



将来センサ

清水 嘉重郎*

機械技術研究所 〒305 茨城県新治郡桜村並木 1-2

(1983年6月22日受理)

Future Sensor

Kajuro SHIMIZU*

Mechanical Engineering Laboratory,

1-2, Namiki, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki 305

1. はじめに

将来センサについて筆者の私見を述べてみたい。将来センサというとき、その意味内容には2通りが考えられる。一つは現在技術の延長上に将来を置き、そこで期待されるセンサという意味である。つまり現存のニーズとシーズを組み合わせて将来実現可能となるであろうセンサについてであり、いってみれば延長期待型のセンサである。もう一つはシーズが現存するかどうかの配慮は考えの外にして将来現われてくるであろうニーズを先取りし、こんなセンサがあれば素晴らしいのだがという飛躍的願望型の未来センサである。前者については、センサの各分野についての専門家が、それぞれの立場から書かれた展望を見ていただくこととし¹⁻⁹⁾、ここではおもに後者の飛躍的願望型の未来センサについて述べてみたい。まだ実現していない将来センサについての私見であるから、筆者の独断と偏見の多いものになると思われる。大方のご批判をいただければ幸いである。

さて、18世紀から19世紀にかけて起こった産業革命において中心的役割を果たしたのはエネルギー・動力の革命にあったといってもよい。これによって人間の肉体的労働に代わって機械が随所に登場することになり、さらに人間以上の働きをすることによって人間能力の拡張を果たし、社会・経済に多大の影響を与えてきた。これに対して今世紀の産業革命は、いってみれば情報革命であ

る。近年における電子技術、コンピュータ技術の目を見はる急速な発展は、まさに革命という名に相応して社会・経済を変貌させつつある。この情報革命の担い手である情報化技術は、さらに二つに分けて考えられる。一つは人間の頭脳の働きをする高度の情報処理能力の機械による代替技術であり、他の一つは人の感覚の働きをする外界情報の収集・処理技術の発展である。ここで、頭脳の働きをするものをコンピュータ情報処理技術とすれば、感覚の働きをするのはセンサ技術ということになる。このような情報化技術は今日ようやく緒についたところであり、まだ発展途上の技術ではあるが、エネルギー・動力に加えてセンサと高度の情報処理技術を駆使することによって、感覚と頭脳と肉体をもった人間より近い高度の機能・複雑多彩な作業のできる機械の開発が可能となってきた。またある点では人間以上の働きのできる高度の機械が出現してきている。

通産省工業技術院では、今年度から「極限作業ロボット」という大型プロジェクトを発足させたが¹⁰⁾、その目指すものは悪環境や危険環境など厳しい環境条件下において、人間に近い高度の知的機能、複雑柔軟な作業のできるロボットの開発にあるという。これはいってみれば限りなく人間に近い機械の実現を目指すものであり、さらにその先には人間にできない作業ができ、人間能力を遙かに凌駕し、かつ人間に奉仕する機械の出現への期待がこめられている。このような高度の知能化機械の実現のためにはエネルギー・動力の技術のほかに情報処理技術やセンサ技術が必要不可欠であり、上述の飛躍的願望型の未来センサも、当面の目標としては、限りなく人間

* 現在：九州工業技術試験所 〒841 鳥栖市宿町 807-1
Present address: Government Industrial Research Institute, Kyushu, 807-1, Shuku-machi, Tosu 841

に近い機械を実現するのに必要とされる未来型のセンサと位置づけることもできよう。

もともとセンサは、人間の器官でいうならば感覚器に相当する働きをするものであり、さらに一般的にいうならば生物の感覚器に相当するものである。しかも生物機能の巧妙さには多くの学ぶべき点が少なくないといわれる。そこで、ここでは未来型センサのあり方について生物の感覚器との対比から考察してみよう。

2. 生物の感覚器¹¹⁻²⁵⁾

生物の感覚は、その刺激の種類によって機械的感覚、光感覚、温度感覚、湿度感覚、化学的感覚などに分けられている。感覚器官による分類では視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚などのいわゆる五感となるが、ここでは刺激の種類による分類に従っておこう。

