

周波数並列化が可能な学習論理回路とコヒーレント光プロセッサの提案

川田 宗太郎[†] 廣瀬 明[†]

従来の電子プロセッサは、電子回路によって処理速度が支配されており、また低周波帯域では周波数多重化のメリットも少ない。我々は、光波のコヒーレンスに着目する新しい概念の光プロセッサを提案する。光波を用いるため原理上処理速度が速く、波長多重による回路の並列化も可能である。そのプロセッサの基本素子となる周波数依存の学習論理回路の光学実験を行った。半導体レーザを用いた光学系を構築し、ある周波数で AND ゲート、別の周波数で XOR ゲートとしての出力結果を得るように学習を行った。その結果、理論値に近い良好な出力を得た。この光プロセッサは、空間光変調器が作る微小光路差によって論理機能が実現される。これを利用した動的な機能ユニットも提案する。

Frequency Controllable Learning Logic Circuit and Coherent Optical Processor

SOTARO KAWATA[†] and AKIRA HIROSE[†]

We propose an adaptive logic circuit whose function can be controlled by carrier frequency modulation. The circuit learns desirable functions adaptively by complex-valued Hebbian rule. After the learning, the circuit can switch its function all at once by changing the delay time at a spatial light modulator. A high mechanical stability is realized by a spatial phase-difference coding. Two-orthogonal phase components are detected in parallel spatially. An experiment demonstrates that the system works as an AND circuit at a certain frequency and as an XOR at another. We also propose a processor named "coherent optical processor" based on the logic circuit and present its application to multiplexed adaptive functional units.

1. はじめに

一般的なプロセッサは、論理回路があらかじめ固定なものとして設計されるため、使用するユニットの順番待ちなど、処理を遅くする要因が多い。一方で、FPGAのように、目的に応じて回路を可塑的に決められるプロセッサや、PCA(Plastic Cell Architecture)¹⁾²⁾のように、使用中に動的に回路を再構成するようなプロセッサも提案されている。しかし、これらは全て電子回路のみで構成されており、基本的には処理速度が電子回路で制限されており、また低周波帯域では周波数多重化のメリットも少ない。

ところが、光波を用いると波長多重、即ち周波数領域への並列化が可能となる。光波の持つ広大な周波数領域の情報処理への応用は、今のところ光ルーティングの実用化研究が中心となっている。ルーティングに特化した具体的な光回路も様々なものが提案されている³⁾。対称マッハツェンダ干渉計を集積したマトリクス光スイッチ、ラティス型フィルタ、トランスバーサ

ル型フィルタ、AWG(Arrayed-waveguide grating)などである。

しかしながらこれらは全て、光ファイバ通信を想定したものであり、空間並列性の利用や、一般的な光コンピューティングはあまり考慮されていない。空間並列性を利用する光コンピューティングは古くから行われており、アルファベットを識別する光ニューラルネットワーク⁴⁾なども研究されている。最近の研究動向として、光波の高密度配線特性を活用した光インターコネクション^{5),6)}、光DSP(Digital Signal Processor)^{7),8)}などが報告されている。

我々の目標は、周波数帯域⁹⁾と空間並列性を共に利用する新しい光情報システムを構築することである。論理ゲートをBP(BackPropagation)学習する光ニューラルネットワーク¹⁰⁾が報告されている。我々のグループはこれまでに、PAL-SLM(Parallel-Aligned nematic Liquid crystal Spatial Light Modulator)を用いた位相フィルタ¹¹⁾を提案している。このフィルタは、学習によって任意の出力を得られる点に特徴がある。

そこで本稿は、キャリア周波数で論理機能が制御可能な論理ゲートと、それを基本素子とする光プロセッサを提案する。空間領域に2つの光ニューロンを構築し、複素 Hebb 学習則を用いて論理機能を埋め込む。

[†] 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 基盤情報学専攻
Department of Frontier Informatics
Graduate School of Frontier Sciences
The University of Tokyo

