光コンピュータ

Optical Computers

石原 聡

Satoshi ISHIIHARA

- 1945年5月生まれ
- 1970年東京大学物理学修士課程修了，電気試験所（現電子技術総合研究所）入所。以後，光情報技術の研究に従事。現在，工業技術院次世代産業技術開発官
- 工業技術院電子技術総合研究所（〒305 つくば市梅園 1-1-4）

1. はじめに

情報化社会の進展にともない，光は，既に情報の入出力，表示，記憶，伝送など，広義のコンピュータシステムで有効に使われ始めているが，さらに，情報処理に対する質的，量的両面での能力向上への需要と，光技術の発展とを背景とし，次のような光の特徴を利用することによって新しいコンピュータ（光コンピュータ）の世界を拓いていくという試みが盛んになってきている^{(1)~(6)}。

(a) 通常使用する光の周波数（可視光で 10^{14} Hz 以上）は従来の電気的情報処理系で行われているそれ（ $<10^{10}$ Hz）に比べて桁違いに大きい。

(b) 外部からの電磁的ノイズにも強い。また，透明物質内や空間を伝搬する光は，電導体を伝わる電気（電子）の場合と異なって，電気容量などの制限を受けない。

(c) 光は三次元空間内を伝搬でき，また光と光の直接的な相互作用は非常に小さい。このため，「並列処理」に適している。

ところで，一口に光コンピュータといっても，実は具体的な構成はもとよりその概念さえ，いまだ一つには固まっていない。本稿では，最近特に注目を集めている，光インタコネクション，光アナログコンピュータ，光デジタルコンピュー

タ，光ニューロコンピュータの四つの分野について述べる（図1）。

2. 光インタコネクション

従来のコンピュータ技術においては情報伝送は電気的に行われているが，その伝送容量の向上の必要性にともない，配線量の増大による配線間クロストークなどの問題点が生じてきた。これらを解決する手段として，コンピュータの各階層で光によって情報をやりとりする「光インタコネクション（光接続，光結線などとも呼ばれる）」が有望と考えられている⁽⁷⁾。

2・1 機器間 伝送情報容量増大や電磁ノイズ対策のため，コンピュータや各種情報機器の間に光が導入されている。既に光通信・光LAN（ローカルエリアネットワーク）技術として実用

図1 光コンピュータの木

化されている。

2・2 機器内/プロセッサ間 コンピュータの内部の（スパゲッティのような）電気配線の間のクロストークや、外部から及び外部へのノイズの問題を解決するため、光ファイバが徐々に導入され始めている。また、多数のプロセッサを同時に稼働させるマルチプロセッサシステムにおいて、プロセッサ（やメモリ）を放送形の「バス」によって結合する際に必要となる膨大な配線に対して、光は有効な手段を提供する。

2・3 チップ間 最近のコンピュータ用高速デバイスの速度は、それ自体のスイッチング時間よりも、むしろデバイス間の伝搬遅延時間で制限されるようになってきている。したがって素子の高速化を図るためには集積密度を上げる必要が出てくるが、各チップへの入出力を電気的に行っていると、相互クロストークや配線自体の電気容量などの問題もあってその入出力の線数や時間に限界が生じる。そこで発光素子と受光素子をチップ内におくことによって、チップ内部から光によって直接情報を入出力しようとする提案がある。有望な応用としては各デバイス間の同期をとるためのクロックの分配への領域がある。結線のためにホログラムを利用しようという方法も面白い。「三次元光結合共有メモリ（図2）⁽⁶⁾」等の専用デバイスの開発も始まっている。

2・4 チップ内 クロストークなどに関して

はチップ間と似た事情にあり、さらに、チップ内の演算部に対する配線部の面積が無視できなくなっている。そこで演算は電気（E）で、配線は光（O）でと、それぞれの特長を生かした分担形デバイスが考えられている。多数のEO、OE変換をいかに効率的に行うかがそのキーポイントであろう。消費エネルギーを考慮すると配線長がある程度（現在の技術では数百 μm ）以上のところで光の優位性が発揮される。

