レーザー解説

光　コ　ン　ピ　ュ　ー　タ

— 岡　芳　樹*

(1986年7月11日 受理)

Optical Computer

Yoshiki ICHIOKA*

(Received July 11, 1986)

1. はじめに

光コンピュータは光の物理的特性を利用した大容量情報の大規模高速演算システムである。

情報処理の世界では、常に、より多くの情報をより速く、より少ないエネルギーで、より安く処理したいという要請がある。そのため、その時代に稼動している最高能力のコンピュータの2～3桁以上の能力を持つシステムの出現が期待されている。高度情報化社会に突入しつつある現在では、その要望は特に強い。

コンピュータの能力は、この30年間、大体2年毎に倍増してきたが、このペースをいつまでも続けることはそう簡単ではない¹⁾。飛躍的な能力向上はより一層、困難なようにみえる。その原因は現在のコンピュータの基本構造 (von Neuman型)、演算方式 (時系列逐次処理)、信号通信帯域の制約、クロックスキュー、実装上の問題 (配線長、熱除去、ピン数の制約) など、種々のレベルで認識されている。現在、これらを克服する方策として、超高速論理素子の開発、メモリ集積密度の向上、パイプラインニング、デ

ータフロー、並列アーキテクチャー等を利用した計算システムの開発が進められている。このようなシステム構成の行きつく先が、並列処理を基本としてきた光情報システム構成に似てくくることは容易に想像できる²⁾。

光の特性としては、高速性、超並列性、電磁信号との非干渉性、アース不要、等がある。現在のエレクトロニクスの世界では、nsで作動するスイッチングゲートは日常的なものであり、そろそろ、psという言葉が聞かれるようになっていく。光速は 3×10^8 m/sで絶対的なものであるが、その伝達距離は、1 nsで30 cm, 1 psで0.3 mm, 1 fsで0.3 μ mである。1 psや1 fsで作動するゲートをクロックスキューなしで動作させることは至難の技である。そのため、光コンピュータにとって重要な光の特質は超並列情報伝送・処理能力がその第一にあげられよう。光の並列伝播能力を利用した並列光インターコネクションの概念と、情報を一網打尽に処理する能力の有効利用が光コンピュータ実現の大きなきめ手である。

この解説では、光コンピュータの能力、その

* 大阪大学工学部応用物理学教室 (〒565 吹田市山田丘2-1)

* Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Osaka University (2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka 565)

目的をのべ、それに必要な基礎研究、演算方式について概観する。そして、現在、主流をなしつつある、2種類の光コンピュータの構成概念を紹介する。

2. 光コンピュータの能力

Fig. 1 に超高速科学演算用コンピュータ、光コンピュータの演算能力を示す³⁾。縦軸に演算速度 (AND operation/s), 横軸にクロックパルスのサイクルタイムを示す。パラメータはデータの並列度である。例えば、 $1000 \times 1000 = 10^6$ から成る2次元のアレイ状の情報を $1 \mu\text{s}$ のクロックで処理しうるシステムでは、単純計算で 10^{12} 回/sの演算能力をもつ。超高速科学演算用コンピュータの能力の単位は FLOPS (Floating Operation per Second) で示してある。この図で、光による並列演算は画素間演算を実行する場合である。光による2次元積和演算能力 (たとえば、Defocus 光学系による結像) を併用し、演算核 10×10 のアレイの利用を仮定すると、演算能力はさらに増大し 10^{14} AND/s となる。

現在、開発中のスーパーコンピュータの能力は1992年時点で 10^{10} FLOPS にすぎない。このこ

Fig. 1 Processing speed of super computers and optical parallel computers.

とから、光コンピュータの並列演算能力が如何に大きいものかが、理解できよう。

3. 光コンピュータの目的と応用

光コンピュータは、現在使用されている計算機を凌駕するという性質のものではなく、コンピュータが苦手とする部分に相補的に利用されるべき性質を持っている。以下に、光コンピュータの早期実現が望まれている、2, 3 の応用分野を示して、その目的を明確にしよう。

3.1 連続場の数値シミュレーション

コンピュータにとって、2次元、3次元に配列した大容量データの高数値演算は最もやっかいなものの一つである。連続場の数値シミュレーションとは、流体力学、気象、プラズマ物理などで生ずる現象を解明するための計算で、3次元空間座標点における物理量の時間的变化を求める演算である。たとえば、飛行機的设计、天気予報などでは、3次元の空気の流れをシミュレートするために膨大な計算を要する。特に後者では、準実時間性が要求される。台風の通過した後でその正しい経路が解っても何ら意味をなさない。このような問題では、時空間的なモデルを立て、大行列に対する際限のない反復演算を必要とする。数学的には極めて大きなサイズの連立常微分方程式を解くことに相当している¹⁾。

