

光コンピュータ：原理と展望

電子技術総合研究所 石原 聰

Optical computer : an introduction

Satoshi Ishihara

Electrotechnical Laboratory

1. はじめに

1990年4月にわが国で最初の光コンピュータ国際会議が開催されるが、このように最近、光を用いた情報処理、あるいは「光コンピュータ」技術が注目を集めている¹⁾。その背景には、光ディスクメモリ、光ファイバ通信やレーザー加工などに代表される光技術の発展と、情報化社会の進展にともなう質的、量的両面での情報処理能力の一層の向上への期待がある。

ところで、この光コンピュータ技術の展望にあたっては、本来これを何らかの形で「分類」するのが便利であろうが、一旦に光コンピュータと言ってもその具体的なイメージはもとよりその概念さえ多様で、いまだ一つには固まっていないため、これが容易ではない。すなわち「分類」自体が、数ある光コンピュータへのアプローチの中での一つの立場を表すということになるし、また「分類」に意味があるかどうかとも明確でないからである。しかし、ここでは説明の便宜上次のように大きく4つに分け、以下ではこの順序でそれぞれについて述べる。

- ・光インターコネクション
- ・アナログ光コンピュータ技術

- ・デジタルコンピュータ技術
- ・光ニューロコンピュータ技術

2. 光の特長

これらの技術の紹介の前に、コンピュータ技術への応用において、「なぜ光なのか」、すなわち「どのような光の特長が注目されているのか」、を簡単にまとめておこう。

(a) まず、よく知られているように、その周波数(可視光で 10^{14} Hz以上)が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こと。

ただし、このような帯域を直接利用する技術はまだ開発されていない。

(b) 次に、外部からの電磁ノイズにも強いこと。また、ガラスのような透明物質内や空間を伝ばる光は、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こと。

これらの点は、情報を別の場所に伝えようとする場合に特に有用である。

(c) さらに、光は3次元空間を伝ばることができること。また光と光の直接的な相互作用が著しく小さいこと。

このため、いわゆる「並列処理」に適していると言われ、注目されている。後者の「光と光の相互干渉性」は、一般的には、光で直接理論演算を実行しようとする場合にはむしろ欠点となることも考えられるが、光と物質の相互作用を介することによって高速、低消費パワーの論理演算素子の実現の可能性も追求されている。

なお以下に述べる個々の技術が、必ずしもここにあげたすべての特長を利用しているわけではない。

3. 光インターコネクション

従来のコンピュータ技術においては、大きくはコンピュータ間から、小さくはLSIチップ内のエレメント間に至るまで、情報のやりとりは電気的に行われている。情報処理容量の増大にともなう、これらの情報伝送の伝送容量の向上へのニーズも高まってきたが、これにつれて、配線量の増大にともなう配線間のクロストークなど、いくつかの問題点が生じてきた。これらを解決する手段として光が有効と考えられている。そのような技術が光インターコネクションである。これには、必ずしも光ファイバや光導波路などを介する方法だけでなく、空間内を伝ばす手法も含まれ、「光接続」と呼ばれることもある。

これは厳密に言えば光コンピュータとは言えないかもしれないが、現在のコンピュータの持つ欠点を助けようという技術である。ここでは、コンピュータを以下のように段階分けし、その各々のレベルごとに検討してみよう。

(a) 機器間

コンピュータや各種情報機器の間の光配線である。伝送情報容量の増大、電磁ノイズ対策などを狙いとした、このレベルへの光技術の導入は、すでに光LAN(ローカルエリアネットワーク)として実用化されている。身近な話では、オーディオ機器間接続にも光ケーブルが盛んに使われ始めている。概念的には以下の各レベルでの光配線につながるものといえる。

(b) 機器内/プロセッサ間

コンピュータの内部を覗いてみると、多数のケーブルの束がプロセッサなどのモジュールの間を

行き来している。これらの電気配線の間のクロストークや、外部から、あるいは外部へのノイズが無視できなくなり、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てコンピュータの性能を向上させようという試みもある。多数のプロセッサ(やメモリ)を放送形の(すなわち任意のプロセッサからの情報を他の全てのプロセッサに同時に伝える)「バス」によって一つに結合したマルチプロセッサシステムはその一例であるが、一つ一つのプロセッサ間を光ビームや光ファイバでそれぞれ直接結合する方法では、プロセッサ数が増大すると膨大な配線が必要になる。そこで、空間を自由に伝ばす光の利用が注目されている。Fig. 1にそのような光のバスの基本的な構成を示す。ある一つのプロセッサの発光素子(レーザーなど)からの光にのった情報は、円筒形のミラーで反射し、すべてのプロセッサの受光素子に到達することができる。