2本の光路差を用いた干渉光学系を構築し、光学実験を行った結果、良好な制御性を得たことを報告する。

近年、全光のまま時系列信号を空間領域へ変換する光学系¹²⁾、近接場光を用いた遅延回路 (~1ns) の概念¹³⁾ など、我々の研究を実用に近づける可能性があるものが報告されている。少ない命令数で大並列実行が可能な新しい計算原理「キュー計算モデル」に基づくプロセッサ¹⁴⁾¹⁵⁾ も提案されており、また非常にシンプルな構成であるため、提案する光プロセッサとの融合も考えられる。

2. 周波数並列化が可能な学習論理回路

この章では、提案する光プロセッサの基本要素である、周波数並列化が可能な学習論理回路について述べる。ここでいう周波数並列化とは、1つの論理回路がそれぞれの光キャリア周波数ごとに異なる論理機能を持っており、キャリア周波数空間から見るとそれらが束ねられているという意味である。

2.1 周波数依存の論理回路

図1に本稿で提案する学習論理回路の概念を示す。例に挙げるものは、キャリア周波数 f_1 で AND ゲート、 f_2 で XOR ゲートの出力を呈する論理回路である。

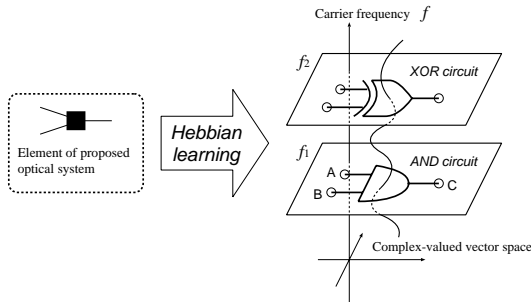


図1 周波数依存の論理回路

学習前は何の機能も持たない論理回路が、Hebb 学習を経ることによって、図1の機能を持つ。我々はこの学習論理回路を、光ニューラルネットワークで構築する。これまでも光ニューラルネットワークの研究が行われ、論理回路の学習やデバイス化も試みられたが、単純に光波の強度のみを利用したものが多く、強度や空間並列性を使うだけでは、回折限界によって小型化が困難である。そこで我々は、光波の広大な周波数領域も使う。

ここでの周波数 f は、キャリア光源である半導体レーザーの波長(光周波数)である。周波数を考えるということは、光波を波動としてみるということに相当する。そこで、光波のコヒーレンスを利用する、振幅・位相型の複素ニューラルネットワークの理論を用いる。複素ニューラルネットワークでは、入力、出力、結合

荷重はそれぞれフェーズで表現される。具体的なダイナミクスは、参考文献 11) を参照いただきたい。

2.2 ネットワークと学習

図2(a)に学習論理回路のネットワークの構成を示す。2ニューロン、3入力のネットワークである。ここでは、1つの入力に対して複数の結合荷重(それぞれ遅延時間が異なる、即ち、複数の光路差に相当)が存在するニューロンを用いる。この理由は、周波数に対して任意の処理をさせるためである。

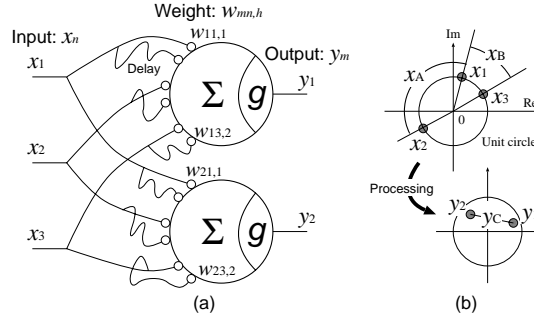


図2 (a) 3入力2出力のネットワーク (b) 位相差と距離による情報表現

図2(b)に信号表現を示す。機械的な振動に強くなるように論理ゲートの入力 (x_A, x_B) 、出力 y_C を、2つの信号の差分で表現する。ネットワークの入力 $\mathbf{x}=(x_1, x_2, x_3)$ 、出力 $\mathbf{y}=(y_1, y_2)$ に対し、 $x_A = |\arg(x_1) - \arg(x_2)|/\pi$ 、 $x_B = |\arg(x_1) - \arg(x_3)|/\pi$ 、 $y_C = |y_1 - y_2|/2$ としてコーディングを行う。入力は単位円上の位相差であるが、出力は距離である。このようにすると、光回路を多段階層接続することが可能になる。

