

解 説

光 コンピュータ

谷田貝 豊彦

筑波大学物理工学系 〒305 茨城県新治郡桜村天王台 1-1-1

(1984年10月31日受理)

Optical Computer

Toyohiko YATAGAI

Institute of Applied Physics, Tsukuba University,
Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki 305

1. 光コンピュータとは

光コンピュータと聞いて何を思いうかべるであろうか。IC のかわりに光集積回路による演算システム、レンズのフーリエ変換作用を用いた空間周波数フィルタリングシステム、CPU やメモリを光ファイバーで組んだシステム、とそのイメージは明確ではない。

では、なぜ、光コンピュータは注目を集めているのだろうか。デジタル電子計算機の側からいえば、現在までに高度に発展してきた大型計算機の技術にも、ようやく本質的とも思える限界がみえてきたことにある^{1,2)}。基本的素子である超 LSI や周辺技術の著しい進歩の影響を受けて、従来の von Neumann 流の計算機の思想をのりこえるような新しいアーキテクチャが具体的に検討され始めている。これを受け、光学的な演算システムを含めて、高速性と並列処理性を兼ね備えた機能演算システムが探索されているのが現状である³⁾。

一方、光の側からは、光の回折を利用した演算法などの伝統的な手法に加えて、光コンピュータを開発する上で必要と思われるデバイスが開発され、新しいアルゴリズムが次々と発表されている。とくに、半導体レーザー、光双安定素子などのオプトエレクトロニクス素子の発展には注目に値するものも多い。

このような現状をふまえて、従来のデジタル電子計算機に比肩しうる機能性と、これを上まわる演算性能（計算速度）をもった、光演算システム—これを仮に光コンピュータ^{*1}と呼ぶこととする—は開発可能なのであろうか。

本稿では、いまだ明確な概念すら存在しないこの光コンピュータ技術の現状および動向を解説し、その可能性を探ることにする⁴⁻⁹⁾。

2. 光 演 算 技 術

光コンピュータに必要とされる光演算法は多様である。強いて分類すると、以下の三つの方に大別されるが、必ずしもこの分類に入らないものも多い。

2.1 並列アナログ演算方式¹⁰⁾

2次元あるいは3次元のデータ（画像）をそのまま並列的に処理する方式である。このアナログ演算方式では、光の回折現象にもとづくレンズのフーリエ変換機能を利用するが多い。ホログラフィックな空間周波数フィルタリングなどがこれにあたる。また、加減乗除、微積分、論理演算などの基本演算も実現されている。これらのアナログ光演算は、デジタル電子計算機が不得意としている並列的な演算処理をきわめて高速に実行できる点に特徴がある。従来の光情報処理の技術の大部分はこの範疇に入る。航空写真解析システム¹¹⁾、欠陥検出システム¹²⁾、パターン分類システム¹³⁾など、特殊な目的を達成するための演算装置がいくつか実用化されている。

並列アナログ光演算は、光の並列性・高速性という特徴をよく生かした方式であるが、演算の精度が悪く、融通性に欠ける。これらの欠点を克服する意味でディジタ

*1 米国ではおもに optical computing (光計算) の用語が用いられている。概念としてはこのほうが適当であるが、日本においては光コンピュータ (optical computer) と呼ぶことが多い。

表 1 おもな空間光変調器の性能

材 料	感度 ($\mu\text{J}/\text{cm}^2$)	コントラスト比	解像度 (lp/mm)	消去時間	商 品 化 例
Bi ₁₂ SiO ₂₀ 結晶 ²⁷⁾	0.5～600	5,000 : 1	10～50	数 μs	Iteck(米) 住友電工
PLZT 結晶	10 ⁴	10 : 1～100 : 1	1,000	<1 s	
ネマティック液 晶 ²⁸⁾	5	100 : 1	70	30 ms	Hughes(米)
サーモプラスチ ック	5～100	100 : 1	1,000	<1 s	Newport(米) 富士写真光機

ル電子計算機とのハイブリッド演算システムが実用上は有利となろう。

2.2 時系列ディジタル演算方式¹⁴⁾

ディジタル電子計算機の各要素、論理演算素子、メモリ、配線などを電子から光に置き換えようとするものであり、従来の電子計算機のアーキテクチャやソフトウェアがそのまま利用できる点が特徴である。電子の伝播から光の伝播へと変換することによって、浮遊容量の問題や電磁ノイズの影響を受けないという長所も獲得することになった。これにとどまらず、光を利用することによって情報の空間分割、波長分割、偏光分割などの多重化（並列化）処理も利用できる可能性が生じた。

光双安定素子は、時系列ディジタル処理用の素子として最も有望である¹⁵⁾。スイッチング速度と消費電力の両面からみて、シリコン素子やジョセフソン素子を凌駕しうるもののが期待されている¹⁶⁾。また、最近、常温動作可能な素子の報告もある¹⁷⁾。