2.1 機械的感覚

機械的感覚は、さらに狭義の機械的感覚、聴覚、および平衡感覚に分けることができる。

2.1.1 狭義の機械的感覚

狭義の機械的感覚は圧力、張力、振動、運動などの機械的刺激によって起こされる感覚である。機械的エネルギーにより受容器細胞が変形し、これによる感受性を電気信号として表わすものである。動物の体表や皮膚内には触受容器があって、触覚や圧覚を生ずる。ヒトの指先の皮下に分散して多数分布しているパチニ小体は振動感覚の受容体といわれる。昆虫では機械的感覚器として感覚毛があり、外骨格の動きを検知したり関節の曲りを感知したりする。この狭義の機械的感覚の場合、感覚の受容細胞は特定の場所に局在するというよりは、体表や皮下に広く分散して分布しているのが一般である。

図1はヒトの示指におけるパチニ小体の分布を示したもので¹¹⁾、図のようにこの振動感覚の受容体は立体的に広範囲に分布しているのがわかる。このような受容細胞

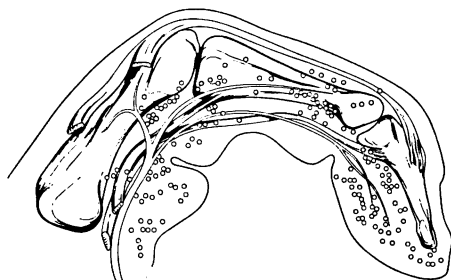


図1 ヒトの示指におけるパチニ小体の分布 (文献 11)より)

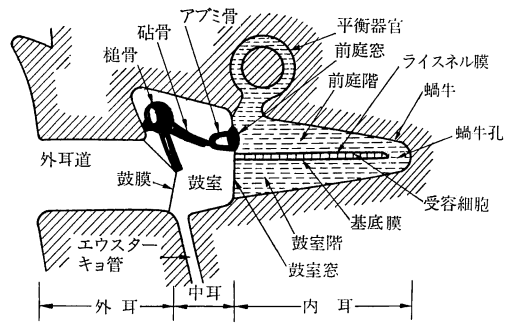


図2 ヒトの耳の模式図 (文献 19)より一部加筆)

の立体的分布は、圧力、張力、振動等を単一の刺激として感知するだけでなく、時空間的な分布をもつパターンとして検知できるような配置となっている。こうした刺激パターンのくり返しと、それに伴う何らかの形態的变化とは学習機能の基礎となるものと考えられ注目すべき点であろう。

2.1.2 聴覚

ヒトの聴覚では 30 Hz~20 kHz までの振動を音として知覚できる。これには聴覚器官に音の振動周波数に対する特殊な共振構造があり、一種の周波数解析を行なっているものといわれる。

図2はヒトの耳の模式図である¹⁹⁾。鼓膜に伝えられた音の振動は、鼓室内にある槌骨、砧骨を経てアブミ骨に伝えられ、内耳の端面に当たる前庭窓を圧迫する。このとき、内耳内の前庭階を満たしているリンパ液の圧は上昇し、蝸牛先端部にある蝸牛孔を通して鼓室階に至り、最終的に鼓室窓をふくらませることになる。しかし、外から与えられる音の振動数が高くなると、狭い蝸牛孔をリンパ液が通過するために圧伝播の抵抗が大となる。このため圧の変化が急激になるほどいっそう、前庭窓に近い部分が圧迫され、ライスネル膜を介して基底膜上の受容細胞を刺激し、これを興奮させて音の感覚を発生させる。

Békésy はこれをモデル実験で推論し、実際にヒトの蝸牛を使って実証した²²⁾。図3は音の振動周波数と対応する基底膜振動の包絡線を示したもので、図3(a)は基底膜上前庭窓からの距離と振幅の包絡線を、また図3(b)は基底膜を伝わる進行波の様子を示したものである。(b)図では、実線の振動が次の瞬間には破線で示したように右へ伝播する。