また大容量空間スイッチへの応用も注目されているが、これは光通信技術でも利用できる。

(c) チップ間

最近のLSI論理素子の速度は、素子自体のスイッチング時間よりも、むしろ素子間を情報が伝わっていくのに有する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、チップ内の素子の大きさや素子間の距離を小さくする、すなわち集積密度を上げる必要が出てくる。各チップへの入出力を電気的な結線によって行っていると、相互クロストークなどの問題もあってその入出力の線数には限界が生じる。また、配線自体が電気容量を持つのでチャージアップにも時間がかかる。

そこでチップ内部から光によって、直接情報を入出力できれば都合良い。これは発光素子/受光素子をチップ内におくことによって、実現できよう。クロック分配への応用などが期待されている。結線のためにホログラムを利用しようという提案もある。

(d) チップ内

チップ内の結線についてもクロストークなどに関してはチップ間と似た事情にある。また、チッ

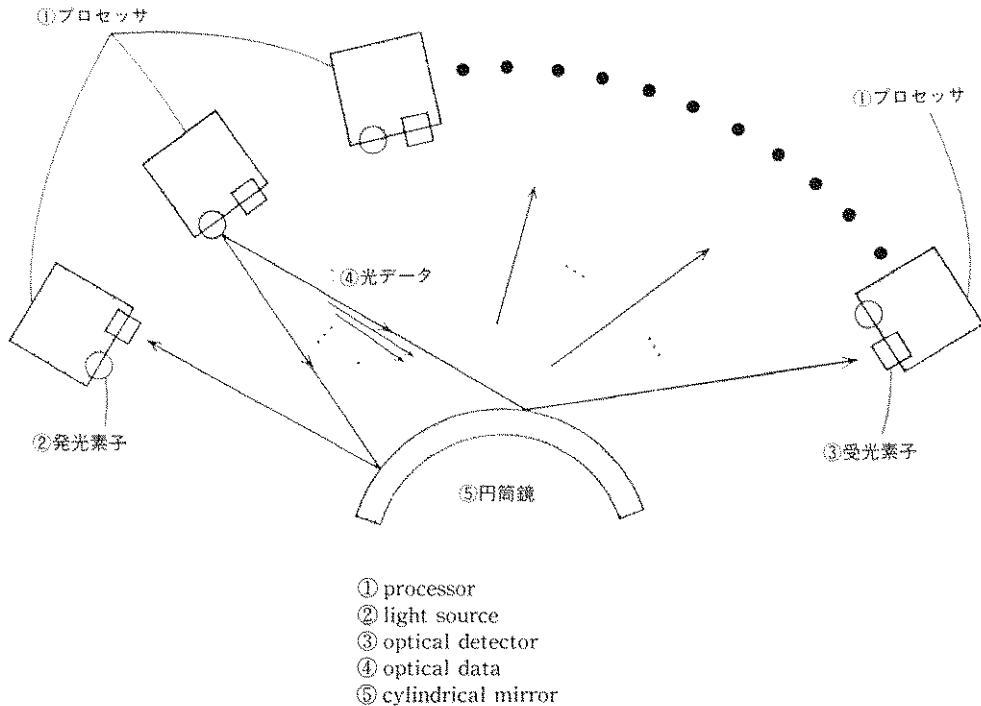


Fig. 1 Optical bus for multi-processor system

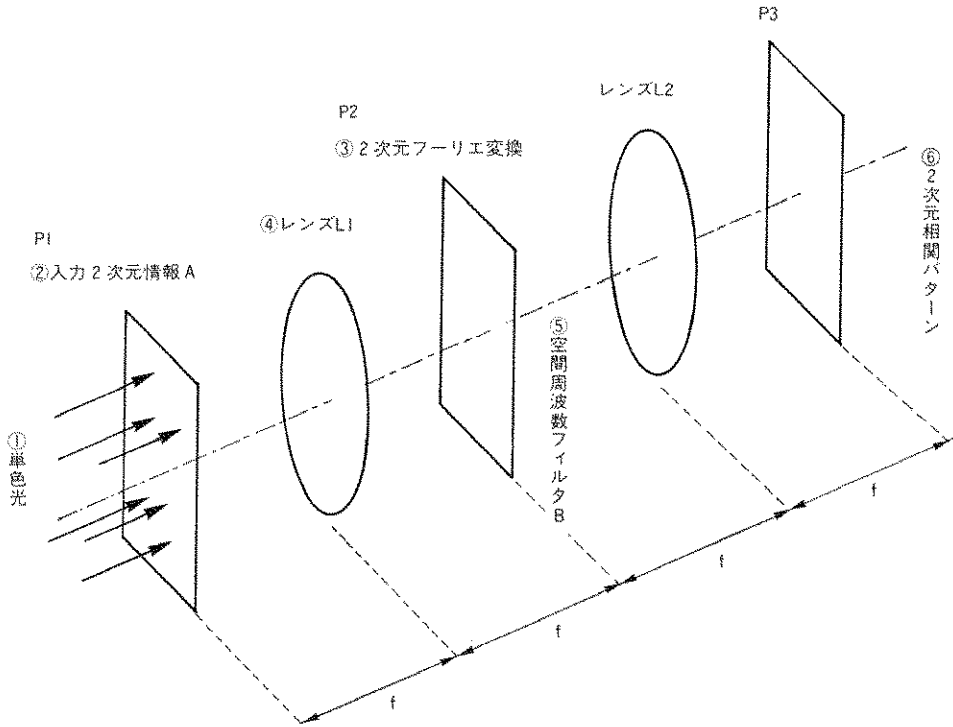
ブ内の演算部に対して配線部の面積が無視できなくなっている。そこで演算は電気(E)で、配線は光(O)でと、それぞれの特長を生かしての分担形デバイスが考えられている。多数のEO、OE変換をいかに効率的に行うかがそのキーポイントであろう。いずれにせよ、ここまでくると、後にとり上げるオールオプティカルデバイスまではあと一步である。

4. アナログ光コンピュータ技術

これもコンピュータの不得意な機能を光によって補おうという技術である。一口で言えば、レンズを用いたアナログ光コンピュータということになるが、むしろ光専用プロセッサなどという方が具体的に内容を示すことになるかもしれない。「レンズ1枚によって(2次元)フーリエ変換が一瞬のうちに行える」という、光と空間の持つ物理的性質を直接利用する。このような光アナログ方式は、数ある光コンピュータ技術の中でも古い歴史を持ち、そのエレガントさゆえに多くの人を魅了して