光ディジタル記憶技術は、時系列演算方式のメモリに幅広く利用されよう。すでに、磁気ディスク装置にかかる大容量メモリとして実用化されている。

2.3 並列ディジタル演算方式¹⁸⁾

並列アナログ方式の欠点であった演算精度の悪さと融通性のなさを、ディジタル処理を導入することによって克服しようとする方式である。光による高速・並列処理性とディジタル方式による高精度でしかも融通性と汎用性が期待できるこの並列ディジタル光演算方式が、将来の光コンピュータの基本演算方式となりうることは想像に難くない。

上記二つの演算方式と比較して、並列ディジタル演算方式による光コンピュータを構築するためには、アルゴリズム、アーキテクチャ、さらにはこれを実現するためのディバイス技術がいずれも未発達の段階にある。しかし、最近、多くの提案、研究、開発がなされ、三つの方式の中では技術的な進展が著しい。Tse コンピュータ構

想¹⁹⁾、投影光学系による並列ディジタル演算法²⁰⁾、ファイバーレーザーアレイによる並列演算素子²¹⁾、液晶空間変調器を用いた2次元光トランジスタ素子²²⁾、光シストリック演算法の提案²³⁾などがこれにあたる。以下、並列ディジタル演算方式を念頭に置いて議論を進める。

3. 要素技術の発展

従来のディジタル電子計算機は、演算装置、記憶装置、入出力装置の3要素から成っていた。しかし、並列演算方式の光コンピュータでは、これらの分類が必ずしも明確にできるわけではない。たとえば、空間光変調器は、入出力装置であり記憶装置でもある。ときには演算装置ともなりうる。一般に、大規模な並列処理を目指す情報処理システムでは、これらの機能が一体化した素子の使用が前提とされることが多い^{3)*2}。並列光コンピュータにおいても同様のことが考えられる。

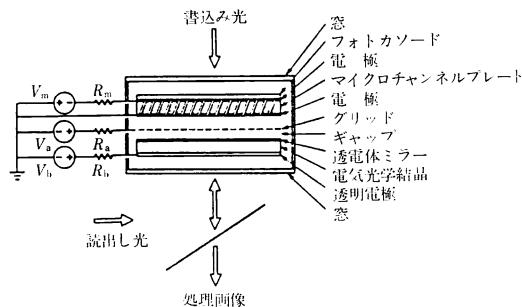
この視点から光ディバイスの発展をみてみよう。

3.1 空間光変調器²⁴⁻²⁶⁾

2次元の画像データを実時間記憶、読み出し、消去できる素子で、材料と記憶効果により分類できる。代表例と特性を表1に示す。感度と応答速度の点で BSO 素子²⁷⁾がすぐれている。BSO 素子とは、光伝導性強誘電体(Bi₁₂SiO₂₀)の単結晶を透明電極でサンドイッチした構造の素子で、入力光強度に応じて結晶中に生じるキャリアによって結晶にかかる電圧を変調し読み出しへは、結晶のポッケルス効果を利用するものである。また、解像度の点ではサーモプラスチックが有利である。液晶素子²⁸⁾、比較的大面積のものが作れるため利用されている。最近、マトリックス状電極の CCD 駆動による新しいタイプの素子も発表されている²⁹⁾。

さらに、マイクロチャンネルプレート (MCP) と BSO

*2 大規模並列処理では、このことが本質的となる。例、人間の脳。これは、後に述べるソフトウェアの観点からも重要である。

図1 マイクロチャンネル空間光変調器 (MSLM)³⁰⁾

素子を組み合わせた microchannel spatial light modulator (MSLM) も開発されている (図1)³⁰⁾。書き込み光が光電面に当たると、光電子が放出され、これが MCP で増幅され、グリッドを透過して BSO 素子に到達する構造になっている。これは、三極真空管と同様な原理でグリッド電圧を変化させることによって、BSO 素子に到達する光電子に変調を与えることができる。この原理で、画像の加減算、コントラスト強調、2 値化、AND, OR, NOT などの論理演算などが実行されている。また、この素子に電子レンズを付加して、さらに演算機能を充実した素子の開発も行なわれている³¹⁾。

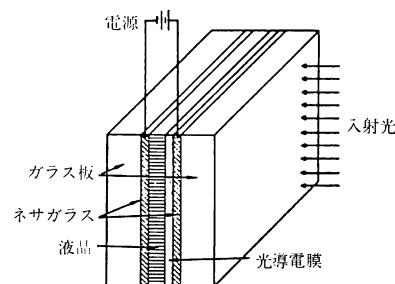
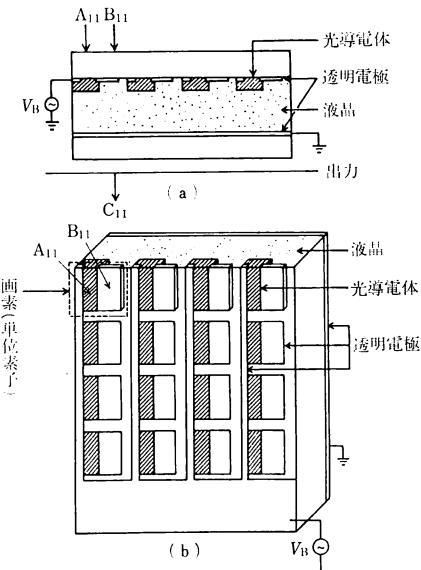
3.2 ファイバーレーザープレート (FLP)³²⁾

