

知的光情報処理システム

谷田貝 豊彦

1. Data, information, intelligence とシステム

光学的な情報処理技術の進歩・発展は、まことにめざましいものがある。エレクトロニクス、通信、映像技術、マルチメディア、光メモリー、そして情報処理技術に至るまで、光技術は今や欠くことのできないものとなっている。従来から利用されていた、光の結像、干渉や回折などの光波の性質を利用したいわゆる結像システムに関連する技術分野と、高度な情報処理システムが結合して、新しい情報処理システムとしての光情報処理システムが見直され、単なる情報の伝搬の手段としての“光”から、従来と異なった視点から“光システム”を検討するようになってきた。

光技術を利用した情報処理、表示、記録に関連する分野は、従来から光情報処理技術と呼ばれている。英語では、optical data processing あるいは optical information processing である。その中でも特に情報処理に関係した部分は、光計算機 (optical computer)、光コンピューティング (optical computing) と俗称されてきていた。最近では、optics in computing の用語も使われるようになった。これらはおおのニュアンスも使う目的も、そして技術の背景も微妙に異なっているが、すくなくとも“光学”の読者にとって、対象としている技術分野は明確であろう。

本題に入る前に“知的光情報システム”の概念を明確にしておく必要がある。この標題は、編集委員会からご提示いただいたものであるが、筆者の念頭にある“知的”について述べることにしよう。

まず“情報処理”における“情報”について考えてみよう。英語ではこの情報に関する言葉として、data, information, intelligence があることはご存じであろう。Data は、日本語でも使われているデータであり、“種々の事象を

集積したりあるいはこれを数値化したもの”の意味である。いわゆる生データ、生の情報である。Information のほうは、通常情報あるいは知識と訳されているが、“data を系統立てて整理しファイル (資料) 化したもの”の意味である。したがって information を検索して必要な data を集めることができるのである。一方、intelligence のほうは、日本語では知能に相当するが、本来的には、“information を整理解析したもので、これを用いて何らかの判断を行ったり行動を起こすことができるもの”、である。因みに、アメリカの CIA 中央情報局は、Central Intelligent Agency である。

このような背景から、知的光情報処理システム (intelligent optical information processing system と翻訳すべきか?) を考えると、光学的な手段を使って、data や information を適当な形に処理するシステムで、その結果を用いて何らかの判断あるいは行動を起こすことができるもの、あるいは、そのシステム自身が判断や行動を起こすもの、状況や環境の変化に対応してシステムの最適化を自律的に行うもの、と考えられる。このように考えると、“知的”の意味が明確になるであろう。知的システムとは、システム自身が何らかの判断や行動の決定機能をもったシステムといえる。したがって知的な情報処理システムは、従来のパターン認識システムの言い換えではないことは自明である。

このような知的 (以後しばしばインテリジェントというカタカナを使うことがある) は光情報処理の分野ばかりでなく、あらゆる光学システムの分野で注目されてきている。正しくは、インテリジェント化ブームの中で、知的光情報処理の概念が提唱されつつあるともいえる。したがって、残念ながらここで定義した意味での、知的光情報処理システムは今のところ厳密には存在しない。いくつかの、

筑波大学物理工学系 (〒305-8573 つくば市天王台 1-1)
E-mail: yatagai@bk.tsukuba.ac.jp

提案とサブシステムの開発が行われている。

さて、インテリジェントシステムを考える上で、以下のような階層構造を考えることにしよう。

- (1) 材料レベル
- (2) 入出力, センサーレベル
- (3) 処理レベル
- (4) ネットワークレベル

光学的なシステムでは、材料レベルや入出力, センサーレベルにおける並列化により光学システムとしての特徴が発揮される。

ここでは、いくつかの光学関連分野におけるインテリジェント化技術にふれ、知的光情報処理システムについて述べる。

2. インテリジェント材料

インテリジェント材料とは、“環境条件に知的に応答し、機能を発現する能力を有する新物質・材料”であり、例えば生物がもっている、環境順応性、自己修復機能、自己診断機能、あるいは自己増殖機能などを材料自体によって実現されるものである^{1,2)}。いわゆるソフトウェア肥大化の問題を、材料自身をインテリジェント化することによって解決しようとするものである。応用分野も、電子材料や医療材料、医薬品、機械・構造材料ばかりでなく、光学材料まで、広い分野で大きなインパクトを与えるものとして期待されている。

