

解説

3. 光情報処理システム



3.1 光情報処理システムの現状と将来動向†

三橋 慶喜††

1. はじめに

光情報処理システムとは、光学系の並列的、すなわち超高速画像処理機能を活かした、あるいは拡大して、画像はもとより、デジタルな信号を光学的に処理するものと定義できる。ここでは、歴史的、技術的背景と、発展の経緯をホログラフィ情報処理装置の開発例を引用して説明する。次いで、昨夏、札幌で開催された国際会議 ICO-13 での研究発表を中心に現状を述べる。特に実時間画像処理については、実例を紹介する。最後に、光コンピュータを実現するための課題を考察する。

2. 日本における発展経緯

図-1 は、「光情報技術」* の発展経過を示している

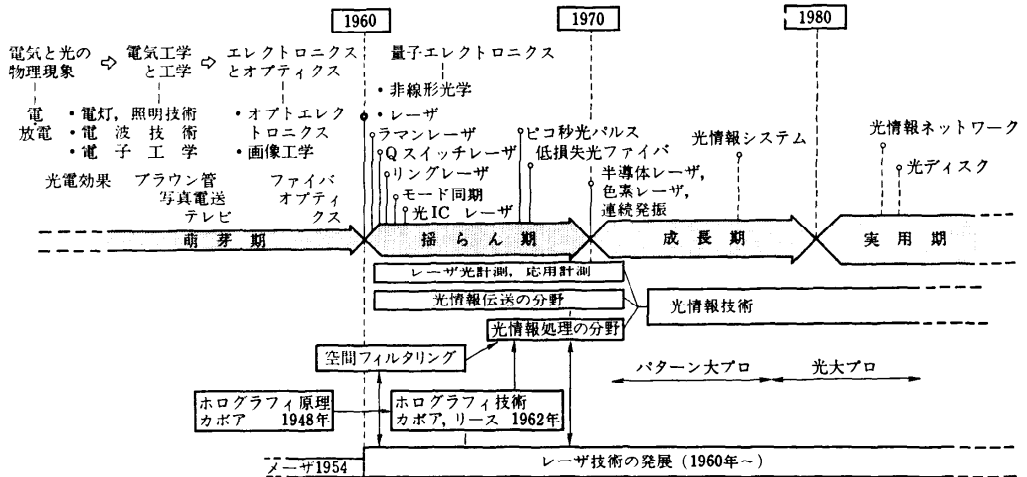


図-1 光情報技術の発展経過

† Optical Information Processing System, Past, Present and Future by Yoshinobu MITSUHASHI (Optoelectronics Section, Electro-technical Laboratory).

†† 電子技術総合研究所オプトエレクトロニクス研究室

* 「光情報技術」という言葉、およびレーザーを科学的興味からではなく、工学的応用を見込んで、レーザー誕生直後から「レーザー技術」という言葉を、いち早く用いたのは、借しくも昨春ご逝去された元、電子技術総合研究所電波電子部長、桜井健二郎氏である。

表-1 国内の主なホログラフィ情報処理装置の開発例

開発機関	システムの種類		主要仕様	開発年代	備考
	アナログ	デジタル			
電子技術総合研究所	光文字読み取り装置 (OCR) 情報検索装置		写真乾板 写真フィルム	1970初	研究用 研究用
電気通信研究所		光メモリ 情報検索装置	10 ⁷ ビット	1970初	研究用 研究用
日立製作所		光情報検索システム	10 ⁸ ビット, ホログラムディスク	1970中	パターン大プロ 研究用
		画像情報検索装置	ビデオディスク	1970中	
富士通	POS スキャナ	光メモリ	2.5×10 ⁷ ビット	1970初 1980	研究試作 実用化
日本電気	ホログラムタブレット, エンコーダ, 音声応答 POS スキャナ			1970 1980	研究試作 実用化
東芝	光大容量ファイル		21万画像, ホログラムシート	1970中	パターン大プロ
東レ		漢字メモリ	7,000字	1970中	一時期商品化
松下電器		漢字メモリ	16,000字	1970後	一時期商品化

