

光学情報処理——いままで、いま、これから——

一 岡 芳 樹

Optical Information Processing: Past, Present and Future

Yoshiki ICHIOKA

This paper gives a brief historical review of the life of optical information processing from the early days until today. Optical information processing generated a lot of enthusiasm in the sixties with major breakthroughs opening a large number of perspectives. From eighties, optical information processing was named optical computing or information optics. Two decades from 1980 to 2000 could be called the golden age of optical computing with numerous new technologies and innovating optical processors designed and constructed for real applications. Today optical computing is the term of information photonics, reflecting the domain. Perspective of information photonics is described.

Key words: optical information processing, digital image processing, imaging systems, optical computing, information optics, information photonics

光学情報処理は、光を情報のキャリアーとし、光のもつ高速性と並列・高密度性を利用して高速データレートで情報を処理する技術であり、時代とともに光情報処理、光コンピューティング、情報光学、情報フォトンクスなどと名称が変わってきた。ここでいう情報とは光信号または画像で、その観測、収集、取得、処理、変換、蓄積、認識、表示、伝送などに関わる研究分野である。光による高速並列処理は、計算機の時系列的な電子処理に比べて膨大なデータを実時間に処理できるという本質的な利点をもっている。これを利用したのが狭義のアナログ光学情報処理である。その研究は1950年代から始まった¹⁻¹³⁾。

光学情報処理の基本はフラウンホーファー回折によるレンズの二次元フーリエ変換機能、結像機能である。レンズの前側焦平面に置かれた二次元物体がコヒーレント光で照明されると、そのフーリエ変換が後側焦平面上に生じる。このとき、物体の二次元フーリエ変換の正確な振幅・位相がレンズによって高速並列に演算される¹⁴⁾。

本稿では、光学情報処理研究の発展の歴史を振り返り、得られた成果と課題を概観するとともに、将来について私見を述べる。光学情報処理は光信号、画像情報を対象とす

るため、光情報システム、広義の画像システムに関わる研究分野でもある。筆者自身は、デジタル画像処理の研究を行う中で、1970年代当時の計算機があまりにも能力不足であることを痛感したのが契機となって、その能力をカバーするのに光による高速・並列・高解像度の(画像)情報処理が役立つのではないかという期待から、光学情報処理の分野に関心を持ち始めた。そのため、光学情報処理の発展の歴史を俯瞰するにあたり、1961年に実用化されたデジタル計算機が光学に与えた影響、計算機を利用するデジタル画像処理システムなどの発展の歴史についても、並行して見ていきたい。そして、現在進行中の、光学情報処理と計算機が融合した光・計算機融合(画像)情報システムの概要、および、今後発展すると思われる方向について概観する。光学情報処理は60年以上の、デジタル画像処理でも50年以上の歴史がある膨大な研究分野であり、そのすべてを網羅するのは不可能であるので、ここでは画像情報システムという切り口からみた光学情報処理について述べる。

1. 新しい光学のスタート：光学情報処理の勃興（1945年～1980年）

情報光学は1950年代から光学の一分野となっているが、そのルーツには1859年のFoucaultによるナイフエッジ・テストがある¹⁵⁾。その後、1873年のAbbeによる顕微鏡のコヒーレント結像理論¹⁶⁾、1934年のZernikeの位相差顕微鏡¹⁷⁾、1946年のDuffieuxの光学系のフーリエ変換法(OTF: optical transfer function)¹⁸⁾、1953年のHopkinsによる光のコヒーレンスを考慮した顕微鏡結像理論¹⁹⁾など、通信と情報理論が光学情報処理のベースを形成した²⁰⁾。Marechalは1953年、再回折光学系を利用したコヒーレント照明による空間周波数フィルタリングを提示した²¹⁾。50年代半ばには、合成開口レーダー(SAR: synthetic aperture radar)の信号処理(像再生)に光プロセッサが利用された^{22,23)}。1948年、Gaborによって、新しいイメージング技術であるホログラフィーが発明²⁴⁾されたが、光学情報処理への応用は1960年にレーザーが発明²⁵⁾されるまで限定的なものであった。ホログラフィーは光学情報処理と密接に関連して互いに進歩した。

1970年代前半までに、光学情報処理のほとんどすべての基本システムが発明された。光学情報処理は実時間データ処理に対し大きな可能性をもつことが期待されたが、利用しうる空間光変調器(SLM: spatial light modulator)が未開発のため、実用的な光プロセッサはほとんど作製されなかった。

1.1 基本発明とアナログ光相関器

1960年のレーザーの発明により光学情報処理は急速な発展をとげ、関連するおもな発明は1970年までになされた。1962年、Leithらは、Gaborのインラインホログラムの再生像に重畳する共役像による像劣化を避けるため、オフアクシスホログラムを発明した²⁶⁾。さらに、拡散ホログラム、三次元(3D)ホログラムを考案した²⁷⁾。

光プロセッサの最も大切な応用は実時間パターン認識である。60年代に2つの基本的な光相関器のアーキテクチャーが提案された。1つは再回折光学系をベースにした空間周波数フィルタリングを利用する光相関器²¹⁾であり、もう1つは結合変換相関器(JTC: joint transform correlator)²⁸⁾である。

前者のおもな研究課題は、参照信号のフーリエ変換をもつ複素フィルターを作製することであった。1964年、Vander Lugtはフーリエホログラムの技術を用いてコヒーレント光学プロセッサ用の複素フィルターを合成する方法を考案し、再回折光学系を使って、マッチトフィルターをはじめさまざまなフィルターを利用した処理を行った²⁹⁾。

JTCの処理は周知のように2段階で行われる。その特長は相関フィルターを計算する必要がないことであり、ターゲットトラッキングのように実時間で参照信号を高速データレートで更新する必要のある実時間応用に対して理想的なアーキテクチャーとなっている。光アドレス型SLMの性能が向上したので、現在でもよく利用されている。

1965年にはインコヒーレント光学プロセッサを用いた空間周波数フィルタリングによる文字認識などの研究が行われた^{30,31)}。また、1966年には当時の計算機の能力に合致したセル符号化(detour phase)による計算機ホログラム(CGH: computer generated hologram)合成法が発明された^{32,33)}。さらに1969年には、計算機を利用して純位相を符号化するキノフォームの作製法が開発され、以後の高回折効率の回折光学素子(DOE: diffractive optical element)開発への道を開いた³⁴⁾。しかし、1980年頃までは、CGH符号化ならびにDOEの作製は計算機の能力によって制限され、高解像度のものは作製できなかった。

線形光学処理は、二次元相関や二次元コンボリューションのようなスペースインバリエント操作と、座標変換やハフ変換のようなスペースバリエント操作に分けられる³⁵⁾。非線形処理はLOG変換、閾値処理、アナログ-デジタル変換などが光学的に実行された^{36,37)}。

実時間光プロセッサは、再回折光学系の入力面や、フィルター面での振幅位相がSLMで制御できるならば作製可能である。そのため、光を変調しうるほとんどすべての物質を対象としたSLMの研究が、この時期何年にもわたり行われた。しかし、多大な開発努力にもかかわらず、実時間光学情報処理に供する実用的なSLMは、70年代終わりまでには開発されなかった(文献3,38,ならびに本特集号の原氏の解説参照)。

1.2 光パターン認識

光パターン認識は初期のころから光の並列性と二次元フーリエ変換が有効に利用できる応用先であった。コヒーレント&インコヒーレント、スペースバリエント&スペースインバリエント、線形&非線形アーキテクチャーが、さまざまな応用に利用された。実際の問題を解くため、パターン認識用に光・デジタルハイブリッド処理が利用された。しかし、当時この分野の第一人者であったCasasentは80年代初頭、たとえ電子計算機の能力が低くても、電子プロセッサが光プロセッサに置き換わることはないと言っている³⁹⁾。その理由は3つあり、1)光プロセッサで得られるスピード(光速)が必要な応用が比較的少ない、2)光プロセッサ作製の強力で高性能なSLMがない、3)光プロセッサは計算機に比してデータ処理の

柔軟性を欠く、というものであった。

1.3 デジタル計算機とデジタル画像処理

1956年、富士写真フイルムの岡崎文次氏は日本初の電子計算機 FUJIC (真空管式) を開発・実用化し、レンズ設計の光線追跡に利用した⁴⁰⁾。5年後の1961年、国産のデジタル計算機が初めて市販された。当時はまだ半導体集積回路 (IC: integrated circuit) も DRAM (dynamic random access memory) も開発されていない時代で、演算システムには個別トランジスターで構成した論理回路が、メモリーは磁気コアメモリーが装備された。メモリー数は4k語程度であった。電子計算機を最も早く導入しその恩恵を受けたのが光学産業であり、いち早くレンズの設計・評価に利用し始めた。それまで人力や機械式計算機に頼っていた光線追跡などの計算に威力を発揮し、レンズ設計がきわめて効率よくできるようになった。1970年代初頭には光学各社は自動レンズ設計プログラムを開発し、効率的なレンズ設計業務ができるようになった。また、計算結果を画像表示する automatic plotter など比較的早い時期に開発され、スポットダイアグラム、CGH、ホログラム再生像表示などに利用された^{4,41,42)}。