表1 AND と XOR の学習セット

	f [THz]	x_A	x_B	x_1	x_2	x_3	y_C	y_1	y_2
AND	472.000000 (= f_1)	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	1	0	0	π	0	0	0
		1	0	0	π	0	0	0	0
		1	1	0	π	π	1	0	π
XOR	472.006300 (= f_2)	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	1	0	0	π	1	0	π
		1	0	0	π	0	1	0	π
		1	1	0	π	π	0	π	π

表1は学習セットを表す。 f_1 と f_2 にそれぞれ AND と XOR の論理ゲートになるように学習パターンが用意されている。学習は、光路差 ΔL_h と学習係数 $K, k^{11)$ 、学習パターンの値(入力ベクトル \mathbf{x} 、出力ベクトル \mathbf{y} 、周波数 f) をパラメータとし、複素 Hebb 学習則に従って PC 上で数値計算によって行う。一般的なフーリエ変換解析による機能決定と異なり、この方式は原理的に逐次学習も可能である。

2.3 光学系

図3(a)に実験に用いた光学系を示す。これは複数の光路差を持つマッハツェンダ型干渉計である。

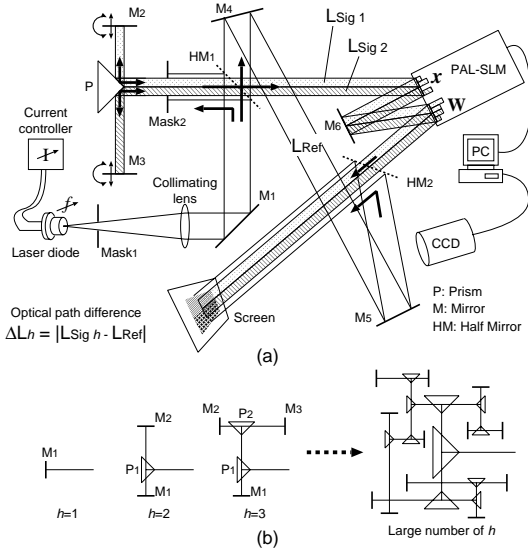


図3 光学系 (a) 2つの光路差を持つ光回路 (b) 光路差を増やす方法

光波の流れを順を追って説明する。半導体レーザから出された光が平行光レンズによって並行にされ、HM₁で参照光(透過する側)と信号光(反射する側)の2つに分けられる。参照光はM₄, M₅で反射され、HM₂で干渉に使われる。信号光は三角プリズムPの頂点に直角に入射し、2つに分かれ、M₂, M₃で反射されて、同じ光路を辿り、PAL-SLMへ入射する。ここで、入力ベクトルの x と結合荷重行列の W とが変調される。そして、HM₂で参照光と再び合流し、干渉結果がScreenに投影され、CCDカメラに取り込まれる。なお、半導体レーザのキャリア周波数は、注入する電流によって変えている。PAL-SLMおよびCCDにおける信号の変調区分を図4に示す。

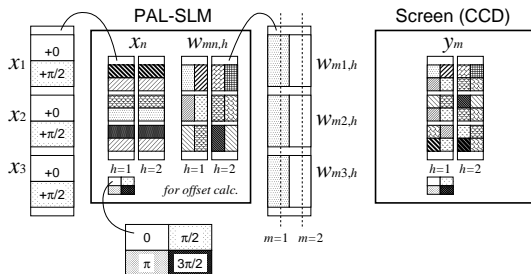


図4 光学デバイス上における信号表現

入力信号、結合荷重行列をPAL-SLMで空間的に変調する。信号の読み取りには自己ホモダイン検波法を

用いる。今回は同時に信号の直交2成分を読み取るようにするため、1つの信号のcos成分(シフトなし),sin成分(90度シフト)、オフセット分(0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$)を同時に用意する。

図3(b)は、今回提案するプリズムを用いる複数の光路差生成光学系である。少ない部品数で複数の光路差を実現できる。終端ミラーの微調節が容易で、光強度も弱まらないという特徴を持つ。光路差が多くてバラエティに富んでいるほど、周波数領域に対して任意の情報空間を描くことができる。これは、フーリエ級数の次数が高いほど、任意の波形を近似できることに相当する。

