

センシング技術の動向 —センサのシステム化と智能化を中心に—

山崎 弘郎*

New Trend of Sensing Technology
—Sensing Systems and Intelligent Sensors—
Hiro YAMASAKI

Key words : sensor system ; intelligent sensor ; smart sensor ; multi-dimensional sensing system ; fault detection ; intelligent man-machine interface ; sensor fusion ; paradigm of sensing system.

1. センサ技術はいま

センサとは、対象からわれわれが必要とする情報を収集し、その状態を把握理解するシステムの最先端において信号の検出変換を行う機器要素である。

人間生活のあらゆる局面において情報の収集と処理を行うシステムが重要な役割を果たしている。とくに、高度な機能を持つ機械や装置を活用する鉄鋼業においては適切な情報が必要不可欠だが、さらにそれらがヒューマンフレンドリーであるためには自然法則が支配する物理の世界から人間の知の世界にわたる情報の交流がスムーズに行われなければならない。この情報交流や知的処理を実行するのはセンシングシステム、信号処理システムおよび知識処理システムなどの情報システムである。これらのシステムの最先端で情報の正否を支配するのは多種多様なセンサ群である。図1は異なる世界を流通する情報の流れを示したものである。

センサ技術の進歩発展は目覚ましく、対象の範囲も産業のシステムから地球環境、生体システムなどへと拡大し、その技術は多様化、高度化した。また、マン・マシン・インタフェースにおいても人間と機械の情報交換のために種々のセンサ技術が応用されている。したがって、センサ技術は物理の世界における情報の収集にとどまらず人間の知の世界にも接近し、人間の認識と行動をも包含する高度な技術体系を形成しつつある。

一方、センサデバイスの技術も対象の拡大とともにマイクロマシンングや新しい物性科学や材料技術の進歩を背景に高度な機能を微細な空間に集積し、そこに情報システム機能も実現するマイクロインテリジェントシステムを指向

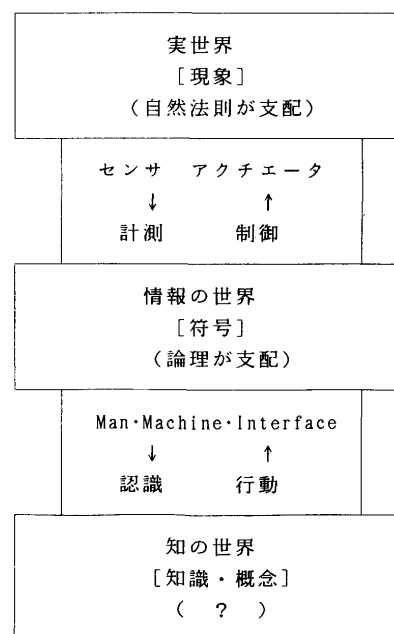


図1 異なる世界を結ぶ情報の流れ

しつつある。

また、センサの対象が物理量化学量の変換から生体量や心理量へと拡大し、センサシステムの機能が高度化するに従いセンサ情報の世界が人間の知の世界に接近し、人間の感覚、感性システムを目指して進歩しているといえよう。

したがって、今世紀末から21世紀初頭にかけて最も大きな発展と変化が予想される技術分野の一つがセンサである。このような変化を遂げつつあるセンサを中心としたセンシング技術を、ここではシステム化と智能化とに関連するいくつかのキーワードで動向を描いてみよう。

平成5年2月22日受付 平成5年4月9日受理 (Received on Feb. 22, 1993; Accepted on Apr. 9, 1993) (依頼展望)

* 東京大学工学部教授 (現: 東京大学名誉教授, 横河電機(株)常務取締役) (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, now Professor Emeritus, Yokogawa Electric Corporation, 2-9-32 Naka-cho Musashino 180)

1・1 センサ技術の変化：デバイスからシステムへ

従来、センサ技術は検出対象の量が個別に規定されており、それを処理可能な情報形態に変換するデバイス技術と見なされていた。したがって、実用的なセンサ技術は信号変換を実現するデバイス技術と、そのデバイスを実現する材料プロセス技術とで構成されていた。

近年、センサの応用範囲が急激に拡大された結果、対象に特化したデバイス技術のみでは対応しきれなくなり、信号処理や複数のセンサ信号の情報処理によって、より高次の情報を取り出すようになってきた。すなわち、センサデバイスを中心に情報処理システムを構築することにより、それまでに無い高機能を実現し、また、多様な要請、多様な対象への拡大に対応してきた。

したがって、前述のハードウェア技術だけでなく、ソフトウェアを包含するセンシングシステム技術の世界が確立され拡大しつつある。

これからの数年間はセンシング技術がシステム技術として一層の発展を遂げ、システム技術としての新しいパラダイムが確立されることになろう。

1・2 センサの知能化のニーズとシーズ

信号の検出変換機能のほかに信号処理、情報処理などの機能を併せ持つセンサをインテリジェントセンサと呼ぶ。なお、知能化センサあるいはスマートセンサという呼び方もある。インテリジェントセンサがどのような背景から開発されたのかを考えてみよう。

対象の多様化と複雑化とはセンサの数の増加と多様化をもたらし、センシングシステムの規模の拡大が情報処理の分散化を必要とした。分散処理の必要性を最初に感じたのはNASAであった。対象が地球上に限らず、宇宙に広がるからセンサの設置場所が空間的に離れており、情報伝送路の容量が伝達できる情報量を支配してしまう。そこでセンサの情報を処理し、情報伝送容量以下に圧縮する機能がセンサの近くに要求されて分散した知能が必要になった。

