特 集

光コンピュータの現状と将来

— 岡 芳 樹*

(1987年 5月14日 受理)

Optical Computer

Yoshiki ICHIOKA*

(Received May 14, 1987)

This paper describes the present state and the prospect of optical computers. Areas of system architectures of optical parallel computers are emphasized and breakthroughs required in the development of optical computers are indicated. In addition, the role of the optical computer in a hybrid computing system in future is discussed.

Key Words : Optical computer.

1. はじめに

光コンピュータという言葉を聞くと、美しい虹色のレーザー光線が縦横にかけ巡り、その中で、何かとてつもない大容量の演算が光速で、しかも静かに実行している夢のコンピュータシステムのイメージを抱く。残念ながらこのようなコンピュータは未だ実現していない。

光コンピュータの研究は1980年代に入って急に活況を呈し始め、現在、各国の研究者がしのぎを削って行っている計算の世界のフロンティアである。日本の研究も、今のところ世界の第一線の研究に伍しており、これから数年の展開が極めて重要な段階となっている。情報処理や伝送に光を用いようという考えは古くからあったが、最近の光通信の成功はこの概念の正しさを明確に示した。

情報処理・伝送システムにおいて電子の代りに光を情報媒体とする利点として、超高速性、超広帯域性、超並列性、信号相互間の非干渉性などが挙げられる。また、電子システムで常に問題となる負荷遅延、クロックスキュー、アースの問題が回避できること、大ファンアウト、ファンインが実現できることなども光システム独特の重要な性質である。

ここでは、光コンピュータの目的、研究の現状、光コンピュータ実現に必要な技術的ブレークスルー、複合化コンピュータへの夢などについて述べる。

2. 光コンピュータの目的

コンピュータ科学の最近のホットな話題は、今後10年間位の電子計算機の主流と目されるMIMD型並列計算機の発展動向であろう。光コン

* 大阪大学工学部応用物理学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

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

コンピュータの目的はこれらの並列計算機あるいは大規模スーパーコンピュータでもってしても実現のむずかしい応用を指向する必要がある。そこで、光コンピュータが目指すべき役割を実現可能性の高い順に並べると

- i) 高速光通信への応用
- ii) スーパーコンピュータより 10^3 位処理能力の高い汎用コンピュータへの応用
- iii) 高速画像処理への応用
- iv) 視覚情報システムへの応用
- v) 高速画像検索への応用
- vi) 超高速汎用コンピュータとしての応用
- viii) 知的画像認識への応用

などが浮び上る。現在及び近年の電子計算機の最も不得手な分野は、画像処理や2, 3次元情報シミュレーション実験等のデータ配列が並列的でかつデータ量の多いところである。光の諸性質を考えると、光コンピュータの主目的をこの辺りに設定するのは当然の成行である。パターン認識は情報処理の究極の目的であり、そのアプローチにおける光コンピュータの果たす役割も重要なものとなってくるであろう。

3. 光コンピュータの現状

光コンピュータの研究の大きな流れとして Table I に示す3つの方向が考えられる。

Table I Optical computers and their applications.

ある研究者は光コンピュータの目的を2次元フーリエ変換やパターン照合のような特殊目的の専用コンピュータシステムとして限定する。

光デバイスの研究者は光が電子に対して優れている性質—電磁界に対する非干渉性, アース不要性, 大ファンアウト・ファンインがとれる—を用いた光パルス利用の光コンピュータを目ざしている。その構成は極めて現実的で光と電子が得意とするところを各々, 光素子, 電子素子で実行させ, その間の信号の通信を光電, 電光変換素子でインターフェースし, 新しい演算システムを作成しようとしている。このようなシステムは光コンピュータというより, むしろ光エレクトロニックコンピュータと云うべきシステムである。その主目的は高速光通信応用と電子計算機に近い構成をもつ高速汎用コンピュータ (スーパーコンピュータの約1000倍位の能力をもつシステム) の開発である。