2.4 実験結果

図5に実験結果を示す。(a)と(b)は、それぞれ f_1, f_2 のときの入力に対する汎化特性、(c)は入力パターンが00,01,10,11のときに対する周波数領域の汎化特性である。(d)は干渉縞の写真である。

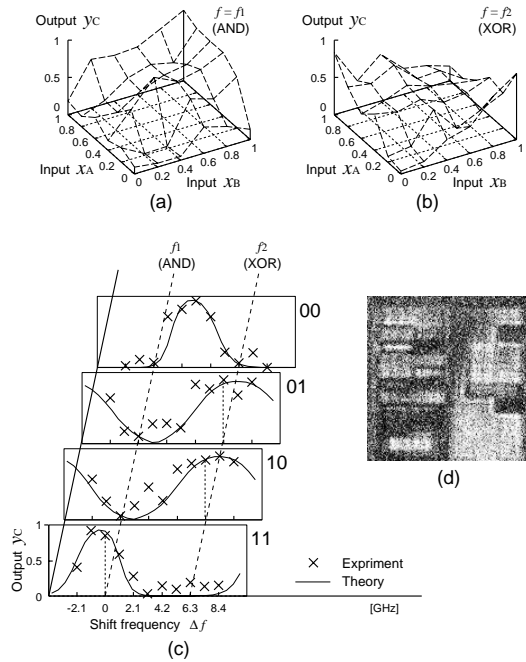


図5 実験結果 (a)AND回路 (b)XOR回路 (c)周波数領域における汎化特性 (d)干渉縞写真

(a),(b)によると、 f_1, f_2 とも多少のノイズを含むものの、それぞれAND,XORに対応する出力を出していることが確認される。その間の入力があったときは、四隅をなだらかに結ぶ出力を示している。(c)からは、出力が周波数領域に対しても連続的に変化していることが分かる。実線はシミュレーションによる理論値、×印は実験値であるが、実験結果もほぼ理論値の近傍に位置している。(d)の写真からは、干渉の明暗が明確で、振動による時間的変動もすべて共通に表

れていて、振動の影響がキャンセルされることが確認された。

以上の結果から、周波数に依存する学習論理回路の出力を得ることが確かめられた。一般的にコヒーレントな光情報処理を行う場合、光学系の大きさに比例して結果が不安定になってしまう。将来は微小デバイス化しより安定にすることが望まれる。また、信号のコーディング方法の開拓や、多重化密度に対する解析も行う必要がある。

3. コヒーレント光プロセッサ

前章で述べた学習論理回路は、光波のコヒーレンスを利用したものである。その学習論理回路を基本素子とし、多数結合してプロセッサ化することを提案する。本稿ではその光プロセッサを「コヒーレント光プロセッサ」と命名する。

3.1 学習論理回路のモジュール化と階層化

図6にコヒーレント光プロセッサの概要を示す。(a)は学習論理回路をモジュール化し、階層化した場合の概念図である。ここでは例として、5つ以上の周波数に機能が学習されている。学習論理回路の基本はニューラルネットワークで組み立てられているため、ブール代数のみを扱う論理回路以外に、ニューロン本来のアナログ的な情報処理も可能である。全て、学習によって機能が決定される。

