



新しいセンシング技術

山 崎 弘 郎*

Recent Development of Sensing Technology

Hiro YAMASAKI

1. 計量から認識へ

最近の計測技術の進歩を概観すると、対象の拡大、手法の多様化が著しい。その中で、鉄鋼の生産に関連するものに話題を限定すると、点の計測から面の計測、別の表現では一点の状態量の計量から状態の認識へと展開しつつあると行うことができよう。

鉄鋼業における計測と制御が熱管理から出発して、漸次品質計測とその制御へと領域を拡大した。その品質管理は点の管理から面の管理へと進展してきた。最近では炉況や設備の劣化、製品の内部傷など目に見えない状態についての情報が重要視されるようになってきて、数学モデルが確立した物理量の計量から五官で感じられない状態の認識へと対象が拡がりつつある。

本文では、計測の技術の進歩発展の中でこのような側面に光を当てて、その一端を述べてみたい。実は、この方向で計測技術を記述しようとする、現在のセンサ技術の問題点を述べることになり、つぎに、それらの問題点を、新しいセンサデバイスの開発およびシステム化により克服しつつあるセンシング技術のプロファイルを記すことになる。

2. センサ技術の問題点

センサ技術の進歩を評価する規準は人間の五官とするのが自然であろう。本来、センサは人間五官の機能を単能化して置換するだけでなく、拡張発展させるために技術化したものに他ならないからである。

現在のセンサ技術は空間的に1点の物理量を正確に測定することに関しては、精度、測定範囲ともに五官より優れている。

熱電対や測温抵抗体により液化ガスの温度から溶鋼の温度まで ± 1 度の精度で測定することは困難ではない。常温付近ならば、 $1/100$ 度の変化を検知することは容易である。我々の触覚の中に温覚があつて、額に手をあてて 0.5 度程度の差は識別できるが、測定範囲は非常に狭い。

光のセンサも各種そろつていて、1点の光の強度を測るだけならば感度が我々の眼と同等であるし、眼が感じない赤外や紫外線にも高い感度をもつものがある。音波についても同様である。

ところが、対象が1点ではなく、空間的に広がりをもち、しかも状態が時間的にも変化するととなるとセンサの優位性がゆらいでくる。1点の光の強度ではなく、表面のきずや塗色のむらとなると人の眼より検出能力が劣る。

1本のパイプの中を流れる流体の流量やタンク内の液位を正確に測定することは容易だが、パイプやタンクのどこかで発生する液体の漏洩を検知するととなると容易ではない。漏洩はどこで発生するか予測することは困難であるし、パイプやタンクという閉じた空間の境界を横切つて流れる流量を正確に測定することはさらに難しい。

漏洩となると人間の五官でも容易ではない。それだけに良いセンサが望まれているが現状では困難なのである。

我々の五官を始め、生体の感覚は正確な計量は不得手だが、生体の環境空間の状況に関する情報をすみやかに収集し、状態を認識することは得意である。

環境に関する情報の主たる関心は正常か異常かのみに関する場合が多い。状態は計量値で示されるよりは異常の有無でだいたい十分なのである。

動物は我々をも含めて波動を利用したり、場の性質を利用して環境の情報を収集している。また、特定の成分に高い選択性をもつ嗅覚あるいは味覚センサにより、物質の拡散現象を利用して広域にわたる物質情報を得ている。現在のセンサ技術の弱点を克服するために行われているセンシング技術の開発を述べようと思う。

以下、この方針に沿つて記述を進めていくと、機械的に“かたい”構造の典形例である光学系が“やわらかさ”をもつ波動信号処理システムに変身しつつある動向を述べることになる。そして、そのシステムが電子的信号処理技術と有機的に結合して新しいセンシング技術の重要な部分を形成することを強調したい。

昭和 59 年 1 月 6 日受付 (Received Jan. 6, 1984) (依頼解説)

* 東京大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku 113)

3. センシング技術の進歩

センシング技術の進歩はつぎの二つの方向に集約される。

- (1) 新しいセンサデバイスの開発
- (2) 新しいセンサシステムの構築

(1)の方向の開発では点状のセンサデバイスに代わつて、線状のセンサアレイ(1次元センサ)や面状の情報を収集するイメージセンシングデバイス(2次元センサ)が開発されている。このような1次元、あるいは2次元センサの開発により形状計測技術やパターン認識技術の実用化が飛躍的に発展した。

