

情報光学ラボ

(Information Optics Lab.)

研究項目：高並列大容量演算システムの評価

研究期間：平成4年度～13年度

1. 背景

光技術と情報処理技術の重なり合う領域、特に情報処理技術の高度化に用いる光学、光技術が情報光学である。情報光学ラボでは光の並列情報伝送性を生かした情報処理技術、および光情報処理技術を応用した超短光パルスの制御技術の開発を行っている。

人間は「認識」や「学習」などの柔軟で適応力の高い情報処理を何気なく実行している。これらの情報処理は、今後さまざまな状況の中で各種機器、情報処理システムが利用されていく際には必須の機能である。しかし、これまではこれらの情報処理を工学的に実現することは困難であった。その実現のためには、実世界から得られる膨大な情報を高速に処理し、実世界との高度なインターアクションを可能にする技術が必要である。情報光学ラボでは、そのために情報媒体としての光の特徴である大容量情報伝送性、高並列性を生かした光情報処理システム、アーキテクチャおよびデバイスの研究を行ってきた。なかでも近年は光技術と親和性の高いニューラルネットワークの開発を進めてきた。

一方、従来から研究されてきた光情報処理の代表がフーリエ変換である。その空間領域でのフーリエ変換は、コヒーレント光を用いてレンズ一枚で実現することができる。この技術はフィルタリングやウェーブレット変換として画像処理などに用いられている。一方、時間領域でのフーリエ変換は周波数展開であり、光ではグレーティングやプリズムなどを用いて実現する。情報光学ラボではこれら二つの技術を結合した時空間融合光制御技術による高速光パルス制御を研究しており、高速現象の空間的測定、光情報処理技術への発展を目指している。

2. 研究経過

ニューラルネットワークを用いたシステムの最大

の特長は自己組織化、学習能力にある。学習機能を持つ光ニューラルネットワークでは、認識対象の特徴抽出に最適なフィルタを自動的に作成することができ、また入力画像の変型に強いシステムを構築することができる。さらに、個別のシステム設置環境による変化に対しても強い適応性を持つ。その上、システムやデバイスが持つ不均一性や個別の欠陥等の影響も学習により排除することができ、より実用性の高いシステムといえる。

光ニューラルネットワークシステムの最も重要な素子はシナプスの結合荷重を記憶し、学習によって変化させる空間光変調器である。我々はこれまで、大規模かつ高速な光ニューラルネットワークの実現にむけて、Pockels Readout Optical Modulator (PROM) をキーデバイスとする2次元構造光学型ニューラルネットワークを提案し、この光学システムを用いた学習実験を行ってきた¹⁾。PROMは、入力光強度に従い、読み出し光の強度を変調する光書き込み型の空間光変調器であり、高解像度での並列加算、減算、およびメモリ機能がある。このPROMをシステムの結合荷重デバイスに用い、また青色LEDアレイ(B-LA)、光検出器アレイ(PDA)と組み合わせたシステムを構築することにより、高速動作を可能とした²⁾。実験システム上で実現したネットワークは3層構造である。中間層ニューロンは8個であり、入力-中間層ニューロンのネットワークは光学システムで、中間-出力層ニューロンのネットワークはコンピュータ内で計算した。出力ニューロン数は学習する顔画像の数に合わせ3とした。大規模な並列演算が必要な一層目を光学的に実現し、ネットワークの小さい二層目を制御性の良い計算機上のシミュレーションを用いることにより、トータルの性能を上げることが出来る。教師信号は、それぞれの認識画像あたり1個の"1"ニューロンを持つパターンである。3個の出力ニューロンにより、画像認識結果を表す。この時、光学システムの接続総数はPROMの分