デジタル画像処理はアメリカのアポロ計画の中で急速な進展をみせた。1965年には Mariner Mars IV号から22枚の火星表面の写真が送られてきて人々を驚かせた。1969年7月、アポロ11号が月面に着陸し人類の足跡を残した。以後の宇宙開発には画像システムが大きな役割を担うことになった。1972年には画像システム開発で2つの大きなエポックがあった。1つは資源探索衛星ランドサット (Landsat) の打ち上げであり、他の1つはEMI社によるX線CT (computed tomography) 装置の開発、実用化であった。その結果、デジタル画像処理が一気に社会的に注目されるようになった⁴³⁾。

1.4 光メモリーと計算機メモリー

60年代初期の計算機は磁気コアメモリーを利用しており、メモリー容量は限られていた。

1970年 (アポロ11号月面着陸の翌年)、IntelでICのDRAMが開発され、急速に磁気コアメモリーを駆逐した。以後、ICの集積化の速度は凄まじかった。一方、60年代後半にはホログラフィック光メモリーの研究開発も始まった。光メモリーには2つの利点、高密度性と並列アクセス可能性がある。1968年、ベル研究所で32×32頁 (64×64 bits/inch) のホログラフィックマトリクス・メモリーが作製された⁴⁴⁾。また、1974年フランス Thompson-CSFでフォトリフラクティブ結晶を利用した角度多重三次元光メモリーが開発された⁴⁵⁾。能力は10⁴ビットの10頁のメモ

リーである。フィルムを用いたホログラフィックメモリーも開発された。わが国でも1970年初頭からホログラフィックメモリーの研究開発が電機業界を中心に展開されたが、周辺技術が未熟なため実用には至らなかった。70年代初頭には常温発振の半導体レーザーが開発され、光メモリーはホログラフィックタイプのものから光ディスクタイプへと研究開発ターゲットがシフトしていった。図1に光学情報処理の基本技術、光情報システム、画像システム等の開発の年譜を示す。

2. 光コンピューティングの黄金期 (1980年~2004年)

1980年~2000年代は光コンピューティングの黄金期で、将来は明るく、世界的に研究が活発に行われた。90年代には毎年さまざまな組織が国際会議を開催し、OSA (The Optical Society of America) のジャーナル Applied Optics でも10か月に1回程度は光学情報処理、光コンピューティングの特集号があった。研究内容はアルゴリズムの理論研究、アナログ・デジタル光コンピューティング、線形・非線形コンピューティングなど広範囲にわたった。どの分野でも研究成果があり、商用の光相関器も市販された。

2.1 CGH から DOE へ

計算機の性能が向上、メモリーも増大し、演算時間が劇的に短縮した。また、電子ビーム描画装置などの微細加工技術が成熟し普及し始めた。それに呼応して、以前のセル符号化方式 CGH に代わる新符号化法 (点オリエンテッド法)、エラー分散アルゴリズム、特に純位相 CGH に対して高 SNR (signal to noise ratio) ・高回折効率を示す反復フーリエ変換アルゴリズム、最適多重クライテリア・アプローチなどが提案され、CGH 計算法が劇的に改善された^{46,47)}。90年代に入りリソグラフィ技術が進歩し、高精度の DOE や CGH が作製できるようになってきた。電子線描画を利用したリソグラフィ技術、エッチング技術の進歩によりサブミクロンの微細構造をもつ DOE が作製できるようになった (図2)^{48,49)}。偏光選択 CGH、反射防止構造などのナノ構造も作製できるようになり、厳密回折理論が必要となってきた⁵⁰⁻⁵³⁾。計算機の能力が上がり、FTDT法 (finite-difference time domain method) のソフトなどが発売され、誰もが簡単に計算できるようになってきた。

2.2 SLM の開発⁵⁴⁾

1980年以降、光学プロセッサの速度、解像度、サイズ、変調能力を満足するような SLM の開発に多くの努力がなされた。最終的に、液晶系のものと DMD (digital micromirror device) が実用化された。今日、光学情報処

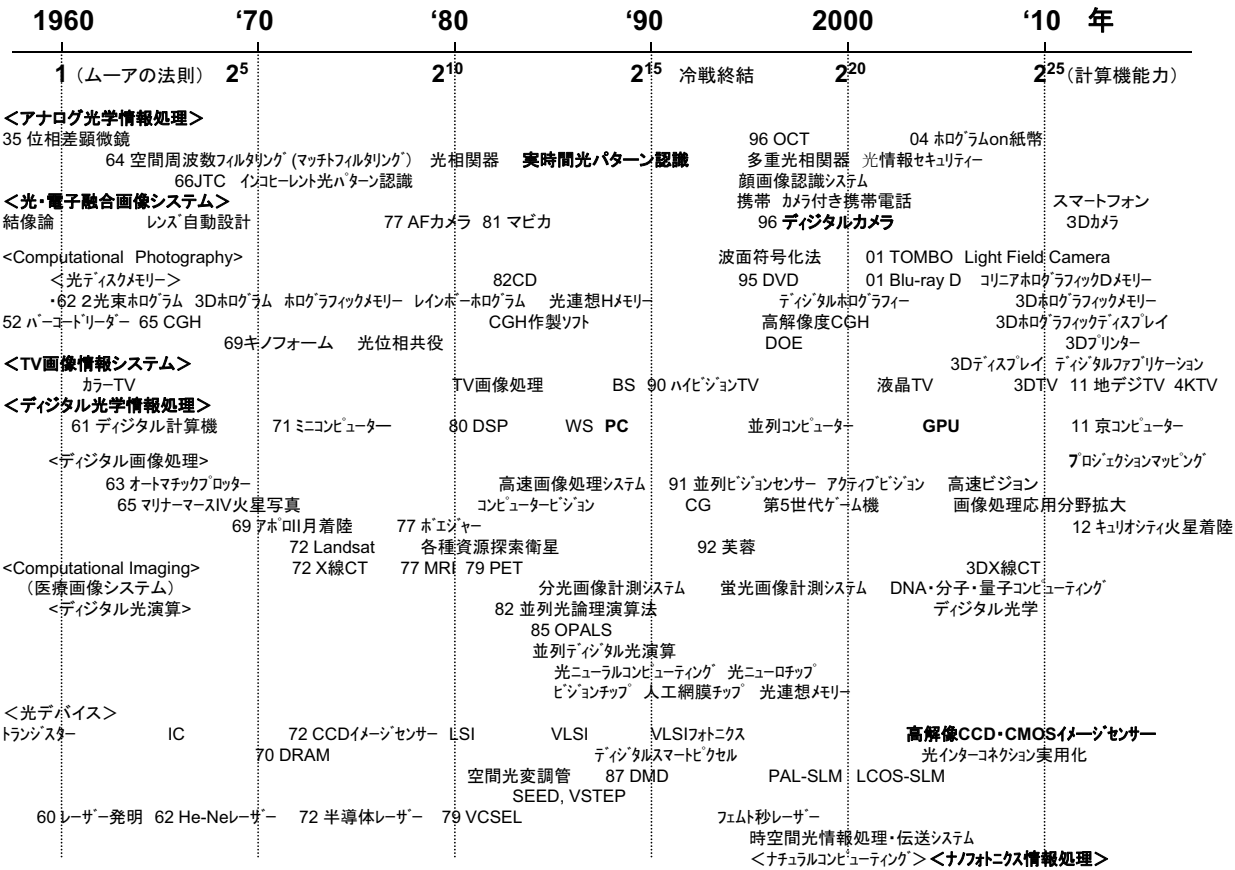


図1 光情報処理基本技術, 光情報システム, 画像システムの年譜 (項目の前の数字は略年代を示す).

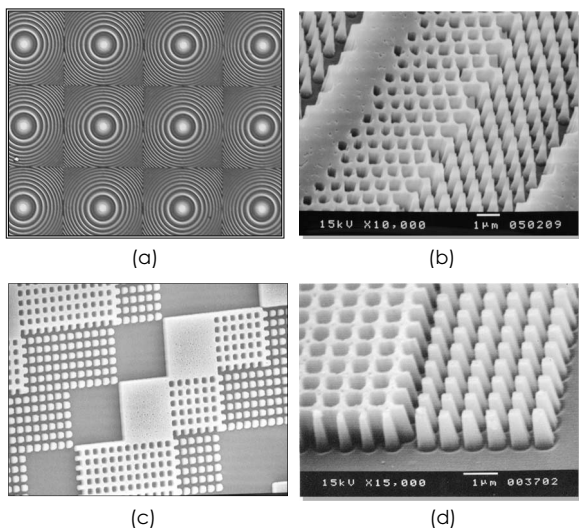


図2 微細加工技術による光学素子の作製, (a) マイクロレンズアレイ, (b) マイクロレンズの微細構造, (c) 計算機ホログラム, (d) 計算機ホログラムの微細構造 (各素子とも, バイナリ形状でマルチレベル機能を実現)⁴⁸⁾.

理の研究が始まって以来, やっと, 速度, 変調能力, 解像度で要求される性能を満足する SLM が市販される時代となっている. 現在, 高性能光アドレス型 PAL-SLM (parallel aligned liquid crystal SLM) や⁵⁵⁾, 高解像度 (1920×1080

画素) LCOS-SLM (liquid crystal on silicon SLM) などが市販されている⁵⁶⁾. これらは, JTC を利用した実時間顔認識装置⁵⁷⁾, 光パルス整形⁵⁸⁾, 量子鍵分布⁵⁹⁾, 光ピンセットなどに利用されている (本特集号の原氏の解説参照).