コンピュータによる数値演算を基本とした計算物理学の領域では、演算速度の向上、データ並列度の向上が特に望まれており、光コンピュータ研究の一つの大きな動機となっている。

3.2 高速画像処理

コンピュータの苦手とする領域に画像処理がある。汎用計算機は基本構成上 (逐次処理やデータアクセス及びその転送方式)、2次元的な広がりのあるデータ処理には不向きである。デジタル画像処理では、入力データを走査、検出、標本化、デジタル化を行って情報をメモリに格納する。演算は時系列的に実行し、演算

結果はデータ入力と逆の操作を行って、CRT上に表示する。テレビジョンの一フレームは高々500×500画素であるが、その実時間処理ができる計算機は少い。汎用のコンピュータは画像処理にとっては極めて低速のプロセッサにすぎない。

画像は人の視覚と深いかかわりあいがあるため、その高速処理を要求する分野が非常に多い。ランドサット資源探索衛星からは、時々刻々、膨大な画像を送信してくる。一フレームの画像は2000×3000画素以上のデジタル画像である。そのデータを無駄なく生かすためには、各画素点について、 $10 \sim 10^2$ 回の演算処理が必要であるこれを実時間処理することは汎用コンピュータでは大変なことであり、現在のスーパーコンピュータ開発の一つの動機となっている。また合成開口レーダ像の復元にも膨大な演算を要する。この演算には 10^9 以上のマトリックス演算が必要であり、これをTV実時間で処理するには30 GFLOPS以上の能力を有するコンピュータが必要である⁴⁾。最近ではロボットのセンサー用として動画画像処理に対する要請も増大している。

画像処理の最も基本的な演算として2次元積和演算があるが、演算核が少し大きくなると電子的な専用ハードウェアを用いても実時間処理は難しい。

高速画像処理が実行しうる光コンピュータ実現への期待は大きく、このような光コンピュータの開発が光学サイドからの大きな目標となっている。

3.3 視覚人工知能、画像連想、パターン認識

光コンピュータの最終的な目標は、人間の視覚と脳で構成されている画像連想・認識機能の人工的な実現であろう。眼の網膜までの信号入力は光学処理と対応しているが、得られた信号を脳に伝達し、物体・事象を連想・認識する働きは脳で行われる。脳が行っている高度な情報処理を実行するシステムの実現は不可能であるが、光コンピュータを単なる光情報処理システム

ムとしてでなく、ある程度、簡単な連想・認識機能を付加した並列情報処理システムとして実現することは、できるのではないと思われる。

並列光連想記憶については6.でふれる。

4. 光コンピュータ実現に必要な研究

光コンピュータの研究が最近、活況を呈しているが、現在のところ、確たる光コンピュータの形態が明確になっていないため、研究者の間に意識の違いがある。

光コンピュータに必要な基礎研究として、

1. システムアーキテクチャの研究
2. 光機能デバイスの研究
3. 光情報処理技術の研究
4. 概念の明確化、

などが挙げられる⁵⁾。以下、これらについて簡単にのべる。

4.1 光デバイス

光コンピュータという言葉から、どうしても既存のコンピュータの概念にとらわれる。光にはコンピュータを構成する基本要素である、論理演算素子、記憶素子が欠如していたため、まずこれらの素子の開発から手がけねばならないという立場に立った研究分野である。マイクロエレクトロニクスやオプトエレクトロニクスで大きな実績を上げてきたので、これらの技術を用いれば、光コンピュータ用の基本デバイスが開発できるのではないかと考えられている。

新しい材料開発、光源、発・受光素子、論理演算素子、記憶素子、空間光変調素子等の研究が行われている。光双安定性の研究を中心として、光コンピュータの研究の中では最も活況を呈しているように見える。

4.1.1 材料

半導体材料、光双安定性材料、電気光学材料、磁気光学材料などの基礎研究が広く行なわれている。最近では、有機材料と光との相互作用、超格子、光書込み・消去可能な材料等の研究が注目をあびている⁶⁾。