解能によって制限され、約50000である。学習アルゴリズムには、バックプロパゲーション学習を採用した。学習は、結合荷重が何もPROMに書かれていない状態からスタートする。このとき、実際の結合荷重の初期値はシステムのデバイスや光学系の不均一により、微小でランダムな値を持つ。1回の学習サイクルは、それぞれの3つの画像を連続して学習することによって完了する。約46秒、150回の繰り返し学習により、3人の顔画像を認識することができるネットワークを構成することができた。学習1サイクルあたりの動作時間は約96ミリ秒であり、総コネクション数から学習速度として0.5MCUPSの性能が確認された。システムの動作のうち、ボトルネックとなっているのは液晶デバイスに顔の多重像を表示する部分であり、入力画像を切り替えない特殊な学習状況においては約8MCUPSが実現される。

通常の表示用液晶デバイスを用いたシステムでは

画像表示がビデオレートで制限され、光ニューラルネットワークの画像認識システムにおいても十分な速度を得ることが困難である。その解決のために我々はシリコン電子回路上に液晶変調素子を一体化した光電子集積デバイスを提案し、試作および基礎特性の測定を行っている。デバイスは、シリコンDRAM構造における各セルのメモリ内容をそのまま電圧として取り出せる電極を取り付けた電子回路がベースであり、この電極上の液晶により光を変調する。電極の形状、面積を工夫することにより、通常の電子計算機におけるDRAMへの入力と同じ2値のデジタル入力により、面積比に対応した擬似的なアナログ値を得ることができる(Fig.1)。このデバイスではデジタル/アナログ変換を、電子回路ではなく電極の面積比を用いて行い、2値デジタル信号を光アナログ強度に変調することができる。電極面積、液晶駆動回路を考慮したシリコン電子回路のレイアウトをFig.2に示す。製作した

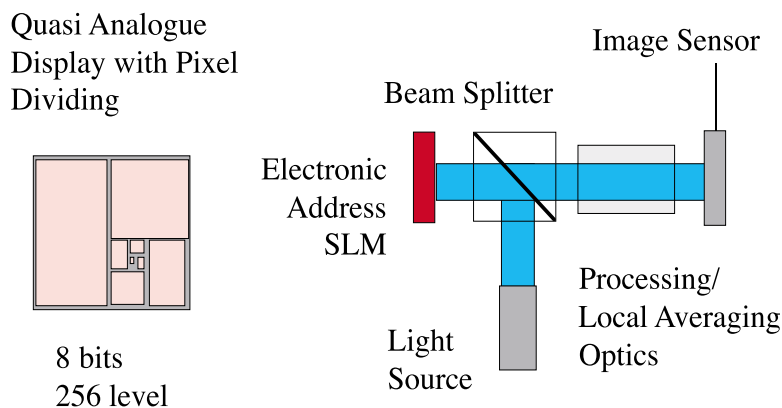


Fig.1 Schematic diagram of the high-speed image display with a Si-DRAM base liquid crystal spatial light modulator.

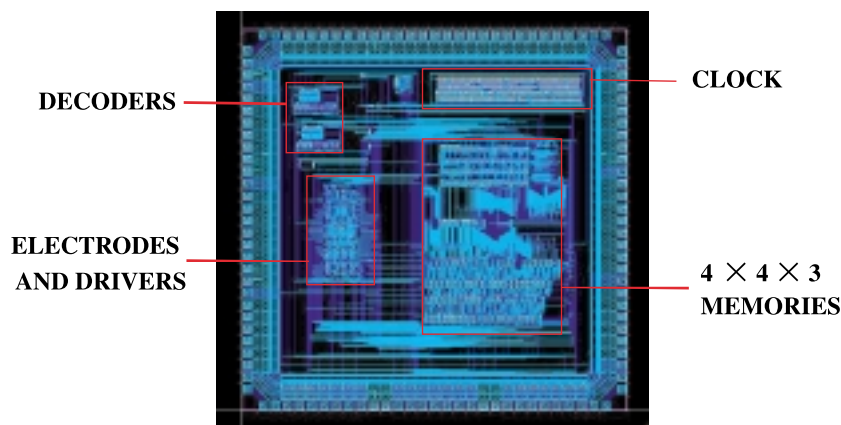


Fig.2 The layout of the Si circuit for the high-speed image display.