なお、動物のなかにはヒトの可聴範囲を超えた高周波の振動を検知できる種類がある。たとえばコウモリは 30~80 kHz の超音波を空中に発射し、ちょうどレーダ

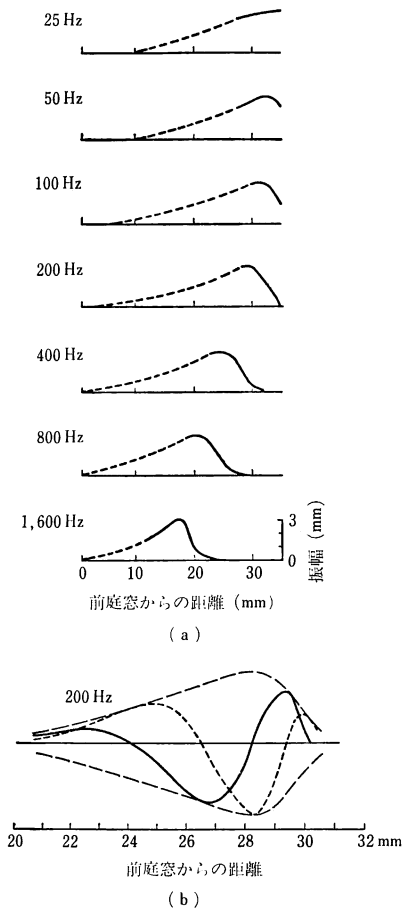


図3 振動周波数と基底膜振動の包絡線 (Békésy, 1943, 1947, 文献22) より

のようにその反射音を検知して障害物や餌を検知することができる。一方、コウモリの餌であるヤガにはコウモリの発する超音波を検知し回避行動をとることができる。イルカは100 Hz~150 kHzの低周波から高周波に至る音を聞き分けられるという。また聴覚器の形態や存在部位も動物の種類によって著しく異なっている。たとえばカの聴覚器は触角の基部にあり、キリギリスの聴覚器は前脚部にある。図4はキリギリスの聴覚器の存在部位とその断面構造を示したものである¹⁵⁾。このように生物の感覚器は、それぞれの種の生存環境に合わせて独特の形態と存在部位および受容帯域をもっている。

2.1.3 平衡感覚

ヒトの平衡感覚は耳の蝸牛殻の中に存在する。甲殻類十脚目では触角のつけ根に平衡胞と称する窪みがあり、その内面に密生する感覚毛と、平衡胞内に存在する平衡石と称する砂粒の塊との相対関係から重力の方向を検出し、体の平衡感覚を得ている。クラゲ類にもこれと類似

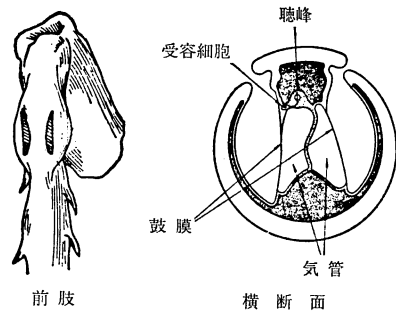


図4 キリギリスの前肢膝節にある聴覚器 (文献15) より



図5 甲殻類における平衡器とくに十脚目の例 (文献19) より

の平衡感覚器がある。図5は甲殻類における平衡器の例を示したものである¹⁹⁾。

2.2 光感覚^{14,20,21,23-25)}

ヒトの目は波長0.4~0.8 μm の光を受容し光感覚を生ずる。この過程を仲介しているのが視物質の光化学反応で、光量子を吸収して最終的には細胞の興奮すなわち電気現象に変換している。この光感覚により外界物体の形状、色および色分布、明暗の時空間分布を認知し、これから生物に有用な情報の抽出を行なっている。これらの情報の処理過程は並列処理、立体回路処理となっている。図6はハエの視細胞から脳に至る間に存在する視葉部の神経回路網を示したものである²⁴⁾。図のように空間並列処理、立体回路処理となっていることがわかる。ヒトの網膜内神経回路網も同様である。

生物のなかには、このほかに昆虫類のように波長250~400 nmの紫外光を検出できるものや、ヘビのように赤外光を検出できるものもある。また多くの昆虫や甲殻類は偏光の検出が可能だが、なかにはハチやアリのようにこれを生物の生活の中に直接とり入れているものもある。この種の生物にはその目の中に偏光検出を可能とする特殊構造部がある。