4.1.2 光源、発・受光素子

光コンピュータにはコンピュータの電源に相当するものに光源装置がある。半導体レーザーを中心とした新レーザーの研究が活性化している。レーザー光の性質の内、光源輝度の強さが受動素子の多い光情報処理では重要である。コヒーレンスも、光の振幅・位相、偏光特性を利用したコヒーレント光学系利用の光コンピュータでは重要になってくる。処理段階の雑音を考慮すると、光コンピュータではコヒーレント/インコヒーレント両光源の併用が必要となろう。そのため、強力な指向性(?)を有するインコヒーレント光源も必要となる。並列処理における光の多重性を考慮すると、波長多重レーザー、白色光源も重要なものとなろう。

並列処理の観点からは、アレイ状の光源も必要であるが、現代の技術ではほぼ製作可能のように見うけられる。受光素子アレイ、発光素子アレイを一体化したアクティブなデバイスの研究も行われている^{7,8)}。この素子は並列度が上れば、光の超並列情報処理、並列光インターコネクション、並列インターフェース用の素子として、極めて重要なものとなってくる。

重要なのは、新しく開発されるこれらの素子を有効に利用しうる、光コンピュータのアーキテクチャーである。電子デバイスのみで構成されている現在のコンピュータと同じ構成のシステムを新しい光デバイスで構成してもあまり意味がない。この点が、光通信と光コンピュータで光の利用方法が根本的に異なる点である。

4.1.3 論理演算素子

光双安定性デバイスに代表される研究分野である。アレイ状に構成した並列光論理素子を光コンピュータの基本素子とする立場に立った研究が多い。受・発光素子を一体化した基本要素とする半導体集積回路型⁷⁾、光とエレクトロニクスを併用したOEIC型⁹⁾のものが提案されている。基本的には、現在のコンピュータの論理演算素子に代行する機能を持たそうという考え方であり、アレイ素子上で論理をとることを目的としている。

光では、並列論理は必ずしも機能素子上でと

らなくても、空間並列的に実現する方法がいくつも提案されている。光コンピュータの構成はいずれの方式をとるかにより、大きく変わってくる。

4.1.4 記憶素子

光コンピュータには集積化された並列記憶可能な光記憶素子が必要である。光双安定性を利用した光フリップフロップの研究が活発に行われている。光学の分野で長年用いられている銀塩材料は書き換え不能の Read only memory である。

並列記憶素子ではデータアクセスの仕方が今後の課題となろう。現在、実用化の域に達した光ディスクメモリは、その機構が光の並列性を用いた光コンピュータには整合していない。アドレッシングを基本としたデータアクセスは新しい光コンピュータでは不向きであり、一時代前に座折したホログラフィックメモリーもこの方法をとっていた。書き込み、消去可能であり、かつ、並列に一網打尽にデータアクセスできる記憶方式の研究とそれに共する素子の研究が必要である。

最近是有機材料を用いたホトケミカルホールバーニングによる記憶法の研究も発表されている⁹⁾。現在のところ、未だ現象の基礎実験段階であるが、今後の研究の進展が期待されている分野である。

4.1.5 空間光変調素子

光情報処理の実用性や光コンピュータの実現の鍵を握るデバイスである。受動素子ではあるが、光信号の並列入出力、並列記憶、並列演算機能を一つの素子で有している機能素子である。電気光学結晶BSOや液晶を用いたPROM(Pockels Read Out Modulator), LCLV(Liquid Crystal Light Valve)がその代表例である¹⁰⁾。これらは、記録光信号による偏光面の回転を利用したものである。長い研究期間を経ているにもかかわらず、実用化デバイスの開発が遅れている。最近、高誘電体液晶の研究が注目されている。また、イメージ管と電気光学結晶を組合せた空間光変調管も発表されている¹¹⁾。分解

能が高く、応答速度の速い素子の実用化は光学や光コンピュータ実現の立場からは待望久しいものである。

以上の光デバイスの内で最も渴望されているのは、外部からの信号制御によって光の信号が並列に自由自在に記録、演算、表示、消去するデバイスである。この場合制御できるのは、PROMやLCLVのように偏光面回転だけでなく、フォトリソミック材料のような濃淡制御、あるいは屈折率制御、色変換、散乱能変換などいずれの物理量でもあってもよい。伸縮制御可能な有機系レンズも光コンピュータでは必要な素子となってくるであろう。

アクティブデバイスは受・発光素子が一体化した、アレイデバイスが光コンピュータに役立つものと思われる。しかし、いずれのものも、実用的なデバイスは未だ開発されていない。