シリコン電子回路及び電圧印加電極にラビング膜を形成し、ラビング、液晶封入を行い、現在までに並列読み出しの基礎動作を確認した。

画像処理とパターン認識の分野への光ニューラルネットワークの応用では、画像の並列入力、並列処理、並列出力などを直接的に扱えるため、生物の脳における視覚情報と類似性の点から、国内外とも高い関心を集めている。情報光学ラボではファジー制御を導入し画像認識において高速学習を可能とした³⁾。階層型ニューラルネットワークは、パターン認識、画像信号処理などの分野で盛んに応用され、その有効性が示されてきた。実用的な画像認識システム実現のために解決しなければならない基本的な問題として、画像の幾何学的な変換に対して、汎化能力の高い認識を行うことの必要性が指摘されている。しかしながら、従来のニューロンモデルは重み付き線形加算にSigmoid関数を付加しただけであるので、各シナプスに埋め込むことのできるパラメータの数は1個に限られる。したがって、システム全体として複雑な柔軟性を持たせてパターンを認識できるようにすると、何層も何個ものニューロンが必要となる。このような膨大なネットワークは、設計性が悪く、学習にも時間がかかる。また、ネットワークの汎化能力とニューロン数の依存関係は飽和性が存在することも既に示されている。我々は、多層ニューラルネットワークの一部のニューロンに二次元ガウシアン分布関数で記述されたシナプス結合荷重を持たせることにより、画像認識におけるニューラルネットワークの汎化能力を向上する方法について提案している。また、この方法により、幾何学的な変換の二次元パターンを認識できることを示した⁴⁾。一方、画像パターンをニューラルネットに学習させる場合、一つのカテゴリに属する標準的なパターンを提示するだけで、それ以外の種々のパターンも認識できるので便利である。しかし、このような柔軟性を持たせることを考えると、学習用データの作成量や、ニューラルネットの学習負荷が大幅に増大することになる。一方、生体の視覚系では情報が網膜から脳に伝わる間にかなり柔軟に処理されることがわかっている。例えば、人間は、写真を一瞥しただけで、その後、写真の位置ずれ、拡大縮小、回転などの変形をさせても、多数枚の写真の中から同じ写真を見つけ出すことができる。このような生体視覚系の優れた機能と構

造を学び、人工ニューラルネットに活用すれば、より高機能なパターン認識システムを実現することが可能になる。我々は、生体の視覚系でパターン認識するときに行われている空間複素-対数マッピングを人工ニューラルネットワークに応用し、フーリエ変換あるいはガウシアンシナプスニューロンモデルとの組合せにより、入力画像を回転、大きさ、位置ずれに対して不変なパターンに変換し、これをニューラルネットへの入力として、学習・認識を行う。この方法により、幾何学的に変形した二次元パターンが認識できることを示した。また、この処理についての光学システムを提案した⁵⁾。

情報光学の新しい展開として時空間融合情報処理技術が注目されている。その中で我々は超高速物理現象の空間的測定等に用いることができる光パルスの3次元形状制御技術、測定技術を開発することを目標とした研究を進めている。これまでのサブピコ秒光パルスの波形制御は単に時間軸1次元のみの制御であった。これに対し我々は、空間軸も考慮したサブピコ秒光パルスの制御を追求し、2次元空間上の各点における光パルスの時間軸制御を検討してきた。この3次元空間で制御された光パルスを我々はフォトンウォールと呼んでいる。これまでに計算機シミュレーションおよび、基礎実験により、空間2次元、時間1次元のサブピコ秒パルス制御が原理的には可能であることを示した。光パルスの空間-時間制御を可能とする光学系をFig.3に示す。位相変調型空間光変調器(SLM)上の位相パターンを制御することにより出力面の各点における光パルスの時間軸を制御することができる。これまでの計算機シミュレーションはフーリエ変換と幾何光学に基づいており、原理的な可能性は示すことができたが、具体的なパルス幅も含めた計算は不可能であった。そこで、時間-空間-波長を統一的に扱い時空間パルス整形を数値的に表現することが可能な計算手法として、ウィグナー分布関数を用いた解析を行うこととした⁶⁾。この手法の導入により、従来手法では不可能であったパルスの時間幅計算、レンズデフォーカスの影響の見積等が可能となった。この手法を用いて、Fig.3中のSLMに3次関数を表示したときのパルス形状を計算した結果をFig.4に示す。これによりSLMの制御により各種パルス形状を生成する事が可能であることが明らかになった。SLMはコンピュータ制御で位相