光ファイバをセンサデバイスとして使用すると一種の1次元センサであり、ハイドロフォンや温度センサ、ねじれセンサなどの応用が発表されている。

光ファイバ・ジャイロは軟らかい光学系により創成された新しい計測法である。

酵素や微生物のセンサの固定化技術が開発されて酵素センサや微生物センサが実用になりつつある。これらは液中の特定成分の検出に効果を発揮する。

ガスセンサに関する話題を探ると、セラミックスの表面現象を利用したガスセンサが実用になっているが、選択性についてはいまだ十分ではない。

トランジスタ、ICの製造技術を背景にした微細加工技術は半導体上に異なる機能を集積したり、超小形のセンサデバイスを可能にした。センサはそれ自体小さいということで新しい応用領域が開ける。また、センサのインテリジェント化への最短のアプローチでもある。

新しい計測用材料として形状記憶合金が注目されている。センサとアクチュエータの一体化したデバイスが可能になる。これも異なる機能が集積化した例である。

(2)のセンシングシステムの構築において、センシングシステムではセンサデバイスと信号処理機能とをより有機的に結合して、デバイスのハードウェアそのものは従来と変わらなくても新しい機能の創出を目指す。

本来、システムは特定のミッションを実現するニーズがあつて構築されるのであるから、現時点では前述のセ

ンサ技術の弱点を克服する意図をもつ場合が多い。すなわち、計量よりは状態の認識を目的としたもの。1点の物理量の測定ではなく、多次元化、知能化を目的としたシステムが構築されている。

つぎにこれらの中からいくつかの具体的な話題をとりあげつつ最近の進歩を示そう。

4. イメージセンサデバイス

4.1 センサアレイ

センサアレイとはセンサデバイスエレメントを1次元に配列したもので、1個のエレメントでは得られない空間的ひろがりを持つ対象の情報を得る。2次元画像情報を得るためには光学的あるいは機械的に配列方向と垂直方向に走査する。

図1に示したのはフォトダイオードリニアアレイであつて、フォトダイオードをセンサデバイスエレメントとして直線上に配列してある。多いものでは4096個あるいはそれ以上まで実用化されている。

フォトダイオードの出力はシフトゲートを経てCCD(charge coupled device)シフトレジスタに加えられ、それにより時系列電気信号に変換される。奇数番目のフォトダイオード素子の出力は下側、偶数番目の出力は上側のシフトレジスタに加えられ、さらに出力ゲートを介して外部に取り出される。このセンサアレイはファクシミリなど送信文書の読み取りに使われている。

次に同様な線画像を電気信号に変換するセンサアレイであるが、図2に示したデバイスはカメラのフォーカスセンサである。A, B, 2列のそれぞれ48個のフォトセンサアレイとそれぞれセンサに接続されたCCD 2系列からなる。センサの上に開口した24個のマイクロレンズアレイを通して撮影レンズ(対物レンズ)のA点およびB点を通じた光線をそれぞれAアレイ, Bアレイのフォトダイオードに入射させ、それをCCDにより時系列電気信号に変換する。そして、両アレイの出力の位相から焦点の状態、(いわゆる前ピン, 合焦, 後ピン)を求めるのである。説明するまでもないが、合焦状態では両出力が一致する。