材料技術の歴史を考えると、まず素材があって、それが、例えば、構造材料になり、耐摩耗性、耐高温性といった受動的な機能材料へと発展し、さらには、光を当てると電気エネルギーが生まれるといった能動的機能を発現する材料へと発展してきた。また、鉄は鉄、セラミックスはセラミックスといった分離型から、金属とセラミックス、半導体と有機物などのような複合型へと発展し、異種物質間の境界がわからなくなった融合型へと構造が進化を続けてきた。

究極のインテリジェント材料である生体では、われわれが工学的に開発してきた機能材料と比べて、外部刺激に対して自律的な動的機能（自己修復、自己学習、自己分解などの機能）をもっている点で決定的にすぐれている。これらの機能の一部を、材料システムで実現したい。また、生物はエネルギーを常に食物によって供給しなければならない。インテリジェント材料では、材料自身がエネルギー源をもつか、入力刺激をエネルギーに変換するなどのエネルギー供給の側面も検討しなければならない。

以上のように、インテリジェント材料に関して、主に機

能の面から考えてきたが、この機能を発現させる機構はなにであろうか？ それは、材料要素（分子、分子集合体などいろいろなレベルが想定される）の共同現象、同期・協奏現象といえるのではないだろうか。最近話題となってきた分子シンクロナイゼーションによる材料システム設計の手法はまさに、インテリジェント材料に設計指針をあたえるものである³⁾。

さて、以上のようにいろいろ検討すべき課題はあるが着実に進展しているインテリジェント材料における、光材料について考えてみよう。

2.1 フォトクロミック材料

フォトクロミックとは、光照射によって物質の吸収スペクトルが可逆的に変化する現象である。この材料は、書き換え可能な光メモリー材料や透過率が変化するめがね材料としてすでに使われている^{4,5)}。めがね材料の例は、環境の変化によって自動的に調光するインテリジェントな機能の典型である。多数の有機・無機材料においてこの効果が観測されている。しかし、フォトクロミック材料を光メモリー材料として利用する場合には、短波長での記録読み出し特性、記録の安定性、繰り返し使用に対する安定性など解決すべき課題も多い。材料自身に適当なセンサー機構をもたせ、書き込み・読み出し波長の自動最適化、繰り返し使用に対して常に応答特性を一定に保つ機構などが発現できれば、インテリジェントな光記録材料といえるであろう。

2.2 光双安定材料

一般に、1つの入力に対して安定な2つの出力状態をもつ状態を、双安定状態という。光学においてもこの現象が存在し、ある強度の信号を入力すると、2つの状態が安定して生じることがある⁶⁻⁸⁾。この光双安定性は、光メモリー、光スイッチなどを構成する上で重要な現象である。一般に、双安定現象を発生させるためには、非線形な応答特性と、フィードバック機構が存在すればよいことがわかっている。

光双安定デバイスとしてさまざまな提案があるが、大別すると、(a) 帰還ループとして電気回路を用いるハイブリッド型、(b) 光非線形媒質と光共振器とからなる純光学型、(c) 過飽和吸収体を素子内部に含むレーザーダイオードのようなモノリシック型、に大別できる。

純光学型 (b) の一例として、GaAs 非線形エタロン⁹⁾がある。GaAs の励起子吸収の飽和にもとづく非線形屈折効果と反射膜によるフィードバックを利用して双安定現象を発生させている。40 ns 程度のスイッチング速度が得られている。GaAs を GaAs と GaAlAs の MQW (multiple quantum well) にすることによって常温動作が可能なこと

も報告されている。

励起子吸収以外の現象を利用した非線形エタロンも報告されている。GaAs と GaAlAs の量子井戸の1つのバンド内部での量子化準位間光学遷移 (QWEST: quantum well envelope state transition) を利用した QWEST デバイスがそれである。この材料を光学多層膜の反射鏡でサンドウィッチした構造の素子で、NOR ゲートが提案され、ピコ秒程度のスイッチング速度が期待できるという。

