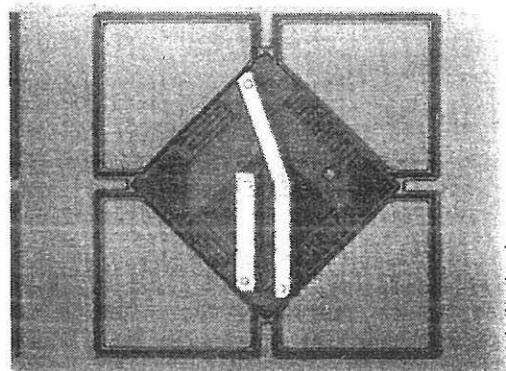
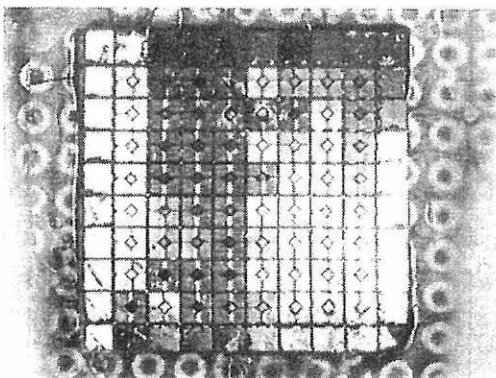


図2 ピエゾ抵抗型触覚センサと1センサ素子の拡大写真⁶⁾

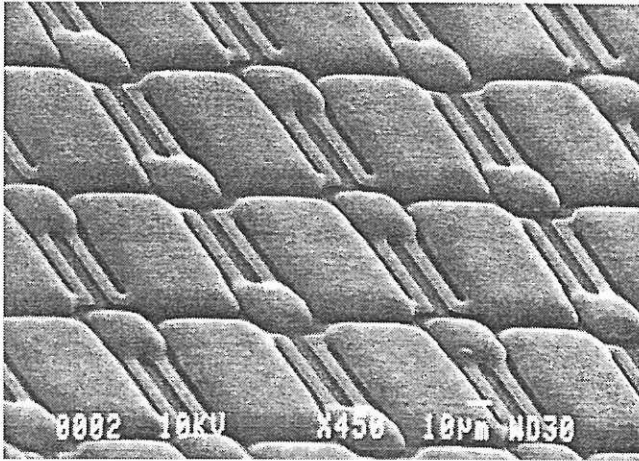


図3 容量型触覚センサ⁷⁾

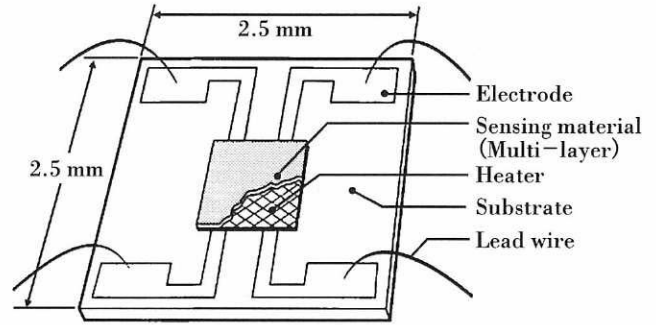


図5 半導体ガスセンサの構造
(フィガロ技研カタログより)

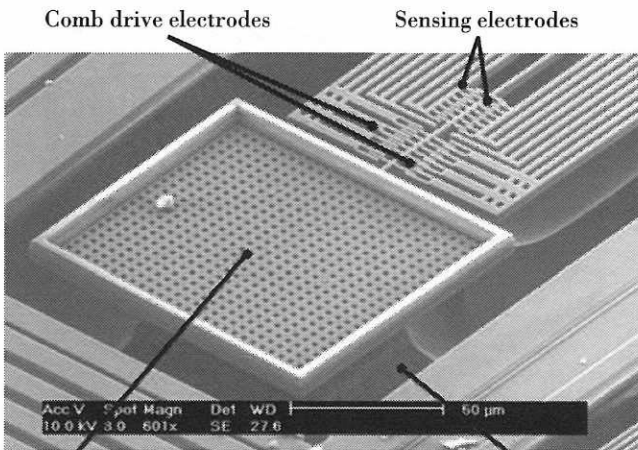


図4 振動型ガスセンサ⁸⁾

(4) 温度変化による動的非線形応答を利用したガスセンサ

半導体ガスセンサでは、ガスが半導体に吸着することにより電気抵抗値が変化することを利用して検出を行う。しかし、多種類のガスに反応し、また、濃度によっても抵抗値が変わるため、一般的な半導体ガスセンサではガスの種類が判明していないと濃度を検出できない。この問題を解決するため、アクティブセンシングの原理を用いてヒータによる温度変化を利用することにより、一つのデバイスのみで多種類のガスを検出する研究が行われている⁹⁾。MEMS技術により作成されセンサに組み込まれたヒータ(図5)により温度を能動的に変化させ、そのときの半導体抵抗値の応答のプロファイルを見ることにより、ガスの種類と濃度を単一デバイスで同時に識別できる。