図7は甲殻類視細胞の例で、図のように直径0.5~0.01 μm の微細管が規則正しく並び、かつ層状構造とな

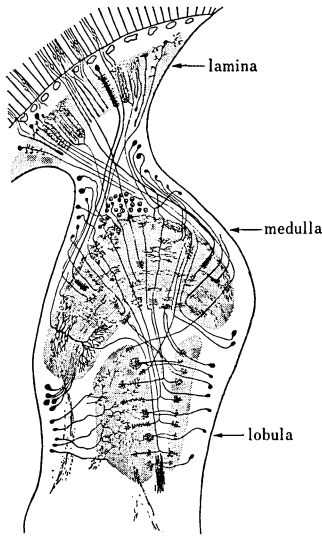


図 6 ハエ視葉における神経回路網 (文献 24) より

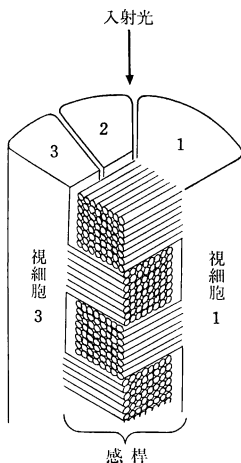


図 7 甲殻類視細胞の微細構造

っている部分がある^{20,21}). これを感桿と称している. 図では, 視細胞1は, ちょうどところどころ抜けのある櫛の歯のように一定方向に並んだ微細管を出している. これに対して視細胞2と3は, これと直交する方向に微細管を出し, これらが交互に重なり合っ層状構造となっている. この微細管の中には, 光が当たると光化学反応をおこして光感覚を生ずる視物質がつまっている. ここで, 図の感桿部に直線偏光が入射したとき, 微細管の軸に平行な偏光と垂直な偏光とでは光の吸収が異なり, これによって偏光の検出を行なっている. 図7の視細胞1の微細管に平行な直線偏光を感桿部に入射したときは, 層状構造の各段で光の吸収がおり, 結局視細胞1は興

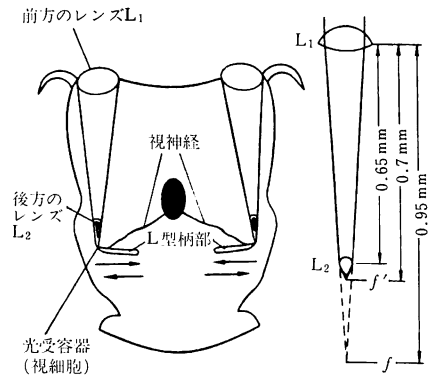


図 8 ミジンコの目の走査機構 (文献 18) より

奮して電気的な応答を示す. これに対して入射偏光面に垂直な微細管をもつ視細胞2および3では光の吸収は少なく, 応答を示さない. モデルを使った理論計算では, 上記微細管1個について2方向の吸収の違いは比率にすると2となることが報告されている²³).

またヒトの目には凝視しているときにも固視微動と呼ばれる無意識の微細振動のあることが知られている. これは物体像の輪郭抽出に有用と考えられているが, 甲殻類のなかにも微細振動による走査機構をもった目がある. 図8がその具体例で, カリブ海で発見されたミジンコの一つ (*Copilia*) である¹⁸). 固定レンズ L_1 と可動レンズ L_2 の二つのレンズをもって, 図のようにL型の柄部をレンズ L_2 とともに矢印の方向に左右に振動させ, これによって外界を走査している. このような走査機構の意味の詳細は不明だが, 走査することにより順応を防止して感度の増大をはかることや, 輪郭抽出に役立つものと考えられる.

このほかに甲殻類の目の視葉部には, 触角からの化学情報や, 体表からの機械刺激の情報や, 反対側の目からの情報などが中枢を介して入り込んでいる部位がある¹⁴). これは本来の視覚情報が他の感覚からの情報により変調を受けていることを示している.

2.3 温度感覚・湿度感覚

ヒトの皮下 0.2~0.3 mm のところには冷および温の感覚を起す受容器がある. 図9はヒト皮膚の断面図¹¹で, Meissner 小体や Pacini 小体は触覚・圧覚・振動覚の受容体であり, Krause 氏終末膨大は冷覚, Ruffini 小体は温覚の受容体といわれる.

