

光応用センサの展望

Outlook on Optical Sensor Technology

矢部 正也 * Masaya Yabe

I. まえがき

光ファイバケーブルを用いた光通信と光データ伝送は既に実用化され、その基礎技術はほぼ確立されたと見られる。残されているのは伝送速度(伝送容量)、中継距離、軍用等の極端環境への適用性などの追求とコストの大幅低減とであろう。

一方、検出手段として光信号を直接に利用する計測を光ファイバ伝送路を介して遠隔から行う計測技術(これを光応用遠隔計測技術とよぶことにする)はまだ揺籃期にあり、実用化されたものは極めて少ない。また、実用化されたものも非常に単純な機構の単体計測器のようなものに限られており、本格的な計装システムとして実用化に至ったものはまだほとんどないのが実態であろう。確かに光ファイバ信号伝送技術は、光データリンクから光データハイウェイまで鉄鋼や電力のプラント制御とか、鉄道の集中監視・管理システムなどの分野に浸透してきたが、光を媒介として各種工業計測量を変換して情報化する技術は最近ようやく研究開発が本格化し始めた段階である。これまでの光通信に偏った技術だけでは、工業計測上の要求を満足できる光応用遠隔計測システムをつくることはできない。このようなシステムの機能、性能、信頼性、経済性をユーザの評価に耐えるものとするには、なお技術面の革新と蓄積による高信頼化、適用効果の明確化、価格の低減が必要であり、これに用いる検出素子の研究開発は、その構成のアイデアの実験室的検証に比して、その後続く実用化開発のウェイトが大きい。

最近光ファイバ自体も長尺の石英系画像ファイバとか定偏波ファイバといった工業計測・監視を目的としたものが、高価格という点は別としても、利用可能になってきた。こうした動向は光応用遠隔計測技術の進展に少なからぬ寄与となるのであろう。

また、通商産業省工業技術院の大形工業技術研究開発プロジェクトの一つとして「光応用計測制御システムの研究開発」が8か年計画として昭和54年度から行われており、(株)富士電機総合研究所ではその要素技術の研究開発の一部を委託研究として実施しているが、この計画は工業分野での光応用技術の展開における種々の課題の解決に大きなインパクトをもたらすものと考えられる。

このような背景のもとに、富士電機は光応用計測制御

技術の研究開発に大きなウェイトを置いている。そこで、光応用センサの課題を展望しつつ、富士電機のこの分野での研究開発活動の一端を紹介したい。

II. 光応用センサとその課題

1. 光応用センサの原理と構成

光応用センサの構成には第1表に示すようないろいろの形があるが、観測対象物体の放射・散乱する光を受光するだけの放射光受光形(A)の構成を除けば、電気→光変換器の光源を出た励起光又は搬送光を受けたトランスデューサ部は、それらを検出量の大きさに応じた信号光又は変調光に変えて測定する構成となっている。トランスデューサ部は被検出量の光学量への変換を直接に行う直接形と、介在変換機構を用いて間接的に行う間接形

第1表 光応用センサの信号検出方式

Table 1. Structural concepts of optical sensors

分類	構成	例
A. 放射受光形 (光ファイバ励起形を含む)	信号光→ O/E	イメージファイバセンサ 赤外放射温度センサ (放射線量ファイバセンサ)
B. 光励起形	励起光← E/O 信号光→ O/E	蛍光励起温度センサ
C. 搬送光変調形	搬送光← E/O 変調信号光→ O/E	光ファイバ音響センサ 光ファイバ力/圧力センサ
a. 自己変換形		
b. 介在変換形		
1. 直接形		
(1) 対ファイバ形 (透過, 反射)	搬送光← E/O 変調信号光→ O/E	バイメタル光温度センサ 複屈折光温度センサ 光ファイバ変位センサ
(2) 単ファイバ形 (反射)	搬送光← E/O 変調信号光→ O/E	同上
2. 間接形		
(1) 純光形	搬送光← E/O 変調信号光→ O/E	タービンチョップ流量センサ カルマン渦光流量センサ
(2) 電光混成形		
① 光電駆動形	搬送光← E/O 変調信号光→ O/E 光源	
② 電池駆動形	搬送光← E/O 変調信号光→ O/E 電池	
③ 光ファイバリンク形	指令光← E/O 信号光→ O/E 電池	デジタルセンサ