他のグループは光の最大の特徴である超並列性とデジタル処理の概念をもとにした超高速の並列コンピュータの研究を行っている。コンピュータの入出力部, 記憶部, 演算部全てに光の超並列光演算概念を取入れようという野心的な試みを目論んでいる。伝統的な光学の諸概念の利用が基本にあり, 光のもつ種々の優雅な処理技術や既存の光技術を視点をかえて情報システムに導入していこうという立場に立っている。目標は高速画像処理や超高速汎用並列コンピュータ (スーパーコンピュータより $10^6 \sim 10^9$ 能力の高いシステム) の開発である。

他のグループは, 並列デジタル計算機よりは, むしろ, 人間の脳や生体の知的な演算能力, たとえばパターン検索能力, パターン認識能力が実現しうる未来指向の並列コンピュータの研究を行っている。このコンピュータは, 光・電子・生体情報処理の概念が融合した複合システムで, 光ニューロンコンピュータと呼ぶべきシステムである。

我々のグループは並列光コンピュータや光ニューロンコンピュータに興味をもって研究を行っている。Table II は現在, 考えられている並

Table II Optical parallel computers.

	並列アナログコンピュータ	並列デジタルコンピュータ	並列光連想コンピュータ	並列パターン認識コンピュータ
目的	専用用途	汎用, 並列光通信, 画像処理	高速画像検索	パターン認識
基本概念	光学現象 光情報処理	デジタル処理の概念 離散的2次元相関処理	神経回路網情報処理 分散処理, 光情報処理	視覚情報処理, 光情報処理 画像処理
演算概念	種々の並列演算 ホログラフィ	空間的並列論理演算 並列アレイロジック	並列光分散処理, 記憶 光閾値処理	並列分担処理, 複合処理 ハイブリッド画像処理
信号通信法	並列光接続, 無結線	並列光接続, 無結線	並列光接続, 無結線	並列光接続, 無結線
入出力	並列2次元配置	並列2次元配置	並列2・3次元配置	並列2・3次元配置
記憶法	並列可逆	並列可逆	並列可逆	並列可逆
ソフトウェア	並列光接続制御	並列デジタル記法 並列光接続制御	モデリング(数式表示) 光接続制御	モデリング(数式表示) 光接続制御
必要デバイス	空間光変調素子等	高性能並列可逆光メモリ, 3次元並列光スイッチ等	高性能並列可逆光メモリ, 並列閾値デバイス	高性能並列可逆光メモリ
CPU	相関/干渉光学系	相関光学系/光機能デバイス	相関光学系/光機能デバイス	相関光学系/光機能デバイス

列光コンピュータの目的, 基本概念, 演算原理, 必要な素子などをまとめたものである¹⁾。

4. 並列光コンピュータの現状と展望

並列光コンピュータの構成は基本的にデータの入出力部, 演算部, 記憶部から成るが, その形態は電子計算機とはかなり異なる。いずれのレベルでも信号は並列的に光で運ばれ, 各部の処理も並列に行われる。その処理方式はSIMD型(Single Instruction Multi Data Flow)が主流である。しかし, アルゴリズムの工夫によりMIMD型の演算も可能である。信号の伝送は光の並列空間伝播特性を用いた並列光接続を利用する。並列光接続による基本動作は, 入出力信号, 中間信号の同時並列シフト, プロセッサ間の同時並列接続, 完全シャッフリング, 大ファンアウト特性を用いた信号伝播(Broadcasting), 並列入出力などである。並列光記憶素子の開発が遅れているが, この素子が開発できればほぼ実用化に近いシステムが実現出来る。以下, 並列光コンピュータの代表的な5つのアーキテクチャを紹介する。

i) 並列光順序論理プロセッサ²⁾ Fig.1に並列インターコネクション素子(自由空間並列光接続素子)と空間光変調素子で構成されたシステ

Fig.1 Functional block diagram of sequential optical logic system.²⁾

ムのブロック図を示す。このシステムでは, 並列論理ゲートアレイ, メモリーアレイ, I/O, CPUの機能は一体化されている。この機能の一体化は高性能の空間光変調素子を用いれば実現できる。並列光接続素子が自在に外部制御できると, メモリーに格納されている信号とフィードバックされた中間信号間の任意の並列演算が可能となる。並列プログラムは並列光接続素子を外部制御して実行する。4×4アレイの実験システムが報告されており, 並列フリップフロップなどの並列順序回路論理演算の実験が試みられている。

ii) シフト接続SIMDアレイプロセッサ³⁾

Fig.2にシステムの構想図を示す, 2次元入力信号はビットプレーンに分解され, 2値画像

Fig.2 Shift-connected SIMD machine block diagram.