宇宙だけではなく、我々の身近でも知能化ロボット、インテリジェントビルなど、いろいろな機械やシステムの知能化がとりあげられている。そして、機械やシステムの機能が高度であるほど、その機能に関係する物質やエネルギーに対して情報が果たす役割が大きい。特に情報獲得の入口となるセンサは、その性能と機能が全体のそれを左右する。生体においても高等な生物ほど感覚系と頭脳とが発達している。機械やシステムの対象範囲が拡大し、高度化自動化されるのにもとない目的に適合した必要な情報のみを効率良く選択し、人間が与えた知識あるいは機械自身が獲得した知識にもとづいて処理して提供する知能が必要になった。これがインテリジェントセンサの開発が要請される背景である。

NASAの研究者達が最初にインテリジェントセンサの必要機能について提案したが、その後も多くの提案がある。

これらを総合すると以下の様になる。

- 1) データの特徴を抽出する信号処理機能
- 2) 異常値や例外値を識別する機能
- 3) 自動校正機能および診断機能
- 4) 自動補償機能
- 5) メモリー機能
- 6) 変更可能な処理アルゴリズム

また、望ましい特性として、他のセンサと連携、環境条件変化への適応、判断機能などをあげている¹⁾。ここでは知的情報処理まで考察の範囲を拡大し、機能を中心に知能化の意味や効果について考える。私の考えでは、上の1)～6)の機能を実現する技術シーズやニーズはほぼ出揃っているので、むしろ、望ましい特性として取り上げられた機能をいかにして実現するかが、これからの重要な課題と思われる。

インテリジェントセンサを開発する際の諸問題はつぎの二つに集約される。

- 1) インテリジェントセンサの知能にいかなる役割を期待するか
- 2) インテリジェントセンサの知能を具体的にどのように実現するか

上の問題はインテリジェントセンサ開発を期待するニーズとそれを具体化するシーズ技術とに対応する。本文ではニーズとシーズの両面からインテリジェントセンサの現状と将来に関する展望を述べる。

1・3 センシング技術に対する要請

センシング技術は本来ニーズ指向の技術であるから、現在のセンシング技術に対する要請を考察すれば将来のセンサの姿を予見できる。そのニーズは益々多様化しているが、開発が要請される機能を次の様に集約できよう。

- (1) 空間的ひろがりを持ち、時間的にも変化する多次元的動的状態の把握
- (2) 異常状態の早期検出と予知
- (3) 高度で微妙な人間感性の代替

これらは現在のセンシング技術の弱点であるが、いずれも我々が持ち合わせる対象に関する知識が不十分か、あるいは、知識を持ち合わせても、それがセンシング技術に結び付きにくいものである。表現を変えると、対象のモデルが十分に確立されていないものといえることができる。物理現象として信号変換の因果関係が規定され、しかも、その逆変換が一意に定まっても、変換された物理現象と対象との関係が一意に定まらないので、対象の状態を正しく把握し得ない。たとえば、異常状態の検出や予知がその一例である。

必要な情報はセンサ信号の中に含まれてはいるが、われわれの関心と直接対応していないのである。そこで、種々の情報処理を施すことによりセンサ信号の中に含まれている目的情報を抽出しなければならない。その際には、処理

の背景に対象に関する知識が活用され、処理においてマシンインテリジェンスが重要な役割を果たす。モデルの不十分なところを知識やほかのセンサからの情報で補わなければならない。

当然、後述する様に、複数のセンサや異なる種類のセンサ情報を統合あるいは融合するシステム化手法が問題の解決に有効な手法となり、そして、それらが智能化センシングシステムの構築手法となる。

2. センサ智能化の段階と現状

2.1 インテリジェントセンサの発展段階

智能化の具体的な段階と得られる効果とを次の三段階に分けて考えることができる。

1) 影響量の補償や直線性などのセンサ特性の改善を期待する第一段階。(特性補完段階)

そこでは精度や感度の向上、出力信号の標準化、センサ設計の自由度増大などが実現される。

2) 自動校正、自己診断などの自律的機能が付与される第二段階。(自立化段階)

自動化、省力化、分散処理などシステムの基底に位置するインテリジェントセンサの基本的機能が確立され、上層の適応機能、他のセンサとの連携機能などが実現される。

3) 特徴抽出、パターン認識など意味の理解の前段階となる機能、あるいは認知機能の一部代替などが実現される第三段階。(認識への接近段階)

状況の理解や学習機能などが実現する。複数の分散処理システムが相互に有機的連携を保ちつつ、与えられた状況に適応する。

第一段階はすでに実用段階とみなせる。第二段階がシステム技術として開発段階、第三段階はセンサフュージョンなどの要素技術が開発されているが、研究段階といえよう。

2.2 センサ智能化の具体的手法

智能化を実現するためのハードウェア技術的手法は、センサというハードウェアの中に前述の智能化機能を定着し、センサの検出変換機能とどのように有機的に結合させるか、結局複数機能の集積化をいかなる形で実現するかに依存する。そのためには次に示す具体的手法があげられる²⁾。

A) センサと信号処理デバイスとの機能集積化

(インテリジェントインテグレーション)

B) 機能材料の物性による信号処理機能の実現

(インテリジェントマテリアル)

C) 形態や構造自体がもつ信号処理機能の応用

(インテリジェントストラクチャ)