きた。

Fig. 2においてP1面に2次元(振幅透過率)情報を置き、これを単色光で照射すると、その2次元フーリエ変換の結果がP2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、P2面はそのままスペクトルアナライザの出力面といえる。パターンBに対応する透過率を持った2次元情報をP2面に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、Fig. 2の右側に第2のレンズL2を置けば、再度フーリエ変換が行われるのでP3面にAとBの2次元相関パターンが得られる。一般に自己相関パターンは鋭いピークを示すので、AとBが同一であるかどうか、すなわちパターン同定の手段としても利用できる。さらにL1とL2を、ある方向にのみフーリエ変換を行う特殊なレンズにすることによって、P1面に配置したベクトル情報とP2面に配置したマトリクス情報のベクトル・マトリクス積(ベクトル)をP3面で得ることも可能となる。



- ① monochromatic light
- ② 2-dimensional(2-D) input A
- ③ 2-D Fourier transform of A
- ④ lenses
- ⑤ spatial filter B
- ⑥ 2-D correlation output

Fig. 2 Optical analog computing with lenses
(f : focal length of lenses)

この方式は、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、最大の特長は何といってもそのハードウェアの単純さと高速性である。最近米国を中心に、レーダー信号などの周波数解析器、相関器あるいは2次元的な画像情報の相関器の実用化の研究が進められている。

この方式の実用上の最大の問題は、Fig. 2のP1(やP2)面へどうやって2次元情報を導入するかという点にある。したがって、電気的あるいは光学的な入力によってその2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(SLM)の開発が重要な課題となる。現在市