としてメモリに記憶される。メモリから読出された信号はシフターによって上下、左右に画像全体が並列シフトを受け、論理演算部に入力される。そして、これらの信号に対し並列論理演算、算術演算が実行され中間結果をメモリに保持する。必要な演算が実行し終るまで、データはフィードバックループ内を回る。基本的に四則演算がSIMD方式で並列的に実行できるが、具体的なシステム構想まで発表されていない。

iii) OPALS⁴⁾ OPALS (Optical Parallel Array Logic System) は新しい並列光演算の原理である並列光論理演算法と光アレイロジックの概念を基本として構成した並列光コンピュータシステムである。並列光論理演算は入力データの符号化と2次元相関技術を用いて実用しうる並列論理演算 (パターン論理演算) 技法で、スイッチング素子を用いて行う従来の論理ゲートとはその実行法が基本的に異なる⁵⁾。並列光論理演算は入力データの符号化、並列シフト、並列光接続の概念を利用した並列演算法で、光学でよく用いる相関光学系ならいずれの系を用いても実行できる。並列光論理演算法の演算原理はカスタムIC作成に利用するアレイロジックの演算原理と巧妙な対応関係がつく。しかも、この対応関係は入力画像を構成する全ての要素に対し並列かつ独立に成立つ。このような並列アレイロジックを光アレイロジックと呼んでいる⁴⁾。

Fig.3にOPALSの構成概念図を示す。その具体的なシステム構成法には、光・電子複合型、

Fig.3 Functional block diagram of OPALS.

Boolean Logic:

(Recognize Statusvector → Substitute Statusvalue)

Symbolic Substitution:

(Recognize spatial configuration → Substitute spatial configuration)

Fig.4 Comparison of Boolean logic with symbolic substitution.

純光学型、機能モジュール型がある。OPALSはそのハードウェア実現法と共にそれを駆動する並列プログラムの技法が具体的に提示されているのが大きな特徴である。OPALSは先述のシフト接続SIMDアレイプロセサの基本演算原理を全て含包、利用している。

iv) 符号置換コンピュータ⁴⁾ 最近、符号置換 (Symbolic substitution) という新しい並列光演算原理を利用した符号置換光コンピュータの研究が活発に行われている。符号置換とは特定の局所パターンを考え、その空間配列の形状およびその配列の存在する位置を、入力データ全面にわたって検出し、その検出信号に対し

Fig.5 Architecture of an optical symbolic substitution processor.

別の局所パターンを割当てて出力信号を再構成して出力する新しい演算原理である。Fig.4に通常の論理演算と符号置換の演算原理の差異を示す。符号置換の基本演算は2次元パターン照合と2次元相関演算である。このような符号置換の演算原理を基にした符号置換光コンピュータの基本概念図をFig.5に示す。パターンスプリッタにより2値入力信号のレプリカを複数個作る。この入力信号に対しパターン認識器（一種のパターン照合光学系）で特定の局所パターンを並列的に検出し、符号置換器（2次元相関光学系）で新しいパターンに置換して、出力像を合成し、演算結果を得る。符号置換の演算原理を用いると、前出の並列光論理演算の他、並列算術演算、パターン照合なども実行できる。現在、このシステムの具体的な実現方法の研究が進められている。

V) MIMD型光演算システム⁷⁾ OPALSや符号置換光コンピュータの基本演算方式はSIMD型である。しかし、データの入力法を工夫して、種々の種類の入力像を局所パターン化しておくと、これらのシステムを用いてMIMD型の並列演算を実行することができる。Fig.6はその演算概念図を示したものである¹⁾。第一ステップは異なる種類の入力像をそれぞれ局所パターンに符号化し、一枚の入力像に変換する。第二

Fig.6 Processing principle of an optical MIMD machine.