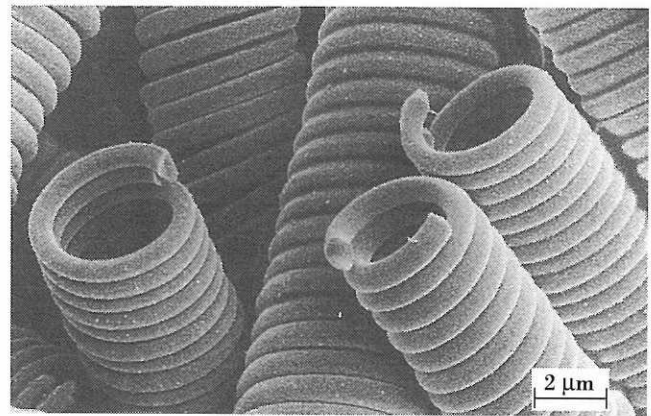


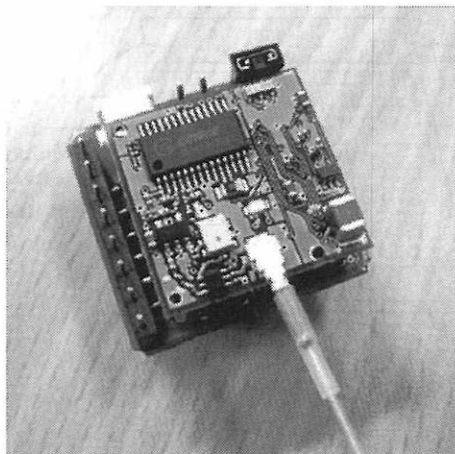
図6 カーボンマイクロコイル(CMC)¹⁰⁾

(5) カーボンマイクロコイル(CMC)を用いたセンサ

カーボンマイクロコイル(以下 CMC)(図6)は岐阜大学工学部元島栖二教授らにより開発された、コイル直径1~10 μm程度のスケールをもつ非晶質コイル状炭素繊維であり、一般的なMEMSとは異なり不純物活性CVD法(Chemical Vapor Deposition; 化学気相蒸着)により生成される。CMCを弾性体中に分散させることにより触覚センサが作成できる¹⁰⁾。弾性体の変形により、弾性体中のCMCの間隔やCMC自身が変形し、インピーダンスが変化すると考えられている。

5. MEMS センサの将来

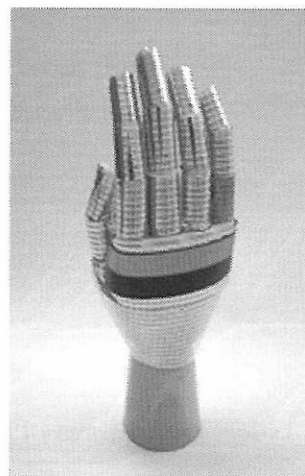
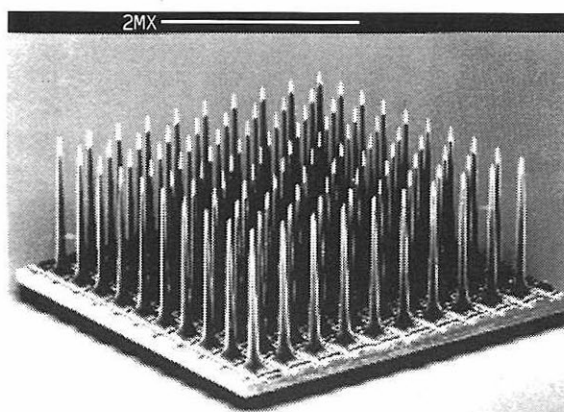
将来は、MEMS技術を用いた各種センサの小型化、高精度化、低消費電力化や、処理回路まで含めた集積化がさらに進むのは間違いない。センサが小型化した場合には、電力供給や信号のための配線も大きな課題となる。無線によるネットワーク化はこれを解決するための有力な手段である。無線でセンサネットワークをつくる例としてはユビキタスセンサネットワークが挙げられ、これを実現するセンサノードはいろいろなものが開発されている。例えば、YRPユビキタスネッ