通常の結晶内では電子は3次元的に運動できるのに対して、量子井戸構造の材料では電子の運動が2次元的に制限されるため、ユニークな機能が期待できる。非線形エタロンの常温動作や SEED (self-electro optic effect device) における励起子の電界効果などがそれである。さらに次元を下げ励起子の閉じ込め効果を増加させると非線形光学効果が増加することが予測されている。また応答速度の向上も期待されている。1次元量子井戸 (quantum wire) やゼロ次元の量子井戸 (quantum dot) がそれである⁹⁾。すでに半導体微粒子をガラスにドーパした材料を用いて非線形動作を確認している。

素子の高速化を実現するためのひとつのアプローチとして、バンド内の光学遷移の利用が考えられる。通常の半導体光デバイスでは、自由キャリアーのバンド間遷移を利用しているので時定数はナノ秒程度である。これに対して、量子井戸のバンド内量子化準位間の遷移を利用する QWEST では、ピコ秒の動作が期待できる。

2.3 光変形材料

ある種の有機化合物は、光照射によってその構造をトランスからシスへと変化することがある。この現象は光学異性化として知られている⁹⁾。このような、トランス・シス変化により、通常は屈折率の変化が起こるが、巨視的な形態変化を起こすものがある。アゾベンゼン (azobenzene) は、光照射によりトランス・シス構造変化を起こす。このアゾベンゼンを側鎖にもつある種の高分子材料に、微細な干渉縞を照射すると、周期的な屈折率変化ばかりでなく、表面に周期的なレリーフ構造が生じる。このレリーフが生じる機構はまだ解明されていないが、回折効率の大幅な増幅が観測される¹⁰⁾。また、類似の材料で、光照射により粘性が変化する現象も報告されている¹¹⁾。

ある種のゲルは光照射によって体積を大幅に変化させることが知られている。トリフェニルメタンロイコシアニド (triphenylmethane leucocyanide) 類をポリアクリルアミド (polyacrylamide) のゲルにドーパしたものに紫外線を照射すると、2.2 倍程度伸張し、重さも 13 倍増える¹²⁾。暗所におくと元に戻る。

これらの現象は光によるアクチュエーターとしての可能性、あるいは、アダプティブレンズや結像系への応用が期待できる。

2.4 フォトニッククリスタル

材料の構造、具体的には誘電率などが波長の光波長の程度で周期的であると、この構造は入射光に強い相互作用をもたらす¹³⁾。このような構造は、結晶が電子に対して周期的なポテンシャルであることに対して、この構造が光子に

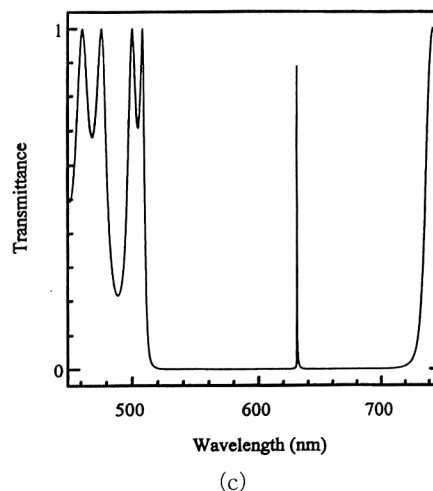
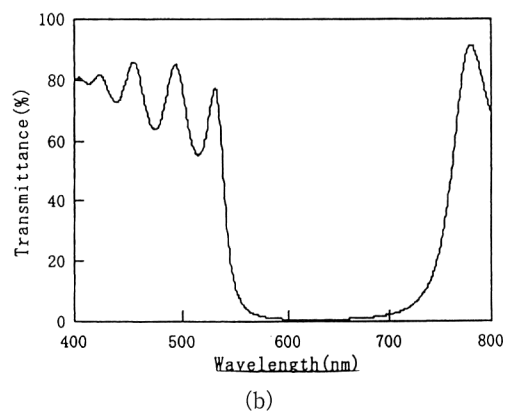
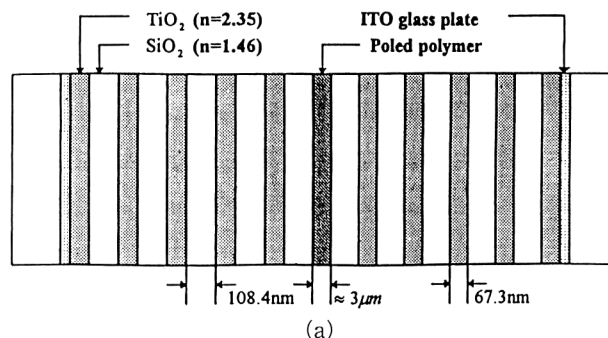