2.3 光メモリー

並列光コンピューティングでは並列プロセッサとメモリー間のボトルネックを避けるために, 並列アクセス光メモリーが要求される. そのため, 80~90年代の20年間に三次元並列アクセス光メモリーの研究が精力的に行われ, さまざまなアーキテクチャーのものが提案されている. Marchand らは 1992 年 motionless-head parallel readout optical disk を試作し, 1.2 Gbyte/s のデータレートを達成した⁶⁰⁾. Mok, Psaltis らはフォトリフラクティブ結晶を用いた 3D ホログラフィックディスクメモリーの研究プログラムを実施し, 3 cm³ の結晶に 440×480 画素のホログラムを 10000 枚記録した⁶¹⁾. IBM も 90 年代, ホログラフィックメモリーの研究を活発に行った⁶²⁾. わが国ではコリニア方式ホログラフィックディスクメモリー⁶³⁾が開発され, 超高速顔認識システム⁵⁷⁾などに利用されている. 今日, ホログラフィックメモリーはまだ将来のメモリーの有力候補として残っている. しかし, 記録媒体の問題が未解決

で、安価な書き換え可能な材料の探索が続けられている。フォトポリマーは書き換えができず、フォトリフラクティブ結晶は利用が難しく高価である。

1982年、ソニーからビットバイビットのアーキテクチャーをもつ光ディスクメモリーであるCD (compact disk) が市販された。以後、民生用、業務用の光ディスクメモリーの開発競争が始まった。90年代になるとビデオテープにとって替わってビデオディスクDVD (digital versatile disk) が普及した。2000年代初には民生用のBlu-ray Discが発売され、現在、PC (personal computer) やビデオなどに広く利用されている。しかし、現在の光ディスクメモリー・システムは、性能向上が著しい磁気ディスクと競合状態にあり、今後の利用形態を含め、将来の方向を模索中である。

2.4 アナログ光学情報処理、光パターン認識

20世紀最後の20年間に光プロセッサと光パターン認識の研究が世界各国で行われ、大きく進展した。光プロセッサの要は参照フィルターにある。相関はシフトインバリエントではあるが、スケールバリエント、方向バリエントなので、この欠点を克服するために種々の方法が提案された。SDF (synthetic discriminant filter) はこの欠点を克服するフィルターである^{64, 65}。古典的なマッチトフィルターもかなり改善された。複雑なシーンの中にあるターゲットを区別して強調するために、多くの研究が行われた。JTCのアーキテクチャーも広く研究され、Javidiは非線形JTCを提案し性能を改善した^{66, 67}。SLMの進歩により数多くの光プロセッサが開発された。またフィルターやアーキテクチャーに関する理論研究も行われた。いくつかの光パターン認識システムが実用に供された。その概要は文献68に要約されている。

この中から2, 3の例を示す。1982年、Clelandらは、高エネルギー物理実験用のインコヒーレント光プロセッサを開発、飛跡の検出に利用した⁶⁹。Yuらは光ディスクベースのJTCを利用した光パターン認識プロセッサや自律的実時間物体トラッキングに供する適応JTCを提案した⁷⁰。また、ホログラフィックメモリーをベースにした光・電子プロセッサを利用して実時間カーナビゲーションを達成するロボットも作製された⁷¹。

Guilbertらは非線形光学アドレス・フェロエレクトリック液晶SLMを用いて実時間道路標識認識用のオンボード光JTCプロセッサを開発した⁷²。Perkin Elmerでは1990年、Hughesの液晶ライトバルブ、ポロプリズムとホログラフィックフィルターを利用したミニチュアVander Lugt型相関器を開発した⁷³。1995年には、OCAがPCのスロッ

トに入る光相関器のプロトタイプを作製、商用化を狙った⁷⁴。最近では、4 KHzで動作するSLMを利用した光相関器⁷⁵、JPLのChaoらの数種類の実時間自動ターゲット光認識プロセッサ⁷⁶などがある。そのほか、ベクトル・マトリクス演算用、シストリック・アレイ処理などの目的に光プロセッサが試作された。

国内でもさまざまな取り組みが行われた。例を挙げると、インコヒーレント文字認識システムの作製⁷⁷、顔認識用JTCプロセッサの開発⁷⁸、反射型多重光相関器を利用した道路の交通標識認識用システム、「見つめタイガー」の開発などがある⁷⁹⁻⁸¹。インコヒーレントホログラフィーとフーリエ分光を融合した高空間分解能かつ高スペクトル分解能を有する超多重分光イメージングシステムも開発された⁸²。特筆すべきは、1996年、低コヒーレンス光干渉をベースとする断層イメージング技術、光コヒーレンストモグラフィー (OCT: optical coherent tomography) がわが国で発明されたことである⁸³。

2.5 光ニューラルネットワーク

1980年代になると計算機の性能もずいぶん上がってきた。しかし、フォンノイマン型コンピューターは、数値計算や記号処理、論理処理は得意だが、人が行っているような知的な情報処理、柔軟な情報処理、連想などの曖昧な処理には不向きであることがわかってきた。80年代半ばに入ると、ニューロコンピューター開発への機運が一気に高まり、ニューロを付した国内外の学会、会議は常に超満員の状況が続いた。ニューラルネットワークの理論、モデル、ハードウェア、応用、認知科学、神経生理学など広範な関連分野の研究が行われた。

光ハードウェア関連では、光の並列性、高密度空間配線、アナログ高速処理、画像情報の直接処理などの特質を利用した光ニューラルネットワークシステム・デバイスの研究が活発に展開された。光・電子融合システムとして、マトリクス・ベクトル演算用の光集積化システム (光ニューロチップ) の開発、感度可変受光素子 (VSPD: variable sensitivity photodetector) を利用した可変シナプス型ニューロチップ、光アドレス型ニューロチップ、二次元VSPDを用いた画像認識用光ニューロチップなどが開発された。また、ホログラムを利用した階層構造を有する光連想記憶システム、リング共振器利用の帰還型光連想記憶システムなどが提案された⁸⁴。その他、シミュレーテッドアニーリングによって生成したSDFを利用した反復型インコヒーレント光連想記憶メモリー、光ウェーブレット・プロセッサと結合したニューラルネットワークを用いたパターン認識など、多くの研究報告がある⁸⁵⁻⁸⁷。

2.6 デジタル光学情報処理

デジタル計算機と対抗するために、幅広い分野でデジタル光コンピューティング (DOC: digital optical computing) に関する研究が行われた。それらの内容は、文献 88~90 や ICO (International Commission for Optics) や OSA 主催の国際会議, '88 Toulouse, '90 Kobe, '93 Budapest, '94 Kyoto, '94 Edinburgh, '96 Sendai, '96 Taejon, '99 San Francisco をはじめ多くの国際会議のプロシーディングスに詳細に記述されている。

2.6.1 並列光論理演算法と OPALS

情報光学の黎明期の 1962 年頃から、光の高速性、並列性、高密度性を利用した光コンピューターが研究者間では話題となっていた。しかし、光コンピューターの開発に必要な光技術は長い間未熟であった。デジタル光コンピューティングに対する明確なイメージを与えたのが Tse 「字」コンピューターである⁹¹⁾。Tse コンピューターでは 2 つの二次元二値入力画像に対して、その配列を保ったまま並列に AND, OR, NAND などの論理演算を光で行う並列論理素子の組み合わせで、任意の論理回路を構成する。電子計算機の論理回路を二次元的に拡張したもので、画像入力に対してきわめて高速の処理が期待できた。しかし、このコンピューターは概念の提案のみに終わり、具体的なシステム開発には至らなかった。

二次元論理演算を直接並列素子で実行する代わりに、投影光学系を利用した並列離散相関光学系によって実現したのが並列光論理演算法である⁹²⁾。2 つの 2 値入力画像の対応画素を 2 ビットデコーダーのルールに従って符号化し、符号化入力像と点光源アレイの並列離散相関演算結果を復号マスクで復号操作して、2 変数 2 値論理関数の二次元並列演算を実現する。2×2 の点光源アレイの点滅状態を変更させると、デジタル計算機の基本である 16 種類の 2 変数 2 値論理関数の演算結果が並列的に 2 値画像として得られる。演算カーネルの操作と二次元的なビット配置を利用して、パターンに直接操作して記号置換論理も実行できる。

並列光論理演算の発展形として並列光アレイロジックが考案された⁹³⁾。光アレイロジックはパターンを近傍領域内における二次元ビット列とみなし、それらに対する論理演算を並列処理で行う技術である。光アレイロジックによる並列光演算をもとに汎用デジタル並列光演算システム OPALS (optical parallel array logic system) が考案され、数種類の実証システムが作製された⁹⁴⁻⁹⁶⁾。また、OPALS 上での並列演算を実行するための視覚的な演算の記述法 (プログラミング法) も研究され、細線化や経路探索などのデジタル画像処理の問題に適用され良好な結果を得