周辺素子や技術が未成熟であり、また、可逆感光材料がなく写真銀塩材料を用いた光メモリは ROM (リードオンリーメモリ) とならざるを得ず、致命的なことは、複製の作成が困難なことであった。パターン大プロ (パターン情報処理システムの研究開発、通産省の大型プロジェクト、半導体レーザ、可逆感光材料など光部品、光システムの研究開発が行われ光情報技術進展の大きな力となった) の一環として研究試作が行われた、光大容量ファイルの性能 (容量 21 万コマ、アクセス速度 0.5 秒、分解能 1000×1000 画素) は、当時としては画期的なものであったが、社会的な需要が今ほどなかった、すなわち時代に先行しすぎたという不運や情報検索のためのソフトが未熟であることに泣かされた。

ホログラム漢字メモリは、一時期商用化され販売されたが、エレクトロニクスの発展、すなわち IC メモリの低価格化が急激に進んで打負かされた。

しかし、光情報技術は、光通信の実用化、光ディスクの実用化と花開き、「光産業」として着実に発展を見せるに至った。こうしたなかで、光情報処理システムも、将来の光コンピュータへの夢とともに、見直される時期にきたようだ。

昨夏、札幌で内外から約 700 名の研究者を集めて開催された、The 13th Congress of the International Commission for Optics (ICO-13 と略) では、Optical Computing がそのハイライトであった²⁾。筆者の分類

表-2 光情報処理の研究分野

画 像		信 号	
光	線形処理	非線形処理	
	アナログ	デジタル	
学 系	位相共役 画像増幅		双安定素子
	空間光変調素子		
	光導波路素子		
	材料・デバイス・その他		
	ハイブリッドシステム		
エレクトロニクス			

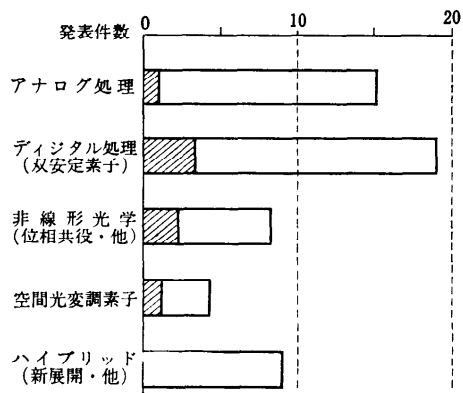


図-2 ICO-13 (札幌) における研究発表件数。斜線部は日本からのものを示す。

では、表-2、図-2 に示すものが、これらに関する。Optical Computing とは Optical Information Processing の別名と考えられ、必ずしも、汎用光コンピュータを指すものではない。図-2 に示すように、日本からの研究発表が少ないのが気がかりである。多くは米国から、そして特筆すべきことは、中国から10件にのぼる発表があったことである。

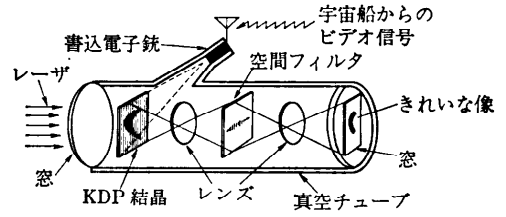
光情報処理システムとして、これまでに実用化された、あるいは実用化されつつあるものほとんどは専用装置としての応用である。たとえば、単純なフーリエ変換のみを用いた製品検査³⁾、空間フィルタを併用する IC ホトマスクの検査⁴⁾、工業製品の欠陥検査⁵⁾、などである。電気信号を光学系で処理する実用例としては、レーダ信号の解析を行うスペクトラム・アナライザがある。これは、音響光学変調器に電気信号を加え、その周波数の超音波による光回折を用いて周波数解析を行うものである。研究試作では超小形の光導波路素子において、バンド幅 1GHz という高性能なものが得られている (本特集 2.2 参照)。

そのほか、各種の光情報処理システムは、本特集に述べられているので詳細は省略する。

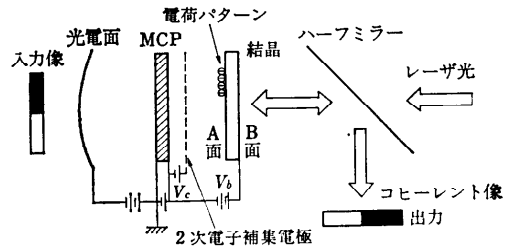
3. 実時間画像処理

コヒーレントなレーザ光とレンズ系による、画像の並列的超高速フーリエ変換が光情報処理システムの最大の武器である。しかし、一般に、光学系への画像入力は写真フィルムを用いた透明画 (transparency) としてのみ与えられる。フーリエ変換そのものは、レンズ系で光が進む時間、約 1 ns (10^{-9} 秒) の瞬時に行われる。画像として 1000×1000 画素、濃淡レベル 8ビットを考えると、単純計算で単位時間内の情報処理速度は 8×10^{15} ビット/秒という膨大な値となる。そして、ホログラフィ技術により可能になった複素空間フィルタ (振幅と位相の両方の情報を記録し、再生、あるいは制御できる) と組み合わせることにより、マッチドフィルタリングなど、パターン認識にうってつけの機能を利用できる。