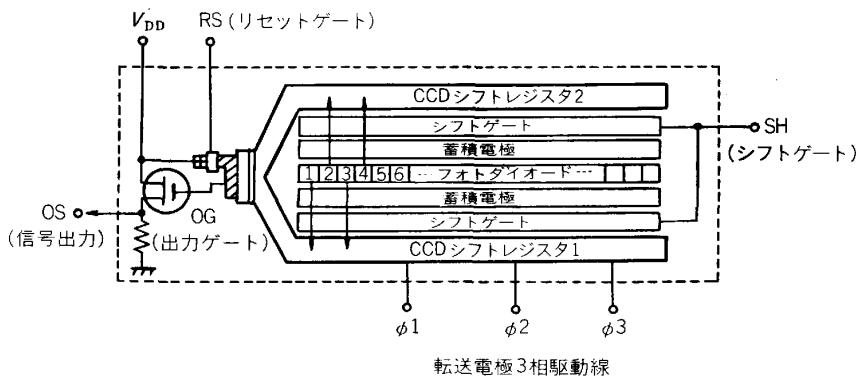


図1 フォトダイオードリニアアレイ

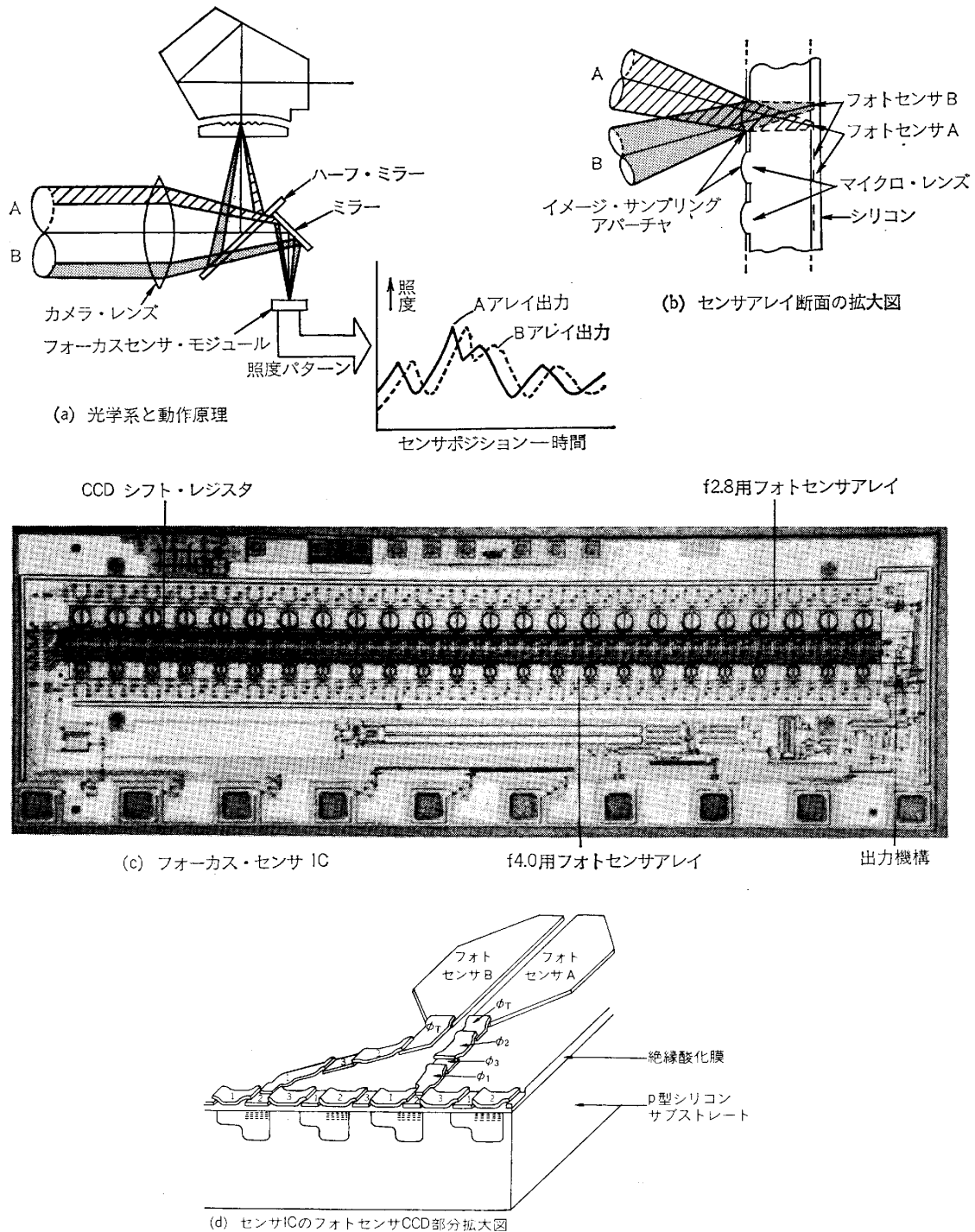


図 2 フォーカス・センサ¹⁾

このフォーカスセンサデバイスはp形シリコン基板の上にフォトセンサ、CCDなどが集積されたICとして作られている。

レンズ交換してもつねにフォーカスの状態を知る1眼レフカメラのために開発されたものであるが、ロボットの視覚にも有用と期待される。

4.2 センサマトリックス

図3は2次元イメージセンサデバイスであり、フォト

センサがマトリックス状に配置されている。したがって、光学系を経てこの上に結像したイメージを機械的走査をせずに電気信号に変換できるからテレビカメラの撮像管(イメージオルシコンなど)に代わって、ITVカメラやビデオカメラに使われている。

フォトセンサの出力をとり出す方式として、行または列ごとにCCD方式で取り出す電荷転送方式と行および列それぞれ座標を指定して読み出すXYアドレス方