4.2 光情報処理と光演算法

光コンピュータの研究では、長い歴史を有する光学サイドからのアプローチがある。光には古くから光情報処理という大きな研究分野があり、画像処理、2次元計測、2次元信号入出力システムなどで大きな実績を積んできた。光コンピュータという言葉も古くから用いられており、実際に、光コンピュータと呼ぶにふさわしいシステムの開発も多々なされてきた¹²⁾。

光情報処理の基本は空間的2次元アナログ信号に対する並列処理である。相関光学系、結像系、フーリエ変換光学系などが基本処理系である。しかし、演算システムとして最も必要な論理演算素子、記憶素子がなかったために、プログラム制御による演算が行えず、長い間、光情報処理システムは光演算システムとして認識されていなかった。

最近、超並列アナログ情報処理能力を有する光情報システム中に、コンピュータで行っているような離散信号に対する並列デジタル処理能力が潜んでいることが明らかになってきた。

これは離散信号処理、デジタル処理の究極が、連続信号処理、アナログ処理であると考えたと当然のことであるが、長い間、注目されな

かった。

現在、デジタル信号処理用の光演算法が多く発表されている。たとえば、空間並列光論理演算¹³⁾、マトリックスベクトル、マトリックスマトリックス演算法¹⁴⁾、並列シストリック演算法¹⁵⁾、並列剰余演算法¹⁶⁾などがその代表例である。

空間並列光論理演算法は、デジタルコンピュータの基本論理演算を一網打尽に光学的に実行する方法である。論理素子がなければ、論理演算ができないという考えを打破する上で大切な考え方である。この方法では、ネガ・ポジ像、偏光像、多色像、位相差、強度信号像などで符号化した2次元並列信号に対し、光による超並列情報処理能力を用いて、並列論理（パターン論理）を実行する。並列光論理演算が実行できるようになってきたので、並列デジタル光コンピュータの実現の可能性が、かなり高まってきた。

将来の光コンピュータでは種々のレベルで光の空間並列伝送特性を利用することができる¹⁷⁾。この技術は並列光インターコネクションと呼ばれており、プロセサプロセサ、プロセサチップ、チップ間レベルの並列信号伝送に役立つ。Fig.2に示す投影光学系は、並列光伝送を実行しうる系の一例である。物体と点光源の相関像が像面に得られる。勿論、回折理論を用いるとこのメカニズムは正しく記述できる。この現象を信号伝送の立場で考えると点光源からの信号を透過物体を介して無限本の並列信号伝送チャネルで信号伝送していることに相当する。これが、光並列インタコネクションの一つの考え方である。

並列光伝送の概念は、薄膜集積デバイス間の

Fig.2 Parallel signal transmission by light.

並列信号伝送や、3次元ICの層間の信号伝送などに利用できそうであり、その具体的方策が検討されはじめています。後述の空間並列光論理演算法は並列光インターコネクションの考え方を有効に利用したものである。並列光インターコネクションは光の持つ最良の性質を利用した信号伝送法である。

光コンピュータではこの並列インターコネクションの概念を十分駆使しなければならない。たとえば、Fig.2の系で並列光経路にマスクをおくと光の伝播方法、すなわち、像が変わる。したがって、並列光インターコネクションの方法を外からより自在に制御できれば、任意の演算が並列にできることになる。

相關光学系や結像光学系をCPUとする光コンピュータの駆動プログラムとは、実は並列光インターコネクションを時間的に制御する方法を記載したものである。並列コンピュータなどの電子装置がかかえる複雑な結線との決別が並列光インターコネクション利用の最大の利点である。

4.3 光コンピュータのアーキテクチャ

光コンピュータの方式としては、現在、次のものが考えられている¹⁸⁾。

- i) 時系列デジタル演算方式
- ii) 並列アナログ演算方式
- iii) 並列デジタル演算方式
- iv) 並列アナログ/デジタル演算方式

i) は現在のコンピュータと同一の構成を用いた電気信号を出来るだけ光信号に変えようとする方式である。光機能素子、光ICなどデバイスの使用を前提としている。

主な特徴は、光を信号通信に用いることにより、配線相互間の信号の干渉が避けられる、今までに蓄積されてきた全てのソフトウェアが利用できることである。しかし、大規模の並列コンピュータという特質は持たない。