図1 フォトニッククリスタル。(a) 不純物の層を導入したフォトニッククリスタル、(b) 1次元的なフォトニッククリスタルの透過率、(c) 不純物の層を導入したフォトニッククリスタルの透過率。

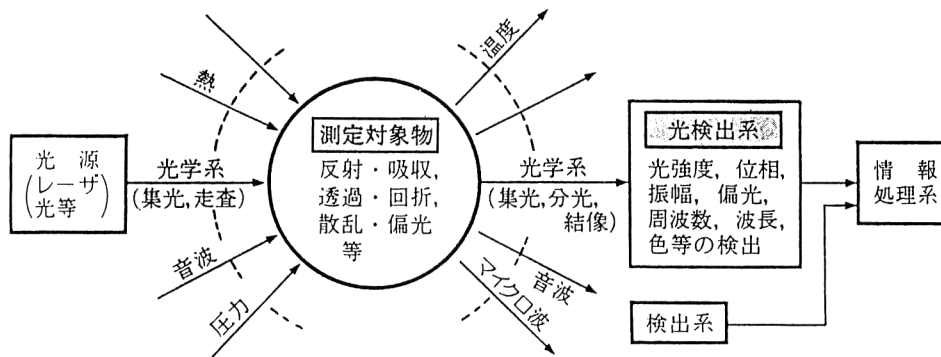


図2 センシングシステム。

対して周期的なポテンシャルを与えるので、フォトニック結晶と呼ばれる。1次元的なフォトニック結晶においては、その分光透過率は図1(a)のようになり、半導体における禁制帯に相当するバンドが観測される。このフォトニック結晶に不純物を一層加えると(b)、透過率は(c)のようになり、半導体における不純物順位に対応する透過バンドが現れる¹⁴⁾。ここで、この不純物が電気光学効果をもっているとする、印加電圧によってその物質の屈折率が変化し、したがって透過バンドの位置を変調することができる。この便利を使って、光変調器が開発されている。この構造は、不純物の両側を誘電体反射膜ではさんだ構造とも解釈でき、そうすると、一種の非線形エタロンと考えることもできる。また、フォトニック結晶による光電場閉じ込め効果による非線形光学効果の増強とも解釈される¹⁵⁾。

3. インテリジェント光センシング

光センシングに限らず、あらゆる計測分野においてインテリジェント化は重要な概念として認識されつつある。1960年代から始まった生産過程の自動化の流れは、無人化工場を究極の目標として発展してきたが、これは、システムの自動化、集約化、階層化、知能化によって達成されようとしている。しかし、単なる無人化のみではなく、システムの拡張性と汎用性を追求すると、システム各要素の自律性とシステム全体の協調性が重要であることが意識されるようになってきた。このような流れの中で、システム全体の自動化、自律性、協調性を技術的に支える要素として、インテリジェント・センシング、あるいは、インテリジェント・センサーの技術が目ざされるようになってきたのである。このように、インテリジェント・センシングに期待される役割は、制御、検査、診断のための適切な情報提供であり、システム全体の中での情報のやりとりと運用(通信)に基づく体系を構築することである。

さて、一般の計測と同様、光センシングにおいても、高度化(高精度化、高速化、高機能化)が叫ばれている。単に長さを正確に計測したり、そのデータを積み上げて形状を計測するばかりでなく、計測装置自体にある程度の判断機能をもたせ、必要な情報のみを抽出、処理、転送できる計測器、外界の状況変化に対応して計測対象と精度を変化させることができる計測器、このようないわば知能化された光センシングをインテリジェント光センシングと呼ぼう¹⁶⁾。