この中で、A)は今後開発されるデバイスではマイクロプロセッサのようなデジタル信号処理方式が利用されるのに対して、B)C)では本質的にアナログ信号処理方式である。

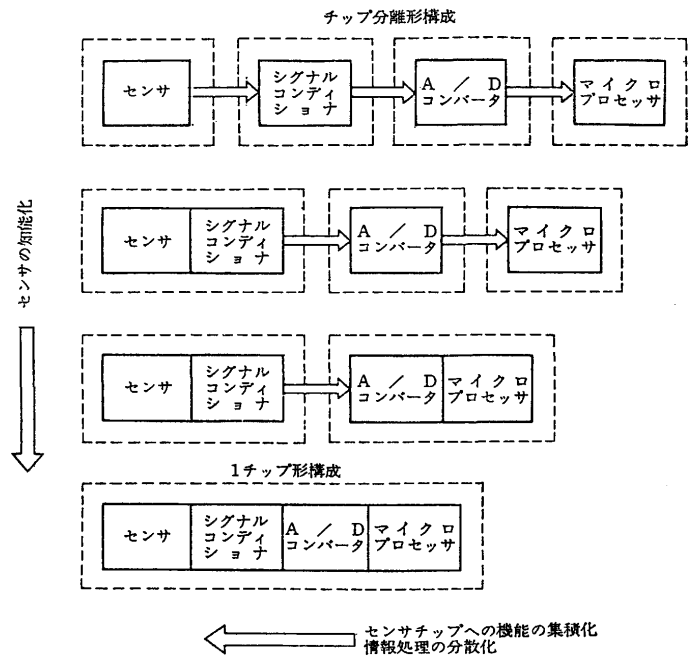


図2 センサとマイコンとの結合形態の変遷と機能の集積化

B) C) のアプローチはセンサの智能化の手法として十分に認識されていない。しかし、信号処理機能という視点からセンサの材料物性や形態自体などが見直されると、その重要性は今後広く認識されよう。なぜならば、生体の感覚受容器の信号処理機能ではマイクロプロセッサ相当の機能が感覚器の近傍には無く、この様な手法によるものが多いからである。

現在の状況は特性補完段階と自立化段階がA)の手法で実現したとみることができよう。

機能の集積化による智能化の過程をA)の手法を例として図2に図式化した。現在はセンサと信号コンディショナが一体化した段階である。次に二、三の開発例を示す。

2.3 インテリジェントセンサの現状

2.3.1 機能集積形インテリジェントセンサ

(インテリジェントインテグレーション)

半導体センサデバイスの中に信号処理回路を内蔵した1チップ集積化センサがいくつか発表されている。図3はその一例で、シリコン単結晶の異方性エッチングによりダイアフラムを形成して圧力センサとし、同じシリコン基板上に信号コンディショナとしての補償回路と増幅器を作られる。また、変位—電気変換のための定電圧回路や発振器などを含む³⁾⁴⁾。

また、我々に非常に身近なセンサとしてガスメータがある。一定容積の計量室の中を膜が、ガスの流れによって押されて移動し往復する機構があり、その往復回数を計数する動作原理は100年以上変わっていない。しかし、最近大きな変化がおこりつつある。マイコンメータの導入である。これはいわゆるマイコンとセンサとがワンチップという姿

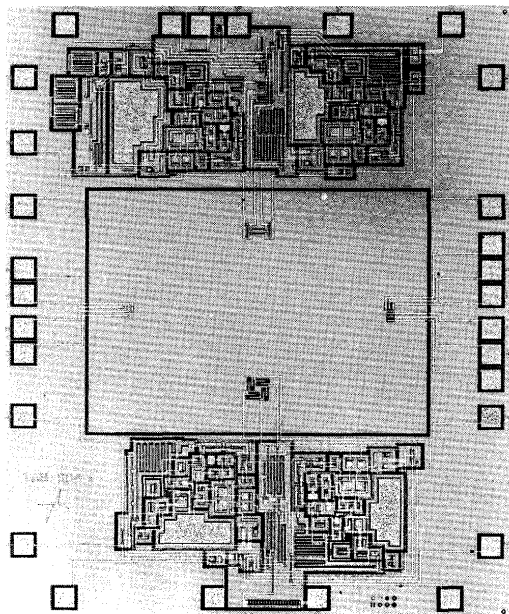
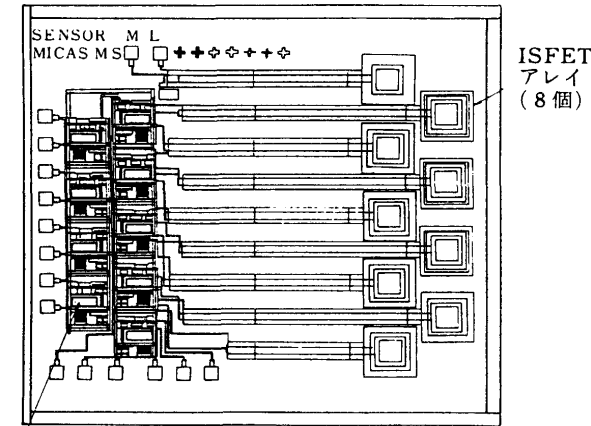


図3 Siダイアフラムを持つ機能集積形圧力センサダイアフラムの様に電子回路が集積化されている
(豊田中央研究所五十嵐伊勢美氏提供)

ではないが、機能集積型インテリジェントセンサの開発実用例である。そして、ガス使用状態の異常や地震による配管の破損などを検出して安全性の向上に大きく貢献している。

2・3・2 物性の機能化 (インテリジェントマテリアル)