ファイバー状のガラスレーザーを多数束ねたもので、ファイバー束の一方の端面に入力画像を照射すると、レーザーの発振閾値以上の強度をもった部分が発振し、他端から指向性の強いレーザー光が画像として出力される。FLP の閾値特性、発振遅延特性を利用すると、画像の A/D 変換、レベルスライス、AND, OR, NOT の基本論理演算などが並列に行なえる。

3.3 集積型双安定半導体レーザー

並列型の光双安定素子に、集積型の双安定半導体レーザー (bistable laser diode: BILD) がある。半導体レーザー自体にその出力に比例した正帰還をかけ、発振状態を双安定にするものである。この素子は、レーザーダイオードと光検出器を直列に配置した簡単な構成であるので高速・高効率化が期待できる³²⁾。

また、この BILD の構造を発展させ、面発光レーザーと積層ブリッジ反射膜および高速フォトダイオードを組み合わせたデバイスを作り、これを 2 次集積化した素子も提案されている。面発光レーザーは基板と垂直に光発振するので、裏面から 2 次元像を入力し、表面に処理出力像を得ることができる。したがって、この素子をカスケードに接続すれば、2 次元像の相関や論理演算などの並列演算処理ができる³³⁾。

図2 可変格子モード液晶空間光変調器³⁴⁾図3 ネマチック液晶による光並列論理素子³⁵⁾

3.4 液晶論理素子

光強度を空間周波数に変換する素子である。素子の構造は、図2に示すように、透明電極ガラス(ネサガラス)の間に、光導電性薄膜と薄いネマチック液晶層をサンドイッチしたものである。直流電圧が液晶に印加されると、液晶は位相格子状の構造になる。印加電圧に比例して、液晶格子の空間周波数が変化するので、variable grating mode (VGM) 液晶素子と呼ばれている³⁴⁾。入力像を光導電性薄膜に結ぶことにより、場所的に液晶の空間周波数を変化させることができる。

この素子は、実時間動作可能であり、入力像の θ -変調素子として使用できる。画像の論理演算、空間周波数フィルタリングなどに応用されている。

また、同じネマチック液晶を用いた TNLC (twisted nematic liquid crystal) 素子による光並列論理素子も開発されている。これは、透明電極と CdS 不透明電極が

一組となり、ネマチック液晶に加わる電圧を入力画像によって制御する素子で、 8×8 のアレイを構成し、半加算器の機能が実現された（図3）³⁵⁾。

3.5 コード化パターンによる論理演算²⁰⁾

コード化されたパターンを光源でスクリーンに投影して演算を行なうことができる。基本光学系を図4に示す。二つの入力画像がバイナリである場合、各標本点の値（1か0）にしたがって、上下もしくは左右に2分された画素に対して、それぞれ明暗の符号化を行なう。たとえば、標本点の値が1の場合には、上が明で下が暗、0の場合には上が暗で下が明と符号化をする。コードパターンは、この符号化された2枚の入力画像を重ね合わせて作る。したがって、コードパターンは、上下と左右の明暗符号化の重ね合せであるので、各画素とも $1/4$ の部分が明のパターンとなる。互いに半画素ずつ離れた四つのLED点光源を適当な組合せで発光させ、復調パターンを通して投影パターンを観測すると、2変数2値論理関数の16演算がすべて実行できる。

また、空間周波数変調された入力画像を周波数フィルタリングすることでも同様の論理演算が行なえることが報告されている³⁶⁾。

これらのコード化パターンによる論理演算素子には、記憶機能はないが、きわめて単純な構成で、並列ディジタル演算が実現できる。光の特性をよく活かした方法といえる。

3.6 光メモリ

光メモリシステムに関しては、ビットバイビットの記録方式による光ディスクメモリ装置が時系列ディジタル演算方式のコンピュータで実用化されている。大容量低価格、高信頼性などの特徴をそなえ、現在の磁気ディスクや磁気テープメモリ装置などの下層メモリ部を占めることになろう。しかし、並列ディジタル型の光コンピュータに、この方式のメモリがそのまま利用されるとは考えにくい。本章の冒頭で述べたように、並列処理には、

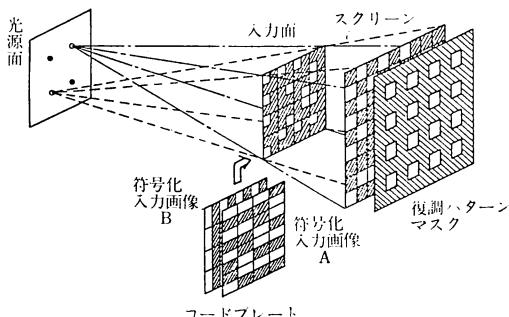


図4 投影光学系による並列光論理演算²⁰⁾

ある程度の情報処理能力をもった機能メモリが有利で、ホログラフィックメモリも再評価されてよい³⁷⁾。とくにホログラムの一入力多出力機能（時系列・並列変換機能）、メモリの内容でアクセスできる連想メモリ（content addressable memory）機能などには注目すべきである。