ステップはこの入力符号化像に対しOPALSや符号置換コンピュータで演算を実行する。第三ステップはCPUで実行された演算結果に対し入力時と逆の操作を行って出力像をうる。符号化された入力像は並列レジスタ用の入力データと見なすことができる。この考え方をを用いると、異なる種類のパターン間の並列演算や、MIMD方式の数値演算（四則演算）を実行することもでき、光コンピュータのソフトウェア面に対し極めて示唆に富む演算概念を提供する。

また光コンピュータでは演算結果や中間結果の並列データを次段の演算の並列演算命令と考え一種の間接命令的な機能を果させることもできる。この考え方を利用すると処理しうる並列データ量を一層増大させると共に、演算の自由度を飛躍的に向上させることもできる。

5. 光コンピュータ実現に必要なブレイクスルー

光コンピュータは、従来の計算機とは構成、演算原理、役割の異なる新時代の大規模演算システムである。その実現に必要な技術的ブレイクスルーは多々あるが、特に重要なのは次の3点である。

- i) 光コンピュータのシステムアーキテクチャとその駆動プログラム
 - ii) 必要な性能をもつ光機能素子の開発
 - iii) 光情報処理技術の実用化
- i) についてはすでに3, 4節で述べたのでここでは省略する。いずれのタイプの光コンピュータも必要な性能を有する新しい光機能素子の開発の可否がその実現の大きなキーポイントと

Table III Optical devices for optical computers

種 類	性能・仕様（レスポンスタイム）
高性能空間光変調素子（LCLV等）	制御性， $>1000 \times 1000$ (μs)
並列光メモリ（PHB等）	消去性，波長多重性など ($\mu s \sim ns$)
光演算機能素子（論理素子等）	制御性，増幅，論理演算，閾値特性，並列性 (ns)
機能光学素子（新レンズ等）	制御性，可変特性，高分解能 (ms)
非線形光素子（位相共役素子等）	制御性，並列性，光双安定性，閾値性，光位相共役特性 (μs)
光スイッチ	時空間並列性，波長多重性 (μs)

なる。これは、光コンピュータの研究者の一致した見解である。Table IIIに必要な光機能デバイスの種類と必要な性能をまとめた。

並列光コンピュータの立場に立つと最も必要な素子は外部制御（電子的，光学的）可能な高性能並列光メモリあるいは空間光変調素子である。次に必要なのは，制御性を有する機能光学素子である。機能光学素子とは外部制御によってその特性が可変なレンズ，ミラー，回折格子，レンズアレイなどを指す。光の超並列性を有効利用するには，光IC的な素子よりも，むしろ，古典的な光学素子の新しい機能の見直しの方が重要である。

光エレクトロニクコンピュータでは，光双安定効果を用いた光論理素子，閾値素子，メモリ，光増幅素子等の研究が活発で，そのアレイ化の問題が最大の課題である。非線型光学素子は現象そのものの発見が新しく，未だ基礎研究の段階にあるが，光コンピュータを含む，新しい光応用技術全般に必要な素子という点で，今後の研究の進展が期待される。

光情報処理技術の実用化も重要な課題である。特にレーザー光を利用したコヒーレント光情報技術は，ホログラムを見るまでもなく，潜在的に大きな可能性を持っており，光コンピュータの実用化には不可避な技術と思われる。コヒー

レント光情報処理技術の実用化をはばむ最大のネックはコヒーレントノイズ（スペックルノイズ）である。現在の並列光コンピュータのアーキテクチャは殆んどものが，インコヒーレント光による光学現象の利用を想定している。これはコヒーレントノイズの影響を避けるための方策であって，本質的な意味は持たない。コヒーレントノイズの問題が解決できれば，コヒーレント光利用の方が殆かにシステム構成の自由度が増大する。コヒーレントノイズ除去の問題は光情報処理技術全般にかかわる大きな問題である。その解決の方策としては，各種位相板（補償板）の開発と光位相共役現象の利用の2つの方向がある。後者は本質的な問題解決の糸口を提示しており，今後積極的な研究が必要な領域である。