た。この技術は計算機におけるソフトウェアに相当し、光による並列処理で任意の処理を自由に設計、プログラムで実現できる手段を示した点に意義があった⁹⁷⁾。

並列デジタル光演算法による並列演算は、全データに対して同一の論理演算や光相関演算を実行する SIMD (single instruction multiple data) 形式であるので、データに対する処理が均一な画像処理などの目的には有効であるが、条件分岐の多いアルゴリズムでは効率が極端に悪くなる。この特徴から並列デジタル光演算は、演算処理でなく画像処理などに特化したデジタルプロセッサにその適用範囲が見いだされると期待された。しかし、以後の VLSI (very large scale integration) 技術の急速な進展に伴う電子計算機の能力の圧倒的な向上、並列デジタル光演算の機能・性能を満足させる並列光・電子機能素子の欠如のため、デジタル光コンピューターの研究は現在休止状態にある。Guilfoyle らは UNIX 環境で動作する 32 ビット、プログラマブルな DOC を試作した⁹⁸⁾。DOC 用の素子としては VCSEL (vertical cavity surface emitting laser), SEED (self-electrooptic effect device) などが開発された^{99,100)}。

2.6.2 高速デジタル画像処理システム、ハイブリッド画像処理

1970 年代終わりから 1980 年代にかけて、高速データベースをもち、かつ高速演算が実行できるさまざまなシステムアーキテクチャーをもつ高速デジタル画像処理装置の開発が、世界レベルで繰り返された。そのアーキテクチャーの特徴は処理の並列化にあり、完全並列型、局所並列型、パイプライン型、マルチプロセッサ型などの方式が試みられた^{101,102)}。この時代、デジタル画像処理とアナログ光学処理を融合したハイブリッド画像処理の研究も行われた¹⁰³⁾。

2.7 CCD/CMOS イメージセンサー、ビジョンチップの開発¹⁰⁴⁻¹⁰⁷⁾

イメージセンサーはレンズを通して得られた光信号 (画像) を電気信号に変換する光電変換センサーである。70 年代初頭に実用化され、それまで撮像装置で全盛を誇っていたビジコンなどの撮像管に取って代わった。Si ベースの半導体でできており、方式として CCD (charge coupled devise) イメージセンサーと CMOS (complementary metal oxide semiconductor) イメージセンサーがある。両者とも二次元配列された PD (photo diode) に入射した光を光電変換して順次読み出していくが、光電変換された電子を電気信号として読み出す方式に違いがある。CCD では電荷転送に高電圧が必要で、駆動回路が外付けとなっている

が、CMOSは製造過程が一般のMOS論理回路と同じであるため駆動回路が内蔵しており、消費電力もCCDに比して小さくなるという特長をもつ。その性能は現在も日々向上しており、テレビ・ビデオ用をはじめ、デジタルカメラ、産業用、医療用、自動車などの交通制御用、各種見守りカメラ、携帯電話・スマートフォンなど幅広い分野に利用されている。CMOSイメージセンサーの画素数、性能は年々向上しており、また、特性も改善され、最近では低ノイズの裏面照射型CMOSイメージセンサーも登場している。

CMOSイメージセンサーの各画素内にさまざまな機能をもつ処理回路を集積化し、(画像)処理の高速化・高機能化をめざした素子を“ビジョンチップ”といい、研究開発が活性化している。歴史的には、Meadらによって始まったアナログ系ビジョンチップ¹⁰⁵⁾が有名で、生体の視覚機能を模したものが発表された。一方、画素内にビットシリアル演算回路を集積化し完全並列デジタル処理を目指した高速ビジョンチップも開発された¹⁰⁶⁾。画素回路構成は、近傍4画素と結合してSIMD動作する完全並列型である。標準テレビレートを超える高フレームレートでの画像取得、記録、処理ができる高速画像システム高速ビジョン¹⁰⁷⁾の基本素子として威力を発揮している(本特集号の石川氏の解説参照)。

アナログ・デジタル融合センシング方式の光LAN(local area network)用ビジョンチップ、パルス幅変調方式、パルス周波数変調方式をベースとしたビジョンチップも開発された¹⁰⁸⁾。パルス周波数変調方式のイメージセンサーを利用した人工視覚への応用も検討されている¹⁰⁹⁾。半導体集積回路技術、微細加工技術を併用して、光入出力機能と演算処理機能を集積させたデジタル・スマートピクセルというハイブリッド素子の開発も試みられている¹¹⁰⁾。

2.8 デジタルカメラの開発¹¹¹⁻¹¹⁴⁾

1981年にソニーは電子スチールカメラ「マビカ」を、1986年にはキヤノンが「RC-701」を発表した。1995年、カシオは光学結像系、25万画素のイメージセンサー画像検出系、デジタル画像処理系を組み合わせた画期的な光・電子撮像システムのデジタルカメラ「QV-10」を開発・市販し、歴史に残る大ヒット商品となった。この功績は大きく、この年からデジタルカメラ(以下デジカメ)の開発競争が始まり、光学、家電メーカー各社からごく短期間にさまざまなデジカメが開発、市販され、社会に普及していった。デジカメは、世紀をはさむわずか10年未満の短期間で、長い歴史をもつ銀塩フィルムカメラを駆逐し

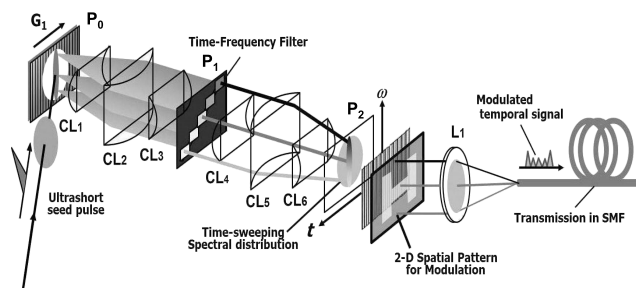


図3 超高速時空間フォトニック情報変換・伝送システム。

た。その技術変革を起こしたのが、CCDやCMOSイメージセンサーの急速な性能向上、特に、銀塩フィルムに肉薄する空間解像度の向上である。イメージセンサーの製造技術は、わが国のメーカーが技術的、製品戦略的に世界をリードしてきた。現在、36M(6000×6000)画素のイメージセンサーを装填した一眼レフデジカメも発売されている。

デジカメでは、イメージセンサー上に結像した被写体像をアナログーデジタル変換器でデジタル電子化し、それを画像エンジンという画像処理専用のシステムLSI(large scale integration, 一種の専用コンピューター)で補間、色補正、ガンマ補正、画像強調・鮮明化などの基本的な画像処理を行って写真画像を構成して実時間でモニターに表示、JPEG(joint photographic experts group)圧縮してメモリーに保存、または、ネットワークで伝送する。デジカメの特徴は、PCやネットワークとの親和性が高く、さまざまな利用法が開発されて広く社会に普及していることである。

デジカメ開発に必要なレンズ設計・製作技術、イメージセンサー作製技術、画像処理技術などは、長い間、個別の技術として発展してきた。しかし最近では、撮影光学系、撮像素子、およびデジタル画像処理系を融合一体化したシステムと捉え、目的・用途に合わせ、サブシステムのパラメーターを統合的に取り扱って、最適化システムを開発することができるようになってきている。このような技術の融合化により、デジカメの設計・開発手法も急速に変わりつつあり、新しい機能を付加したデジタルカメラや新しいデジタル映像機器の開発が進んでいる。

2.9 超高速時空間フォトニック情報変換・伝送システム¹¹⁵⁻¹¹⁷⁾

フェムト秒レーザーの極短光パルスの波形整形技術を参照して、画像情報を超高速に変調、伝送、再生しうる時空間フォトニクス情報処理・伝送システムが提案された¹¹⁵⁾。図3に超高速時空間フォトニック情報変換・伝送システムの概念図を示す。

空間的傾きをもって回折格子面 P_0 に入射するコリメー

トされた極短光パルス (100 fs 幅のパルスで厚さ 30 μm の光シート) は、回折格子 G_1 上を時間とともに (光速) で移動していく。移動する超短光パルスは回折格子によって分散され、シリンダリカルレンズ CL_1, CL_2, CL_3 によって P_1 面上に水平方向に信号光のスペクトル分布を生じる。このスペクトル分布は鉛直方向には全く同じで、線状の分布をもつ。このスペクトル分布に対し、鉛直方向の異なる高さの開口窓で異なるスペクトルを抜き出すフィルタリングを行う。フィルタリングされたスペクトル分布は後のシリンダリカルレンズ CL_4, CL_5, CL_6 によって P_2 面上に再結像される。この光学系で結像された光波分布は鉛直方向にスペクトル分布が並ぶようにフィルタリングされたものである。 P_2 面は回折格子面 P_0 と結像関係にあるので、この線状のスペクトル分布は時間とともに P_2 面を (回折格子上を移動する入射超短光パルスに対し) 水平逆方向に移動 (線走査) する。

P_2 面上で得られる光波分布の鉛直方向はスペクトル分布に、水平方向は時間軸分布に対応している。すなわち、極短光パルスがもつ時間信号とスペクトル信号を P_2 面上で二次元空間的に展開したことになる。 P_2 面上の光波分布は光スペクトログラムとよばれる。 P_2 面に PAL-SLM 等で表示された二次元画像を置けば、光スペクトログラムを直接 (空間) 二次元画像で変調することができる。変調スペクトログラムは、レンズ L_1 で一次元時間光信号に変換し、光ファイバーで超高速光伝送する。伝送されてきた変調スペクトログラムは、再回折光学系 (図3の $P_0 \rightarrow CL_1 \rightarrow CL_2 \rightarrow CL_3 \rightarrow P_1 \rightarrow CL_4 \rightarrow CL_5 \rightarrow CL_6 \rightarrow P_2$ で構成する光学系に対応) で再度、二次元画像の形に変換する。実際に実証システムが試作され、良好な実験結果が示された¹¹⁶⁾。