光インタコネクションを光コンピュータの観点から見ると、上記のように、インタコネクション自体を「目的」として捉えてあくまでも光に情報伝達に専念させようとするアプローチだけが重要ではない。次項以下でも述べるように、将来の光コンピュータを目指す諸技術において、空間的変換などの処理機能やニューロネットワークの結合機能などの実現をはかる際に、必然的に光インタコネクションを「手段」として利用するようになるという、重要かつ分離不可能な側面もある⁽⁷⁾。

3. 光アナログコンピュータ

「レンズ1枚によって（二次元）フーリエ変換が一瞬のうちにできる」という光専用プロセッサ技術であり、光と空間の持つ物理的性質を直接利用するそのエレガントさゆえに多くの人を魅了してきた。例えば、図3において P_1 面に二次元

図2 三次元光結合共有メモリを用いた並列プロセッサ⁽⁶⁾

(振幅透過率) 情報を置き、これを単色光で照射するだけで、その二次元フーリエ変換の結果が P_2 面で光振幅分布として得られる。フーリエ変換とは周波数空間への変換であるから、 P_2 面はそのまま二次元スペクトルアナライザの出力面といえるし、 P_2 面に、必要とする透過率を持った二次元情報 B を置くことによって空間周波数フィルタリングが可能となる。さらに、図 3 のように第 2 のレンズ L_2 を置けば、再度フーリエ変換が行われるので P_3 面に A と B の二次元相関パターンが得られ、パターン同定の手段としても使用できる。同様の光学系で、 P_1 面に配置したベクトルと P_2 面に配置した行列の積を P_3 面で得ることも可能となる。

この方式では、出力がアナログ的であってダイナミックレンジに限界があるが、最大の特長はハードウェアの単純さと高速性であり、レーダ信号などの周波数解析器、相関器あるいは二次元的な画像情報の相関器などについて実用化の研究が進められている。実用上の最大の問題は、図 4 の P_1 (や P_2) 面へどのように二次元空間情報を導入するかという点にあり、電気的あるいは光学的な入力によってその二次元的な振幅透過率 (あるいは反射率) を変えることのできる空間光変調器 (Spatial Light Modulator : SLM) の開発が重

要な課題となる。例えば、最近、強誘電液晶を用いた高速のものなどが開発されている。

4. 光デジタルコンピュータ

「光」自体が、デジタル演算の中核的機能を担おうという技術である。単純に考えれば、コンピュータの構成方式 (アーキテクチャ) としては現状のものをそのまま借用し、現在の電子コンピュータの情報担体の電気パルスを光に置き換え、光パルスに対する光論理素子や光メモリ、そして光インタコネクションを使えばよい。このような方向の実用化のポイントは、速度、消費エネルギー、大きさ、信頼性、そして究極的にはコストパフォーマンスが既存のデバイスのそれを上回る光デバイスの開発である。しかし、シリコンデバイスという競合技術の現状と今後の発展を念頭に置くと、それはそれほど容易ではない。

一方、1 章で述べた光の並列処理性を導入することによって、コンピュータ全体の体系的な性能を飛躍的に向上させようとするアプローチがある。図 4 (a) に示すような基本構成を持つ従来の (フォンノイマン形・時系列) デジタルコンピュータにおいては、次のタイミングで実行されるべき演算やその演算で使われるデータをメモリ

図 3 レンズを用いた光アナログコンピュータ方式 (f : レンズの焦点距離)

の中から取り出してくる（アドレッシング）部分がボトルネック（隘路）となって、その高性能化を妨げている。ところが光を用いると、図4(b)のように「並列アドレッシング」が容易になる。仮に後述の空間光デバイス技術の開発が進んで 1000×1000 のチャンネルの各々が100 Gbit/sを取扱うことができるようになるとすると、 10^{17} bit/sのスループットが得られる。