図4にISFET (イオン検出電界効果トランジスタ) と演算増幅器とを複数対同一チップ上に集積した多成分センサ



(a) センサICチップ

(b) 1チャンネルの等価回路

図4 複数のISFET (8個) と演算増幅器を集積化した多成分分析センサ

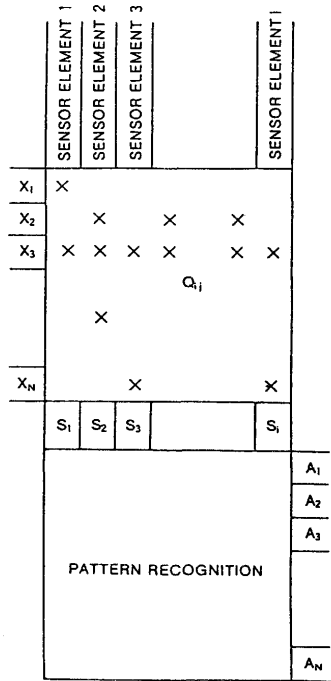


図5 多数の特性の異なるガスセンサ (i個) で複数の対象成分 (N成分) を識別分析するセンサ

を示す。ISFETはそれぞれ固有のイオンに対する不完全な選択性を持つが、複数センサの出力信号を組み合わせることで総合的に高い選択性を実現する⁵⁾。

この考え方を一般化して第三段階に挑戦した例として特性の異なるガスセンサを複数組合せ、その感度パターンの相違をパターン認識技術を利用して対象成分を同定するガスセンサが提案されている。(図5参照) 検出したい対象の $X_1, X_2, \dots, X_N$ のガスがあって、それを $S_1, S_2, \dots, S_i$ の特性の異なるセンサ群に加える。センサ群の信号をパターン認識機能で処理すれば成分毎の答え $A_1, A_2, \dots, A_N$ が得られる。 Q_{ij} は成分に対するセンサの感度を示す行列である。もし1個のセンサが1成分のみに対して理想的な選択性をもつならば対角成分のみが値をもち、他のすべての要素は零となる。実際のセンサは複数の成分に対して感度をもつので、その特性を考慮して解を求める。成分数よりセンサが多ければ情報に冗長性があるので、センサやシステムの校正や機能チェックに利用できる⁶⁾。試作された図6の例では特性の異なる半導体厚膜ガスセンサ6個の出力信号パターンを多数のガスについて記憶させ、未知のガスのパターンとの類似度をマイコンで計算してガスの種類を判別する。同時にガス濃度を計算する⁷⁾。

ここで注意したいのは、センサの選択性が完全な方がつねに良いとは限らない。選択性が完全であれば、ほかの処理を必要とせず成分の識別ができる。その代わりに対象の成分の種類が多ければその数だけ多種類のセンサが必要となる。成分の数は無数にあるから選択性が優れたセンサをそれだけ用意するのは困難である。むしろ、一つのセンサ

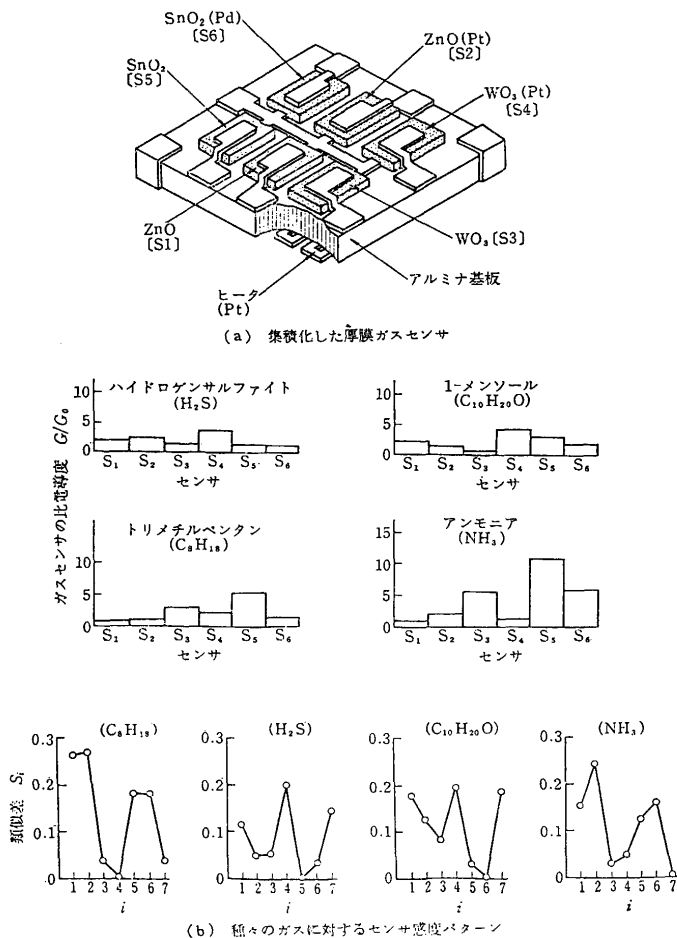


図6 複合化厚膜ガスセンサによる成分の判別と分析

の選択性が不完全で、複数の成分に感度を持っても、その感度が成分により異なれば、複数のセンサの感度の違いをパターンの違いとして判別することができる。このほうが限られたセンサの数でより多くの対象に対応できるシステムができる。その代償としてパターンの差や特徴を判別する処理システムが物性の信号処理を補完するために必要となる。人間や動物の嗅覚や味覚はこのような方式であるといわれている。

2.3.3 形態、構造の機能化

(インテリジェントストラクチャ)