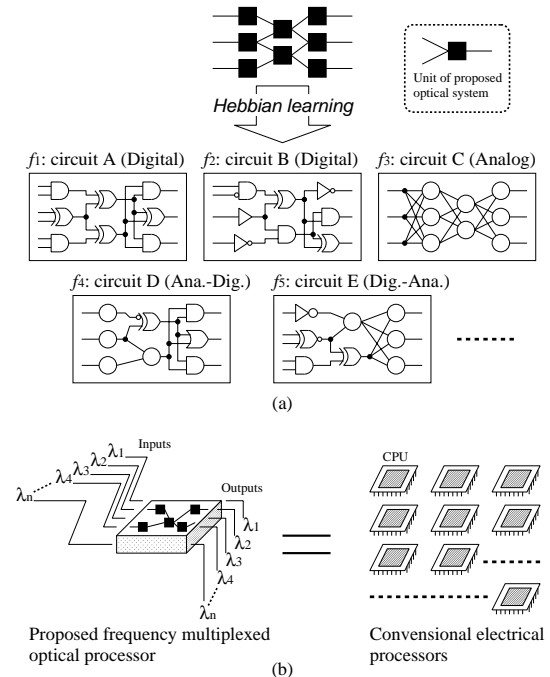


図6 コヒーレント光プロセッサの概要。(a) 学習論理回路のモジュール化と機能の学習 (b) 波長多重

(b)は波長多重によって異なる情報処理が1つのコヒーレント光プロセッサで同時になされる様子を、従来の電子型プロセッサと比較したものである。電子型プロセッサは低消費電力で小型化が可能で処理速度も年々高速化しているが、基本的に処理は電子回路の時間数によって制限され、周波数領域に対する多重化のメリットもあまりない。

提案するコヒーレント光プロセッサは、消費電力・サイズ・処理速度に関しては、現在のところは基礎実験の段階であるため未知数であるが、処理速度は一部に電気・光の変換はあるものの原則的に光速である。また、1つのプロセッサ内を複数の波長の光が同時に流れて処理が行われ、それぞれに独立した結果が取り出せるため、電気型プロセッサを複数枚並列に重ねたのと同じ効果が得られる。

3.2 多段接続

図7に示す光学系は、学習論理回路の基本素子をカスケード接続する場合の接合部分である。今回提案した学習論理回路は、入力位相差、出力は2つの信号の複素平面上の距離として表現されている。これを何段にもつなげる場合、出力を位相差として再び次の段の入力へ渡す必要がある。

図7では、 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ の3波長における2段の接続を示す。全て光軸のみで描いているが、この光軸を法線とする平面状に光波が伝播するものと仮定する。上段の3本は無変調のビームである。ここから光波の一部をサンプリングし、波長ごとに入力 x の位相変調を行う。次に複数の光路差回路を通して、更に結合荷重の位相変調を行う。そして再び干渉を行わせ、DEMUX (DE-MultipleXer) によって波長分割を行う。この際に、ほかのユニットからの情報も交える。波長ごとに取り出された信号を使って次の段の入力の変調を行う。上段の無変調光源は段数を経るごとに弱まっていくため、光アンプによって増幅される。

3.3 デバイス化の構想

コヒーレント光プロセッサをデバイス化した場合の構成を、図8にまとめた。このデバイスは、大きく次の3層に分けることができる。複数光路差層、光情報処理層、及び電気信号制御層である。

複数光路差層は、三角プリズムと全反射ミラーで構成された光学回路である。前章の基礎実験では2つの光路差だけが用いられたが、より多くの光路差を用いれば、周波数領域に対してより任意の情報処理を学習させることができる。基礎実験のように、必ずしも大きなバルク品を使用しなくとも、フォトニック結晶などで同様の機能を持つものが実現されれば小型化できる。

光情報処理層は、光波の振幅変調や位相変調のみが行われる層である。図8のように、あらかじめ多重化された光源がこの層に入り、何らかの処理を施されて、この層から出て行く。複数の光路差を経る部分は、上