ii) は光情報処理システムを用いた、専用の大規模高速情報処理システムである。2次元相關、2次元フーリエ変換の演算機能がその中心

となる。システムの見直しによって有効な利用法が見つかる就非常能力の高い新しい情報システムになる可能性がある。新しい記憶デバイスが見つかり、後述の、光連想コンピュータのように、従来にない、新しいシステムの構築も可能となる。2次元相關演算は光の最も得意とする演算であり、その有効利用がこの方式による光コンピュータシステムの実現の鍵となっている。

iii) は光情報処理技術の中から、デジタル処理に役立つ技術を見出し、システム全体を離散信号のデジタル処理システムと見なし、プログラムによって、セミ汎用並列処理を実行させようというものである。プログラマビリティ、反復処理能力、精度保持に特に注意を払ったシステム作りを目指している。この方式は、光の超並列特性を重視した並列デジタルコンピュータである。現在、発表されている。大部分の光コンピュータ構想は、この方式に属している^{19)~22)}。

iv) は光情報処理の利点を生かしつつ並列デジタル演算機能を並用しようとするシステムである。高速画像処理システムとして高い能力を発揮することが予想される。複合度の度合いにより、並列アナログ演算方式、または、並列デジタル演算方式に近づく。光の基本的な性質である、連続信号の性質を無視した並列デジタル演算方式よりも、光の特徴を生かした、並列アナログ処理を積極的に利用して、光コンピュータを構築しようという立場に立っている。光アナログ/デジタル画像処理などが、その基本的な概念である²³⁾。

5. OPALS: 並列光コンピュータ

ここでは、並列デジタル演算方式の光コンピュータの基本演算システム: OPALS (Optical Parallel Array Logic System) の概要を紹介する²²⁾。

OPALSは、空間並列光論理演算をその基本演算系とした、2つの2次元並列2値信号を処理しうる並列デジタル光演算システムである。

Fig. 3 Illustration of optical parallel logical operations.

OPALSの構成上、機能上の特徴を挙げると、

i) 2次元相関光学系を用いた空間並列光論理演算法を基本としており、CPUは2次元相関光学系そのものである。

ii) エレクトロニクスのアレイロジックの概念を拡張した、空間アレイロジックの概念を基にシステム構成を行い、かつその作動はプログラムにより実行する。

iii) 演算の種類は並列光インターコネクションをプログラムにより外部制御して選択が可能

iv) システムはフィードバック光学系を中心に構成し、並列信号の記憶やラッチには外部制御可能な、高性能空間光変調素子を想定する。

5.1 空間並列光論理演算法¹³⁾

Fig. 3はOPALSの基本演算を実行する並列光論理演算法の概念図である²⁴⁾。2つの2値離散入力画像A、Bを想定する。2つの画像の対応する画素を画素値の組合せ00, 01, 10, 11に従って特定の符号化画像に変換し、符号化画像を得る。(0は白, 1は黒に対応)符号化にはホログラム、多波長符号化、偏光などが利用される。次に相関光学系を用いて、符号化画像と演算核の相関をとる。得られた画像の各画素の中央部のみを抽出する復号マスクを用いて復号化する。得られる画像は演算核の種類によって

変化する。アレイ状に並んだ四つ一組の演算核を考えると、そのスイッチングの組合せは16種類ある。16種類の演算核による結果は全て異っており、各画素値は2変数2値論理関数演算の結果となっている。このような並列論理をパターン論理と呼ぶ。

Fig. 4にインコヒーレント投影光学系(相関光学系)を用いた並列光論理演算の実行法を示す。

Fig. 5にパターン論理の一例を示す。2入力像と、AND, OR, XORのパターン論理演算を示す。Fig. 4で演算核(光源アレイ)の位置を上下、左右、にシフトすれば、得られる結果は2次元的に下上、右左に並列シフトする。

このように、相関光学系を用いると、ディジ

Fig. 4 Implementation of optical parallel logic gates using a shadow casting system.

Fig.5 Pattern logic.

デジタルコンピュータに必要な2変数2値論理関数の演算，並列シフト演算ができる。したがって，相関光学系をCPUとして，並列光コンピュータが構築できることが予想される。勿論，上で示した並列光論理演算は相関光学系であればどのような系を用いても実行できる。

5.2 空間アレイロジック

アレイロジックは規則正しい構造をもつ回路素子を用いて，様々な機能を有する回路を作成する技術であり，カスタムICの製作に利用されている。

Fig.6 に半加算器のランダムロジックによる表現とアレイロジックによる表現を示す。アレイロジックを用いると任意の論理演算がANDアレイとORアレイの交点パターンで定義できる。

5.1で述べた並列光論理演算のある特定の画

Fig.6 Half adder, (a) expression by random logic, and (b) that by array logic with 2-bit decoder.