アメリカベル研究所ではデジタルコンピュータの限界がシステム内の情報伝送ボトルネックにあると考え、インタコネクションだけでなく演算までも光で行おうとしている。彼らは、デジタル光コンピュータの開発に取り組み、例えば後述のSEED素子アレイを使った図5のようなパイプライン形の並列演算を考えている⁽⁹⁾。

「符号置換法 (Symbolic Substitution) ⁽¹⁰⁾」

図4 デジタルコンピュータの基本方式⁽⁴⁾

図5 光パイプライン並列演算方式⁽⁹⁾

は、このような並列ディジタル汎用光コンピュータの基本演算方式の一例である。バイナリ画像を対象とし、「(A) その中からある一定のパターンを見つけ、(B) これを別のパターンに置き換える」という単純な基本操作の積み重ねによって、あらゆるディジタル演算を実行しようというものである。一般に光を用いると(A)の操作が実現しやすいので、多くの光学的実現法が提案されている。

このほかにもディジタル並列光コンピュータ方式が数多く提案されている。例えば、二つのバイナリ画像を空間コード化して重ね合わせたものを所望の演算に応じて配置された光源アレイで照明し、影絵方式で一度に画像内の全点に対して任意のディジタル論理演算を実行しようという方式⁽¹¹⁾がある。

5. 光ニューロコンピュータ

小さな子供でも人の顔を識別するが、これは従来の考え方のコンピュータの不得意な仕事の一例であろう。このように「大量の情報を瞬間的に処理し、多少の曖昧さは残ってももっともらしい解釈を出す」というタイプの情報処理へのニーズが高まっている。人間の脳に関する最近の神経生理学や神経心理学の研究の成果に基づいた脳の数理モデルでは、多数の基本要素が並列的に動作し、情報は分散的に記憶、処理されるというものが多く、光の並列処理性などを利用してモデルのシミュレーションを行おうという提案がある。さらに進んで、光を使った、「光脳」とでも言うべき新しいタイプのハードウェア（光ニューロコンピュータ）を実現しようという試みが注目している。

現在のところ、光はそのインタコネクション特性を生かして図6のようにもっぱら基本要素（ニューロン間のシナプス結合）に対応する行列ベクトル乗算の部分に使われている⁽¹²⁾。自由空間によるインタコネクションだけでなく、さらに小型で実用性の高い光ニューロチップ⁽¹³⁾なども試作され、また、ニューロコンピュータの重要な特性の一つである「学習」の、光による実現の報告もある。使用する個々のデバイスの性能が理論的な性能から外れ、ばらつきなどがあっても、ディジタルコンピュータと違ってシステム全体としては

所望の機能を発揮できるという特長があることが指摘されている⁽¹⁴⁾。

ホログラムと位相共役鏡とを使った連想システムも面白い。これはホログラム中にあらかじめ蓄えられたパターン（たとえば、顔写真）の一部分をインプットすることによって、その全体をアウトプットするというものである。

6. 光コンピュータ用デバイス

上でも触れたように、光コンピュータの研究開発における最大の問題は、使用可能なハードウェアに乏しいことである。特に、光の持つ並列処理性や情報伝送能力を生かすため、二次元的な広がりをもつ光情報を発生、変調、検出できる「空間光デバイス（図7）⁽⁴⁾」の開発が重要である。その際、並列光論理ゲート、空間光変調器（SLM）といった能動デバイスだけでなく、従来の光学素子技術を踏まえた受動デバイス（たとえば、ホログラム、レンズアレイなど）を忘れてはならないことを強調しておこう。

ところで従来の電子コンピュータ技術の開発にあたっては、その階層化が有効に働いてきた。すなわち、デバイス、回路、システム、ソフトウェアなど全体を細分化し、各々の専門分野での成果を集めることによってコンピュータ全体が進展するという分業体制ができあがっていた。しかしながら、その最終イメージも確立していない光コンピュータの開発にあたっては、むしろ総合的な観点から開発を進めるという考え方も重要である。デバイスと方式の開発も別々に行うのではなく、同時に考えていく必要がある。