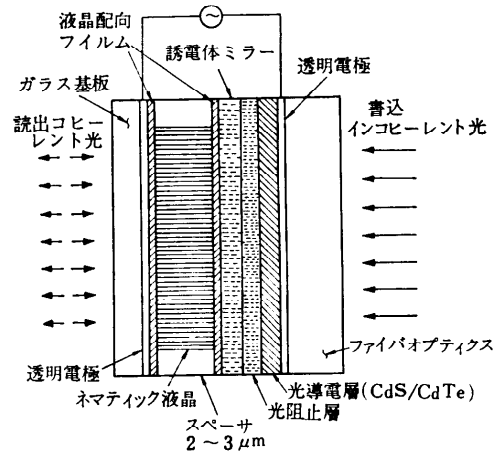
しかし、最大の欠点は、画像入力を実時間で行うことが難しいことであった。そのため、実時間画像入力装置が当初から各種提案され、開発が行われてきた。図-3 に示すものが、その代表例である。図-3(a) はイリノイ大学の Poppelbaum 教授と、現在、カーネギー・メロン大学の Casasent 教授らが 1968 年に開発したものである⁶⁾。人工衛星搭載用画像処理装置と



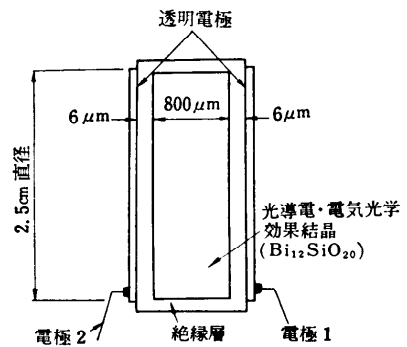
(a) Poppelbaum's tube



(b) MSLM



(c) LCLV



(d) PROM

図-3 主な空間光変調素子の構造

して考案されたもので、ビデオ信号として与えられる画像の雑音や走査線を消去して、きれいな像を得ることに成功している。この装置の原理は、電気光学効果結晶（この場合は KDP）に、電子銃を用いて、画像情報としての電荷パターンを与えると、この電荷パターンにより KDP 結晶の屈折率が変化し、光に対して、位相画像パターンとして機能することにある。この位相画像パターンはコヒーレントなレーザ光で読み出され、雑音と走査線の除去はフーリエ変換を用いた空間フィルタにより行い、最終的には、光強度画像として与えられる。図-3(b)~(d)は、図-3(a)と異なり、電気信号ではなく、普通の光学的画像、すなわち太陽光下での風景とか、蛍光灯などで照明された文書など、インコヒーレント光で与えられる画像を、写真フィルムを用いずに、コヒーレントな光学系への画像入力として与えることを目的としたものである。インコヒーレント・コヒーレント変換素子、あるいは、空間光変調素子と呼ばれる⁷⁾。写真フィルムのように現像処理を必要とせず、実時間 (real time) で画像入力が行え、しかも、消去再使用が繰り返せる。表-3 に、1970年代初期に開発が始り、1980年代初期に、製品化された LCLV (Liquid Crystal Light Valve: 液晶を用いた光バルブ) と、PROM (Pockel Read-out Optical Modulator: 電気光学効果と光導電効果とを合わせ持つ結晶、ピスマス・シリコン・オキサイド $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 、を用いた偏光読出し光変調器)、ならびに最近

開発が行われた MSLM (Multichannel Spatial Light Modulator: マルチチャンネルプレートと呼ばれる光電子増倍管の役割を果す中空光ファイバ束と電気光学効果結晶、リチウムニオベート LiNbO_3 、を用いた空間光変調素子)とを示す。図-3(b), (d)に示す素子は米国で市販された。しかし非常に高価であり、光情報処理システムの研究や実用化を加速する助けにはなっていない。日本では、PROM の開発が1970年代後半より、住友電工で行われ⁸⁾、現在では、ビンックスとも略称される $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 結晶は、世界最大、最高品質のものが得られている。しかし、PROM としての応用は、研究用に大学などで検討が行われている段階にすぎない。ビンックスは光学的に興味深い優れた結晶であり、たとえば、電界(電圧)、磁界(電流)測定用光ファイバセンサに組み込まれ実用化されている。また、可逆感光材料としてホログラフィに、さらに、光導電材料としても利用されている。