半導体レーザー、光導波路、光ファイバーをはじめとする微小光学技術、マイクロエレクトロニクス、並列光センシング技術、AIなどの発展により、インテリジェント光センシングを実現する上での技術的障害は、徐々に取り除かれつつある。高機能なマイクロデバイス技術を駆使することによって、知能化集積化された光センシングシステムが誕生しようとしている。

光センシングシステムは、およそ図2のような概念として捉えられる。まず、対象物体に光を投射して、種々の光学現象(散乱や回折)を利用して、必要な情報を光情報に変換して検出する。またあるものは、音波などの光以外の媒体を測定対象物に当てて、光を用いて対象物からの情報を取得する。逆に、光を当てて、発生する音波などの光以外の媒体から得るものも、光計測の範疇に入れられる。

インテリジェント光センシングにおける“インテリジェント”とは、単にコンピューターを使用した自動化のことではない。インテリジェント(知能化)のインテリジェントたるところは、“環境の変化に適應する能力”と言い換えてもよい。そして、環境の変化に適應するためには、

- (1) 環境変化を知るための情報収集機能(センサリング)
- (2) 過去の経験の蓄積(データベース)
- (3) 論理的な処理、推論などをする機能
- (4) 適應するための行動

が必要である。この条件を満たすためには、各構成要素間

で情報の授受（通信）を行う機能も重要となってくる。

図3にインテリジェント光センシングシステムの概念を示す¹⁷⁾。光信号の並列的収集，処理系への並列的信号伝送，アクチュエーターや光源・照明系の制御などの機能を集積・集約化したブロック群，そしてこれらの間と他の制御装置，製造装置，検査装置との通信ネットワークから構成される。これらの各要素がもっている機能の並列化と複合化がインテリジェント化の鍵である。

3.1 インテリジェント光センシングの技術

インテリジェント光センシングの技術を

- (1) センサーレベル
- (2) 処理レベル
- (3) ネットワークレベル

の3層構造として考えよう。従来の光センシングでは，最も低レベルの光センシングの部分のみが限定的に光センシングの領域と考えられてきた。しかし，これまでに述べてきたように，種々の機能や並列化の機能をこの光センシングの部分にもたせることによって，計測系全体の構成と機能に大きな変化がもたらされる。

3.2 センサーレベル

光センシング部分を支える技術としては，CCDなどの2次元画像センサー，光検出器と発光素子を融合した光双安定素子，あるいは光トランジスター，空間光変調器，光導波路型センサーなどが考えられる。これらの素子は，単に並列的にデータを収集する能力ばかりでなく，S/N改善，ノイズの除去など比較的単純な信号処理能力をもたせることが望ましい。

センサーレベルのインテリジェント化の例として，光双安定素子を用いた並列ヘテロダイン検出器をあげよう¹⁸⁾。2次元並列型の光双安定素子を閾値素子として用い，正弦的な入力光信号を矩形信号に変換し，矩形化された参照信号とのANDをやはり光双安定素子で計算し，これを時間積分すれば2次元的な位相分布が求められる。

測定の対象により特性を変化させることができるセンサーもインテリジェントセンサーとみなせる。可変加重空間フィルタは，受光セル，その出力信号を切り替えるスイッチ，および加重関数を記憶保持するメモリーを2次元集積化したものである。測定対象の形，運動速度，方向を検知するために最適な加重を設定できる。また，動く対象物に追従できるように加重を移動変化させることもできる¹⁹⁾。