ネコの舌には温度に感ずる神経線維があり, ゴキブリやカの触角には温度受容器がある¹⁵). また恒温動物では中枢神経系に温度受容細胞があり, 体温調節に関与すると推測されている.

湿度感覚器は、多くの昆虫では触角に存在する。図10はワモンゴキブリの触角上にある温度湿度感覚器の拡大図である¹⁶⁾。図のように“かさ”をもっているのが特徴で、湿度の変化に応答する。なお、ハエの幼虫など胸部に湿度感覚器をもつものもある。この感覚器は湿度の変化に応じて電気的なスパイクの頻度が変化して応答す

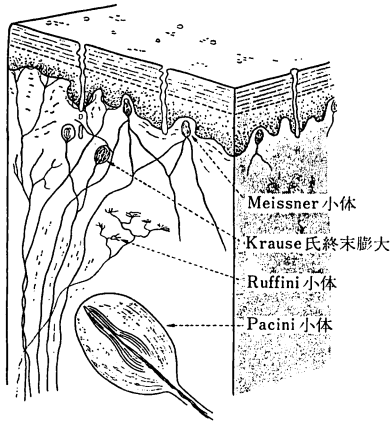
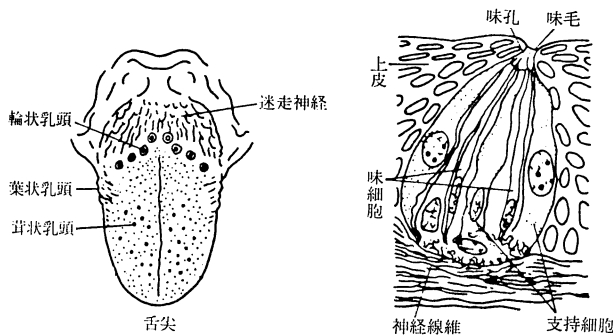


図9 ヒト皮膚の温度感覚受容器 (文献11)より



図10 ワモンゴキブリの触角にある温度湿度感覚器 (文献16)による



(a) 舌の乳頭 (b) 味蕾
図11 ヒトの味覚器 (文献12)より

る。

2.4 化学的感覚

2.4.1 味 覚

脊椎動物の味覚器は味細胞が集合した味蕾と呼ばれる組織にある。

図11はヒトの舌表面と、味蕾の断面図である¹²⁾。図11(a)に示したように、舌の前方2/3に分布する茸状乳頭部、舌の後方1/3の舌縁にある葉状乳頭部、および舌の奥部に点在する直径1~1.5mmの輪状乳頭の溝に沿って分布している。図11(b)は味蕾で、図のように微繊毛のある味細胞とそれの支持細胞とから成っている。

味蕾はおもに舌に多く分布しているが、ナマズのようにひげや唇にあるものや、一般の魚類のように口蓋や鰓にあるものもある¹⁹⁾。昆虫の味覚器は多数の味覚毛となっており、種によっては口器、前・中・後肢の跗節や触角にも分布している。なおハエの例ではショ糖の溶液濃度が $2 \times 10^{-3}M$ 程度でも検出でき、反応することが知られている¹⁵⁾。

2.4.2 嗅 覚

嗅覚の特徴は感覚を生ずる閾値濃度がきわめて低いこと、また非常に順応が速くたちまち環境に馴れ反応しなくなることである。脊椎動物の嗅覚器は鼻腔内の嗅上皮にあり、その中に嗅細胞がある^{11,13)}。

昆虫の嗅覚器は触角上の感覚毛となって分布している。その形状は種によって異なり、毛状、錐状、桶状、窩状、壺状の各種がある。図12は錐状感覚子の一例を示したもので、感覚細胞の末端突起が感覚子の表面クチクラを貫通して外界と連絡しているのがわかる¹⁷⁾。また、一つの感覚子に含まれる感覚細胞の数は一般に複数個である。なお、この嗅覚器の感受性は非常に高く、特定の物質では空中にある1~2分子でも感覚細胞にスパイク信号を発生させることができる¹⁵⁾。このような高感