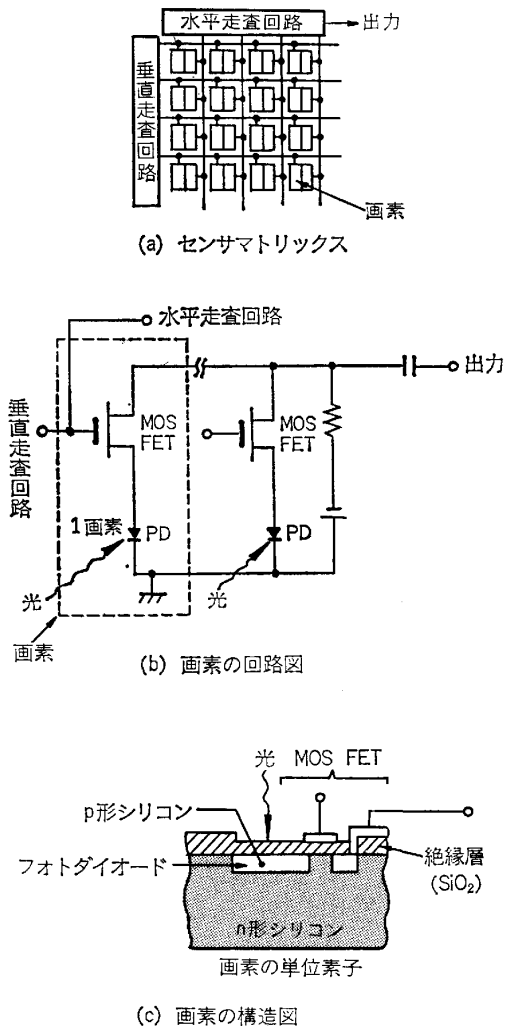


図3 2次元イメージセンサデバイス—XYアドレス方式MOS形イメージセンサ—

式とがある。

図3は後者のXYアドレス方式のMOS形イメージセンサである。フォトダイオードがMOSFETのソースに接続されている。FETのドレインは出力回路に、ゲートは走査回路に接続されていて、XおよびYの走査回路で指定されたアドレスの1個のFETが導通してフォトダイオードの電荷を出力する。分光感度特性は可視域にあつて、表面にカラーフィルタを設けた素子はカラー画像センサとしてビデオカメラに使われている。

5. 光ファイバ応用センサ

光ファイバを信号の伝送路として使用すると同時に、軟らかい光学系として、光学系の特性(光路長、屈折率の空間分布など)がファイバ周辺の状況に依存することを利用して線状の1次元センサを実現することが試みられている。