4. アーキテクチャとアルゴリズム

並列ディジタル光コンピュータの開発には、固有のシステム構成（アーキテクチャ）のアイディアと、具体的な目的・問題に対する解法・算法（アルゴリズム）とが必要である。アーキテクチャとアルゴリズムとは密接な関係にある。汎用のコンピュータシステムにおいては、アーキテクチャとは、機能レベルで眺めた比較的上位の設計・構造の概念であって、個々のアルゴリズムとは明確に区別されている。しかし、専用プロセッサの場合には、アーキテクチャは、アルゴリズムに影響されざるをえない。概念自体が不明確であり、周辺の要素技術の発達が不十分な光コンピュータの場合には、両者が混同して用いられる場合も多く³⁸⁾、現実の提案では、アルゴリズムや演算素子に強く依存したボトムアップ型のアーキテクチャの傾向が強い。

現在までに提案されている光コンピュータのアーキテクチャを大きく分類すると

- 1) 光の並列処理能力に立脚した方式
 - 2) VLSIの使用を前提とした並列電子計算機もしくは画像処理専用プロセッサのアーキテクチャをベースにした方式
 - 3) 特殊アルゴリズムや演算素子に依存した方式
- のようになる。Tseコンピュータや並列ディジタル光コンピュータの構想などが1)の分類に、ストリックアレイプロセッサは2)の分類に、光剩剰コンピュータや光フィードバック機構などは3)の分類に該当する。

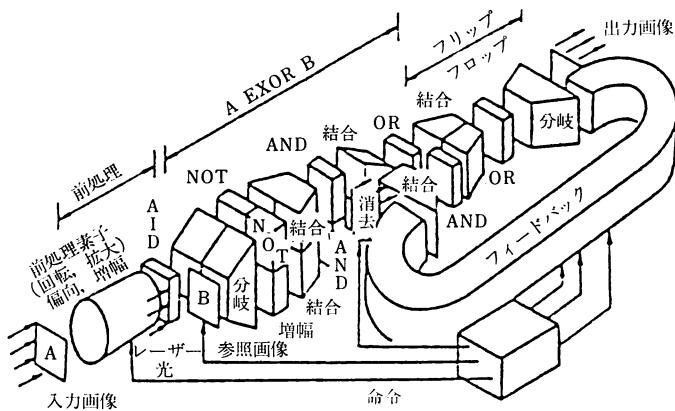
1)と2)の方式は、光演算の特性や並列演算からの要請から出発したもので、いわばトップダウンの概念であって、具体的なハードウェアの裏づけに乏しいのが現状である。一方、ボトムアップ型の3)の方式では汎用性に欠けるという弱点がある。

以下各アーキテクチャを概観しよう。

4.1 Tseコンピュータと並列ディジタル光コンピュータの構想

光論理素子アレイをカスケードに接続して複雑な並列

³⁸⁾ Archirhythmやalgotectureという用語も用いられている。

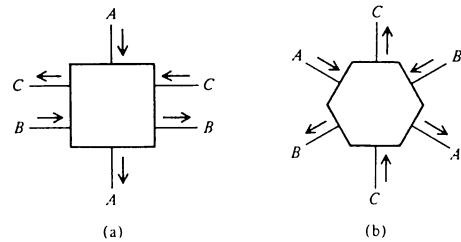
図5 並列ディジタル光コンピュータの構想⁵⁾

論理回路網を構築するアーキテクチャである。NASAのTseコンピュータ構想では、入力像を光ファイバー束による「画像バス」を介して論理演算部に転送し、AND, OR, NOTとシフト演算を実行する構成が基本となっている¹⁹⁾。提案では、光検器出と電気的論理素子と発光素子を一体化した薄膜トランジスタアレイにより論理演算部を作るとしている。その後、論理演算素子として、ファイバーレーザープレート、液晶論理素子の使用が検討された。

Tseコンピュータの検討をもとに、図5の並列ディジタル光コンピュータが提案された⁵⁾。まず初段で、入力画像の回転、拡大縮小を行ない、画像の規格化をする。必要に応じて、輝度の射幅、2値化もこの前処理部で実行される。演算部では、Tseコンピュータと同様に、AND, OR, NOTの基本論理演算を実行し、必要な処理を並列的に実行する。演算結果は2次元フリップフロップメモリに記憶される。この光コンピュータでは、出力結果の一部を演算部にフィードバックできる機能も備えている。

4.2 シストリックコンピュータ^{38,39)}と波面コンピュータ⁴⁰⁾

シストリックアレイプロセッサは、超高速信号処理用のVLSI開発の中で生まれた並列処理向けのアルゴリズムである。シストリックプロセッサは、同じ機能と形態をもった多数の処理ユニットから成る。処理ユニット間の信号伝達時間を短縮するために結線は最近傍間のみとし、全プロセッサ間の同期の問題を単純化するために、データの流れを規則的に行なっている。データの流れを非常に単純で規則的にし、しかも各処理ユニットでパイプライン処理することにより、処理速度の向上と汎用性を追求している。