形態や機械的構造が信号処理機能を持つことは理解しにくいかもしれない。われわれの最も身近な耳介はその一例である。我々は左右2個の耳で三次元的音源の定位が可能である。左右はともかく、前後上下は2個の耳では判別しにくい。これを可能にしているのは我々の耳介である。この事実を実証する実験結果が図7である。インパルスの音を発する音源の位置を頭の正中面に沿って移動させ、外耳道内に設置した超小型マイクで捉えた応答が示されている。図から明らかな様に音源の方向により耳の中で捉えられた音はかなり異なっており、これが方向感覚を与えるのである。この相違を与えるのが、耳介であり、複雑な形状が伝達特性の方向依存性を造り出している。我々の研究の結果

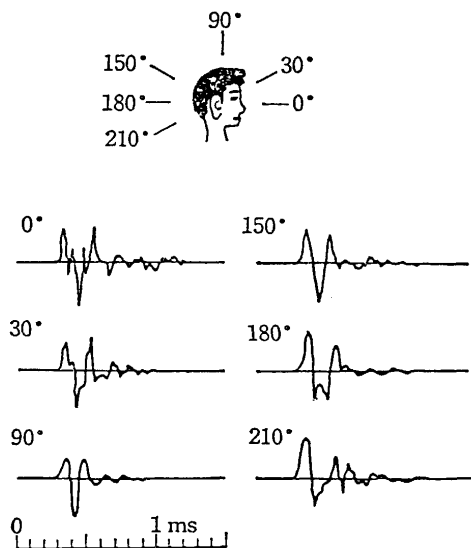


図7 正中面内の音源に対する耳介のインパルス応答

によると個人個人の耳介の形状は異なるが、図に示されるような特徴は多くの被験者に共通であった。自然が作った巧みなインテリジェントセンサの一例といえよう⁸⁾。

この手法は性格上対象が空間的拡がりをもつ多次元的センシングシステムに多く適用される。センサへの情報媒体が波動であれば、波動センサの形状により空間分解能を高めることが可能となる。

3. 現状の分析とパラダイムの変化

3.1 問題点

センサの知能化は、この数年間に、研究開発は進んだものの実用化は第一段階と言えよう。現在のセンサデバイスは空間的に1点の状態を電気信号に変換するものが大部分である。センサの知能化もセンサとシグナルコンディショナとを一体化したり、プロセス用流量、圧力センサなどに見られるようにマイクロプロセッサによる機能増強と簡単な通信機能の付加が実現した。これを通じて遠隔校正、遠隔診断機能などが実現した。この形のセンサはすでにプロセス計測などで多数実用されている。しかし、そこでは、まだ、ほかのセンサとの協調や統合機能などは持たず、あくまでも、その出力信号は1点の状態を記述する特徴量であることに留まっている。情報処理としてひとまず完結してはいるが、自立的ではない。この意味で第一段階(特性補完段階)と表現した。

また、計測システムを形成する過程も、計測可能な量を下から積み上げて全体を理解しようとするボトムアップ的発想にもとづいている。

すなわち、センシングシステムを構築する現在の段階は、デバイスから出発してシグナルコンディショナや処理回路により知能化を実現する段階である。利用できる材料やプロセス技術に強く依存する反面、目的の機能が高度であれ

ばあるほど実現できる機能との間の距離が大きく、それを埋める手段の見通しが悪い。

3・2 センシング技術の新しいパラダイム

現在、システム技術の発展、とくに、知識処理の発展に代表されるソフトウェア技術の発展とメモリやマイクロプロセッサ技術、マイクロマシニング技術に代表されるハードウェア技術、プロセス技術の発展など、進歩を支えるシーズは出揃ってきた。限られた空間に多くの、しかも高度な機能を集積する技術も確立されつつある。これらを利用した、本格的な発展は次の21世紀までの数年間であろう。

それでは本格的な発展を可能にする条件は何か。それはセンシング技術におけるシステム技術としてのパラダイムの変化ではないだろうか。

われわれが必要な知識情報を明確化し、その対象の情報構造を考察し、収集できる信号にブレークダウンして、具体的な収集システムを考える。このようなトップダウンのプロセスが合理的であって、前記のメモリやプロセッサなどのデバイス技術、材料プロセス技術や集積化技術などは強力な支援ツールではあっても、主役ではない。主役はニーズに対応して対象の知識を構造化することなのではないだろうか。

センシングの対象が今後点から線へ、さらに線から面へ、ニーズに対応して展開して行く。すなわち、多次元化、そして異常の早期検出や予知、さらに人間感性への接近の方向に展開することになる。それと同時にセンシングシステムの構築過程がトップダウンに変わっていかなければならないのではないかと著者は考える。

4. 知能化センシングシステムの展開、期待される知能化センサの応用

4・1 点から面へ——多次元化への拡張——

センシングの対象が空間の1点の状態から変化して、空間的に広がりがあり、その状態が空間に依存して変化し、かつ、時間的にも変化するような多次元動的状態に発展する。当然、センシングの広域性と同時性とを同時に実現することを望まれるが、通常はそれを同時に実現するのは困難である。

広域性を重視してセンサを走査すると時間的同時性が成立せず、複数のセンサ群を広域に配置すると空間的な代表性が問題で、情報の空間的な分解能、すなわち広域性が犠牲になる。それをリモートセンシングによる画像化により解決する場合、グラントルースすなわち校正と画像理解の問題が残る。

たとえば、画像情報から情景を理解する場合においては、イメージセンサの中の1点1点の画素情報は、個々の画素の明るさのレベルより周囲の画素の明るさとの関連が重要な意味を持つ。したがって、多数の画素情報を統合的に処

理する機能を果たす上位の情報処理が必要になる。このような処理においては画素と画素との間の関係を記述する情報、すなわち、対象の構造に関する知識が不可欠である。また、対象の構造に関する知識があれば、画素の数を減らしても必要な情報が得られる。知識を活用して画素間を内挿したり、欠落データも補完できる。