MSLM は当初、MIT で考案されたが、浜松ホトニクスで改良と高性能化が行われている⁹⁾。真空管内での電子ビームを介在させているため、磁界などの補助的制御機構を用いると、入力画像の拡大、縮小、回転、位置の偏向などが可能である点が、ほかのインコヒーレント・コヒーレント変換素子にない、大きな特長である。動作原理は、図-3(a)と同じで、電子ビームによる電荷パターンを電気光学効果結晶上に与え、これを位相画像として読み出すものである。電子ビームを電子銃から供給する代りに、光電面に照射された光入力画像による光電子を2次元のマルチチャンネルプレート (MCP) で約百万倍増幅し、電荷パターンとするものである。したがって、感度は非常に高い。画像の消去には、結晶上の電荷をショートさせて取り去れば良い。書込・読出・消去のサイクルタイムは TV フレーム (毎秒 30 コマ) 並み为目标とされるが、現在これに近い値が得られている。

図-4(a)に MSLM の外観を、同(b), (c)に処理画像の例を、それぞれ示す。MSLM の実用化のためには、分解能を少なくとも 30 lp/mm 以上とすることが必要と思われる。また、エレクトロニクス技術を併用したハイブリッドシステムを想定して、図-3(a)に示すように、電子ビーム書込形を再検討することが望まれる。

光情報処理システムを発展させるためには、エレクトロニクスの分野にはあつて、光学系にはない、各種の非線形素子 (たとえば濃淡画像を二値化したり、あ

表-3 主な空間光変調素子の仕様

	LCLV	PROM	MSLM
開発機関	ヒューズ社	アイテック社 住友電工	MIT 浜松ホトニクス
開口	25×25 mm	18, 25, 38 mmφ	20 mmφ
分解能	50 lp/mm	100 lp/mm	15 lp/mm
コントラスト	100 : 1	100 : 1	
感度	5 μJ/cm ²	W: 5 μJ/cm ² R: 1 mJ/cm ²	W: 0.002 lx/s
繰返し速度		30~200 フレーム/秒	W: 0.02 s, R: 0.05 s
表面精度		λ/10	
機能		NP	NP, 回転, 拡大など
電圧	6V	>kV	>kV
価格	22,500ドル	13,000~ 22,000ドル	

注) { LCLV: Liquid Crystal Light Valve
PROM: Pockel Read-out Optical Modulator
MSLM: Multichannel Spatial Light Modulator
W: Write, R: Read, NP: ネガ↔ポジ反転

るいはレベルスライシングするもの、あるいは強度の弱くなった画像を増幅するもの)を開発することが必要である。こうした方針に従って電総研では、いくつかの素子の研究試作を行ったが^{10),11)}、実用化に至るものは、まだない。今後とも、こうした方向の研究開発を進めるべきである。図-5は、先に述べた結晶ピソックスを用いた、実時間画像増幅の実験構成と得られた画像とを示す¹²⁾。トムソン・CSF社(仏)のHuignardらが長年、研究を続けているものである。光源にはアルゴンイオンレーザ(波長514nm)を用いている。結晶には電界10kV/cmを加え、 piezo圧電素子にとりつけた鏡を振動させて、参照光を照射し結晶には干渉縞間隔 $3\mu\text{m}$ の干渉縞をドリフト・記録モードで与える。入力光画像はスピーカの粗面で反射散乱した光($I_s=5\mu\text{W}/\text{cm}^2$)である。参照光($I_R=10\text{mW}/\text{cm}^2$)を加えると、入力光画像が10倍増幅される。図-5(b)は、スピーカに加えた電気信号周波数に応じて、スピーカの振動膜が特有のモードパターンを形成することを明らかにしている。

筆者は、昨秋、Huignardの実験室を見学したが参照光が加えられた瞬間に、画像が目の前に急に飛出てくるのを目撃して感激した。使用している結晶が住友電工製ときいて複雑な思いを新たにした。