図6 内積ステッププロセッサの形状³⁸⁾

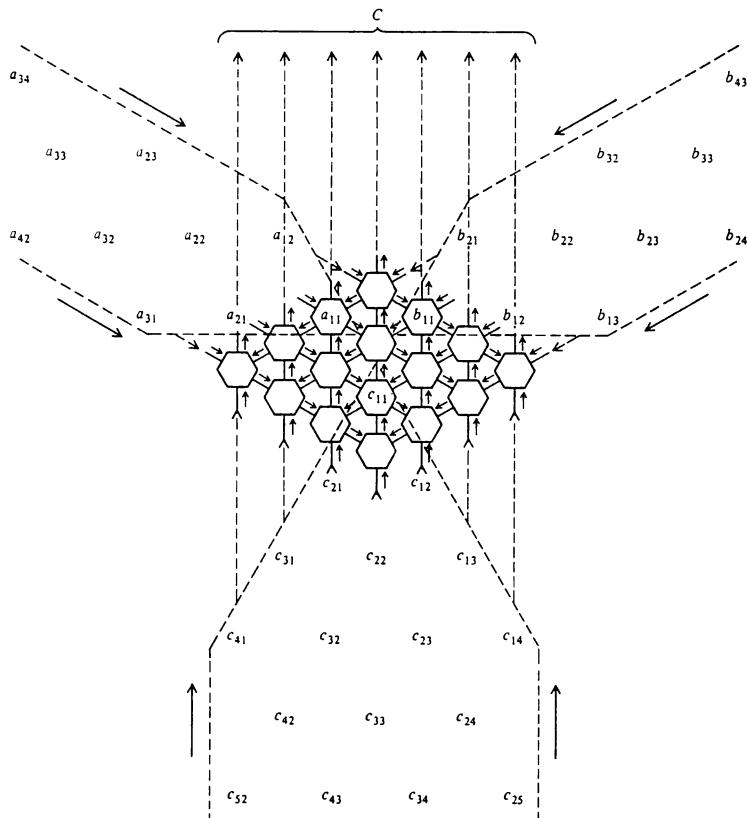
処理ユニットでは、いわゆる内積ステップ、 $C \leftarrow C + A \times B$ を実行する。基本的には、図6に示す2種類の形状の処理プロセッサが用いられる。(a)の四角形処理ユニットは行列・ベクトル乗算および三角線型系の求解に、(b)の六角形処理ユニットは、行列乗算や行列のLU分解（行列を下三角行列と上三角行列に分解すること）に利用される。

処理ユニットを六角網状接続した例を図7に示す。この例では、 $n \times n$ 行列 $A = (a_{ij})$ と $B = (b_{ij})$ の行列積 $C = (c_{ij})$ が次の漸化式

$$\begin{aligned} c_{ij}^{(1)} &= 0 \\ c_{ij}^{(k+1)} &= c_{ij}^{(k)} + a_{ik} b_{kj} \\ c_{ij} &= c_{ij}^{(n+1)} \end{aligned}$$

により計算することをベースに、パイプライン処理により行列乗算を行なっている。行列 A の要素は左上から、行列 B の要素は右上から処理ユニットに流れ、結果のデータは上方に送り出される。

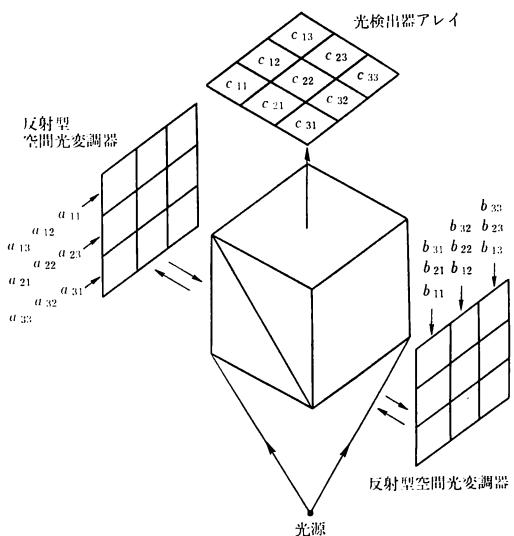
シストリックコンピュータでは、各処理ユニットが同一のタイミングでデータの読み込みと出力を行なっている。各処理ユニット間の通信（データの送受）はローカルであるが同期はグローバルであるので、大規模なアレイの場合には、クロックスキュー（clock skew）を生じる。

図 7 行列乗算のための六角形内積ステッププロセッサアレイとデータの流れ³⁸⁾

この問題の解決には、同一のクロックの使用をやめ、データの入力をまって処理装置を駆動させる非同期方式の処理ユニットを用いればよい。これは、一種のデータフロー計算機である⁴¹⁾。この非同期処理ユニットアレイは、処理データの流れが、ホイヘンスの原理にしたがう波動のように、処理ユニットアレイ間を伝播することから、波面プロセッサ (wavefront processor) と呼ばれている。