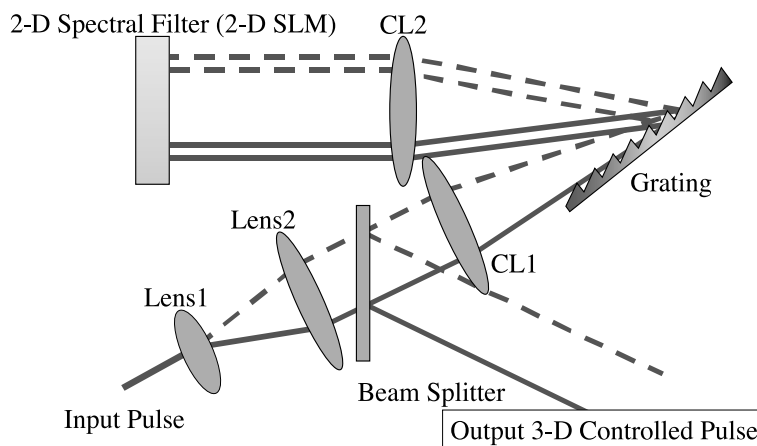
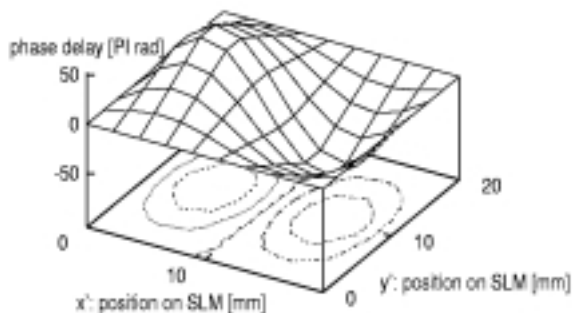
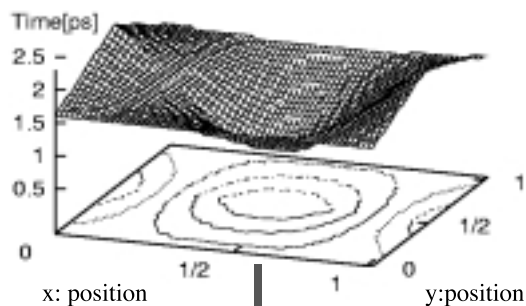


Fig.3 Schematic diagram of the 2-D optical pulse control system.



**Spectral phase delay filter
for photon wall;**

$$\Phi(x',y')=50\pi(20-|2y'-20|)\sin(2\pi 20x')$$



**Simulation result of photon wall;
3-D controlled light pulse**

Fig.4 The computer simulation results of the controlled optical pulse.

パターンを変更できるので、これら各種形状はリアルタイムで変更することが可能である。

時間-空間-波長を統一的に扱える計算手法が波長幅をもった光源と光学システムに応用できることと、時間と空間を融合させ利用する技術開発の経験から、計測技術への研究展開が可能となった。具体的には、広波長幅光源を用いた3次元形状計測システムを時空間結合相互変換相関法コヒーレントトモグラフィー光学システム(時空間結合相互変換相関コヒーレントトモグラフィーシステム)を開発した。通常のコヒーレントトモグラフィーでは一点の奥行き情報だけの測定が可能である。従って、2次元平面の奥行き情報(ト