4. 将来動向

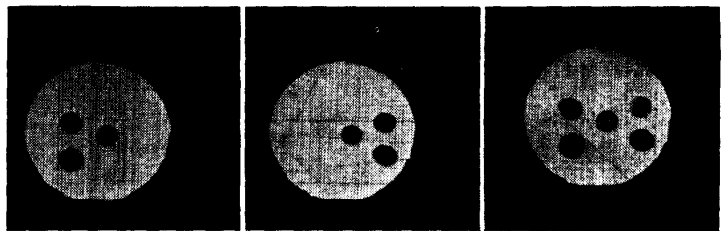
光情報処理システムの研究課題として興味深いのは非線形処理である。これには、3.ですでに述べたように、二値化、レベルスライシング、画像増幅という課題があり、さらに位相共役¹³⁾、光双安定性(本特集2.3参照)などが含まれる。これらの研究には、光源としてこれまで大形で大出力のイオンレーザが良く用いられてきた。今後は半導体レーザを光源として動作



(a) 装置外観



(b) ネガ→ポジ反転



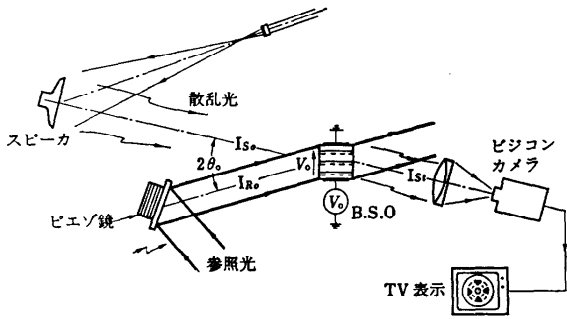
(c) 画像演算(AND)

図-4 MSLMの外観と出力画像の例(写真提供 浜松ホトニクス(株))

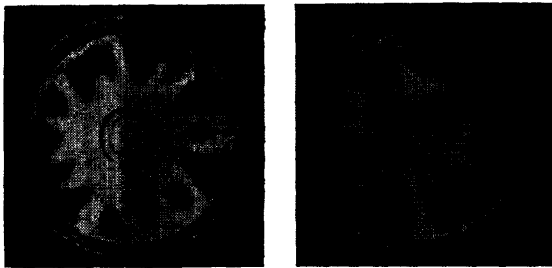
する、材料や素子の研究開発が不可欠である。

半導体レーザを光源とする光情報処理装置の設計例を図-6に示す¹⁴⁾。人工衛星搭載を想定したものである。図-7は半導体レーザを光源として用いたパターン認識の予備実験結果を示す¹⁴⁾。マッチドフィルタを用いた移動物体(この場合は乗用車)の検出に成功している。ホログラフィ育ての親と言っても良い、米国ミシガン大学のUpatnieks(ミシガン大学でLeith教授と一緒に研究を進めている)のグループが日本製の半導体レーザを用いて行った研究である。

こうしたパターン認識は光情報処理システムの応用の大きな目標であるが、光学系は2次元画像の超高速



(a) 実験構成



(b) モードパターンの可視化
 図-5 コヒーレント画像増幅の実験構成と画像

などの前処理を行った後、コヒーレント光学系でフーリエ変換し、多層で選択的地址が可能な空間フィルタを用いて、マッチドフィルタリングを行う。自己相関像と相互相関像とのわずかな光強度の差は、2次元的なレベルスライサを用いてSN比を高め、ホットダイオードアレイで検出する。

並列的フーリエ変換の超高速性を活かし、アナログ処理に起因する演算精度の低さを、デジタル処理機能を導入して高めようというものである。これらの方向は、現在もそして将来も不変の課題として残っていく。

ICO-13の開会冒頭の特別講演で米国スタンフォード大学のGoodman教授が“Optical interconnection: a possible future for optics in computing”と題して、光ファイバや空間伝播によるレーザービームを用いて、エレクトロニクスによるシリコンLSI内部あるいは複数のLSI間の光配線の役割りを示唆した¹⁶⁾。これは、OEIC(本特集2.2参照)の概念に類似するものであり、大きな発展性と課題とを示している。

光学系で利用できる演算は、フーリエ変換が主体であるが、画像をTVカメラで取り組み、エレクトロニクス回路の演算を補助的に利用すると、メラン変換¹⁷⁾、などはかの多くの興味ある演算が可能となる。ICO-13でも、光学系とTVカメラシステムとを組み合わせ合わせたハイブリッドシステムの研究発表は4件あった。ハイブリッドシステムは実用的観点から、もっと注目すべき技術であると思われる。