図6 光ニューロネットワーク⁽¹²⁾

7. おわりに

以上、光コンピュータ技術について、広い範囲を対象として紹介してきた。

光は、現実的なレベルから未来的なレベルまでいろいろな形でコンピュータ技術の発展に寄与する大きな可能性を秘めている。その具現化のためには幅広い技術の発展が重要であり、広い視野に立った研究開発が必要である。筆者がかつて学会誌において初めて「光コンピュータ」という言葉を解説論文のタイトルにした⁽¹⁾頃には全く実現性の無い技術ととらえる向きが多かったが、その後の関係者のご努力によってナショナルプロジェクトのテーマにまで取り上げられるようになったことは同慶の至りである。このような動きが呼び水となり、光を用いる新しいコンピュータの世界を拓くブレークスルー技術が続出することを期待したい。

図7 空間光デバイス⁽⁴⁾

文 献

- (1) 石原・島田・櫻井, 光コンピュータ, 電子通信学会誌, 64-1 (1981), 89.
- (2) Feitelson, D.G., *Optical Computing: A Survey for Computer Scientists*, (1988) The MIT Press, : (邦訳) 光演算研究会訳, 光コンピューティング, (1991), 森北出版.
- (3) Ishihara, S. 編, *Optical Computing in Japan*, (1990), Nova Science Publishers.
- (4) 石原 聡, 光コンピュータ, (1989), 岩波書店.
- (5) 光コンピューティング特集, 光学, 20-10 (1991), 631.
- (6) Cathey, T., Ishihara, S., Lee, S-Y. and Chrostowski, J., Optical information processing systems, *Trans. IEICE*, E75-A-1 (1992), 28 / E75-C-1 (1992), 26.
- (7) 石原 聡・和田 修, 光インターコネクションと光コンピューティング, 電子情報通信学会論文誌, J75-C-1 (1992), 235.
- (8) Koyanagi, M., Takata, H., Mori, H. and Iba, J., Design of 4-kbit $\times$ 4-layer optically coupled three-dimensional common memory for parallel processor system, *IEEE J. Solid-State Circuits*, 25 (1990), 109.
- (9) Price, M.E., Craft, N.C., Downs, M.M., LaMarche, R.E., D'Asaro, L.A., Chirovsky, L.M.F. and Murdocca, M.J., Optical digital processor using arrays of symmetric self-electrooptic effect devices, *Appl. Opt.*, 30 (1991), 2287.
- (10) Brenner, K-H., Huang, A. and Streibl, N., Digital optical computing with symbolic substitution, *Appl. Opt.*, 25 (1986), 3054.
- (11) Tanida, J. and Ichioka, Y., Optical-logic array processor using shadowgrams. III. Parallel neighborhood operations and an architecture of an optical digital-computing system, *J. Opt. Soc. Am.*, A 2 (1985), 1245.
- (12) Farhat, N.H., Psaltis, D., Prata, A. and Paek, E., Optical implementation of the Hopfield model, *Appl. Opt.*, 24 (1985), 1469.
- (13) Nitta, Y., Ohta, J., Mitsunaga, K. and Kyuma, K., GaAs/AlGaAs optical neurochip (Second report), 1990 International Topical Meeting on Optical Computing (Kobe, Japan), 10 I 13, Conference Record : *Proc. SPIE*, 1359 (1990), 319.
- (14) Ishihara, S., Kasama, N., Mori, M., Hayasaki, Y. and Yatagai, T., Effects of imperfection in spatial optical devices on backpropagation learning capability of optoelectronic neural network, *Postdeadline Papers of 1991 Topical Meeting on Optical Computing*, PD 2 (1991), 7.

(原稿受付 1992 年 8 月 26 日)