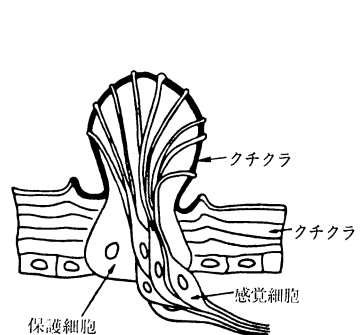


図12 嗅覚器における錐状感覚子 (文献17)より一部加筆

度の由来の詳細はまだ明らかではない。

3. 生物の感覚器と将来センサ

前章にごく大まかに述べた生物の感覚器に特有の諸特性をふり返りながら、これからのセンサの開発方向について考えてみよう。

3.1 出力はデジタルな FM 電気信号

生物の感覚器に刺激となる入力を与えたとき、その出力はまず例外なくデジタルな電気信号に変えられる。入力側感覚細胞の段階ではアナログの電気信号として応答するものが少なくないが、それも高次の神経細胞に至ると、すべて高さの揃ったインパルス信号となる。刺激の強弱に対する情報はインパルス頻度の変化、つまり FM の信号として伝達される。現有のセンサが、外界の物理的あるいは化学的情報を電気的信号としてとり出すデバイスとなっているのとは対比して興味深い。

なお、感覚器からの電気信号は途中いくつかの神経回路網を経て中枢に伝えられるが、その道程が長いほど減衰や外部雑音の混入、あるいは系の非直線性による歪の発生などのため、信号の忠実な伝送は一般に困難となる。これに対してデジタルな FM 信号であれば減衰時の増幅に際して系の非直線性は問題とならなくなる。また外部雑音の混入に対しても適当な閾値を設けることで除去できる可能性があり、アナログ処理より有利と考えられる。

3.2 高感度・高帯域

嗅覚の例でもみられたように、生物の感覚器の検知感度にはきわめて高いものがあるが、同時に順応作用があって刺激の程度と持続時間に応じ感覚器の閾値レベルを変えている例が多い。これは自動レンジ切換え付きの高感度センサということになる。

3.3 高密度・高集積型で、かつ空間並列処理・立体回路処理

ヒトの網膜における視細胞のように、高密度の分布によって空間分解能を高め、また十分な冗長性があって一部の欠損があっても全体としての機能には影響を及ぼさない高信頼性を保持している例がある。さらに複雑な神経回路網が微小空間に配置されて、適切な入力信号の前処理も行なわれている。しかも、これがたんなる 2 次元の時系列処理ではなく、時空間の並列処理・立体回路処理となっている。これらは新しいセンサの開発方向として、通産省の「次世代産業基盤技術」²⁶⁾の研究プロジェクトのなかでも取り上げられている課題である。図 13 がその概念図で、動物の網膜との対比で考えられた三次

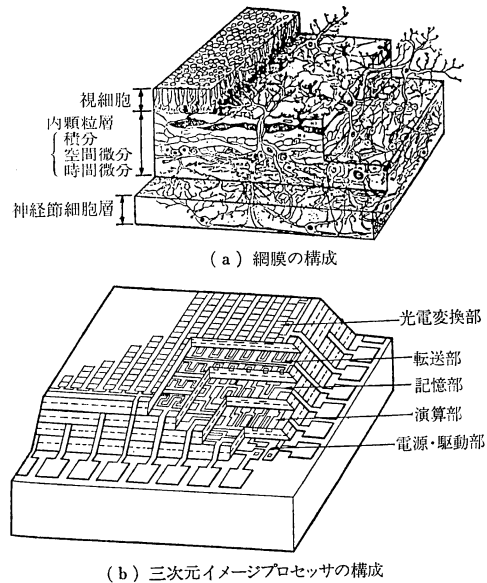


図 13 動物の網膜と三次元回路素子 (文献 26) より

元回路素子の開発である。このような信号の処理方式は、画像情報のように情報量の膨大な対象のリアルタイム処理には不可欠の技術で、従来のような時系列信号の処理方式では実現できないものである。