光情報処理システムが将来の光コンピュータへと発展するためには、並列処理機能の超高速性を活かし、デジタル演算による高精度を保ち、多数のユニ

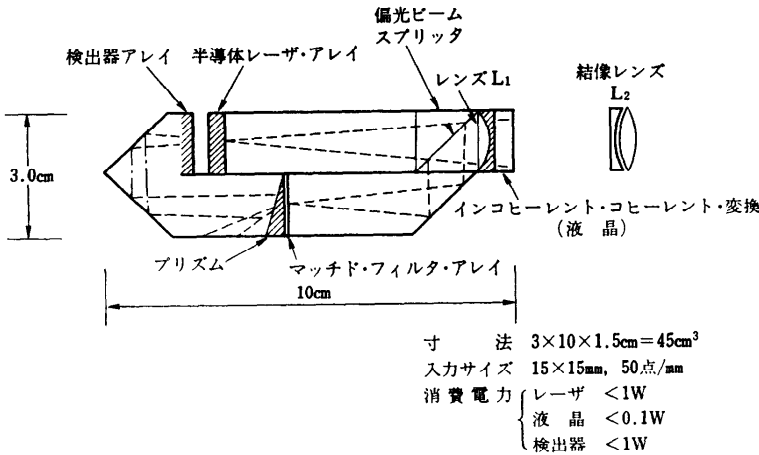


図-6 半導体レーザーを用いた超小形相関器

フーリエ変換ができる非常に大きな長所を持っているが、エレクトロニクス技術に見られる柔軟性、汎用性の少ないことが短所である。今後の望ましい光情報処理システム概念図を、図-8で示す。すなわち、パターン認識を行うには、パターンの拡大、縮小、回転

必要がある。そのためには、表-2に示すような、基本的技術、材料やデバイス、システムの開発、さらには、光学系に適した演算方式の検討などを、粘り強く進める必要がある。欧米では、20年以上も研究を続け

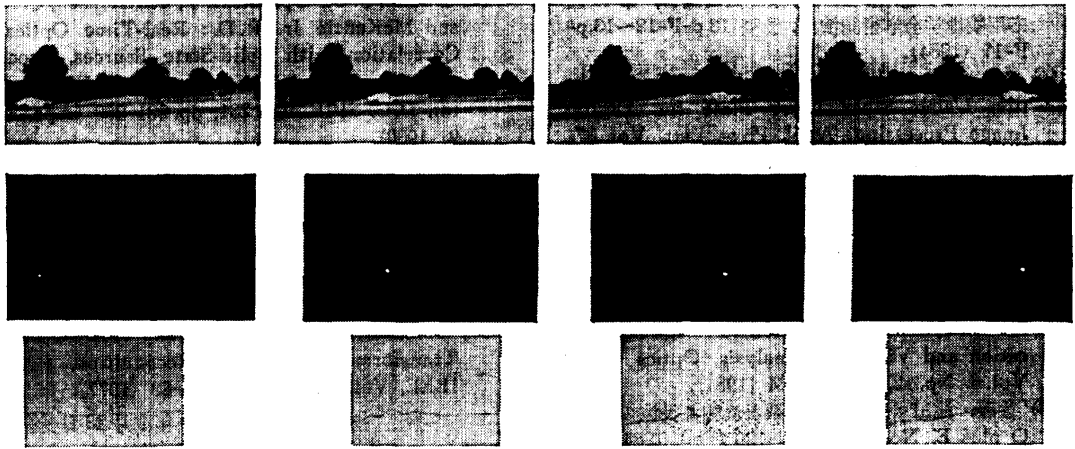


図-7 マッチドフィルタを用いた移動物体(車)の検出

ている多くのグループがあり、我が国での、より積極的な取り組みと息の長い研究開発が望まれる。

5. むすび

光情報処理システムの発展経緯と座折の理由、研究開発の現状、主要研究課題であるインコヒーレント・コヒーレント変換素子の原理と最近の実験例、光画像の実時間増幅の例を述べた。今後の研究課題の多くは以前から繰り返し指摘されたものである。光ファイバや半導体

レーザの急速な進歩や、光導波路素子の研究進展を背景として、今一度、これらの課題に挑戦すること、さらには新たな発想を種々試みることが必要である。光情報処理システムでは、画像はもちろん、電気信号も取り扱い、処理方式、装置も多様である。こうした、多様性と各種デバイスの相互の優劣がまだ決着のつかない状況と、混沌とした中でも将来の大きな可能性を秘めていることをご理解いただければ幸いである。

参考文献

1) 桜井健二郎：光情報処理，日経エレクトロニクス，No. 64. pp. 44-60 (Jan. 1, 1973).：光情報技術の展望，計測と制御，第13巻1号，pp. 2-9 (1974).