図4は光ファイバ・ジャイロである。時計回りと反時計回りにファイバ・ループを回つた光が受光部で干渉する。全体が角速度 ω で回転すると両方の光の径路の光路

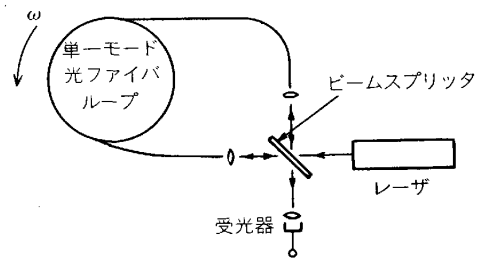


図4 光ファイバレーザジャイロの基本光学系

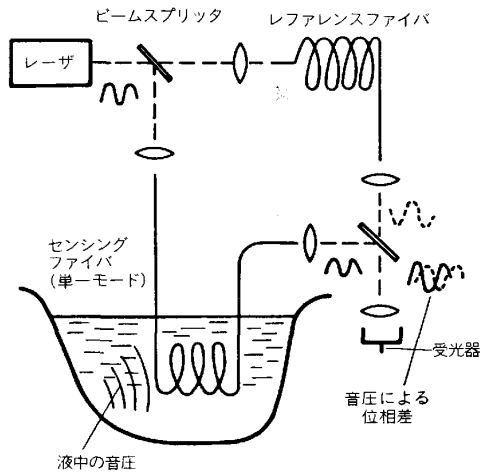


図5 光ファイバ・ハイドロホン

長に差が生ずるので干渉縞が移動する²⁾。

図5はハイドロホンであつて、ファイバ周辺の圧力変動により屈折率が変化して光路差を変化させるのである³⁾。

光ファイバからなる2光路があり、単一モード光ファイバを一方を測定する水中に入れ、他はリファレンスとして信号を加えない。これらはマツハツエンダ干渉計を構成している。

ファイバにもよるが、長さ1mのファイバに1Paの圧力を加えると、およそ 10^{-4} radの位相差が生ずるといふ。温度や音圧以外の機械的衝撃の影響があるので対策が必要である。

温度の影響を逆に利用して図6に示すような温度センサができる。被覆が除去されたファイバの場合には温度変化と位相変化との間に次の関係がある。

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta T} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{n}{L} \frac{dL}{dT} + \frac{dn}{dT} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $\Delta\varphi$: 位相変化、 ΔT : 温度変化、 L : 温度変化を受けるファイバの長さ、 n : 屈折率、 λ : 波長

(1)式の右辺第1項は熱膨張による項、第2項が温度による屈折率の変化による影響を示す。実験によれば、 $L=12$ cm、 $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ で 10.8 rad/deg の感度が得られたという。被覆があると感度が数倍に増加する⁴⁾。

このほか、光ファイバを利用したセンサとして液面センサや油もれセンサがある。前者はコアの端面が円錐状

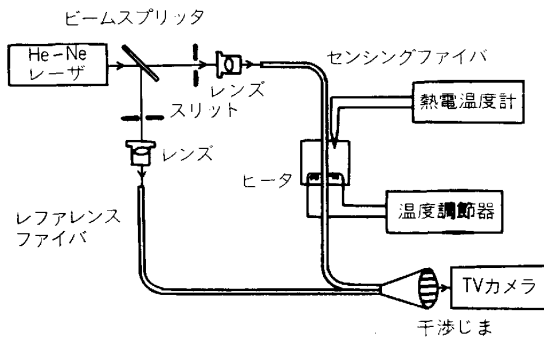


図 6 光ファイバ温度計の実験例⁴⁾

になつていて、円錐面で全反射するようになつてい
るが、液が円錐面に付着すると光は液中に入つて反射光が
なくなるのを利用する。

後者はクラッドに親油性の材料を使用し、漏洩した油
が付着すると膨潤してクラッドの屈折率が増加し、光が
クラッドから外へ漏れることを応用したもので、直線状
の監視領域を同時に監視することができる点が面白い。

ここに紹介したファイバ応用センサはいずれもファイ
バ自体をセンサの機能素子としているので、点の状態の
検出から特定の一次元の線にひろがり、検出空間を拡大
することができる。しかし、その反面、いろいろな物理
量を感じてしまつて選択性に乏しいのが問題である。

6. イメージ・センシング・システム

6.1 合成開口方式センシングシステム

4において述べたイメージセンサデバイスは適当な光
学系を使用して対象をアレイあるいはマトリックス状に
配列されたセンサエレメントに結像させる。分解能は光
学系の特性かアレイにおけるセンサエレメントのピッチ
で定まるが、多くの場合は後者で支配される。