(a)

(b)

Fig. 7 Conceptual diagram of spatial array logic.

素に対応する演算機能は2ビットデコーダを用いたロジックアレイのそれと一対一の対応がつく。すなわち、2つの2値入力画素の符号化画素への変換は、2ビットデコーダの機能に、演算核の種類はANDアレイの一つの積項線（図の縦線）の交点パターンに対応する。大切なことはこの対応関係がFig. 7に示すように画像を構成する全ての画素に対して並列かつ独立に成

立つことである。このような演算機能を実現する技術を我々は空間アレイロジックと呼んでいる。

5.3 OPALSの構成

上述の空間並列光論理演算法の動作機能を空間アレイロジックの概念に拡張し、その考えを利用して構成した並列ディジタル演算方式の光コンピュータがOPALSである²¹⁾。

Fig. 8にOPALSの基本構成概念図を、Fig. 9に純光学型システムとして構築した具体的なシステムを示す。このシステムではデータ記憶に空間光変調素子LCLVを、データラッチに信号遅延を利用してある。左側の2つの結像系は信号の符号化系である。CPUには可変多重焦点結像系（相関光学系）を用いている²⁴⁾。入力

Fig. 8 Block diagram of OPALS.

Fig. 9 Optical version of OPALS.

信号 a と中間処理像 b は CPU によって反復演算され、反透鏡を介して並列的に出力される。

この光コンピュータではプログラムによって CPU 光学系による多重像の重畳の仕方を順次変えていく、すなわち、並列光インターコネクションを変えて、種々の演算を実行する。具体的なプログラムとは相関演算に用いる演算核を刻々と変える手順を記載したものである²²⁾。

6. 並列光連想記憶システム

最近の光コンピュータの研究の一つの流れとして、光の特質を生かした分散記憶、分散処理を基本とした光演算システムの研究がある。その代表例が光連想記憶方式のシステムである。

現在のコンピュータの記憶方式はアドレス指定による逐次読出（書込み）方式である。そのため記憶容量が膨大になると、その検索に要する時間は長くなり、演算効率の低下を招く、一方、人間の脳の記憶は連想方式をとっているといわれる。たとえば、音声、言語、画像の理解等の知的な情報処理を人間が瞬時に実行できるのは、膨大な記憶内容から必要な情報を高速に検索できる能力を持っているからに他ならない。連想記憶方式によれば、被検索情報に関連した情報を入力しただけで、必要な情報が瞬時に得られるという利点がある。光による並列情報処理能力はこのような連想記憶方式の光演算システムに極めて適しているように思われる。現在光連想記憶の研究の流れは以下に示す二つの方向で行われている。

6.1 ホログラムを用いた並列光連想記憶

ホログラムを用いた連想記憶の研究はかなり古くから行われていたが、光連想コンピュータの一つの候補として最近、再び、脚光を浴びている。

2つの物体 a, b から生ずる回折波を A, B として、この2つの波面でホログラムを作成する。ホログラムの記録材料の現像後の透過率が入射光強度に比例すると仮定し、このホログラムを波面 A に近い、不完全波面 $\hat{A}$ で照明するとホロ

グラム直後に現われる光の振幅分布は

$$\hat{A}|A+B|^2 = \hat{A}|A|^2 + \hat{A}|B|^2 + \hat{A}AB^* + \hat{A}A^*B \quad (1)$$

但し、 A^* は A の複素共役である。第4項から再生される像は、物体 b と物体 a 及び $\hat{a}$ の相関像とのコンボリューション積分となる（フーリエ変換型ホログラムを考える）。もし、 $\hat{a}$ が物体 a に十分近いものであれば、 a と $\hat{a}$ の相関像は鋭いピークをもつので、物体像 b が忠実に再生される。また、ホログラムを波面 B に近い不完全波面 $\hat{B}$ で照明しても同等のことが実行され、この場合には像面に再生像 a が現われる。すなわち、このホログラムを物体 a からの回折波で照明すると、像面に物体 b が想起され、物体 b から回折波で照明すると、物体 a が想起される。ホログラムを多重記録して作成すると、複数組のパターンも記録できる。

(1)式の第4項の再生波で再びホログラムを照明すると、その再生光は

$$\hat{A}A^*B|A+B|^2 = \hat{A}A^*B(|A|^2 + |B|^2) + (\hat{A}A^*)|B|^2A + \hat{A}A^{*2}|B|^2 \quad (2)$$

となる。第3項はほぼ完全な物体回折波をあらわしている。この場合、波面の位相は A のそれであり、振幅が $(\hat{A}A^*)|B|^2$ で僅かに変調されているにすぎない。この方法を用いると、ホログラム照明光が不完全波面 $\hat{A}$ であっても、ほぼ完全な像 a が想起できることがわかる。この考え方を実行する手段として、Fig. 10のような位

Fig. 10 Associative memory using phase conjugation mirrors²⁵⁾.