超高速時空間フォトニクス情報変換は、極短光パルスに光情報処理技術を適用した新しい時空間情報変換技術であり、最近提案された超高速光 AD (analog to digital) 変換技術とともに、次世代の通信インフラを担うスマート・フォトニックネットワークや次世代超高速情報伝送分野で注目され、研究が進められている。

2.10 光 接 続

光接続は、光学が大きなポテンシャルをもつ分野である。特に自由空間光接続が大切で、スイッチ、光源、検出器、アーキテクチャー、ルーチンアルゴリズムなどあらゆる種類の光接続が研究されている。1989年、Goodmanは光接続技術の詳細な解析を行った¹¹⁸⁾。MillerはSiICの光接続発展の歴史を報告している¹¹⁹⁾。また、光パーフェクトシャッフル、ハイパーキューブベースの光接続、クロスバー NW (net work)、光接続への液晶 SLM の利用、光接

続用 DOE、ホログラフィック光接続とその限界、ボード間光接続などについて多くの論文が90年代に発表された¹²⁰⁻¹²³⁾。2009年から、Intelはチップ間の電気接続をテラヘルツバンド幅の光接続で置換する可能性の研究を始めている¹²⁴⁾。D. A. B. MillerはSiチップの光接続に要求されるデバイスについて論じている¹²⁵⁾。

3. 光コンピューティング、情報フォトニクスの現在 (2005年~現在)

2000年頃から光コンピューティングに対する興味が衰退し始め、中心的な話題であったアナログ光学情報処理やデジタル光学情報処理の研究も少なくなっていた。世紀が変わると、デジタル計算機の性能のパワーアップを背景に、光コンピューティングは情報フォトニクスと名前を変え、光・計算機融合 (画像) 情報システム—デジタル光学—や、三次元情報処理、光セキュリティ、ナノフォトニクス情報処理などの広義のイメージングシステムに関わるテーマに研究対象がシフトしている。本章では現在、情報フォトニクスで取り扱われている分野¹²⁶⁾を俯瞰して将来への展望を述べる。

3.1 GPU (graphics processing unit)^{127, 128)}

この数年、電子計算機の性能向上におけるマイクロプロセッサのクロック競争が終わり、マルチコアプロセッサに代表される並列化に舵がきられた。さらに、光の並列性を連想させる細粒度 PE (processing element) の並列展開というアーキテクチャーを導入した GPU が開発され、情報フォトニクス分野から熱いまなごしが注がれるようになった。GPUはPCやWS (work station) 等に装填される画像データ処理専用の集積回路である。2010年以降、おもなCPU (central processing unit) メーカーは従来のCPU機能だけにとどまらず、1つのCPUチップ内に複数のCPUコアを搭載するとともに、画像出力専用回路として細粒度並列プロセッサからなるGPUコアも統合したアーキテクチャーをもつ統合GPUという製品を提供するようになってきている (図4)。GPUの画像演算機能を利用して、各種科学技術計算やシミュレーション、グラフ処理、画像処理、画像認識、音声認識などの汎用的な用途に広く利用されるようになってきた。

3.2 デジタル光学

最近のイメージセンサーの高解像度化や性能向上に伴い、カメラや光学実験で古くから用いられていた写真フィルムや写真乾板に代わって、高解像度のイメージセンサーが利用されるようになってきた。デジタル光学とは、イメージセンサーで取得した入力光 (画像) 信号をディジタ

統合GPU (CPU内蔵GPU)

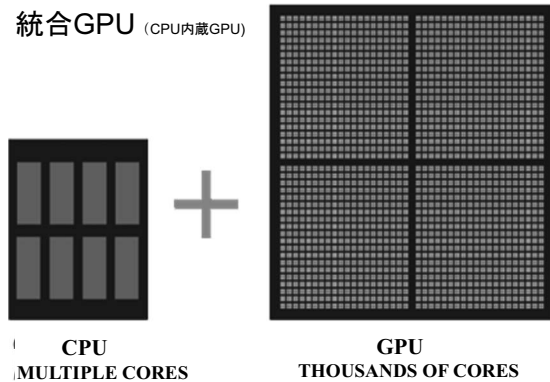


図4 統合GPUの構成図¹²⁸⁾

ル電子化して、計算機あるいは専用デジタルプロセッサを利用してさまざまな情報処理(加工, 変換, 操作など)を行う, 光・計算機融合情報システム(広義のイメージングシステム)に関わる分野である。最も代表的なシステムが前出のデジタルカメラである。最近の計算機の性能向上やGPUの普及とともに, 今までの光学的な考察, 手法のみではできない新しい機能をもつ(画像)情報処理や, 新しいイメージングシステムの開発が行えるので, 多くの研究者の関心を集めている¹²⁹⁾。

現在, デジタル光学の中に, コンピュータショナル・イメージング (computational imaging), コンピュータショナル・フォトグラフィー (computational photography), デジタルホログラフィー (digital holography), computational interferometry, ハイブリッド画像処理, コンピュータショナルセンシング, プロジェクションマッピング, デジタルファブ리케이션¹³⁰⁾, コンピュータショナルデザイン, デジタルデザインなどの分野が創成され, 活発な研究が行われている。デジタル光学は, 情報処理分野からも関心もたれており, 次世代高度情報通信化社会に資する融合科学技術として今後の展開が期待されている。以下, 2, 3の例を記す。

3.2.1 コンピュータショナル・イメージング/フォトグラフィー

結像光学系とデジタル画像処理系を組み合わせ, 高度で複雑な後処理を前提として, 目的にあわせて撮像系を再構築する, コンピュータショナル・イメージングあるいはコンピュータショナル・フォトグラフィーという新しい映像技術分野が広がりつつある。

前者の代表例は, 病院にあるX線CT装置, MRI (magnetic resonance imaging) 装置などの医療映像機器である。X線CT装置等で再構成される断層像は, デジタル画像処理技術がなければ絶対に得ることができない。最近, 体軸方向に走査してマルチスライス(例えば128枚)のX線CT

断層像を撮影し, 計算機により10秒以内で三次元像を再構成する三次元X線CT装置が普及し始めている。大動脈瘤や大動脈解離などの画像が短時間で非侵襲観察・検査できる。MRI装置とともに, 今後, 医療現場で急速に普及していくものと思われる。

後者の例として, 撮影した光学像から, 波面コード化法という後処理を前提として像再生を行う超深度被写界デジタルカメラ^{131, 132)}や, 薄型複眼カメラTOMBO (thin observation module by bounded optics)¹³³⁾, ライトフィールドカメラ¹³⁴⁾などが発表されている。

TOMBOは昆虫の複眼構造を模した超薄型多眼の次世代デジタル撮像システムである。二次元アレイ状に配置した微小レンズで得られた多数の小画像から, 画像再構成技術を用いて高解像度の画像を再構成する。微小レンズアレイの配置の仕方により, 被写体までの奥行推定画像, 三次元画像, マルチスペクトル画像, 時間差画像など今までできなかった像再構成ができるようになった。各レンズを特殊な非球面形状として波面を符号化することで, 深写界深度を得ながら距離画像を得る手法も開発されている。また, 立体内視鏡などにも応用されている^{135, 136)}(詳細は本特集号の谷田氏の解説を参照)。

3.2.2 CGH, デジタルホログラフィー¹³⁷⁻¹⁴¹⁾

技術革新により, 計算機の能力, アルゴリズム, 撮像装置, 表示装置の性能が一昔前に比べ格段に向上してきた。その結果, 三次元架空物体のCGHもかなり高解像度のものがごく時間で計算, 光学的に再生されるようになり, きわめて画質のよい再生像が得られるようになってきた。一方, 計算機の能力の向上により, 実存する物体のホログラムから像再生(回折計算)をGPUなどの計算機でごく普通に行われるようになり, デジタルホログラフィーとよばれる分野が立ち上がってきた。位相シフト法を用いることにより, 複数のホログラムから, 物体の振幅と位相分布を求め実像のみの再生が可能となった。最新のサイズ29×20mm, 画素数1.2億(120M)のCMOSイメージセンサーの分解能は, 単純計算で約500本/mmである。ホログラム乾板がCCDカメラに置き換わったおかげで, ホログラフィーは生産する製品の品質制御や, 新しい応用分野を開くデジタルホログラフィー顕微鏡などの産業応用分野で再度活路を見いだしている¹⁴²⁾。

3.3 三次元光情報技術¹⁴³⁻¹⁴⁷⁾

三次元光情報技術とは, 三次元シーンの画像情報の計測, 取得, 加工, 符号化, 認識, 伝送・表示などを行う技術の総称である。三次元情報は人間生活に密着しており社会的にも需要が大きく, しかも光技術との親和性がよい。歴史

的には古くから両眼視差を利用した立体映画があり、半世紀前から「飛び出し映画」として結構鑑賞に耐えるものであった。最近ではこの技術を利用した三次元テレビも市販されている。いずれも左右別々の眼鏡を必要とする。三次元情報処理の研究はホログラム発明の頃から関心はもたれていたが、扱う情報量の多さから具体的システムがなかなか実現できなかった。最近の技術の進展とともに実用的な三次元情報処理システムの実現が視野に入ってきた。