光学的にシトリック演算を実行する試みがなされている。最初の提案は、LED アレイと超音波変調器を用いて信号の入力と乗算を行ない、CCD アレイで加算を行なうベクトル・行列乗算器である⁷⁾。50×50 の行列とベクトルの乗算が 10 μs で実行可能という。また、周波数多重化超音波変調器を用いると、三つの行列の乗算や逆行列の演算もできることも示されている⁴²⁾。光ファイバと光カップラによるシトリック演算器の提案もある⁴³⁾。

行列と行列の乗算には、図 8 に示すルービックキューブプロセッサの提案がある⁴⁴⁾。このプロセッサは、偏光ビームスプリッタ、二つの行列を表示するための空間光

図 8 ルービックキューブプロセッサ⁴⁴⁾

変調器とパルス光源とから成る。二つの反射型空間光変調器上をマトリックス要素の大きさに比例した濃度のパターンを走らせる。光源から出た光は、はじめに空間光

変調器Aで次に空間光変調器Bで反射されて、マトリックス成分 a_i と b_j の積 $a_i b_j$ を計算する。これが光検出器アレイ上で加算される。

4.3 光剩余コンピュータ

剩余算法とは、整数 X を、 M 個の互いに素な自然数 m_i によって X を割った剩余の組で表現し、整数の四則演算を各剩余に対する独立な演算で実行できる並列演算法である。この算法は、並列化による高速化が可能であるばかりでなく、けた上りがないという特徴ももっている⁴⁵⁾。

光学的手法によって、剩余算法を実行するには、光学的な剩余数の表現法、剩余数の演算法、剩余数組からとの整数に逆変換する方法などが解決されねばならない。これらの光学的解決法として、プリズムアレイや回折格子アレイを用いる方法や光導波路による方法などが提案されている⁴⁶⁾。光剩余算法にもとづく、行列ベクトル演算器や⁴⁵⁾真理値表検索型の光コンピュータ⁴⁷⁾などが検討されている。

4.4 光フィードバック

演算結果を入力にフィードバックすることにより、演算の可能性が大きく拡がる。光演算においては、鏡やファイバー束を利用すると並列的にフィードバックが実現できる。並列アナログ演算方式の光コンピュータでは、この光フィードバック技術の導入は比較的初期の段階から検討されている。画像のコントラスト強調などの非線型処理、微分方程式の求解などに積極的に利用されている⁴⁸⁾。

並列ディジタル方式においても光フィードバックの概念は重要である。すでに述べたように、並列ディジタル光コンピュータ構想では、光フィードバックが検討されている⁵⁾。ルービックキューブ光プロセッサでは、光フィードバックにより逆行列の演算が実現できているという⁴⁴⁾。

5. 光コンピュータ制御の特徴

汎用光コンピュータの開発において、不可避な問題にプログラムの記述法、オペレーティングシステム(OS)などのソフトウェア上の問題がある。電子的な並列処理プロセッサに対しては、最近この方向の研究も盛んであるが、いずれも比較的少數の演算要素(processor element)を対象としている。たとえば、 16×16 , 128×128 等の PE アレイに対するもので、光コンピュータが目的とする $1,000 \times 1,000$ もしくは $4,000 \times 4,000$ 程度の大規模並列 PE アレイとは本質的に異なったアプローチが

必要と思われる。

並列処理向けの問題解決言語についての基本的な考察はすでに多いが^{49,50)}、光並列演算に対応できるものは少ない⁵¹⁾。さらに、光コンピュータに対しては、全体の制御を受け持つソフトウェア(OS)に関してはまだ具体的な検討すらなされていない。ここでは、将来の大規模並列型光コンピュータの制御の基本方式について、いくつかの特徴を述べる。

5.1 演算要素(PE)の処理・管理

多数の並列演算要素間の処理内容の制御、相互関係のとり方には種々の考え方があるが、大規模並列型のプロセッサにおいては、各 PE 間に階層をもうけない対等 PE 方式が有利である。これは、各処理ごとにプログラマが個々の PE に対して独立に制御プログラムを開発できないという事実にもとづく。平等 PE という考え方には、シリアルコンピュータでは明確に述べられている。光コンピュータではこの考え方方が重要である。平等 PE の考え方を光学の言葉にすれば、space-invariant 処理である。

5.2 PE 間通信

並列処理では PE 間のデータのやりとり(通信)の問題が重要である。この場合も、シリアルコンピュータで導入されている規則的な通信網の考え方は重要である。光コンピュータでは、三次元的な PE の配列が容易である。Optical interconnection による無誘導同期も特徴的である。