Fig.11 Neural network model.

相共役ミラーを利用したフィードバック光学系が考えられる。この系では位相共役ミラーで実時間でフィードバックをかけ、閾値処理、ゲイン調整を行って、連想する方式をとる²⁵⁾。このような、フィードバック光学系に位相共役波を用いた並列光連想記憶は非常に斬新な考え方であり、将来の光連想コンピュータ方式の一つの有力な候補となりうるものと思われる。

6.2 神経回路モデルを用いた光連想記憶

Fig. 11 のような神経回路モデルを用いた連想記憶の研究が最近、盛んになっている。Hopfieldモデル²⁶⁾、アソシアトロンモデル²⁷⁾ など多くの神経回路モデルをもとにした方式が提案されている。神経回路モデル、アソシアトロンを用いた場合の記録と想起は次のように行われる。

- 1) 各神経細胞（入出力素子、ニューロン）の全てのものは相互に接続されており、その接続路（シナプス）に記憶素子を持っている。
 - 2) 神経細胞は興奮状態に1と-1の値を持ち、非興奮状態には0、すなわち三値をとる。
 - 3) 記録時、シナプスは記憶素子の両端の神経細胞の値の積を加える。想起時、シナプスは記憶素子の内容を量子化し、一端の神経細胞との積を他端の神経細胞に伝える。
 - 4) 神経細胞は多方面より刺激を受け、1と-1の多数決をとり、多い方の値となる。
- このモデルは i) 記憶事項が、記憶領域全体に

分散して記録され、全体が統合されて想起が行われる。ii) 各素子は全く同じ処理をそれぞれ独立に行う、iii) フィードバックをかけると想起精度が向上する、など光学処理に適した特徴があげられる。想起のメカニズムを線型モデルで表わすと

$$\tilde{y} = T \tilde{x} \quad (3)$$

但し、 $\tilde{y}$ は出力ベクトル、 $\tilde{x}$ は記憶事項 $x^{(r)}$ に近いベクトル（入力）、 T は記憶行列で、記憶事項ベクトル $x^{(m)} = (x_1^{(m)}, x_2^{(m)}, x_3^{(m)}, \dots, x_n^{(m)})^T$ の自己相関行列

$$T = \sum_{m=1}^k x^{(m)} x^{(m)T} \quad (4)$$

として表わされる。Fig. 12 は(3)式の操作を模式的に表わしたものである。

想起は、記憶行列 T の各成分に入力 $\tilde{x}$ の各要素を横方向に積算し、縦方向に加算して出力 $\tilde{y}$ を得る。これは一種の行列-ベクトル積算であるので、光を用いると原理的には実行可能である。しかし、記憶行列の一方向の記憶素子数はデータ長の自乗に比例するので、 N^2 画素からなる画像入力では、記憶領域は N^4 と巨大なものとなり、現実には、光学処理でも不可能に近い²⁸⁾。この欠点を避けるため、各神経細胞間の接続数を制限して、記憶行列を帯行列とし、近傍

Fig.12 Readout of memories.

画素間演算が利用できるように調整して、2次元光学処理が可能のように改善した方法も考えられている²⁹⁾。この場合、記憶行列を空間的な記憶行列マスクとして具体的に作成することができる。想起は2つの縦続多重結像系を利用する。

7. おわりに

光コンピュータの目的、それに関連する基礎研究分野、種々の方式を概説した。また並列デジタル演算方式の光コンピュータシステムOPALSの概要と、並列光連想記憶の2つの方式を示した。