上に述べたように、対象が点から面へと拡大するにしたがって、多くのセンサ出力信号を統合する処理が必要となり、それを効率良く実行するためにはトップダウン的なシステム構築が必要なのである。

4・2 異常検出予知システムの知能化

4・2・1 異常の状態モデルの確立

システムの大規模化、広域化、高度化は、それが正しく機能する限り大きな便益をもたらすが、異常が発生すると危険であり、かつ影響が広範囲に及ぶ。異常を早期に発見し、的確に原因や故障箇所を同定する機能をシステムが持つことが必須である。

そこで、システム開発の設計段階において、おこり得る異常状態に対して対策や防止策が施される。それにもかかわらず、システム運用後発生する異常が設計段階で全く予知していなかったものであることが多い。異常の予知がいかに困難であるかを示唆しているのであるが、それにもかかわらずシステムを構築し、運用しなければならない。その際の予知予測の不十分なところは異常検出システムや監視機器及びオペレータの監視にゆだねられる。

しかし、異常状態を正常状態から明確に区別し、それによって異常の早期検出あるいは予知に役立つ様な異常状態のモデルが確立されていない。このことが異常検出予知の問題を難しくしている。モデルが確立されれば、特徴となるパラメータを組織的に選択できるし、異常の予兆を収集して異常予知が可能となるからである⁹⁾。

4・2・2 異常状態への接近

モデルが確立されていない異常状態への接近手法の一つは、次善の対策として複数異種類のセンサ情報をトップダウン的に組み合わせ、間接的に異常状態に迫ることになる。

火災を例にとると温度や煙だけを頼りにした火災報知器がしばしば誤報を出す⁹⁾が、複数の異なる情報を統合することによりの中率が増す。したがって、それぞれのセンサの感度を高められるので早期に警報が出せる。異常検出はインテリジェントセンサの重要な応用分野である。この際複数の情報を有機的に結合するのは対象に関する知識である。これは熟練した人間が多種類の情報から総合的に異常を判別するのと同様である。

知能化センシングシステムの学習機能を利用して異常状態を経験することによりシステムが情報を増加させ、利口になっていくことも可能である。

大規模、高度なシステムの運用には通常の監視作業のほか異常の検出処理や予測、非常作業におけるオペレータ

の負担軽減が重要であるので、エキスパートシステムなど知識工学の知見が導入されつつある。また、ニューラルネットワークも有効な手法である。しかし、ネットワークの学習や役に立つ知識ベースの構築にはやはり異常状態の知見が別の形で必要なのである。

4・3 マン・マシン・インタフェースの知能化

——人間と機械の相補的協調——

高度な機能と巨大な規模を持つシステムでは、システムの全体像の把握が段々と困難になり、機能や全体構造が個人の理解レベルを超えてしまい勝ちである。

そのシステムを安全かつ高効率で運用するために、システム運用のための大量の情報や知識を処理しつつ人間を補佐する知能化マン・マシン・インタフェースが必要である。それを介して人と機械とが相補的協調関係を保持できる。

特に、異常時における緊急な作業においてそれが重要な役割を演ずる。例えば、減多に起きない緊急事態における処理や操作において、その操作や処理の無矛盾性を機械が検証したり、また、異常の原因に関連のありそうな事象や部品を確率の大きな順序に示す対話的知能化インタフェースが有用である¹⁰⁾。

近年話題になっている仮想現実感(Virtual Reality=VR)の応用は非常に広範であるが、特に人間と機械とが共生をはかる上で重要なインタフェース技術である。本来、相補的協調関係を実現するためには人間と機械とのスムーズな対話が不可欠である。そのため人工の現実感が役立つ。そして、人間が感じる現実感や臨場感を高めるためには、人間の行動から意志を読み取る高次の知能化センサが活躍する。

センサは現実の世界の情報を収集するものであり、VRは文字どおり仮想の世界を扱うのであって、最も相反するように思われるが、マン・マシン・インタフェースにおいて両者の間に密接な関係がある点が興味深い。

4・4 人間感性への接近

——物理情報より感知情報へ——

4・4・1 センサ情報の統合と融合

センサの信号変換は物理法則に強く支配される。必要な情報は信号の中に含まれてはいるが、我々の感覚と直接対応しないことが多く、さらに種々の情報処理が必要である。その処理は通常我々の持つ知識を利用した手続きであって、それによりセンサが収集した情報が構造化されて対象に関する知識となる。

センシングシステムにおける情報処理のデータソースが1個のセンサのみならば、情報量にはおのずから限界がある。複数のセンサあるいは異なる種類のセンサ群をデータソースとして情報の統合や融合を行うことにより高度な感性が持つ知的機能に近づくことができる。

複数のセンサ情報を組み合わせる1個のセンサでは得られない高次の情報を獲得する手法をセンサ情報の統合と呼

ぶ。統合の概念を異なる種類のセンサ情報を含む場合に拡張するとセンサフュージョンと呼ばれるセンサ情報の融合となる¹¹⁾。

4・4・2 視覚情報と聴覚情報との融合

知能化センシングシステムの良いお手本である人間の感覚システムにおいては、視覚情報と聴覚情報とか、視覚情報と触覚情報など複数の異なる種類の情報が巧みに融合されて、より高次の知覚情報を形成している。五感により外界の情報を取り入れる際、情報にあいまいさや欠落があっても感覚センサ群からのデータを相互に補完したり、統合して新たな情報を生み出すことにより外界の変化や複雑な状況を正しく認識する。それを可能とするのは対象に関する知識を利用して異なる情報構造を持つ感覚情報を融合する知的能力である。