5.3 共通メモリ

各 PE は独立に演算を実行する上で必要最小限のメモリは素子各自でもつべきことはすでに指摘した。しかし、全 PE が共通に利用すべきメモリも存在する。電子的な並列プロセッサでは、共通メモリは一時に一ヶ所からしかアクセスできないので、各 PE から同時にメモリアクセスが起こると並列プロセッサはそこで停止せざるをえない。これがメモリアクセスの競合の問題である。光コンピュータでは、メモリアクセスの競合を読み出し角度の多重化、波長多重化、偏光等の利用で、自動的に回避しうる。

5.4 並列タスクへの分解

並列プロセッサでは、目的とする処理を、何段階かの並列処理可能な仕事(タスク)に分割して実行する。いかに能率よく並列タスクに分割するかが重要な問題であるが、一般的な解決法はまだない。さらに、分割されたタスクのなかで、必ず前の段階の結果を必要とするタスクが存在しうる。したがって、並列プロセッサといえど

も、1カ所の処理の遅れで全演算時間が決まる事態が起る。本質的に並列演算に適さない演算があるわけである。とくにOSで中心的な命令である条件分岐命令(branch on condition)は並列化不可能である。

しかし、光コンピュータのような大規模並列プロセッサでは、この問題を解決しうる。予想される全分岐条件にしたがって、対応する可能な全処理プロセスを先取り的に実行し、分岐条件が確定した段階でその実行結果の一つを選択する等の処理が可能となろう。

6. 光コンピュータへの挑戦

光コンピュータとは何か？光コンピュータの概念、現在の技術的背景、特徴および解決すべき問題点……種々の観点から光コンピュータ技術を解説した。光コンピュータは夢の段階から構想の段階へと進んできた。それにともなって、ようやく問題の困難さが具体的に認識され、挑戦すべきターゲットも明確になりつつある。

光コンピュータは、高速大規模並列処理コンピュータ(supercomputer)の一つの重要な候補である。並列スーパーコンピュータの応用分野⁵²⁾としては、地球物理学や流体力学で使用される有限要素法の計算や偏微分方程式の求解、固体物理学における格子ゲージの統計力学的計算、引力の多体問題、FFT、回路網などのネットワークシミュレーション、そして衛星写真の解析などの画像処理さらには最近では、人工知能への応用など枚挙にいとまがない。光コンピュータを含めて、並列スーパーコンピュータの実用化にともなってこれらの分野の飛躍的発展が期待される。

本稿では、汎用を目的とした並列ディジタル光コンピュータを中心に述べた。実用化の点からは、並列アナログ演算方式、特に超音波光変調器を利用した^{53,54)}、光周波数分析器⁵⁵⁾、光相関器⁵⁶⁾、ベクトル・行列乗算器⁵⁷⁾、などの発展、さらにはA/D変換器^{58,59)}や光交換器⁶⁰⁾の研究開発などには注目すべき点も多い。紙面の関係でこれらについては述べる余裕がなかった。

光コンピュータの研究は、ようやく緒についたといえる。概念すら明確になってはいないが、光コンピュータが稼動するのは、おそらく21世紀を待たねばならないだろう。挑戦すべき頂上への道程は険しい。しかし、高度な目的追究の結果生まれるものは、たんに光演算装置ばかりでなく、光技術、エレクトロニクス技術などへの計り知れない波及効果の存在もあることを最後に指摘したい。