(注) ◁ 放射光, 像光, → 光以外の作用

○ 非光トランスデューサ, □ 光応用トランスデューサ, ⊠ 励起発光体

* (株)富士電機総合研究所 調査室

第2表 光応用センサの変換原理の例

Table 2. Typical principles of transducer for optical sensors

計 測 量	変換原理・検出機構	材料・部品	検出量
温 度	熱膨張変形による光路の絞り, 偏向, 遮断	バイメタル, 水銀柱, 光てこなど と光ファイバ対	光強度, 光有無
	熱応力複屈折	透明等方弾性体	偏光, 色
	複屈折, 屈折率, 透過率の温度変化 蛍光発光の温度依存性	一軸結晶, ガラス 蛍光体	偏光, 干渉強度 発光強度, 発光時定数
力, 圧 力	応力複屈折 光ファイバコア応力複屈折	透明等方弾性体 光ファイバ, 加歪デバイス	光強度 光強度
流 量	光の回転断続	タービン式光チョッパ	パルス光周波数
	渦振動による光変調	カルマン渦振動体	変調光周波数
	光ドップラー効果, ビート検出	干渉計	光ビート周波数
液 位	光ビーム遮断, 吸収	発・受光対, アレイ	光有無, 光強度
	液浸漏光	U字光ファイバ, コーナキューブ	光強度(二値)
濃 度	ホトルミネセンス	励起光源	光強度
	液体屈折率, 吸収	光ビーム系	偏光, 光強度
湿 度	吸湿伸縮体	光てこ	偏向
	結露散乱	鏡面	光強度
濁度, 塵濃度	紫外/可視光ビームの散乱率	光ビーム系	散乱光強度
振 動, 音 響	振動体光変調	共振子	変調周期
	光ファイバ応力複屈折	光ファイバ, 干渉計	光ビート周波数
磁界 (電流)	磁気旋光(ファラデー効果)	常磁性/反磁性ガラス	偏光(光強度)
	磁気複屈折(コトン・ムートン効果)	透明体	偏光
	磁歪膜駆動光ファイバ複屈折効果	磁歪膜コード光ファイバ	モード変化, 光強度
電界 (電圧)	電界誘起複屈折(ポッケルス効果)	透明誘電体結晶	偏光(光強度)
	電界誘起光吸収(フランツ-ケルディシュ効果)	GaAs	光強度
放 射 線	蛍光シンチレーション	蛍光ファイバ, シンチレータ	発光パルス計数
	放射線損傷光吸収	Ge 添加光ファイバ	光強度(累積吸収)
回 転 角	サグナック効果	リングレーザ干渉計	干渉じま
	光エンコーダ	コード板	コード信号光
速 度	ストライプ状反射体の光点走査	ストライプ反射体	光パルス数/単位時間

とがある。後者の場合、介在変換機構の駆動エネルギーとして光電池又は電池を用いる電気-光混成形もある。また、トランスデューサ部は純電氣的で、光ファイバは単なる光リンクの役しかしていない光ファイバリンク形もある。

第2表は、光応用センサのトランスデューサの代表的な変換原理と検出機構について概略を示している。トランスデューサとして光ファイバ自体を用いる場合は、光ファイバセンサとよぶのにふさわしい。その他のものは、物質の光学物性を用いる物性形と機械的メカニズムを用いて光を変化させる機構形とである。

第3表は光応用センサの信号検出の方式についてまとめたものである。計測系にとってはデジタル検出が最も望ましいのであるが、光応用センサではダイナミックな系(例えばタービン流量計)を除けば実現はなかなか難しい。アナログ検出では光の強度か干渉じまに変換して検出するため、光源強度の変動、光ファイバ伝送系の光損失の変動及び光学的ノイズ(導波モード、位相などの変動)に対する補償が不可欠である。二値変

換方式は光信号の有無だけによるもので、単純であるが実用的には構成が容易で有効性が高く、それだけでシステムを作ることも可能である。

センサは原理と構成ができるだけ単純で、製作・補償・調整が容易で、堅牢で高い信頼性が容易に実現できるようなものが良い。光応用センサでもそのとおりなのであるが、光学部品の耐環境性や堅牢性については解決しなければならない点が多々ある。