3.3 処理レベル

処理レベルにおいては，センサー部からもたらされる種々の記号（光信号に限らない）を並列実時間で処理判断

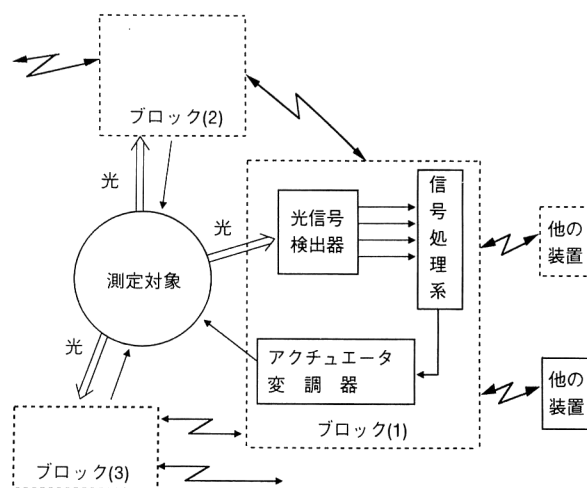


図3 インテリジェントセンシングシステムの概念。

する必要がある。並列信号処理の機能ばかりでなく，データの解釈，推論の能力も必要である。適切な状況判断を下して，アクチュエーターを制御し，光源を変調し，測定系を最適な状態に保持するためには，過去のデータを蓄積しておくデータベースも必要であろう。

光センサーアレイと演算処理機を組み合わせた3次元ICは，典型的なインテリジェント光センサーの例である。また，光検出パターンを適当に標準化し，これを光ニューラルネットワークで処理するシステムもこの範疇に入れてよい²⁰⁾。

3.4 ネットワークレベル

他のブロックや他の装置との間の通信をするためには，適切なネットワークが必要である。各ブロックが一応自律的であれば，従来の並列コンピューターネットワークにみられるような密なネットワークは必要なく，きわめて緩いネットワークでよい。すでに，光通信を用いたFAシステムは実用化されている。このようにして，いわば計測複合体とも呼ぶべきインテリジェント光センシングの概念が生まれた。

4. 知的光情報処理システム

光学的な情報処理システムとしては，アナログ，ディジタル，ニューラルの3種類に分類される²¹⁾。アナログ処理としては，マッチトフィルタをはじめとする空間周波数フィルタリング技術や結合フーリエ変換による相関技術などがある。入力物体の状態や雑音に対して最適なフィルター合成技術が開発されている。また，この相関技術を最適に組み合わせる複合型相関システムもある。また，生物の神経回路網の数学的なモデルを，光学的に実行することによって，学習機能や自己組織化機能を有する情報処理シス

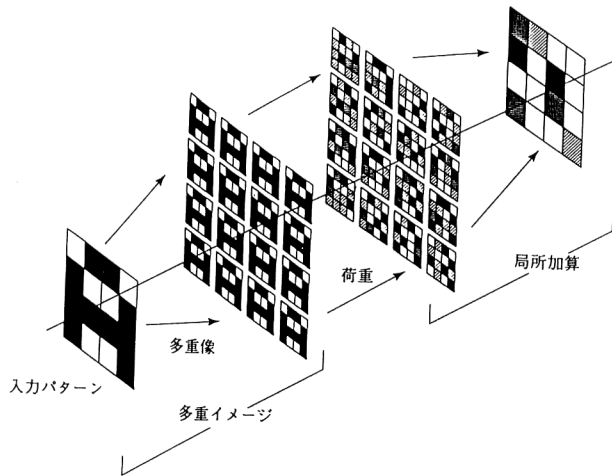


図4 多重結像系による光ニューラルネットワークの光学系。

テムを構築する試みもある。

4.1 SDFと最適フィルター

光学的な相関フィルターの設計法として、相関ピークの最適化、特定の雑音に対する影響の低減、入力物体の変形や回転に対する許容量の拡大などを目的に、合成識別関数法 (synthetic discriminant function, SDF)^{22,23)} や最適フィルター法^{24,25)} が検討されている。SDF フィルターの応答はいくつかの訓練パターンの線形和で表され、各訓練パターンに対する相関出力が特定の値に一致するように線形結合係数をきめる。最適フィルターに関して、特定の訓練パターンに対する応答を最適化するものやフィルターの最適位相分布を求めるものなどがある。これらの技術は入力物体やその背景に対して、自律的にフィルターを動的に構成する手法は開発されていない。