光コンピュータは多くの分野から関心が持たれており、それに関連する研究も多岐にわたっている。現在の大きな流れは、マイクロエレクトロニクス、オプトエレクトロニクスの分野からのアプローチと、光情報処理・並列画像処理、光学の分野からのアプローチに分けられる。前者は新しい光機能デバイスを開発して汎用の光コンピュータを構築しようという立場であり、光に欠けていた、論理素子と記憶素子の開発に力を注ごうという観点に立っている。言い換えれば、エレクトロニクスのトランジスタに相当する基本素子を光の分野で確立しようという立場である。後者は、元々、2次元並列処理に習熟しているため、高速画像処理が第一の目標となっている。アナログ光情報処理システムの経験があり、アーキテクチャに関連した研究が多い。光コンピュータは未だはっきりした形態が定まっていないため、両者の融合が必要で、互いに柔軟な姿勢での対応が必要となろう。

光コンピュータの研究では、光の特質を生かした並列アナログ演算方式の有効利用を今一度心がける必要がある。その意味で、並列光連想記憶方式の光コンピュータの研究は重要である。特に光の性質を利用した、分散処理、分散記憶の概念の導入は、光コンピュータの最も重要な研究の方向を示唆しているようにみえる。このような方式ではさらに学習能力の付加も必要と

なってくるものと思われる。

並列光インターコネクションの考え方は、光コンピュータ独自のものであり、エレクトロニクス装置に付随する複雑な結線からの解放という点で十二分に利用価値があろう。この考え方によれば、光コンピュータの構成が、論理演算素子、記憶素子、入出力素子とそれらの間の結線の集合体である構成にとらわれなくてよいことを示している。多分、光コンピュータは今までのコンピュータとその形態、構成、機能、役割が異なる大容量情報処理システムとして1990年代から、様々のタイプの基本システムが出現してくるものと予想される。

参考文献

- 1) R. D. レビン：サイエンス日本版 **12** No. 3 (1982) 54
- 2) 一岡芳樹：応用物理 **54** (1985) 1019.
- 3) 一岡芳樹：昭和60年度電気・情報関連学会連合大会論文集 3-88 (1985).
- 4) 光動向調査報告書 I (光産業技術振興協会, 東京, 昭和60年) p. 479.
- 5) 一岡芳樹：オプトロニクス No. 46 (1985) 45.
- 6) 光動向調査報告書 I (光産業技術振興協会, 東京, 昭和60年)
- 7) 奥村謙一郎他：電子通信学会誌 **C J66-C** (1983) 393.
- 8) A. Sasaki et al.: IEEE Trans. Electron Devices **ED-31** (1984) 805.
- 9) 水島公一, 和田守叶：化学と工業 **35** (1982) 161.
- 10) 窪田恵一, 西田信夫：光学 **14** (1985) 19.
- 11) 鈴木義二：オプトロニクス No. 40 (1985) 73.
- 12) 三橋慶喜：情報処理 **26** (1985) 909.
- 13) J. Tanida and Y. Ichioka: J. Opt. Soc. Am. **73** (1983) 800.
- 14) W.T. Rhodes and A.A. Sawchuk: *Optical Information Processing Fundamentals* (Springer Series in Topics in Applied Science vol. 48, ed. S.H. Lee), (Springer-Verlag, Berlin, 1981) p. 69.
- 15) S.Y. Kung: Proc. IEEE **72** (1984) 867.
- 16) A. Huang et al.: Appl. Opt. **18** (1979) 149.
- 17) J.W. Goodman et al.: Proc. IEEE **72** (1984) 850.
- 18) 一岡芳樹：計測と制御 **22** (1983) 851.
- 19) A.A. Sawchuk and T.C. Strand: Proc. IEEE **72** (1984) 758.
- 20) A. Huang: Proc. IEEE **72** (1984) 780.
- 21) Y. Ichioka and J. Tanida: Proc. IEEE **72** (1984) 787.
- 22) J. Tanida and Y. Ichioka: Appl. Opt. **25** (1986) 1565.

- 23) 一岡芳樹：光学技術コンタクト **23** (1985) 618.
- 24) 谷田 純：学位論文（大阪大学工学部，昭和61年）
p. 99.
- 25) B.H. Soffer et al.: Opt Lett. **11** (1986) 118.
- 26) J.J. Hopfield: Proc. Natl. Acad. Sci. **79** (1982) 2554.
- 27) 中野 馨：アソシエートロン（昭晃堂，東京，1979）.
- 28) N. Farhat and D. Psaltis: Technol. Digest of Optical Computing, Incline Village N.V., March, 1985, P.WB3-1.
- 29) 吉原一博，一岡芳樹：第33回応物関連学会予稿集（1986，春） p. 63.