三次元光情報技術は基本技術としてホログラフィー技術とホログラフィー以外の技術を用いるものに分類される。ホログラフィーは自然界の三次元情報を扱う最も優れた技術である。静止像物体の三次元ホログラムの記録には、高解像度の写真乾板が利用された。1000本/mm程度の分解能をもつホログラムを用いれば、物体を直接観測するのとはほとんど変わらない三次元像が再生できる。最近のCCD/CMOSイメージセンサーの性能向上、分解能向上には眼を見張るものがあり、そろそろこのレベルに近づきつつある。

最近ではCGHやデジタルホログラムの計算にはGPUが利用できるようになり、三次元物体のCGH合成や三次元像再生に要する演算時間が格段に短縮されるようになった。その結果、三次元物体像を表示するホログラフィックディスプレイの研究も再び活性化している。三次元ホログラムの究極の目標はやはり三次元テレビジョンの実現であろう。三次元動物体や自然情景(シーン)の三次元ホログラムを伝送するには、超高速の情報変換・伝送システムと超広帯域の伝送路が必要となる。もちろん、入出力画像の符号化の方法、帯域圧縮などへの考察が必要である。先述の超高速時空間光情報変換・伝送システムは、その候補となりうる処理速度と伝送帯域を有している¹¹⁶⁾。

ホログラム以外の技術を用いた三次元情報取得・処理技術、立体像表示技術、システム化技術は情報処理分野などでも活発に研究が行われている。

3.4 光情報セキュリティ¹⁴⁸⁻¹⁵⁰⁾

情報社会の進展とともに、安全・安心・安定な社会を保つために情報セキュリティへの関心、需要が高まっている。それに伴い、光学情報処理技術を利用した光情報セキュリティの研究が活発化している。ATMなどの個人識別のために指紋認証、手掌認証、虹彩認証などの光学的手法が実用化されてきた。有価証券や各種サービスカードに、また、2004年には一万円札紙幣にもホログラムが付加されるようになった。光セキュリティの特徴のひとつはセキュリティ性を視認できることである。この特質を利用した視覚復号型暗号方式のシステムが最近各所で提案

され、活発に研究されている。また、情報秘匿性を守る暗号化デジタルホログラムを利用した暗号化処理なども研究されている。情報セキュリティの本質を考慮して、ナノ領域で展開される新しい光技術を活用する手法などの進展も期待されている。

4. 情報フォトリクスのこれから

光学情報処理の研究は、膨大なデータの実時間処理ができる光プロセッサの作製に捧げられてきたといっても過言ではない。しかし、最近では、パターン認識用光相関器の研究もほとんどみられなくなってきた。その理由は、光プロセッサの性能が入出力デバイスの速度で限定されることと、高性能デジタル計算機が急速に普及してきたことにある。最新の計算機はきわめてパワフルで使いやすく、柔軟性があり、かつ、安価である。

光プロセッサで利用するキーデバイスはSLMであり、光・計算機融合情報システムのキーデバイスはイメージセンサーである。しかし、SLMの開発速度は遅々たるもので、現在利用できる素子開発に四半世紀近くもかかってしまった。一方、イメージセンサーの性能・解像度は最初のデバイス開発以来、半導体集積回路技術の進歩とともに向上し、また、電子計算機もムーアの法則¹⁵¹⁾(VLSIの集積度や計算機的能力が実質的に2倍/2年で向上するという指標)に従って性能が向上している。

デジタル計算機の性能向上の速度はまだ衰えていない。ムーアの法則に従って試算すると、1961年の計算機的能力を1とすれば、52年後の2013年の性能は $2^{26} = 6400$ 万倍になる。実感が湧かないが、1991年から12年(4383日)かけて国際的に行われたヒトゲノム解析が、最近では1日でできるそうである。

皮肉なことに、VLSI, ULSI (ultra large scale integration)の集積度の向上、ひいては計算機的能力向上には、わが国が得意とする光学技術が大きく貢献している¹⁵²⁾。極低収差レンズを装備した半導体縮小露光装置(ステッパー)を利用すれば、光の特徴である高速・並列・高解像度処理(縮小結像処理)によって、レチクルをSi基板上に印を押すように効率的に縮小転写することができる。この装置のおかげでULSI, VLSIの生産性は一気に向上し、きわめて安価に製造できるようになって、半導体産業の繁栄をもたらした。

産業応用という立場からみれば、今日、光学は計算(演算)処理というよりも、デジタルカメラ、薄型ディスプレイ、光ディスクメモリー、Blu-rayディスク、スマートフォン、フォトリクネットワークのような(画像)情報

入出力・処理系と通信系で成功している。わが国の平成20年度の工業製品総出荷額は約325兆円、電気・電子・情報関連の出荷額は約50兆円である。そのうち30%の15兆円強を光関連製品が占め、その9割以上が光情報入出力機器、光情報通信関連機器である。光情報産業はわが国の大産業となっている。

高速ビジョンやGPUなどによる電子（計算機）処理と光学処理を併用するデジタル光学などの実用的な（画像）情報処理の環境は整備されてきた。一方、光の高速・並列・高解像度情報処理・伝送能力はまだ健在である。果たして、将来の情報システムの演算部で、光のこの特質が発揮できる機会があるだろうか。

神戸ポートアイランドにあるスーパーコンピューター「京」は、開発費1100億円、GPUの親玉みたいな並列計算機であり、主たる使用目的は並列処理を基本とする自然現象のシミュレーションである¹⁵³。公称最大速度は10.6 PFLOPS (peta = 10^{15} floating point operations per second) である。広い部屋の中に二次元並列に配置された864筐体内の電子プロセッサ（CPU数88,128）を動作させるためには、かなりの電力と凄まじい冷却装置が必要である。この装置を見た瞬間、光学に携わってきた者として、二次元並列処理を特長とする光プロセッサの必要性和出番を感じざるを得なかった。それは、ある程度、目的を絞った処理、例えば、画像配列を保った時空間光並列フィードバック演算処理、高速・並列四則演算、高速・並列・高解像度画像入出力処理、時空間光相関演算処理など、広義のイメージングシステムに関係したものである。光プロセッサの出番（援用）が要請されても何らおかしくない応用である。

情報フォトニクスが情報処理分野（計算機分野）の単なるユーザーにとどまらず、それらと融合・連携して大規模並列計算機を開発する「攻めの」時代が直前まで来ていたのではないかと筆者は密かに思っている¹⁵⁴。戦略的には、まず、高解像度画像の光並列処理をプログラム制御できる「新しい発想」に基づくスマートピクセルの開発が必要である。そして、それらを利用した新しい「アーキテクチャー」をもつ光・電子融合情報システムの創出こそ、光コンピューティング再興のシナリオであろう。

20世紀末から始まった光技術、コンピューター技術、通信技術の融合は、単なる技術革新や技術的パラダイムシフトだけでなく、人々の生活スタイルに変化を及ぼす大きな社会システムイノベーションを引き起こした。今まで培ってきた光情報システム、カメラ・映像システム、写

真、情報通信システムなどをベースに、光・電子融合情報システムはまだまだ進化を遂げており、今後もハードウェア技術の進展によるシステムの性能向上とソフトウェアの拡充により、応用分野の一層の拡大が期待できる。これからは、ハードウェア開発だけではなく、それらを活用するソフトウェアを包含する総合的なエンジニアリングに注力していくことが大切である。新しい光・電子情報産業や光・映像文化/芸術を創出し新たなイノベーションを起こすことは、光学大国であるわが国に課せられた使命でもある。情報フォトニクスの出番が期待される。

本稿では触れなかったが、ナノ領域における分子や原子の振る舞いによる特異な光学応答の特性を光演算に活用して機能の実現を目指す研究、光DNA融合型ナノ情報処理の研究、ナノ-マクロ間階層型光情報システムの研究、プラズモニクスなどのナノフォトニクスをベースとする光演算の萌芽的な研究などが活発に行われている¹⁵⁵⁻¹⁵⁷。要素技術研究にとどまらず、実応用システムへの展開を期待したい。最後に、資料を参照させていただいた諸氏、ならびに、本稿執筆の機会を与えていただいた本誌編集委員会に感謝いたします。

文 献

- 1) D. K. Pollack, C. J. Koester and J. T. Tippett eds.: *Optical Processing of Information* (Spartan Books Inc., Baltimore, 1963).
- 2) J. T. Tippett, D. A. Berkowitz, L. C. Clapp, C. J. Koester and A. Vanderburgh, Jr. eds.: *Optical and Electro-Optical Information Processing* (The MIT Press, Cambridge, 1967).
- 3) K. Preston: *Coherent Optical Computers* (McGraw-Hill, New York, 1972).
- 4) 辻内順平, 村田和美編: 光学情報処理 (朝倉書店, 1974).
- 5) S. H. Lee ed.: *Optical Information Processing Fundamentals* (Springer, Berlin, 1981).
- 6) H. Stark: *Application of Optical Fourier Transform* (Academic Press, Orlando, 1982).
- 7) 稲場文雄編著: 光コンピュータ (オーム社, 1985).
- 8) 辻内順平, 一岡芳樹, 峯本 工: 光情報処理 (オーム社, 1989).
- 9) H. H. Arsenault, T. Szoplik and B. Macukow: *Optical Processing and Computing* (Academic Press, San Diego, 1989).
- 10) 稲場文男, 一岡芳樹編著: 光コンピューティングの事典 (朝倉書店, 1997).
- 11) J. Shamir: *Optical Systems and Processes* (SPIE Press, Bellingham, 1999).
- 12) H. J. Caulfield: *Computer*, **31** (1998) 22-25.
- 13) P. Ambs: *Adv. Opt. Technol.*, **2010** (2010) 372652.
- 14) J. W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill, San Francisco, 1968).
- 15) L. Foucault: *Ann. Obs. Imp. Paris*, **5** (1859) 197-237.
- 16) E. Abbe: *Arch. Mikrosk. Anat.*, **9** (1873) 413-468.
- 17) F. Zernike: *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **94** (1934) 377-384.
- 18) P.-M. Duffieux: *Faculté des Sciences Besançon* (Chez l'Auteur, France, 1946).