たとえば、情景や物体の立体的解析などの場合、複数の視覚情報だけでは容易ではないが、異なる種類の情報の融合が処理を容易にすることは視覚と触覚の組み合わせを思い浮かべると理解しやすい。さらに、視覚と聴覚の融合によりノイズの中から目的の音源を抽出できることなど日常経験するところである。

統合の場合はその処理のアルゴリズムは対象に依存する。すなわち、センサのレベルに近い物理的レベルで処理され、処理アルゴリズムには対象世界の物理的知識が要求される。それに反して融合の場合には、センサの階層より高いレベルでセンサの情報が融合される。そして、対象の構造に関してより抽象的知識が必要とされる。そこで、視覚や聴覚あるいは触覚などの情報構造の相違を大局的に理解することが融合を実現するカギとなる¹²⁾。

ここで、センサフュージョンの研究例を紹介する。

図8は我々が研究を進めつつあるインテリジェントマイクロホンと呼ぶインテリジェント集音システムである。目的の音源の音に相関のある視覚情報を音声信号処理の学習信号に活用することにより、非定常な音声信号の中からでも目的の音声を抽出することが出来る¹³⁾。

4・5 資源リサイクルのための分別センサ

——社会ニーズへの対応——

高次の知能化センサで社会的貢献が大きい例として資源分別センサが挙げられる。

自動化生産技術は社会の発展に寄与したが、原料から製品への工程が主体である。生産だけでなく、使用が済んだ製品や製造過程で発生する廃材から原料へのリサイクルの工程についても、同じように自動化が進められなければならない。生産工程だけが効率化し、省力化されても、リサイクルの工程が非効率、非省力であるためのコストは社会の負担となる。また、資源を浪費し、出てきたごみが環境を汚染している。(図9参照)

リサイクル工程の省力化を進めるためには多様複雑な形状を認識判別するセンサや多数の共存成分の中から特定の

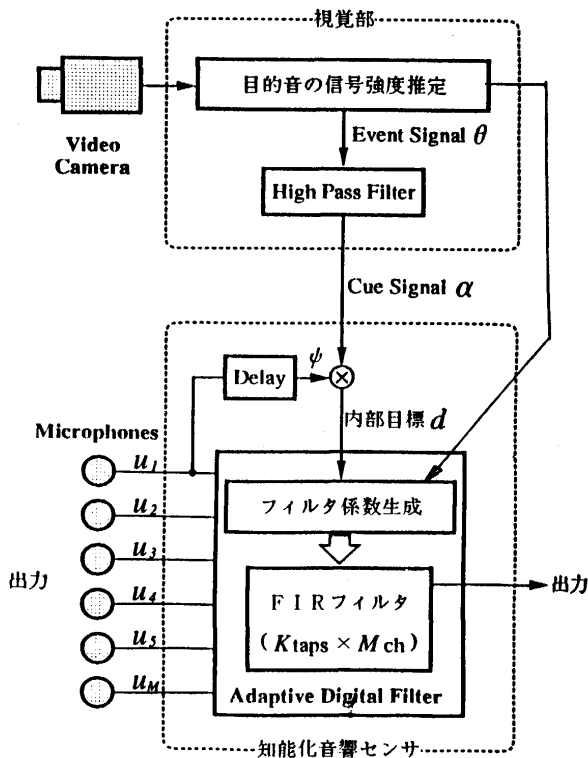


図8 知能化集音システム：視聴覚融合形

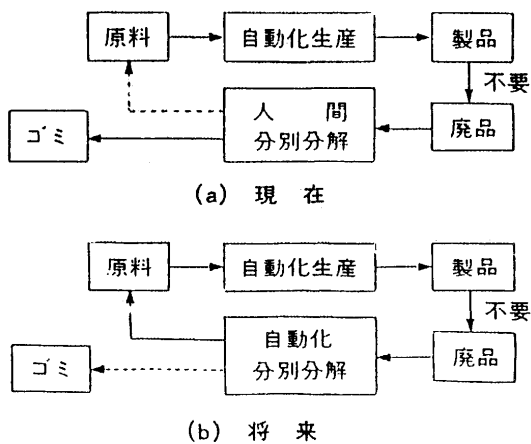


図9 資源のリサイクルの現在と将来

成分を検出する成分センサなど、エントロピーの増加した状態からある秩序にしたがって、必要な対象を判別抽出する新しいセンサが開発されなければならない。

このセンサはエントロピーが増大した状態から秩序を回復すること、すなわち、エントロピーを減少させるのであるから、そこに知能が不可欠なのである。

分別や分解の過程において、人間が総合的に知識と感覚情報とを活用していることを自動化するのであるが、そのためには上位のレベルで構造化された情報を処理できる高度なセンシングシステムの開発が望まれている。

5. 知能化センシングシステムの新しいパラダイム

5・1 知識獲得センサ

——学習センサシステム——

ここまでは対象に関する知識が設計段階で与えられる場合について述べてきた。しかし、海底や宇宙のような未知の空間を移動探索するロボットの場合、環境が構造化されていないのは勿論、地図もなく、抽象的な言語情報もない。環境をいかにして理解するか、そこではセンサからの情報は不十分であり、通常一部が欠落している。また、複数センサの情報を融合するために必要な知識がない。

この場合には多角的かつ部分的情報を構造化し、現有の知識で整理する理解が困難となる。持ち合わせる知識をもとにして、環境からの情報を構造化しつつ知識を増加させる知識獲得能力が必要になる。