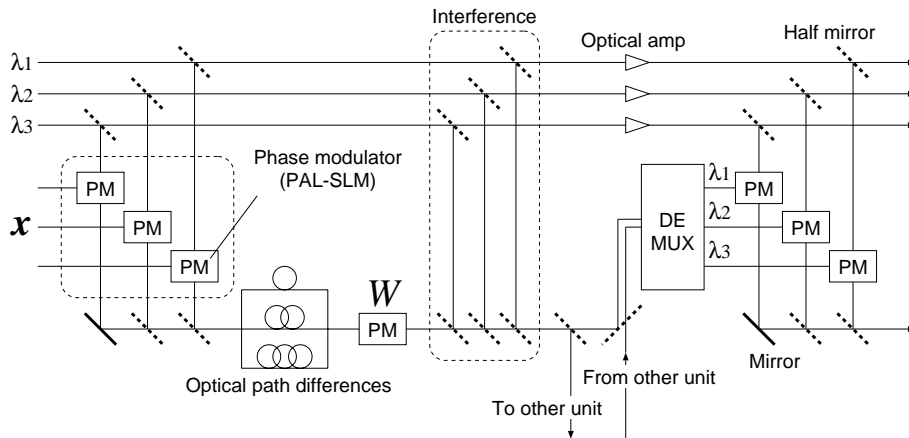


図 7 基本素子の結合部分

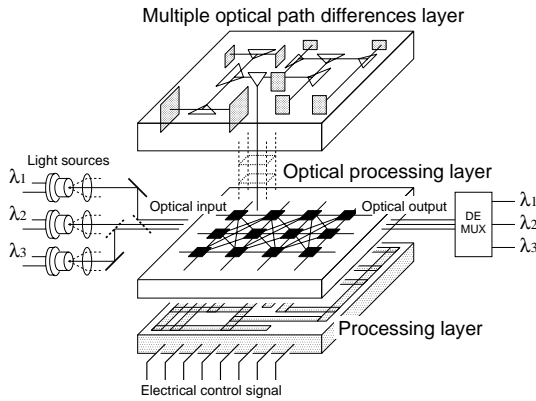


図 8 コヒーレント光プロセッサの構成

段の複数光路差層にまかされる。上層と下層とを行き来しながら処理がなされる。

電気信号処理層は、電気的な入力によって光波に変調を施す層である。基礎実験で用いた SLM は、ビデオ入力タイプの大きなものであったが、実際に集積デバイス化する際には、もっと小型化され、集積化に適した形になると期待される。SLM もしくは CCD カメラの電気入出力部分はこの層に位置し、光学部分は上層の光情報処理層に位置する。

各層とも、なるべく単純な周期構造によって実現されることが望ましい。コヒーレント光プロセッサが従来のプロセッサと大きく異なる点は、機能があらかじめ固定と回路として決められるのではなく、SLM が作る微小な遅延時間によって作られるという点である。遅延の大きさを切り替える時間が早ければ早いほど、ダイナミックに処理を進めることができる。これらを実現するデバイスの開発が望まれる。

3.4 機能ユニットの並列処理

並列処理と動的切り替えを同時に可能にする、コヒーレント光プロセッサを用いた機能ユニットの一例

を示す。図 9 は、命令によって動的に決まる ALU である。

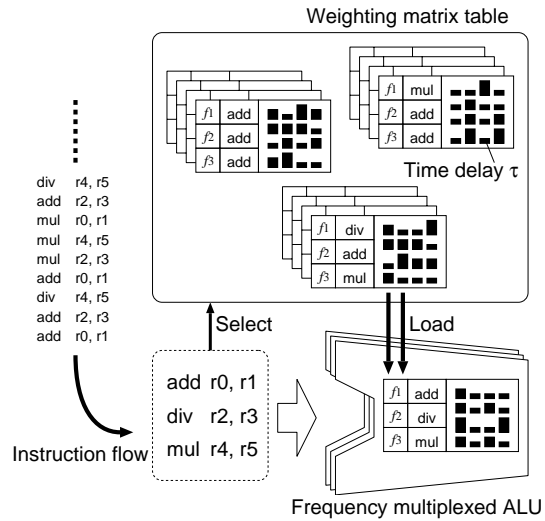


図 9 命令によって動的に決まる ALU

それぞれの機能を持つ遅延時間行列がテーブル化されている。ALU に命令がくると、テーブルが参照され、その命令の種類に一致した機能を持つ遅延時間行列がロードされる。例では、"add", "div", "mul" の 3 つが命令列から取り出され、これらの命令を処理するものが遅延時間行列テーブルから選択され、 f_1 で "add" 回路、 f_2 で "div" 回路、 f_1 で "mul" 回路を行う遅延時間行列が ALU にロードされている。

一般的なプロセッサでは、あらかじめ機能ユニットの個数が決められてしまっているため、もしそれを使用する命令が多く到来した場合、順番待ちとなってしまう。しかし、我々が提案する方式では、原理的に順番待ちが必要ないため、プロセッサ全体の処理速度を向上させることが可能である。