- 19) H. H. Hopkins: Proc. R. Soc. A, **217** (1953) 408-432.
- 20) P. Elias: J. Opt. Soc. Am., **43** (1953) 229-232.
- 21) A. Maréchal and P. Croce: C. R. Acad. Sci., **237** (1953) 607-609.
- 22) E. O'Neill: IRE Trans. Inform. Theory, **IT-2** (1956) 56-65.
- 23) L. J. Cutrona, E. N. Leith, C. J. Palermo and L. J. Porcello: IRE Trans. Inform. Theory, **IT-6** (1960) 386-400.
- 24) D. Gabor: Nature, **161** (1948) 777-778.
- 25) T. H. Maiman: Nature, **187** (1960) 493-494.
- 26) E. N. Leith and J. Upatnieks: J. Opt. Soc. Am., **53** (1963) 1377-1381.
- 27) E. N. Leith and J. Upatnieks: J. Opt. Soc. Am., **54** (1964) 1295-1301.
- 28) C. S. Weaver and J. W. Goodman: Appl. Opt., **5** (1966) 1248-1249.
- 29) A. V. Lugt: IEEE Trans. Inform. Theory, **IT-10** (1964) 139-145.
- 30) J. D. Armitage and A. W. Lohmann: Appl. Opt., **4** (1965) 461-467.
- 31) W. T. Rhodes and A. A. Sawchuk: "Incoherent optical processing," *Optical Information Processing Fundamentals*, ed. S. H. Lee (Springer, Berlin, 1981) pp. 69-110.
- 32) B. R. Brown and A. W. Lohmann: Appl. Opt., **5** (1966) 967-969.
- 33) W. Lohmann and D. P. Paris: Appl. Opt., **6** (1967) 1739-1748.
- 34) L. B. Lesem, P. M. Hirsch and J. A. Jordan Jr.: IBM J. Res. Develop., **13** (1969) 150-155.
- 35) J. W. Goodman: "Linear space-variant optical data processing," *Optical Information Processing Fundamentals*, ed. S. H. Lee (Springer, Berlin, 1981) pp. 235-260.
- 36) P. Ambs, S. H. Lee, Q. Tian and Y. Fainman: Appl. Opt., **25** (1986) 4039-4045.
- 37) S. H. Lee: "Nonlinear optical processing," *Optical Information Processing Fundamentals*, ed. S. H. Lee (Springer, Berlin, 1981) pp. 261-303.
- 38) G. R. Knight: "Interface devices and memory materials," *Optical Information Processing Fundamentals*, ed. S. H. Lee (Springer, Berlin, 1981) pp. 111-179.
- 39) D. Casasent: "Hybrid processors," *Optical Information Processing Fundamentals*, ed. S. H. Lee (Springer, Berlin, 1981) pp. 181-233.
- 40) FUJIC コンピュータ博物館 (<http://museum.ipsj.or.jp/computer/dawn/0010.html>)
- 41) 鈴木達朗, 一岡芳樹, 小川元靖, 田鍋 昭, 村田友司: 応用物理, **32** (1963) 685-691.
- 42) Y. Ichioka and T. Suzuki: Appl. Opt., **10** (1971) 403-411.
- 43) 一岡芳樹: 応用物理, **65** (1996) 462-472.
- 44) L. K. Anderson: Bell Lab. Records, **46** (1968) 318-325.
- 45) L. d'Auria, J. P. Huignard, C. Slezak and E. Spitz: Appl. Opt., **13** (1974) 808-818.
- 46) F. Wyrowski and O. Bryngdahl: J. Opt. Soc. Am. A, **5** (1988) 1058-1065.
- 47) L. Legéard, P. Réfrégier and P. Ambs: Appl. Opt., **36** (1997) 7444-7449.
- 48) 菊田久雄ほか: "高機能光学素子作成技術の確立", 大阪府地域結集型共同研究事業「テラ光情報基盤技術開発」研究成果報告書 (大阪府, 2002) pp. 143-384.
- 49) H. Toyota, K. Takahara, M. Okano, T. Yotsuya and H. Kikuta: Jpn. J. Appl. Phys., **40** (2001) L747-L749.
- 50) A. Mizutani, H. Kikuta, K. Nakajima and K. Iwata: J. Opt. Soc. Am. A, **18** (2001) 1261-1266.
- 51) T. Shiono, T. Hamamoto and K. Takahara: Appl. Opt., **41** (2002) 2390-2393.
- 52) W. Yu, T. Konishi, T. Hamamoto, H. Toyota and T. Yotsuya: Appl. Opt., **41** (2002) 96-100.
- 53) U. Levy, C.-H. Tsai, H.-C. Kim and Y. Fainmann: Opt. Exp., **12** (2004) 5345-5355.
- 54) U. Efron *et al*: Special issues on spatial light modulators, Appl. Opt., **28** (1989) 4739-4908; **31** (1992) 3876-4041; **33** (1994) 2767-2860; **37** (1998) 7471-7552.
- 55) N. Mukohzaka, N. Yoshida, H. Toyoda, Y. Kobayashi and T. Hara: Appl. Opt., **33** (1994) 2804-2811.
- 56) Holoeye: HOLOEYE Photonics AG & HOLOEYE Corporation, 2009.
- 57) E. Watanabe, Y. Ichikawa, R. Akiyama and K. Kodate: Jpn. J. Appl. Phys., **47** (2008) 5964-5967.
- 58) E. Frumker and Y. Silberberg: J. Opt. Soc. Am. B, **24** (2007) 2940-2947.
- 59) M. T. Gruneisen, W. A. Miller, R. C. Dymale and A. M. Sweiti: Appl. Opt., **47** (2008) A32-A42.
- 60) P. J. Marchand, A. V. Krishnamoorthy, K. S. Urquhart, P. Ambs, S. C. Esener and S. H. Lee: Appl. Opt., **32** (1993) 190-203.
- 61) F. H. Mok, G. W. Burr and D. Psaltis: Opt. Mem. Neural Networks, **3** (1994) 119-127.
- 62) J. Ashley, M.-P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, H. Guenther, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, B. Marcus, R. M. Macfarlane, R. M. Shelby, G. T. Sincerbox: IBM J. Res. Develop., **44** (2000) 341-368.
- 63) 堀米秀嘉: 光学, **32** (2003) 542-544.
- 64) D. Casasent and W.-T. Chang: Appl. Opt., **25** (1986) 2343-2350.
- 65) J. Campos, A. Márquez, M. J. Yzuel, J. A. Davis, D. M. Cottrell and I. Moreno: Appl. Opt., **39** (2000) 5964-5970.
- 66) B. Javidi: Appl. Opt., **28** (1989) 2358-2367.
- 67) B. Javidi: Opt. Eng., **29** (1990) 1013-1020.
- 68) F. T. S. Yu and S. Yin: *Selected Papers on Optical Pattern Recognition* (SPIE Press, Bellingham, 1999).
- 69) W. E. Cleland, D. E. Kraus and J. A. Thompson: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., **216** (1983) 405-414.
- 70) F. T. S. Yu, T. Lu, E. C. Tam, E. Nishihara and T. Nishikawa: Appl. Opt., **30** (1991) 915-916.
- 71) A. Pu, R. Denkwalter and D. Psaltis: Opt. Eng., **36** (1997) 2737-2746.
- 72) L. Guibert, G. Keryer, A. Servel, H. S. MacKenzie, P. Pellat-Finet, J.-L. M. de Bougrenet de la Tocnaye and M. Attia: Opt. Eng., **34** (1995) 135-143.
- 73) J. A. Sloan and D. W. Small: Opt. Eng., **32** (1993) 3307-3315.
- 74) S. Bains: Laser Focus World, **31** (1995) 17-18.
- 75) T. Ewing, S. Serati and K. Bauchert: Proc. SPIE, **5437** (2004) 123-133.
- 76) T.-H. Chao and T. Lu: Proc. SPIE, **7340** (2009) 734003.
- 77) T. Nomura, K. Itoh and Y. Ichioka: Appl. Opt., **29** (1990) 4345-4350.
- 78) K. Kodate, A. Hashimoto and R. Thapliya: Appl. Opt., **38** (1999) 3060-3067.
- 79) K. Matsuoka, T. Minomo, T. Yotsuya, I. Kasai, H. Onoda and A. Ueno: Proc. SPIE, **4902** (2002) 660-669.
- 80) 松岡克典ほか: "高速パターン識別光システムの研究開発", 大阪府地域結集型共同研究事業「テラ光情報基盤技術開発」研究成果報告書 (大阪府, 2002) pp. 43-87.
- 81) Y. Ichioka, T. Iwaki and K. Matsuoka: Proc. IEEE, **84** (1996) 694-719.
- 82) K. Itoh and Y. Ichioka: Appl. Opt., **29** (1990) 1625-1630.
- 83) 丹野直弘, 市村 勉, 佐伯昭雄: 日本特許第 2010042 号 (1996).
- 84) 久間和生, 中山 高編著: "光ニューラルネットワーク", ニューロコンピュータ工学 (工業調査会, 1992) pp. 127-158.
- 85) M. Taniguchi, K. Matsuoka and Y. Ichioka: Appl. Opt., **31** (1992) 3295-3301.