販されているものは数種しか無い、応答速度が遅いと言われてきたLCLV(液晶ライトバルブ)も最近誘電体液晶を用いた高速のものが市販されたとのニュースもある。SLMはわが国でも浜松ホトニクスや住友電工などで先駆的な開発が進められてきたが、このようなデバイスは日本の得意な分野と思われ、新たな参入が待たれる。

5. デジタル光コンピュータ技術

「光」自体が、演算のような情報処理の中核的機能を担おうという技術である。すなわち狭い意味での「光コンピュータ」を指す。

パソコンやファミコンにせよ、スーパーコンピュータにせよ、現在のコンピュータはその中で電気的なパルスが動き回って、必要とする処理を実行している。使われているハードウェアは、シリコンで作られた論理素子やメモリと、配線用の銅線である。従って、情報の担体を光に置き換え、光パルスに対する光論理素子や光メモリ、そして配線用の光ファイバ(あるいは光ビーム)を使うという光コンピュータを想定すること自体は比較的易しい。コンピュータの構成方式(アーキテクチャ)は現状のものをそのまま借用すればよいからである。

事実、従来の光コンピュータの研究の多くの努力は、いわゆる光双安定素子などそのような光論理素子の開発に向けられてきている。このような方向のポイントは、デバイスの速度、消費エネルギーといった基本的性能はもとより、大きさ、信頼性といった実用的ファクタ、そして究極的にはコストパフォーマンスが、従来の、たとえばシリコンデバイスのそれを大幅に上回ることができるかどうかにある。今後の発展を含めたシリコンデバイス技術の現状などを念頭に置くと、これはそれほど容易ではない。

米国ベル研究所のL.ウエストが提案した、QWEST効果と呼ぶ新しい量子効果を利用したデバイスは、そのような困難な問題に立ち向かおうとする努力の一例である。このQWEST現象は、サブピコ秒～数ピコ秒(1ピコ秒= 10^{-12} 秒)のスイッチング時間と数十フェムトジュール(1フェムトジュール= 10^{-15} ジュール)のスイッチングエネルギーをもつ可能性があるとのことである。QWEST現象を使った導波路形4入力光NORゲート素子の提案もある。

以上のように構成デバイスを光デバイスに置き換えることによって速度や消費エネルギーなどの性能アップを図ろうとするアプローチだけでなく、すでに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システム的な性能を飛躍的に向上させようとする試みがある。

このためには、コンピュータのアーキテクチャ自体を再考する必要がある、これはいわゆるフォ

ン・ノイマンボトルネック問題(Fig.3(a)参照)の解決にもつながる。米国のベル研究所や南カリフォルニア大などを中心に研究が進められている。たとえば光の並列処理性を活かしメモリ全体を一度にアクセスする方法(Fig.3(b))や、プロセッサとメモリを一体化して考える方式(Fig.3(c))などが研究されている。わが国でもロジックアレイの考え方を拡張した大阪大学の演算方式の提案などもある。今後のこの分野の一層の進展のためには、独創的なアイデアの提示や、デバイス技術を踏まえたその具体的な構成方式の研究が必要であ