2. 光応用センサの特質と課題

第1表、第2表及び第3表に示したように、光応用センサの構成、変換原理、検出機構、信号検出方式は多種多様であるが、これらの中で実用になるものは、機能特性と耐環境性を含めた信頼性と用途相応の経済性が実現できるものに限られる。しかも、在来のセンサの限界の克服、あるいは新しい計測手段の実現ができることにより、適用対象システムの高度化に大きく寄与できるものでなければならない。

在来のセンサによる計測技術も、永年の積み重ねと最近のエレクトロニクスの深化によって、それなりに洗練

第3表 光応用センサの信号検出方式

Table 3. Principles of signal detection for optical sensors

検出方式	変換方法	変換デバイス	検出信号
二値変換	光路の開閉, 偏向	光スイッチ	オン/オフ
デジタル変換	パルス化	スリット列, しま状反射体	パルス列
	光コード化	光エンコーダ	BCDコードパルス
セミデジタル変換	光路の周期的断続, 偏向	光チョッパ	パルス幅, 周波数
	光の周期的変調	振動形変調器	周波数, 周期
	時定数のパルス幅変換	励起発光体	パルス幅
	光路位相差	干渉計	干渉じま計数
アナログ変換	光路位相差	エタロン, 平行スリット列	干渉色, 干渉光強度
	複屈折	偏・検光子	偏光角, 検光強度
	光の減衰	フィルタ, 絞り	光の相対強度

されてきたものなので、光応用センサをそれに対して代替的に使うには、相応の極めて強力な理由がなくてはならない。いずれにせよ、特にこれを適用するシステムの信頼性と保全性に不安を与えないこと、在来の方式に比べてその使用が全体的に優れた経済的効用をもたらすことなどが要求される。光応用センサの開発と適用においてはこれらの点を十分に配慮しなければ、実りのあるものをつくり出すことができない。しかし新しい技術なので、使用材料からデバイス、更にシステムに及ぶ多くの課題を抽出しつつ克服して行くことが必要であって、それによって実用性の根底を築くことが今日の課題である。それゆえ、巧妙なアイデアの創出とともに、地道な要素技術の形成が要求される。

光応用センサシステムの課題の大きな部分を成すものとして、導光路の継目の部品（光ファイバコネクタ、光の分岐・合流、分波・合波、結合、切換などの部品）のコストの大幅な低減を実現する技術への挑戦がある。計装用途では「継目」の使用量が大きく、システム構成に占めるそのコストの割合は非常に大きく、光応用計測の実用化上の大きな隘路となっている。

アナログ方式の光応用センサの構成においては、このような継目を含めた光導波系の安定性が重要で、光の伝搬モード分布や位相の安定性をいろいろな環境条件変化に耐えて確保できる系としなければならない。

光素子・部品の特質は、その機能特性やノイズ発生が光の波動性の効果として直接的に現れることである。それは、元来、光部品が光ファイバも含めて光の波動性が反映されるような寸法精度で製作されているからである。この寸法精度の制御性はまた光部品のコストの決定要因でもある。

デジタル方式の光応用センサではこのような点の問題は非常に軽減されるが、その可能性は、トランスデューサがタービンチョッパ流量センサのように光パルス信号の発生に必要なエネルギーを自給できて、パルス周期

からセミデジタルに測定できる場合を除くと、デジタル光信号形成にはエネルギーの供給とアナログ-デジタル変換機構が必要である。それを光だけで実現するには限界があり、多くの場合、光-電子混成系とならざるを得ない。

光応用センサは、上述のように、光の波長の程度の寸法の精度と安定性がしばしば要求され、また光学系の全体的な安定性のために衝撃、振動、熱膨張、光学定数の温度変動などに対する耐性が要求される。その上、野外や温度の急変する環境下では、結露・結霜・ちり付着・雨水に対する保護も実用上不可欠である。

光応用システムの防爆性を利用する用途でしばしば問題にされるのは、制御操作系に必要な操作力とその駆動エネルギーの供給である。それは、光による操作エネルギーの供給は実用性が低いため、多くの場合ソレノイドやモータに安全防爆装備を施して使用されていることよっている。空気圧を操作端駆動エネルギーとして使用するには、電気的アクチュエータを安全区域に置いて、空圧配管を経由して操作端を駆動することになる。それに伴い、作動遅延時間などの問題も生ずる。