4.2 適応型光システム

結像系に加わる擾乱や光学系の収差の影響を認識してそれを動的に修正するシステムが適応光学系 (adaptive optics) である²⁶⁾。空気の擾乱による天体望遠鏡の結像性能の回復技術がよく知られているが、レーザー加工機における光学系の熱歪みの除去、放射光施設のモニター光学系の熱歪み補正などの目的でも使用されている²⁷⁾。センサー系としては、干渉法や Shack-Hartmann センサーなどの2次元の波面計測技術が利用され、波面補正用のアクチュエーターとしては可変形状鏡や空間光変調器が使われている。検出された光学系の誤差を補正するための制御信号の決定アルゴリズムとしては、最小自乗法などの決定論的な手法が使われている。しかし、制御誤差、アクチュエーターの非線形応答特性などを考慮したフィードバックアルゴリズムやニューラルネットワーク制御技術なども開発されつつある²⁸⁾。

また、空間光変調器を用いたホログラムの適応的な合成技術も検討されている²⁹⁾。

4.3 光ニューラルネットワーク

光ニューラルネットワークは、神経回路網を工学的にモデル化したものを、光技術で実現したものである³⁰⁻³²⁾。ニューロンの基本モデルでは、あるニューロンの状態は、他のいくつかのニューロンからの刺激を受け、その刺激に適切な重みがかかって (シナプス荷重) 総合的な刺激になり、これがある閾値を超えるとそのニューロンが興奮して刺激信号を発する。いま、 M 個のニューロンの入力 (x_1, x_2, \dots, x_n) をベクトル $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ と表す。同様に、ニューロンの出力も $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 、 i 番目のニューロンからのシナプス荷重を w_i とすると、ニューロンの荷重和は、

$$u_i(t) = \sum_j W_{ij} X_j(t) \quad (1)$$

であり、時刻 $t+1$ におけるニューロン出力は

$$y_i(t+1) = f[u_i(t) - h_i] \quad (2)$$

である。ただし、 $f(\)$ は非線形の閾値関数、 h はニューロンの閾値 (オフセット) である。

ニューラルネットによる処理は、入力に対して適当な出力を与えるシナプス荷重を適応的に決定することと等価である。この過程は、学習・自己組織化などと呼ばれている。離散時間の系に対しては、

$$w_{ij}(t+1) = aw_{ij}(t) + c\delta_i(t)x_j(t) \quad (3)$$

が成立する。ここで、 a は $0 < a < 1$ を満たす定数、 c は学習係数、 δ は学習信号である。学習信号は、入力信号 x 、結合荷重 w 、出力信号 y 、教師信号 d に依存するもので、種々の方法が提案されている。

ここで、この光ニューラルネットワークシステムの一例として、多重結像光学系によるパターン認識システムの例を示そう^{33,34)}。入力物体として顔を考えると、式(1)における入力ベクトルは行列になり、シナプス荷重行列は、4次元量とならなければならない。

$$u_{0j}(t) = \sum_{k,l} W_{ijkl} X_{kl}(t) \quad (4)$$

の形に書き換えてシステムを考える。結合荷重は4次元量となるので、図4のように2次元の行列要素を、さらに2次元に並べるのである。学習の過程も同様に2次元構造の光学システムで実現できる。

この多重結像光ニューラルシステムは、入力を2次元情報そのまま取り扱うことのできる学習可能な光ニューラルシステムである。この系は、式(2)に従うダイナミックシステムである。このダイナミックシステムが自己組織的に有効な機能発現 (顔の自動認識) を行うのである。しかし、残念ながら現在のシステムでは、重要な制御やフィードバ

ックは、コンピューターに頼っている。

以上に述べたようにインテリジェント材料と光センシングの概念は光情報処理（光コンピューティング）の概念とも密接な関係があることがわかる。光の情報をなるべく光のままに並列的に計測・処理を進めていくことによって、光が本来的に備えている特徴を失うことなく、計測と処理の高機能化が達成される。インテリジェント光センシングでは、“光”は単に測定のためにのみ利用されるのではなく、信号処理のためにも利用することを目指す。知的光情報処理システムは、並列データの入出力、処理の並列化、高密度高効率記録などの点で光技術の優位性が認識されつつある。さらには、光による検出技術と光による情報処理技術の融合、そして、AI、FAなどの従来型の知的情報処理技術との融合によって、はじめて知的光情報処理技術が完成されるのである。なお最近では、非定常システムや非線形ダイナミクス理論とインテリジェントシステムとの関係も解明されつつあることを指摘しよう。ここでは述べる機会がなかったが、光反応性の材料技術、光アクチュエーター、空間光変調技術など、知的システムの反応を表現する技術群の発展にも注目が必要である。