6. 複合化情報システムと光コンピュータ

現在の計算機では高速画像処理やパターン認識などの知的な情報処理は殆んど実行することができない。一方，人間の脳はこのような問題をいとも簡単に実行することができる。この点でデジタル計算機よりはるかにすぐれた能力をもっている。この差異はデジタル計算機と脳の情報処理システムのアーキテクチャーの差異を端的に示すものである。デジタル計算機では逐次処理を，人間の脳では大規模神経回路網システムで大容量情報の並列処理を実行している。神経回路網を模したシステムアーキテクチャを持つ計算機（ニューロンコンピュータ）の可能性は古くから示唆されていたが，あまりにも複雑なため，その研究は活発に行われていなかった。しかし，このシステムは人間の脳の働きに類似した大容量情報の並列処理や知的情報処理が実行できることから，最近，次世代の計算機の候補として見直され，活発な研究が展開される気運になっている⁸⁾。ニューロンコンピュータの実現には，ニューロン間の高密度な3次元接続をどのように実現するかというハードウェアの問題と，それを駆動する並列処理用のプログラムをどうするかというソフトウェアの

問題を解決する必要がある⁹⁾。

光の超並列性、ホログラムなどに見られる並列分散処理能力はこのようなコンピュータのハードウェア構成に役立つように思われる。脳や生体が行っている並列分散処理、分担処理などの情報処理や情報通信の機能を光の特質を利用してハードウェア化し、その制御を電子システムで行う光ニューロンコンピュータは新しい時代の情報システムとして期待しうるものである。

具体的なアプローチの一つに光連想コンピュータがある。光位相共役現象を用いたホログラフィック並列連想記憶や、Hopfield モデル¹⁰⁾、アソシアトロンモデル¹¹⁾などの神経回路理論を基にした光連想記憶メモリの研究¹²⁾等がすでに活発に行われはじめている。

電子、光、生体システムが一体となったパターン認識用の複合化情報システムは、究極の情報システムであり夢のコンピュータシステムである。このようなシステムでは、光コンピュータは一種のサブシステムとして機能するが、その役割は極めて重要な並列高速演算部分を担うことになろう。したがって、光コンピュータ開発時に蓄積した光の利用法、演算原理、新しいアーキテクチャ、並列演算プログラム技法等が、夢のシステム実現に大いに役立つものと考えられる。

7. むすび

光コンピュータの実現は科学者の長年の夢であった。光コンピュータという言葉はレーザー発明当初から言われていたにもかかわらず、その研究の速度は遅々としたものであった。しかし、1980年頃を境として、光コンピュータへの

アプローチの方法がいくつも提案されはじめ、その研究は一斉に急進展しはじめた。現時点で予想を立てれば、第一世代は高速光通信応用の光エレクトロニックコンピュータが、第二世代は光の超並列性を用いた光主導の並列光コンピュータ、第三世代は光ニューロンコンピュータや複合化コンピュータが重要になるものと思われる。いずれのシステムの実現にも克服すべき問題が山積しているが、今後、急速な研究の進展がなされるものと思われる。

光コンピュータの具体的なシステムは未だ現われておらず、我国からも、ざん新なシステムアーキテクチャやプロトタイプが提案しうる可能性が十分残されている。その意味でも新しい魅力ある分野である。一人でも多くの人の関心と、若い研究者の参画を期待している。

参 考 文 献

- 1) 一岡芳樹：第34回応用物理学会関係連合講演会シンポジウム「光コンピュータ・可能性と未来像」, 30a-G-3 (1987).
- 2) A.A. Sawchuk and T.C. Strand: Proc. IEEE **72** (1984) 758.
- 3) T.J. Drabik and S.H. Lee: Appl. Opt. **25** (1986) 4053.
- 4) J. Tanida and Y. Ichioka: Appl. Opt. **25** (1986) 1565.
- 5) J. Tanida and Y. Ichioka: J. Opt. Soc. Am. **73** (1983) 800.
- 6) K-H. Brenner, A. Huang, and N. Streibl: Appl. Opt. **25** (1986) 3054.
- 7) J. Tanida and Y. Ichioka: Appl. Opt. (in the press).
- 8) 甘利俊一: Computer Today No.18 (1987) 53.
- 9) M. Takeda and J.W. Goodman: Appl. Opt. **25** (1986) 3033.
- 10) J.J. Hopfield: Proc. Natl. Acad. Sci. **79** (1982) 2554.
- 11) 中野 馨：アソシアトロン（昭晃堂，東京，昭和54年）
- 12) 吉原一博，一岡芳樹：第33回応用物理関連学会予稿集，p.63 (1986).