光応用センサの検出素子部は、トランスデューサとその周辺を含め、材料の選択、デバイス設計、構成要素の製作技術などの光学的スケールの技術を要求されながら、検出対象に付帯する環境や取扱いに対して十分に耐えられるものとしなければならないという課題の解決を常に迫られている。室温付近の限られた条件下での使用が可能でなければ計装には実用できないので、これは工業用の光応用センサにとって本質的な課題である。このため、新しい材料と構成の開発がしばしば必要であり、材料からの一貫した研究開発を行うことによってのみ、実用化できる光応用センサを生むことができる。

III. 富士電機における光応用センサの研究開発

富士電機は計装システム及び重電機器予防保全診断/

試験システムの立場から、光応用センサシステムの研究開発に取り組んできた。富士電機の光データウェイシステムは鉄鋼プラントなどで多数稼働中で、豊富な実績を有している。更に、計装への光伝送と光応用センサの技術の導入による次世代のシステムの研究開発を進めている。他方、遮断器、交流発電機、変圧器、ガス絶縁高圧電力ケーブルなど電力機器・システムの保全診断、及び集中監視や超高圧電力技術の研究開発に必要な自社内試験測定のために光応用センサとそのシステムを研究開発してきた。その一部は製品に組み込まれている。この外、制御機器システム等の分野でも光技術の導入による機能の拡張、構成の合理化などを図っている。この特集号ではそれらのうち幾つかを紹介してある。

光ファイバの無誘導性と絶縁性は、各種のサージ、インパルス、高調波、強力な磁界や電界、高電圧などの存在下でもそれらの影響を受けることなく、光信号によって高信頼度の情報伝送を可能にしている。また、光による検出の無接触・遠隔性は高電圧充電部の計測の安全性、計測対象に対する無拘束性などをもたらしている。このような光ファイバと光による検出の特質は電力及び工業プラントにおける計測系、あるいは電力機器の監視・制御系の構成に打ってつけである。そして、この種の系の検出及び検出信号系として適切な手段が光応用系以外にならないというようなケースも幾つも出てきている。富士電機の光応用交流発電機監視装置や光応用遮断器診断装置はその例で、既に実用化されている。高圧電力機器技術の研究手段として反磁性ガラスを用いたファラデー効果形磁界・電流センサと水晶を用いたポッケルス効果形電界センサを開発して使用している。この外、中低圧分野では、ニオブ酸リチウム結晶によるポッケルス効果形電界・電圧センサ〔配電系(交流)及び帯電系(直流)用〕の研究試作と応用研究、車載変圧器内部温度の近距離遠隔

測定用に試作した光ファイバ赤外放射温度計がある。

計装分野では、光応用石油出荷管理システムの試作・評価、通商産業省工業技術院の「光大プロ」委託研究の「光温度センサの研究」の遂行、次世代計測制御システムとその要素技術の開発研究などを行ってきた。

その中で、計装への光応用の課題を抽出し、システム設計から検出素子・トランスデューサ技術に至るまで研究開発を推進している。光応用石油出荷管理システムは、本質安全防爆を目的として光による二値検出、二値指令、回転断続信号という最も単純な方法、光ファイバ信号伝送及び空気圧操作を組み合わせて構成するシステムの有効性、信頼性、経済性などを追究したものである。このようなシステムは技術的には十分に可能であるが、現状では、コスト的にはなお解決を要する。

光温度センサの研究は、在来の光高温計の測温下限以下の温度領域で遠隔から光ファイバを伝送路として光学的に温度を検出し、光データウェイに結合するような計装用光温度検出システムを実現しようとするものである。

この外に、従来から行ってきた赤外線分析・計測機器や紫外線応用計測機器の分野でもそのセンサについて研究が続けられている。

IV. あとがき

本稿においては光応用センサの構成、変換原理、信号検出、更に特質と課題について概説し、富士電機の光応用センサの研究開発活動を紹介した。この分野の研究開発は最近活発になり、今後に期待がかけられている。

参考文献

- (1) 矢部正也：プロセス計装における光応用センサの適用の考え方とその将来、計装、24, 8, p.23 (1981)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。