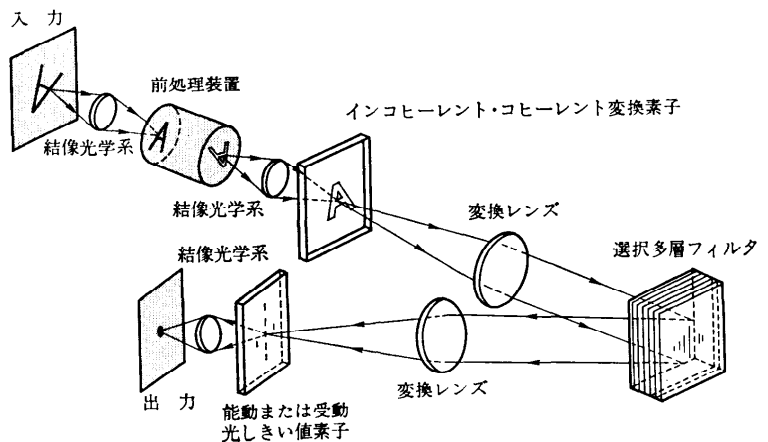


図-8 期待される光情報処理システムの概念

2) Conference Digest of The 13th Congress of the International Commission for Optics, Sapporo, Japan (Aug. 20-24, 1984).
 3) Recognition Systems 社カタログ.
 4) 南 正名：二色法 IC マスク欠陥検査装置，応用物理，第46巻，No. 2, pp. 191-195 (1977).
 5) 三橋，武笠：空間周波数フィルタリングによるパターン欠陥検査，電総研彙報，第43巻，7/8号 pp. 484-498 (1979).
 6) Poppelbaum, W. J., Faiman, M., Casasent, D. and Sand, D. S.: On-Line Fourier Transform of Video Images, Proc. IEEE Vol. 56, pp. 1744-1746 (1968).
 7) Casasent, D.: Spatial Light Modulator, Proc. IEEE, Vol. 65, No. 1, pp. 143-157 (1977).
 8) 多田，工原，竜見，難波，山口：住友電気，117号 pp. 138-156 (1980).

- 9) 原, 加藤, 杉山, 鈴木: 空間光変調管, 第45回応用物理学学会学術講演会, 予稿 13 p-F-12~13 p-F-17 (1984).
- 10) Seko, A.: All-Optical Parallel Logic Operation Using Fiber Laser Plate for Digital Image Processing, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 37, No. 3, pp. 260-262 (1980).
- 11) Mitsuhashi, Y.: Saturable Fabry-Perot Filter for Nonlinear Optical Image Processing, *Optics Lett.* Vol. 6, No. 3, pp. 111-113 (1981).
- 12) Huignard, J.P. and Marrakchi, A.: Two-Wave Mixing and Energy Transfer in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ Crystals: Application to Image Amplification and Vibration Analysis, *Optics Lett.*, Vol. 6, No. 12, pp. 622-624 (1981).
- 13) 佐藤, 池田: 適応的光学系と位相共役波の利用, *O plus E*, No. 51, pp. 114-120 (Feb. 1984).
- 14) Duthie, J.G., Upatnieks, J., Christensen, C.R. and McKenzie Jr., R.D.: Real-Time Optical Correlation with Solid-State Sources, *Proc. 1980 Int. Optical Computing Conf. Washington D.C. SPIE Vol. 231*, pp. 281-290 (Apr. 8-9, 1980).
- 15) 三橋慶喜: 光情報処理, レーザーハンドブック, オーム社, 第32章, pp. 643-652 (1982): 光情報処理技術, 数理科学, pp. 5-9 (May 1983).
- 16) 伊藤, 石原: マイクロエレクトロニクスにおける光配線, 光学, 第14巻, 第1号, pp. 51-53 (1985).
- 17) Casasent, D. and Psaltis, D.: New Optical Transforms for Pattern Recognition, *Proc. IEEE*, Vol. 65, No. 1, pp. 77-83 (1977).

(昭和60年3月28日受付)