3.4 小型・軽量・低消費エネルギー

センサは一般に小型・軽量で、必要に応じて機械のどこにでも取り付けられるものが望ましい。またエネルギー供給が容易で消費エネルギーはできるだけ少ないものほどよい。この点生物の感覚器はほぼ理想に近い。とくに生物におけるエネルギー供給の方法は独特で、周囲環境から常時エネルギーを供給されながら仕事をする。栄養の供給と老廃物の排泄等一般に代謝と呼ばれるものがそれである。神経細胞を次々に減衰せずに伝播するインパルス信号も、筋肉の活動を持続的に保持する機構も上記のようなエネルギーの供給方式の結果である。これはレーザとの対比で考えれば一種のポンピング現象といってもよい。

3.5 形態の変化による機能の創成

生物体の最小単位は細胞と考えられる。この細胞が集まって組織を作り、組織が集まって器官を作り出している。細胞という材料は変わらないが、これが形態を変え、特有の集合を作って組織となり器官となれば、そこに新しい機能が生まれてくる。たとえば細胞の一部が変形して微細管を作り、これが規則正しく配列して層状構造を作れば、節足動物の目などに見られる感桿と呼ばれ

るものになり、偏光検出という新しい機能を生み出してくる。ちょうど微細な直線溝を等間隔に彫刻してやれば回折格子が生まれ、微細な光電子増倍管を多数束ねてやればチャンネルプレートという2次元情報処理用の新しいセンサが生まれるのに似ている。生物において形態の変化が新しい機能を生み出すことができるとすれば、同じ材料であっても加工の仕方によって新しい機能をもったセンサが作れるであろう。

3.6 分布型・分散型

生物における感覚の受容体は、体の特定部位に集中しているものと、ある範囲にわたって広く分布し分散しているものがある。たとえば触覚、圧覚、温冷覚、振動感覚などの受容体は皮下かなりの範囲に分散して分布している。これの効用は、一つにはセンサとアクチュエータを一体にして環境や状況変化への適応性を高めていることである。他の一つは分散して分布された各センサからの出力を総合して刺激を時空間のパターンとし、より詳細な認識判断を可能とすることである。さらにこれに記憶や学習効果が加わればいっそう高度の認識も可能となる。このように複数のセンサの配列・分布は、新しい応用面開拓の可能性を含んでいる。

3.7 複合型

動物の目の中には既述のように化学的感覚や機械的感覚などの他の感覚器からの情報をとり入れて視感覚を調整したり、他の運動機構と連動したりしている例がある。たとえば動物の体に何か触れたとすれば、その動物はそのほうを向き、それを凝視して、それが何であるかを見極めようとする。時には音を声を聞き、あるいは触れてみて最終的に総合判断を下す。これは複数のセンサからの出力が複合化されて一つの認識判断系を作っている例である。最近の防災センサなどは、このような複合化の傾向になりつつある。たとえば火災のセンサには温度、温度変化、光、煙、ガスなどのセンサを複合化して、その信頼性を高めようとしている。

3.8 学習機能

生物の感覚器には学習機能が具わっているものと考えられる。学習によって検知の感度が高まったり、認識判断の信頼性が向上したり、逆に反応しなくなったりもする。これからのセンサには、このような学習機能付きのものも用途によって必要となろう。

3.9 自己診断・自己修復性

生物は自分自身にどこか故障があれば、それを自己診断し自動的に自己修復の方向へ対応するように作られている。自己診断・自己修復の技術開発は、今日の宇宙機

器のように非常に高度の信頼性を必要とする対象にとってはきわめて重要な課題である。故障を検知するものもセンサであるが、そのセンサの信頼性を調べるのもまたセンサである。ハードとソフトの両面からの技術開発が必要とされるだろう。

4. おわりに

将来センサとして人や生物の感覚器に代わる機能をもつセンサを一つの目標としてその特長は何かを考えてみた。それらのなかにはもちろん、今後の研究開発に待たねばならない課題が当然含まれているが、意外にすでに今日の課題となっており、現実に具体化へ向けて動き出しているものもある。たとえばセンサの高密度化、高集積化、インテリジェント化がそうであり、複数センサの複合化の傾向などもある。