文 献

- 1) “環境条件に知的にตอบสนองし、機能を発現する能力を有する新物質・材料の創製に関する総合的な研究開発の推進について（諮問第13号）に対する答申”，航空・電子等技術審議会，科学技術庁，平成元年11月30日（1989）。
- 2) インテリジェント材料フォーラム企画委員会編：インテリジェント・マテリアル（シーエムシー，1991）。
- 3) “特集：分子シンクロナイゼーション手法による高分子材料システムの設計”，ポリファイル，**34**，399（1997）。
- 4) 入江正浩：化学と工業，**41**（1988）163。
- 5) 市村国宏：光機能化学（産業図書，1993）。
- 6) 岡田正勝：応用物理，**53**（1984）331。
- 7) T. Venkatesan, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **48**（1986）145。
- 8) 花村栄一：応用物理，**56**（1987）1348。
- 9) 市村国宏：光反応性高分子材料，電子材料，1月号（1989）71。
- 10) M. Itoh, K. Harada, H. Matsuda, A. Parfenov, N. Tamaoki and T. Yatagai: J. Phys. D: Appl. Phys., **31**（1998）463。
- 11) M. Irie, Y. Hirano, S. Hashimoto and K. Hayashi: Macromolecules, **14**（1981）262。
- 12) 吉野勝美編著：電子・光機能性高分子（講談社，1989）p. 105。
- 13) 井上久遠：応用物理，**64**（1995）19。
- 14) K. Harada, M. Itoh, T. Yatagai: Opt. Rev., **3**（1996）440。
- 15) K. Harada, K. Munakata, M. Itoh, N. Yoshikawa, H. Yonezu, S. Umegaki and T. Yatagai: Jpn. J. Appl. Phys., **37**（1998）4393。
- 16) センシング技術応用研究会編：センサの集積化・知能化技術（日刊工業新聞社，1987）。
- 17) 谷田貝豊彦：“インテリジェント光センシング”，第4回光波センシング技術研究会講演論文集（1989）p. 105。
- 18) 谷田貝豊彦：文部省科学研究費特定研究 光波利用センシング 研究成果報告書（代表：田中俊一）（1989）。
- 19) K. Miyagi: *Proc. 1st Sensor Symposium*（1981）。
- 20) J. Neff: *Technical Digest, OSA Topical Meeting on Optical Computing*（1989）。
- 21) 谷田貝豊彦：光情報処理の基礎（丸善，1998）。
- 22) C. F. Hester and D. Casasent: Appl. Opt., **19**（1980）1758。
- 23) B. V. K. Vijaya Kumar: J. Opt. Soc. Am. A, **3**（1986）1579。
- 24) D. L. Flanney, J. S. Loomis and M. E. Milkovich: Appl. Opt., **27**（1988）4079。
- 25) J. Ding, M. Itoh and T. Yatagai: Opt. Commun., **118**（1995）90。
- 26) 一ノ瀬祐治：光学，**24**（1995）718。
- 27) M. Itoh, N. Takeuchi, T. Mitsunashi and T. Yatagai: Opt. Rev., **5**（1998）196。
- 28) R. K. Tyson: *Principles of Adaptive Optics*（Academic Press, San Diego, 1991）。
- 29) N. Yoshikawa, M. Itoh and T. Yatagai: Opt. Rev., **4**（1997）161。
- 30) N. H. Farhat, D. Psaltis, A. Prata and E. Peak: Appl. Opt., **24**（1985）1469。
- 31) 太田 淳，久間和生：光学，**17**（1988）550。
- 32) M. Ishikawa, N. Mukozaka, H. Toyota and Y. Suzuki: Appl. Opt., **28**（1989）291。
- 33) Y. Hayasaki, I. Toyama, T. Yatagai, M. Mori and S. Ishihara: Jpn. J. Appl. Phys., **31**（1992）1689。
- 34) T. Yatagai, Y. Yagai, M. Mori and M. Watanabe: to be published in Proc. SPIE, **2466**（1998）。

（1998年10月9日受理）