文 献

- 1) H. S. Stone, ed.: *Introduction to Computer Architecture*, 2nd ed. (Science Research Associates, Chicago, 1980).
- 2) 相馬秀夫、飯塚肇、元岡達、田中英彦：計算機アーキテクチャ（岩波書店, 1982）。
- 3) 村岡洋一：情報処理, 20 (1979) 289.
- 4) 石原聰、島田潤一、桜井健一郎：電子通信学会誌, 64 (1981) 89.
- 5) 世古淳也：情報処理, 22 (1981) 1037.
- 6) 石原聰：応用物理, 51 (1982) 570.
- 7) H. J. Caulfield, J. A. Neff and W. T. Rhodes: Laser Focus, Nov. (1983) 100.
- 8) Proc. IEEE, 72, No. 7, Optical Computing 特集号 (1984).
- 9) 谷田貝豊彦：O plus E, 6月号 (1983) 41.
- 10) S. H. Lee: *Optical Information Processing* (Springer-Verlag, Berlin, 1981).
- 11) A. Vander Lugt: Proc. IEEE, 62 (1974) 1300.
- 12) N. N. Axelrod: Proc. IEEE, 60 (1972) 447.
- 13) S. P. Almeida and G. Indebetouw: *Applications of Optical Fourier Transforms*, ed. H. Stark (Academic Press, New York, 1982) 41.
- 14) E. アブラハム、C. T. シートン、S. D. スミス：サイエンス, 4月号 (1983) 48.
- 15) M. Okada: Jpn. J. Appl. Phys., 23 (1984) 789.
- 16) P. W. Smith and W. J. Tomlinson: IEEE Spectrum, June (1981) 26.
- 17) H. M. Gibbs, S. S. Tarnng, J. L. Jewell, D. A. Weinberger, K. Tai, A. C. Gossard, S. L. McCall, A. Passner and W. Wiegmann: Appl. Phys. Lett., 41 (1982) 221.
- 18) A. A. Sawchuk and T. C. Strand: Proc. IEEE, 72 (1984) 758.
- 19) D. H. Schalfer and J. P. Strong, III: Proc. IEEE, 65 (1977) 129.
- 20) Y. Ichioka and J. Tanida: Proc. IEEE, 72 (1984) 787.
- 21) A. Seko and A. Sasamori: Appl. Opt., 18 (1979) 2052.
- 22) U. K. Sengupta, U. H. Gerlach and S. A. Collins: Opt. Lett., 3 (1978) 199.
- 23) H. J. Caulfield, W. T. Rhodes, M. J. Foster and S. Horvitz: Opt. Commun., 40 (1981) 86.
- 24) 西原浩：応用物理, 49 (1980) 479.
- 25) G. K. Knight: "Optical Information Processing," ed. S. H. Lee (Springer-Verlag, Berlin, 1981) 111.
- 26) Opt. Eng., 22, No. 6, Spatial Light Modulators 特集号 (1983).
- 27) B. A. Horwitz and F. J. Corbett: Opt. Eng., 17 (1978) 353.
- 28) U. Efron, P. O. Braatz, M. J. Little, N. R. Schwartz and J. Grinberg: Opt. Eng., 22 (1983) 682.
- 29) J. Grinberg, A. D. Jacobson, W. P. Bleha, L. Miller, L. Fraas, D. Boswell and G. Myer: Opt. Eng., 14 (1975) 217.
- 30) C. Warde and J. Thackara: Opt. Eng., 22 (1983) 695.
- 31) 原勉、加藤隆仁、杉山優、鈴木義二：第45回応用物理学学会予稿集 (1984) p. 74.
- 32) 奥村謙一郎、小川洋、伊藤弘昌、稻場文男：電子通信学会論文誌, J66-C (1983) 393.
- 33) 伊藤弘昌：第19回東北大電気通信研究所シンポジウム論文集 (1983) p. 21.
- 34) A. R. Tanguay, Jr., C. S. Wu, P. Chavel, T. S. Strand, A. A. Sawchuk and B. H. Soffer: Opt. Eng., 22 (1983) 687.

- 35) R. A. Athale and S. H. Lee: Opt. Eng., **18** (1979) 513.
- 36) H. Bartelt and A. Cohman: Appl. Opt., **22** (1983) 2519.
- 37) 角田義人:光学, **2** (1973) 329.
- 38) C. Mead and L. Conway: *Introduction to VLSI Systems*, (Addison-Wesley, Reading, MA, 1980) pp. 271-292; 菅野卓雄, 榊 裕之監訳:超LSIシステム入門(培風館, 1979).
- 39) S. Y. Kung: Proc. IEEE, **72** (1984) 867.
- 40) S. Y. Kung, K. S. Arun, R. J. gal-Ezer and D. V. Bhaskar Rao: IEEE Trans. Comput., **C-31** (1982) 1054.
- 41) J. B. Dennis: IEEE Comput., **13**, No. 11 (1980) 48.
- 42) D. Casasent, J. Jackson and C. Neuman: Appl. Opt., **22** (1983) 115.
- 43) M. Tur, J. W. Goodman, B. Moslehi, J. E. Bowers and H. J. Shaw: Opt. Lett., **7** (1982) 463.
- 44) R. P. Bocker, H. J. Caulfield and K. Bromley: Appl. Opt., **22** (1983) 804.
- 45) 石原聰:O plus E, 4月号 (1980) 63; 5月号 (1980) 68.
- 46) A. Huang, Y. Tsunoda, J. W. Goodman and S. Ishihara: Appl. Opt., **18** (1979) 149.
- 47) C. C. Guest and T. K. Gaylord: Appl. Opt., **19** (1980) 1201.
- 48) J. Cederquist and S. H. Lee: Appl. Phys., **18** (1979) 311.
- 49) J. Backus: Commun. ACM, **21** (1978) 613.
- 50) D. J. Kuck: Comput. Surv., **9** (1977) 29.
- 51) K. Preston, Jr., M. J. B. Duff, S. Lerialdi, P. E. Norgren and J. Toriwaki: Proc. IEEE, **67** (1979) 826.
- 52) G. C. Fox and S. W. Otto: Phys. Today, No. 5 (1984) 50.
- 53) I. C. Chang: IEEE Trans. Sonics Ultrason., **SU-23** (1976) 2.
- 54) N. J. Berg and J. Lee: *Acousto-Optic Signal Processing* (Marcel Dekker, Inc., New York, 1983).
- 55) T. M. Turpin: Proc. IEEE, **69** (1981) 79.
- 56) D. Psaltis: Proc. IEEE, **72** (1984) 962.
- 57) R. A. Athale: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **422** (1983) 24.
- 58) A. Armand, A. A. Sawchuk, T. C. Strand, D. Boswell and B. H. Soffer: Opt. Lett., **5** (1980) 129.
- 59) H. Mada and K. Koide: Appl. Opt., **22** (1983) 3411.
- 60) A. Huang: 私信.