また、センサ技術というとき、新材料や新機能素子の開発がセンサ技術の中心課題と考えられがちである。しかし、センサにおける利用技術も材料開発と同様に、時にはそれ以上に重要である。利活用の現実に則したハードおよびソフトの開発が大切である。

なお、生体機能を参考にするとき、長い進化の過程を経て今日に至った生体の構造・機能を、そっくりまねたものを開発することは経済性、製作技術、製品性能のうえからみて必ずしも妥当とはいえない。また生体機能そのものも多くはまだ研究途上であり、一貫したシステムとして十分理解しつくされているものはきわめて少ない。したがって生体機能に注目してその応用を考えると、その基本原理や手法を学ぶべきであり、具体化に当たってはあらかじめ利用対象の取捨選択と詳細な事前検討が不可欠であろう。

文 献

- 1) 高橋 清編：センサ技術入門 (工業調査会, 1978).
- 2) 大森豊明編：センサ実用便覧 (フジ・テクノシステム, 1978).
- 3) 大森豊明：センサ工学 (テクノ, 1981).
- 4) 柳田博明, 相沢益男, 矢部正也編：新センサーハンドブック, 機能・応用篇/材料データ篇 (フジ・テクノシステム, 1982).
- 5) 電気学会雑誌, 102, 2 (特集 センサ) (1982).
- 6) 日本電子工業振興協会：センシングデバイスに関する調査報告書 (1983).
- 7) 日本電子工業振興協会：計測アルゴリズムに関する調査報告書 (1983).
- 8) 日本電子工業振興協会：センサニーズに関する調査報告書 (1983).
- 9) 日本産業技術振興協会：センサ技術の発展と応用分野の拡大に関するテクノロジー・アセスメント調査報告書 (1983).

- 10) 通商産業省工業技術院編：工業技術，**24**，9 (1983) 33；**24**，10 (1983) 13；機械振興協会：機械振興，**16**，9 (1983) 27.
- 11) 勝木保次編：生理学大系 VI，感覚の生理学 (医学書院，1967).
- 12) 八木 晃編：心理学 I (培風館，1967).
- 13) 問田直幹，内園耕二編：生理学大系 I -2，一般生理学 II (医学書院，1969).
- 14) 日本動物学会編：光感覚 (東京大学出版会，1975).
- 15) 立田栄光：昆虫の感覚 (東京大学出版会，1975).
- 16) 立田栄光，三村珪一，富永佳也，小原嘉明：昆虫の神経生物学 (培風館，1979).
- 17) K. U. クラーク：節足動物の生物学，北村實彬，高藤晃雄訳 (培風館，1979).
- 18) J. B. メッセンジャー：神経・脳・行動，中村嘉男訳 (朝倉書店，1980).
- 19) 立田栄光，三村珪一：動物の感覚 (共立出版，1981).
- 20) H. Autrum, ed.: *Handbook of Sensory Physiology, Invertebrate Photoreceptors*, Vol. VII/6A (Springer, Berlin-Heiderberg-New York, 1979).
- 21) H. Autrum, ed.: *Handbook of Sensory Physiology, Invertebrate Visual Centers and Behavior I*, Vol. VII/6B (Springer, Berlin-Heiderberg-New York, 1981).
- 22) G. v. Békésy: *Akust. Z.*, **8** (1943) 66; *J. Acust. Soc. Am.*, **19** (1947) 459; 感覚と抑制，勝木保次監訳 (医学書院，1969).
- 23) M. F. Moody and J. R. Parris: *Z. Vgl. Physiol.*, **44** (1961) 268.
- 24) T. H. Bullock and G. A. Horridge: *Structure and Function in the Nervous Systems of Invertebrates*, Vol. II (Freeman, San Francisco and London, 1965).
- 25) 清水嘉重郎：計測と制御，**13** (1974) 155; 電子通信学会誌，**63** (1980) 947; 応用物理，**49** (1980) 321.
- 26) 工業技術院計画課次世代産業技術企画室編：次世代産業を支える技術開発 (日刊工業新聞社，1983); 通商産業省工業技術院編：工業技術，**24**，8 (1983) 18.