つぎに光学結像系をもたないで、アレイ自体が結像系
の一部を構成する場合がある。その1つは波長の波長が
長いために光学系の形成が困難な場合である。

よく知られているように、光学系の分解能は開口径と
波長の比で定まる。したがつて、波長が長いと必要な角
度分解能を得るための開口径が大きくなる。口径 20 cm
程度の反射形光学望遠鏡は天体望遠鏡としては高分解能
とはいえない。しかしながら、1 GHz 程度の宇宙電波
を受信する電波望遠鏡で上の反射望遠鏡と同じ分解能を
実現しようとする、直径 100 km のパラボナアンテナ
が必要になり、到底実現できない。

航空機や人工衛星に搭載するレーダの分解能も、同様
に搭載できるアンテナの大きさで分解能が制約される。

このような問題を解決し、小口径のアンテナで高い分
解能を実現するのが合成開口センシングシステムであつて、
センサとコンピュータとが有機的に結合して等价的に大
きな開口径を実現し、高分解能を得ることができる。

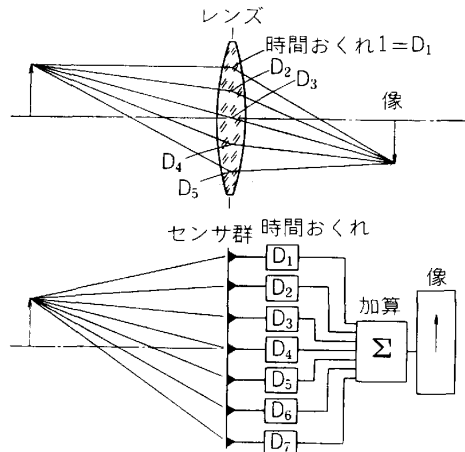


図 7 合成開口方式センサアレイによる結像系の原理

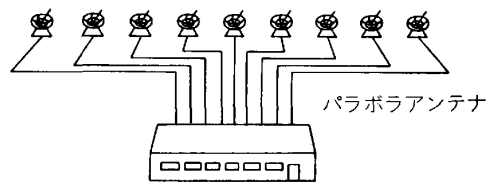


図 8 合成開口方式電波望遠鏡

そこで多次元センシングシステムの例としてこのシス
テムの原理と構成を述べる。小形のアンテナ、ここでは
点状のセンサデバイスに相当するのだが、図7のように
個々のアンテナの出力信号を異なる時間遅れ $D_1 \sim D_7$ を
加えて加算するシステムを考える。同図で示した凸レン
ズでは光軸に近い肉厚の部分は時間遅れが大きく、周辺
の薄い部分は遅れが小さいので波面が曲がることにより
像を結ぶ(屈折)。これはレンズの各部分を通る光線の
伝搬時間が等しくなるように時間遅れを加えて加算して
いるとみなすことができる。

レンズでは時間遅れの空間分布が連続的に変化してい
るのに対して、アンテナ系では不連続である点が相違し
ているが、基本的な機能は変わらないし、分解能も同様
である。

小形のアンテナを広い範囲に配列して、その位置に応
じて時間遅れを配分すれば、アンテナが存在する範囲に
対応した大きさの開口が合成される。そしてそれによつ
て電波望遠鏡も高い分解能が得られるのである。

図8はリニアアレイ形の合成開口形の電波望遠鏡を示
した。1個のパラボラアンテナをセンサと考えることが
できるから、最大のセンサアレイと言えるであろう。開
口径が数 km のものが作られている。

航空機や衛星に搭載したアンテナの場合は、対象が静
止していると仮定して、複数の位置で電波の送受信を行
う。図9に示すように電波を送信し、反射波を記録し、
飛行した範囲の開口を実現する。

合成開口方式で時間遅れを配分して信号を加算する役

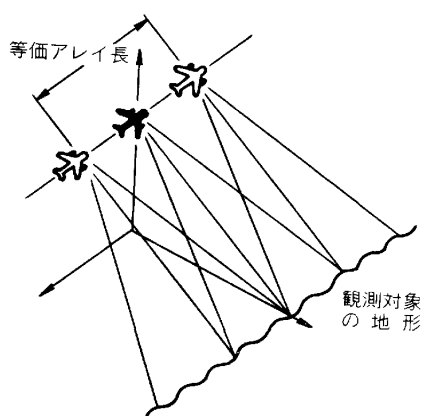


図9 合成開口レーダの原理

割を果たしているのはコンピュータであつて、結像系の一部を構成しているとみなせる。

結像系の焦点を定めたり、光軸の方向を変化させるのはコンピュータで、しかもソフトウェアで変えることができる。すなわち、これも、この小文の中で繰り返し述べている軟らかい光学系の一つに他ならない。