4. おわりに

周波数によってコントロールすることのできる論理回路を提案し、光学実験を行った。入出力および周波数領域での汎化特性を調べた結果、学習パターンにほぼ一致する結果が得られ、ニューラルネットワークの学習の効果が確かめられた。また、この光学系を1つのエレメントとみなし、複数接続した光プロセッサを提案し、複数の命令を同時に且つ動的に処理できる機能ユニットへの応用例を示した。現在は大きな光学系で原理実証実験を行っている段階であるが、微小デバイス化すれば、より実用的なものが構築される。また、電子波を利用する将来の適応的な波動量子デバイスにつながる新しい情報処理でもある。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金(萌芽研究 No.15650037) によるものである。

参 考 文 献

- 1) K.Nagami, K.Oguri, T.Shiozawa, H.Ito and R.Konishi, "Plastic cell architecture: A scalable device architecture for general-purpose reconfigurable computing," *IEICE Transactions on Electronics*, **E81-C**(9), pp.1431-1437 (1998).
- 2) N.Imlig, T.Shiozawa, R.Konishi, K.Oguri, K.Nagami, H.Ito, M.Inamori and H.Nakada, "Programmable dataflow computing on PCA," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences*, **E83-A**(12), pp.2409-2416 (2000).
- 3) H.Takahashi, "Planar lightwave circuit devices for optical communication: present and future," in *ITCom 2003* (Orlando, Florida USA, 2003), *Proc. SPIE*, **5246**, pp.520-531 (2003).
- 4) 田井修市, 光永一正, 久間和生, "光ニューラルコンピューティング," 計算機アーキテクチャ研究報告, No.088-005, (1991)
- 5) A.Goulet, M.Naruse and M.Ishikawa, "Simple integration technique to realize parallel optical interconnects: implementation of a pluggable two-dimensional optical data link," *Applied Optics*, **41**(26), pp.5538-5551 (2002).
- 6) M.Chateaufneuf and A.G.Kirk, "Determination of the optimum cluster parameters in a clustered free-space optical interconnect," *Applied Optics*, **42**(29), pp.5906-5917 (2003).
- 7) Lenslet Ltd., "EnLight256", (2003).
<http://www.lenslet.com/>
- 8) U.Arad, E.Redmard, M.Shamay, A.Averboukh, S.Levit and U.Efron, "Development of a large high-performance 2-D array of GaAs-AlGaAs multiple quantum-well modulators," *IEEE Photonics Technology Letters*, **15**(11), pp.1531-1533 (2003).
- 9) A.Hirose and R.Eckmiller, "Coherent optical neural networks that have optical-frequency-controlled behavior and generalization ability in the frequency domain," *Applied Optics*, **35**(5), pp.836-843 (1996).
- 10) A.A.Cruz-Cabrera, M.Yang, G.Cui, E.C.Behrman, J.E.Steck and S.R.Skinner, "Reinforcement and backpropagation training for an optical neural network using self-lensing effects," *IEEE Transactions on Neural Networks*, **11**(6), pp.1450-1457 (2000).
- 11) S.Kawata and A.Hirose, "Coherent Optical Neural Network that Learns Desirable Phase Values in Frequency Domain by Use of Multiple Optical-Path Differences," *Optics Letters*, **28**(24), pp.2524-2526 (2003).
- 12) Y.Oshita, T.Konishi and Y.Ichioka, "Ultrafast time-to-two-dimensional-space conversion system using SHG crystal," *Optical Review*, **9**(4), pp.141-145 (2002).
- 13) S.Sangu, K.Kobayashi, A.Shojiguchi and M.Ohtsu, "Logic and Functional Operation using a Near-Field optically Coupled Quantum-Dot System," *Physical Review*, (submitted).
- 14) 川田宗太郎, "並列キューマシンの設計とシミュレーションによる性能評価," 電気通信大学 電子工学科 卒業論文 (2000)
- 15) S.Kawata and M.Sowa, "Construction and Basic Performance Evaluation of Virtual Queue Machine," (to be submitted)