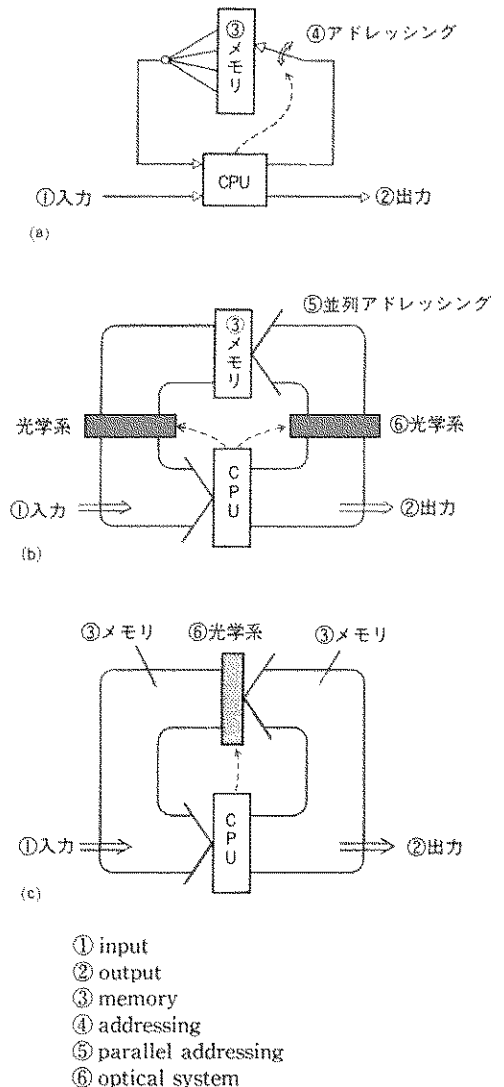


Fig. 3 Optical digital computing architectures

り、さらに光の特長を生かす空間光デバイスの開発が特に重要である。

6. 光ニューロコンピュータ技術

コンピュータの性能が日進月歩を遂げているにもかかわらず、従来の考え方のコンピュータでは処理しにくい、たとえば「大量の情報を瞬間的に処理し、多少の曖昧さは残っていてももっともらしい解釈を出す必要がある」というタイプの情報処理へのニーズが集まってきている。小さな子供でも人の顔を識別するが、これはコンピュータの不得意な仕事の一つであろう。もちろん、このようなタイプの処理は人間の脳で行われている。

そこで脳を模倣した、あるいは脳と同様の機能を有する機械(コンピュータ)を作ってみたいという願望が出てくる。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て、再び脳の数理モデル(たとえばカリフォルニア工科大学ホップフィールド教授によるモデル)が注目されている²⁾。

そのような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、また上述の脳に関する知見の多くが光の性質に関連しているという見解もあって、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光学的に行うという試みがある。さらに進んで、そのような光を使ったハードウェアを作ることができれば、まさに「光脳」とも言うべき、上で述べた新しいタイプのコンピュータの実現につながる。

野心的な、未知の分野といってもよいが、最近ではいくつかの実験が行われ、専用のチップなども試作されている³⁾。また、ホログラムを使った「連想システム」に関する基礎的な実験の報告もある。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。

7. おわりに

以上、光を使った情報処理、あるいは光コンピュータ技術について、最新の動向もまじえ、広い

範囲にわたって駆け足で紹介してきた。ここでは便宜上光コンピュータ技術を4通りに分類したが、今後、ここにあげられていない新しい技術も次々と現れてくるものと思われる。紙面の都合で概論に留まらざるを得なかったが、興味をお持ちの方は専門誌あるいは文献¹⁾などを参照願いたい。

いずれにせよ、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しうる大きな可能性を秘めている。と同時に具現化のためにはデバイスや材料の開発が大きな鍵となる。

他方、ガラス技術はその誕生以来光と共に成長してきた。冒頭に挙げた既存光技術においても、ディスク用基板、光ファイバ、大出力固体レーザーのようにガラスは各々の中心部に重要な役割を果たしている。今後の光コンピュータ技術の発展への大きな寄与が期待される。

参考文献

- 1) 石原 聰：光コンピュータ、岩波書店、NEW SCIENCE AGE 38(1989)
- 2) 福島邦彦：ニューロコンピュータと神経回路モデル、NEW GLASS, Vol. 4, No. 3 (1989)
- 3) 久間和生：光コンピュータ・ニューロコンピュータ用デバイスと材料…現状と将来動向、NEW GLASS, vol. 4, No. 3 (1989)

〔筆者紹介〕



石原 聰(いしはら さとし)
昭43 東大・工・物工卒。
昭45 同大学院修士課程修了。同年電気試験所(現電子技術総合研究所)入所。以来、光情報技術の研究などに従事。現在、同所光技術部光情報研究室主任研究官。この間、
昭52-53 スタンフォード大客員研究員。
昭62-平1 (財)光産業技術振興協会開発部長。

Abstract

After a brief introduction of the nature of light relevant to information processing, so-called optical computer technology is reviewed in four categories :

- 1) optical interconnects : most practical application so far.
- 2) analog optical computer : simple but powerful processing.

3) digital optical computer : future ultrasuper computer, and

4) optical neuro-computer : possible optical brain.

It is emphasized that research and development of devices and materials including that utilize glass play an important role to realize an optical computer.