また、コンピュータの上記の処理を並列処理で実行すれば、複数の点に同時に焦点を合わせるといった通常の光学系では考えられないことが可能である。

合成開口センシングシステムにおいては、個々のアンテナ、すなわち、センサデバイスは分解能が乏しいか、1点における波動場に応答するにすぎない。しかしながら、多数の配列と巧みな信号処理により、空間的なひろがりをもつ対象について空間分解能の高い像が得られる点がこの技術の特徴である。そして、それは現在のセンサ技術の問題点を克服する有力な手段と思われる。

合成開口技術はレーダや電波望遠鏡だけでなく、超音波映像装置に使われ始めた。医療用映像装置の画質が大幅に向上する可能性が出てきた。

我々の研究室でも合成開口技術を応用したソナーの研究開発を進めており、海洋の音響波を利用したトモグラフィーを目標としている⁹⁾。

さらに光学系において画質を劣化させる収差が問題になる。合成開口映像系では、波面の形が既知である平面波や球面波を使用して校正すれば、個々のセンサの特性変動や位置のずれなどをコンピュータで数値補正できる。すなわち、収差の補正もコンピュータで行うのである。

このように合成開口形の多次元センシングシステムは1つのインテリジェントセンサとみることができる。

6.2 知能化センシングシステム

知能化の意味はいろいろと考えられるが、加えられた信号を別の物理量に変換するだけで、知能をもたないセ

ンサデバイスをコンピュータの知能で補強して、より賢い計測を行うことを目的としている。

すなわち、センサ自身の機能の自己診断や測定条件の最適化、ノイズの弁別などを知能を利用して実行する知能分散形システムである。

例えば、超音波の反射波の到達時間で液位を測定する場合を考えてみる。正常な反射が受信される時間以外に別のパルスが入った場合、液面のように積分性の量が急変することはないという「一種の常識」によつて、そのパルスをノイズとして無視する。ローパスフィルタによる信号の平滑化と異なり、ノイズは全く影響しない。また、反射波の到達時間が長いときはパルスは減衰するので増幅器の利得を増す。

7. む す び

めまぐるしく進歩と変化を続ける計測技術の多様な様相の中から、未来の方向を端的に象徴するものとして「計量から状態の認識」の傾向をとりあげた。

その傾向の具体例として点の測定量より多次元状態をイメージとして把握する光学的手段による測定を主としてひきあいに出した。

従来、光学系は工学的機構として非常に「かたい」構造をもつものの代表であつた。生体の視覚システムの光学系は反対に軟らかい光学系をもっている。レンズの曲率を変えたり、屈折率分布を変化させて焦点を調節する。

本文でとりあげた光学系は光ファイバを始めとして軟らかい構造を特徴とする。

軟らかい光学系を実現することが、現在のセンサ技術の問題点を解決し、状態の認識という新しい要請にこたえる有効な過程であることをいくつかの例で示した。

計測技術全体からみると、著者の視点はかたよつていられるかもしれないが、一つの新しい見方として参考になれば幸せである。

文 献

- 1) 島 正雄: Savemation Review, 1 (1983) 2, p. 2 [山武ハネウェル(株)]
- 2) 保立和夫, 東口 実, 丹羽 登: 計測と制御, 20 (1981), p. 937
- 3) 久間和生, 布下正宏: 電気学会誌, 102 (1982), p. 36
- 4) 鳥羽栄治, 伊藤茂男, 大塚 智, 沢路雅夫: 計測自動制御学会第 21 回学術講演会予稿集 (1982), p. 213
- 5) 山崎弘郎, 田村安孝: 海洋計測研究会論文集 (文部省科学研究費, 特定研究 海洋の動的構造に関する基礎研究) (1982), p. 30