図7 pT-Engine¹¹⁾

トワーキング研究所が開発した pT-Engine (図7)¹¹⁾ は2 cm角程度の小型装置で、無線でネットワークに接続されており、ボタン電池1個で1~2年程度使用できる。このような装置の将来像としては、センサ、コンピュータ、アクチュエータをMEMS技術により1チップ化して、究極的な小型化と低消費電力化を実現することが考えられる。また、薄いシート中にマイクロウェーブを閉じ込め、その上に置いたセンサに信号伝達と電力供給を行う方法も研究されている¹²⁾。

現在のMEMS材料としてはシリコンが圧倒的に多いが、将来的にはソフトな材料を用いたMEMSも注目される。例えば、東京大学の染谷研究室¹³⁾では有機トランジスタを用いて、大面積回路を作成するというアイデアのもと、電子人工皮膚(図8)やシート型点字ディスプレイなどを製作している。また、中坊らは人工筋肉とも呼ばれる柔軟なIPMC (Ionic Polymer-Metal Composite) アクチュエータにレーザー加工などの方法で多自由度を与え、小型のロボットを作成¹⁴⁾している。IPMCはセンサとしても使えるので、小型加工技術のセンサへの応用が期待される。

さらに、人間の感覚器が機能を欠損した場合の代替として工学センサを使う研究も進められており、聴覚は既に実用化され、現在は、視覚の研究が行われている。このような場合、センサからの信号を人間の神経系にどのように伝えるかが大きな課題となる。例えば、盲人用の代替臓器として人工眼を考えた場合、受光部はシリコンで容易に作成できるが、二次元的な画像を表す大量の情報を人間の神経系にどう伝えるのが問題である。機械と人間の神経系を繋ぐ技術はニューラルインターフェイスと呼ばれ、近年盛んに研究されており、MEMS技術を用いて剣山型電極(図9)¹⁵⁾などがつくられているが、まだ、耐久性などの点

図8 染谷研究室で作成された電子人工皮膚¹³⁾図9 ニューラルインターフェイスのための剣山型電極¹⁵⁾

で問題が多い。生体との親和性を考えると、将来は導電性高分子を用いてMEMS技術で作成した電極¹⁶⁾が有望であると期待されている。

参考・引用文献

- 1) 松本修文, 脳の情報処理(塚原仲晃編), (朝倉書店), pp.36-69 (1984)
- 2) 生駒グループ, 戦略イニシアティブIRT-ITとRTの融合-, 科学技術振興機構研究開発戦略センター (2005)
- 3) カラー, D. E., マルダー, H., 日経サイエンス, 2004年9月号, pp.66-75 (2004)
- 4) 池原毅, MEMSのはなし(前田龍太郎編), (日刊工業新聞社), pp.55-64 (2005)
- 5) 安藤繁, 小野順貴, 超五感センサの開発最前線, (エヌ・ティー・エス), pp.95-113 (2005)
- 6) 江刺正喜, 庄子習一, 山本晃, 中村克俊, 電子情報通信学会論文誌C-II, J73-C-II(1), pp.31-37 (1990), copyright©2005 IEICE, 許諾番号09SA0010

- 7) De Souza, R. J. and Wise, K. D., Proc. Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'97), pp.1473-1476 (1997)
- 8) Bedair, S. S. and Fedder, G. K., Proc. 3rd IEEE Int. Conf. on Sensors (Sensors 2004), pp.955-958 (2004)
- 9) Kato, Y. and Mukai, T., *Sensors and Actuators B*, 120(2), pp.514-520 (2007)
- 10) 元島栖二, 陳秀琴, 超五感センサの開発最前線, (エヌ・ティー・エス), pp.299-309 (2005)
- 11) YRP ユビキタスネットワークワーキング研究所, 記者発表資料「pT-Engine」, http://www.ubin.jp/press/pdf/TEP041203_u05.pdf (2005)
- 12) Shinoda, H., Proc. SICE-ICASE Int. Joint Conf. (2006)
- 13) 東京大学染谷研究室ホームページ, <http://www.ntech.t.u-tokyo.ac.jp/>
- 14) 中坊嘉宏, 小川浩司, 向井利春, 安積欣志, 大西昇, 第22回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2C16 (2004)
- 15) ユタ大学ニューラルインタフェースセンターホームページ, <http://www.bioen.utah.edu/cni/>
- 16) Ito, Y.; Yagi, T.; Ohnishi, Y.; Kiuchi, K. and Uchikawa, Y., *Int. J. Applied Electromagnetics and Mechanics*, 14, pp.347-352 (2002)
(向井 利春)