このように知能化システムの機能が高度化し、活動領域が拡大するにつれて、センサ情報の統合や融合が重要になり、そのためには対象に関する知識の獲得がさらに必要となる。活動領域が我々にとって未知である領域に拡大すれば拡大するほど、新しい知識の獲得と利用、すなわち、学習能力が必須となる。したがって、それらを具備することにより知能化センシングシステムは真の自律性を実現できる。さらに自律機能が強化されると、関心の対象を自律的に選択し、対象物を背景や周囲から切り分けて必要情報を獲得することになる。

5・2 能動的知能化センサ

——センサとアクチュエータとの統合——

センサの今後の発展で重要なのはセンサ機能とアクチュエータ機能の融合集積化である。触覚は本来その融合を前提としている。センサの能動的な行動により信号処理の負担は大幅に減少するから知能化が容易になる。また、同程度のハードウェアで、よりフレキシブルな機能が実現する。センシングロボットとよばれるような能動的センシングシステムが重要な役割を果たす。

究極の表面形状センサとも言える走査形トンネル顕微鏡 (STM) は正に超精密インテリジェント能動的センシングシステムである。さらに、将来の進歩の趨勢を考えると、能動的センサの知能が高度化し、適応性や自己組織性などを具備し、また、固有の知識ベースと知識獲得機能とを持つ。また、ニューロコンピュータとも接続されよう。このようにインテリジェントセンサは生体のセンサに一層近づく方向に進歩していくことになろう。

外部	知能化センシングシステム—知能化マンマシンインタフェース—				人間
現象の世界	知能	符号の世界	知能	五感	認識の世界

図10 異質の世界を整合する機械の知能

6. むすび

6・1 知能化センシングシステムの知能への期待

センシングシステムの知能への期待を抽象的に述べると次の2点に集約できる。

- [1] 物理の世界と符号の世界との整合
- [2] 人間の知の世界と符号の世界との整合

前者はセンシング情報処理過程における情報機械の符号の世界と物理法則が支配する物理現象の世界とのインタフェースであり、後者は符号の世界と人間の認識や思考が関係する知の世界とのインタフェースである。両者に共通していることは異質の世界の間の規範や論理の差異を整合すること、そして結局システムの能力を高度化し、人の負担を軽減できるように人間を支援することである。そこに、今後大きく期待される知能化機械の知能の重要な役割がある。(図10参照)

6・2 新しいパラダイムの確立と知能化センシングシステムの本格的実用化

知能化センシングへの要求機能が高度になって、ボトムアップ的なアプローチの限界が見えてきた。今まで述べたように、これからの高度な知能化センシングシステムを構築する過程は物理的なレベルから積み上げて上位のレベルに近づく方式ではない。

システムの使命により、より下位の機能が定められ、その機能により、また下位の機能が定められるようなシステム構成、表現を変えると、上位の知識がブレイクダウンされて、情報構造が定まり、それが下位の情報構造を規定するトップダウンのプロセスである。それと同時に、上位の知識が下位から得られる情報により構造化され、モデルがより精緻になる様な柔軟なシステムでなければならない。

また、情報処理が下位ほど分散化する求心的構造が合理的である。このようなセンシングシステムのパラダイムの確立がこれからの数年間に明確になってくるのではないだろうか。それにともない、人間生活のあらゆる局面において知能化センシングシステムが活用され、人間の機能の一部を代替して、われわれを支援するヒューマンフレンドリーな機械となることであろう。

文 献

- 1) R.A. Breckenridge and C. Husson : Smart Sensors in Spacecraft, The Impact and Trends, Proc. AIAA/NASA Conference on Smart Sensors, Hamton, (1978), p.1
- 2) 山崎弘郎：センサの集積化と知能化(山崎編)インテリジェントセンサ, コンピュートロール No.21, (1988), p.2
- 3) S. Sugiyama et al. : Integrated Piezoresistive Pressure Sensors with Voltage & Frequency Output, TRANSDUCERS '83, (1983), p.115
- 4) W.H. Ko et al. : Capacitive Pressure Transducers with Integrated Circuits, Sensor & Actuators, 4 (1983), p.403
- 5) I. Lauks, J. Van der Spiegel, W. Sansen and M. Steyaert : Multispecies Integrated Electrochemical Sensor with On-chip CMOS Circuitry, Digest of Technical Papers, TRANSDUCERS'85, Philadelphia, (1985), p.122
- 6) R. Muller and E. Lange : Multidimensional Sensor for Gas Analysis, Sensors & Actuators, 9 (1986)1, p.39
- 7) A. Ikegami and M. Kaneyasu : Olfactory Detection Using Integrated Sensor, Digest of Technical Papers, TRANSDUCERS'85, (1985), p.136
- 8) Y. Hiranaka and H. Yamasaki : Envelope Representation of Pinna Impulse Responses for 3-dimensional Localization of Sound Sources, J. Accoust. Soc. Am., 73 (1983)1, p.291
- 9) 異状の検出と予知, センサと設備診断技術(山崎弘郎編), (1988), p.1 [工業調査会]
- 10) 山崎弘郎：SICE産業システムシンポジウム資料集, (1989), p.1
- 11) センサフュージョン—実世界の能動的な理解と知的再構成—(山崎弘郎, 石川正俊共編), (1992), p.1 [コロナ社]
- 12) 高橋弘太, 山崎弘郎：計測自動制御学会論文集, 27 (1991), p.276
- 13) K. Takahashi and H. Yamasaki : Self-Adapting Multiple Microphone System, Sensors & Actuators, 22A3 (1990), p.610