- 86) N. Tsumura, Y. Fujii, K. Itoh and Y. Ichioka: *Optik*, **98** (1994) 65-70.
- 87) K. Hirokawa, K. Itoh and Y. Ichioka: *Opt. Rev.*, **7** (2000) 284-293.
- 88) R. A. Athale: *Digital Optical Computing* (SPIE Press, Bellingham, 1990).
- 89) H. J. Caulfield and G. O. Gheen: *Selected Papers on Optical Computing* (SPIE Press, Bellingham, 1989).
- 90) B. S. Wherrett and P. Chavel: *Optical Computing* (Inst. Phys., Bristol, 1995).
- 91) D. H. Shaefer and J. P. Strong, III: *Proc. IEEE*, **65** (1977) 129-138.
- 92) J. Tanida and Y. Ichioka: *J. Opt. Soc. Am.*, **73** (1983) 800-809.
- 93) Y. Ichioka and J. Tanida: *Proc. IEEE*, **72** (1984) 787-801.
- 94) J. Tanida and Y. Ichioka: *Appl. Opt.*, **25** (1986) 1565-1570.
- 95) J. Tanida and Y. Ichioka: "Digital optical computing," *Progress in Optics Vol. XL*, ed. E. Wolf (North-Holland, 1999) pp. 79-114.
- 96) J. Tanida and Y. Ichioka: *Appl. Opt.*, **27** (1988) 2926-2930.
- 97) 谷田 純: *光学*, **31** (2002) 239-241.
- 98) P. S. Guilfoyle and R. V. Stone: *Proc. SPIE*, **1563** (1991) 214-222.
- 99) K. Iga, T. Kambayashi, K. Wakao, K. Moriki and C. Kitahara: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-26** (1979) 707-710.
- 100) D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood and C. A. Burrus: *Appl. Phys. Lett.*, **45** (1984) 13-15.
- 101) 宇都宮敏男ほか: 高速画像処理システム特集号, 電子通信学会論文誌 D, **J68-D**, No. 4 (1985).
- 102) S. Sugimoto and Y. Ichioka: *Proc. SPIE*, **435** (1983) 200-206.
- 103) 一岡芳樹: "画像処理", 光応用技術研修会テキスト応用科目 II-1, 日本オプトメカトロニクス協会 (2013).
- 104) 太田 淳: *光学*, **32** (2003) 416-423.
- 105) C. Mead: *Analog VLSI and Neural Systems* (Addison-Wesley, Reading, 1989).
- 106) 石川正俊: 電子情報通信学会論文誌, **J74-C-II** (1991) 255-266.
- 107) 石川正俊: *応用物理*, **81** (2012) 115-120.
- 108) K. Kagawa, T. Nishimura, T. Hirai, Y. Yamasaki, H. Asazu, T. Kawakami, J. Ohta, M. Nunoshita and K. Watanabe: *IECI Trans.*, **E86-B** (2003) 1498-1507.
- 109) J. Ohta, N. Yoshida, K. Kagawa and M. Nunoshita: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** (2002) 2322-2325.
- 110) 武内喜則・川合英雄・若林信一: *光学*, **32** (2003) 431-433.
- 111) 一岡芳樹: *生産と技術*, **64** (2012) 48-52.
- 112) 平成 22 年度光学機器における光デバイス設計と製造技術の先端動向に関する調査研究報告書 ((社)日本機械工業連合会, (財)光産業技術振興協会, 2011).
- 113) 歌川 健: *光学*, **42** (2013) 31.
- 114) 小山剛史: *光学*, **41** (2012) 184-185.
- 115) T. Konishi and Y. Ichioka: *J. Opt. Soc. Am. A*, **16** (1999) 1076-1088.
- 116) T. Konishi and Y. Ichioka: "Ultrafast temporal-spatial optical information processing, conversion, and transmission," *Optical Information Processing: A Tribute to Adolf Lohmann*, ed. H. J. Caulfield (SPIE Press, Washington, 2002) pp. 311-339.
- 117) T. Konishi, K. Takahashi, H. Matsui, T. Satoh and K. Itoh: *Opt. Exp.*, **19** (2011) 16106-16114.
- 118) J. W. Goodman: "Optics as an interconnect technology," *Optical Processing and Computing*, eds. H. H. Arsenault, T. Szoplik and B. Macukow (Academic Press, San Diego, 1989) pp. 1-32.
- 119) D. Miller: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6** (2000) 1312-1317.
- 120) A. W. Lohmann, W. Stork and G. Stucke: *Appl. Opt.*, **25** (1986) 1530-1531.
- 121) A. Louri and H. Sung: *Appl. Opt.*, **32** (1993) 7200-7209.
- 122) K. H. Brenner and T. M. Merklein: *Appl. Opt.*, **31** (1992) 2446-2451.
- 123) J. Shamir, H. J. Caulfield and R. B. Johnson: *Appl. Opt.*, **28** (1989) 311-324.
- 124) I. Young, E. Mohammed, J. Liao, A. Kern, S. Palermo, B. Block, M. Reshotko and P. Chang: *IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC '09)* (San Francisco, 2009) pp. 468-469.
- 125) D. A. B. Miller: *Proc. IEEE*, **97** (2009) 1166-1185.
- 126) 早崎芳夫: *光学*, **32** (2003) 410-415.
- 127) 香川景一郎: *光学*, **39** (2010) 188-189.
- 128) NVIDIA 社カタログ, <http://www.nvidia.co.jp/object/what-is-gpu-computing-jp.html>
- 129) 高橋 毅: *光学*, **40** (2011) 185-186.
- 130) 五十嵐健夫ほか: 特集"デジタルファブ리케이션", 情報処理, **54**, No. 2 (2013).
- 131) E. R. Dowski and W. T. Cathey: *Appl. Opt.*, **34** (1995) 1859-1866.
- 132) P. E. X. シルベイラ・立原 悟・K. S. クバラ・E. R. ダウスキー: *光学*, **37** (2008) 340-346.
- 133) J. Tanida, T. Kumagai, K. Yamada, S. Miyatake, K. Ishida, T. Morimoto, N. Kondou, D. Miyazaki and Y. Ichioka: *Appl. Opt.*, **40** (2001) 1806-1812.
- 134) R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz and P. Hanrahan: *Stanford University Computer Science Tech Report CSTR 2005-02* (April 2005).
- 135) R. Horisaki and J. Tanida: *Opt. Exp.*, **18** (2010) 23041-23053.
- 136) 山田憲嗣: *光学*, **40** (2011) 534-538.
- 137) M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov and L. P. Yaroslavskii: *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **17** (1972) 333-334.
- 138) U. Schnars and W. Jueptner: *Appl. Opt.*, **33** (1994) 179-181.
- 139) I. Yamaguchi and T. Zhang: *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1268-1270.
- 140) U. Schnars and W. Jueptner: *Digital Holography* (Springer, Berlin, 2005).
- 141) 野村孝徳: *光学*, **40** (2011) 539-543.
- 142) J. Kühn, F. Montfort, T. Colomb, B. Rappaz, C. Moratal, N. Pavillon, P. Marquet and C. Depeursinge: *Opt. Lett.*, **34** (2009) 653-655.
- 143) 宮崎大介: *光学*, **32** (2003) 424-430.
- 144) 下馬場朋禄: *光学*, **40** (2011) 175-178.
- 145) 宮崎大介, 早崎芳夫: *光学*, **40** (2011) 169-171.
- 146) 仁田功一: *光学*, **41** (2012) 222-223.
- 147) 堅 直也: *光学*, **42** (2013) 188-190.
- 148) B. Javidi: *Optical and Digital Techniques for Information Security* (Springer, New York, 2005).
- 149) O. Matoba, T. Nomura, E. Perez-Cabre, M. S. Millan and B. Javidi: *Proc. IEEE*, **97** (2009) 1128-1148.
- 150) R. Shougenji and J. Ohtsubo: *Opt. Rev.*, **16** (2009) 517-520.
- 151) G. Moore: *Electronics*, **38** (1965) 114-117.
- 152) 松山知行: *光学*, **41** (2012) 186-187.
- 153) 川合敏雄: *日経サイエンス*, **23**, No. 8 (1993) 22-26.
- 154) 谷田 純: *光学*, **42** (2012) 163.
- 155) 小倉裕介: 第 1 回情報フォトンクスシンポジウム予稿集 (2013) pp. 11-12.
- 156) 堅 直也ほか: 第 1 回情報フォトンクスシンポジウム予稿集 (2013) pp. 13-14.
- 157) E. N. Economou: *Phys. Rev.*, **182** (1969) 538-554.

(2013 年 8 月 8 日受理)