タルでは3次元情報)を得るためには2次元走査が必要であった。しかし、我々はコヒーレントトモグラフィーの出力を空間フーリエ変換系への入力とすることにより、走査なしに1次元線上の奥行き方向の測定を可能とした。さらに1次元の機械的な走査と組み合わせることにより3次元形状計測を1回の走査だけで可能とした⁷⁾。

3. 今後の研究展開

我々が構築した顔画像の認識を学習できる光学型ニューラルネットワークシステムは、基礎的な実

験システムではあるが、光ニューラルネットワークの画像処理に対する大きな可能性を示している。また、ニューラルネットワークアーキテクチャの研究結果により提案されたモデルとシステムは、光ニューラルネットワーク分野における研究の一翼を担うものである。現在の我々のシステムは一般のパーソナルコンピュータと同等の学習速度を実現しており、さらなるシステムの改良により、大規模な並列電子計算機並の性能が実現可能である。さらに、液晶もしくは新有機材料を用いた光アドレス型の空間光変調器、RWCプロジェクトで開発中のデジタルスマートピクセルや、並列光電子素子、画像表示素子等の高速、高解像度化の進展により、電子技術だけでは到達不可能なレベルの大規模高速学習システムの構築が期待できる。これらのシステムは、応用分野は広いがこれまで困難とされてきた実時間で的高速画像処理、認識に利用できる。

時間-空間融合光情報システムの研究は今後の発展が期待される方向であり、光計測、情報通信、情報処理等さまざまな方向での展開がはかれる。我々は、特に光計測と情報処理を融合したスマートセンシング分野での研究を進める予定である。より高精度、高速、小型高機能な計測情報処理システムの開発により、産業分野での利用だけでなく日常生活の中にも計測、情報機器が導入され、高齢化、情報化社会の中での有効な問題解決手段が与えられると期待できる。

今後も情報技術、計測技術において光技術はますます重要になろう。その中でも我々は光のさまざまな特長を最大限に生かす技術の研究開発を進め、より高度な情報光学技術、光計測制御技術を展開していく予定である。

参考文献

- 1) M.Mori, Y.Yagai, M.Watanabe, T.Yatagai, "Optical learning neural network with Pockels readout optical modulator", Applied Optics, 37, 2852-2857 (1998).
- 2) T.Yatagai, Y.Yagai, M.Mori, M.Watanabe, "Real-time face recognition system with optical learning neural network", Proc. SPIE, 3466, 240-245 (1998).
- 3) X.Lin, M.Mori, M.Watanabe, "Multilayer neural network with fuzzy controlling learning system for optical image recognition", Optical Engineering, 39(10), 2000.
- 4) X.Lin, M.Mori, M.Watanabe, "Improvement of generalization capability for pattern recognition neural network using Gaussian synapse neuron model", Applied Optics, 39, 770-775 (2000).
- 5) X.Lin, M.Mori, "Pattern recognition neural-net by spatial mapping of biology visual field", Optics in Computing (OC 2000), (Quebec City, June 2000).
- 6) Y.Yasuno, Y.Sutoh, N.Yoshikawa, M.Itoh, T.Yatagai, M.Mori, K.Komori, M.Watanabe, "Time-space conversion of femtosecond light pulse by spatio-temporal joint transform correlator", Optics Communications, Vol.177, 135-139 (2000).
- 7) Y.Yasuno, M.Nakama, M.Itoh, M.Mori, Y.Sutoh, T.Yatagai, N.Yoshikawa, "Optical Coherence Tomography by Spatio-Temporal Joint Transform Correlator", International Conference on the Application of Photonic Technology (ICAPT 2000), (Quebec City, June 2000).

当該研究担当者等

ラボ構成員(総数6名)

職員(3名) 森 雅彦* ,渡辺正信 ,伊藤日出男(光技術部)

職員以外(3名) 有馬宏幸 ,谷貝 豊 ,安野嘉晃(筑波大学 実習生)

*ラボリーダー