

階層的並列処理のための自由空間光インターコネクションモジュール

成瀬 誠†, 豊田 晴義††, 小林 祐二††, 石川正俊†

† 東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 Tel:03-5841-6902 Fax:03-5841-6937

e-mail: naruse@k2.t.u-tokyo.ac.jp

†† 浜松ホトニクス中央研究所

〒434-0041 静岡県浜北市平口 5000 Tel:053-586-7111 Fax:053-586-6180

あらまし 光入出力を持つ大規模集積回路 (Optoelectronic VLSI(OE-VLSI)) を光インターコネクションにより接続することにより, 従来の電気配線を用いた計算機システムにおける通信能力を飛躍的に高め, 光の高密度な空間的並列性を生かした超並列システムの実現が可能となる. 本稿は, 階層的並列処理のための自由空間光インターコネクションモジュールについて, 全体システムの機能設計の立場から導かれる特徴を述べ, 空間光変調素子やファイバオプティックプレート (FOP) 等を用いた再構成可能インターコネクションの実現例を示す.

キーワード 光インターコネクション, 並列処理システム, 空間光変調素子

Free-Space Optical Interconnection Module for Hierarchical Parallel Processing

Makoto Naruse†, Yuji Kobayashi††, Haruyoshi Toyoda††, Masatoshi Ishikawa†

† Department of Mathematical Engineering and Information Physics, Graduate School of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Tel:03-5841-6902 Fax:03-5841-6937 e-mail: naruse@k2.t.u-tokyo.ac.jp

†† Central Research Laboratory, Hamamatsu Photonics, K.K, Hiraguchi 5000, Hamakita-shi, Shizuoka 434-0041, Japan Tel:053-586-7111 Fax:053-586-6180

Abstract Optoelectronic VLSI (OE-VLSI) and optical interconnects enhances the physical layer capability of computing systems, by which massively parallel processing could be made that exploits the densely parallel optical data paths. This paper describes the character of free-space optical interconnection module as an application to hierarchical parallel processing systems, as well as the implementation of the module using spatial light modulator (SLM) or fiber optic plate (FOP) technologies.

key words

optical interconnection, parallel processing system, spatial light modulator

1 はじめに

近年の集積回路技術の進歩と通信回線に要求されるデータ通信量の増大に伴い、配線遅延や通信帯域幅等の通信路の性能が計算機システムの性能改善を妨げる要因として、テレコミュニケーションからチップ内に至る様々な階層で顕在化し、光技術の導入 [1] による解決の期待が高まっている。光技術のチップ間通信への応用は、アライメントの問題 [3] [4] [5] 等の実装の困難さが近年の研究で明らかになりつつあるものの、潜在的には配線遅延の低減や超大容量通信帯域幅の実現等のシステム実装上のメリットは大きく、さらに、集積化光デバイスとプロセッサの直結により、光インターコネクションが提供する優れた通信能力と、集積回路技術に支援された計算能力を同時に有する新しい情報処理システムの実現の可能性がある [6][2]。

例えば、ピクセル毎に演算機能と通信機能を有する光電子大規模集積回路 (Optoelectronic VLSI (OE-VLSI)) は、空間的に並列な情報の取得と同時に、演算を可能とすることから、ビデオフレームレートを遙かに上回る速度での画像処理を可能としたが、単体の OE-VLSI に実装可能なトランジスタ数には必ずと上限があり、チップ上で効率良く実現可能な演算機能には限界が存在する。光インターコネクションによって、チップ外との高帯域な通信路が確保できれば、より複雑な処理を複数のチップに分散させることによって、様々な機能を効率良く実現できる新しい情報処理が具現化できる。

本稿は、光技術を活用した超並列情報処理システムの実現における重要な課題の一つである通信機能の実装について、全体のシステムの構造と機能を踏まえつつ、空間光変調素子 (Spatial Light Modulator (SLM)) 等の先端的光デバイス技術を用いて実現した、自由空間光インターコネクションモジュールを示す。

2 階層的並列処理と光インターコネクション

OE-VLSI チップを、光インターコネクションを用いて図 1 のように層状に結合することにより、単位チップに収めることが出来ない複雑な処理を実現する際に発生するチップ間通信のボトルネックは、大きく低減できると期待できる。

このアーキテクチャの特徴のひとつは、プロセッサ層の電子回路を利用して、論理演算及び算術演算を電子的に行い、層間の通信を光インターコネクションにより行うことにある。光インターコネクションにより、プロセッサ間に十分な帯域幅の通信路が確保されることから、単層のプロセッサに割り当てる負荷をそのプロセッサの物理層の能力に適合させ、処理の多段化が可能となる。したがって、一つのデータセットに対する単層での

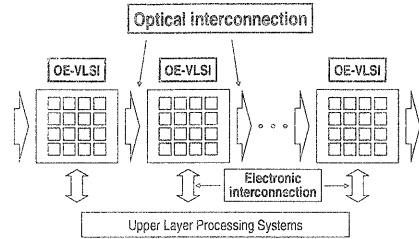


図 1 OE-VLSI を用いた階層的情報処理システムアーキテクチャ

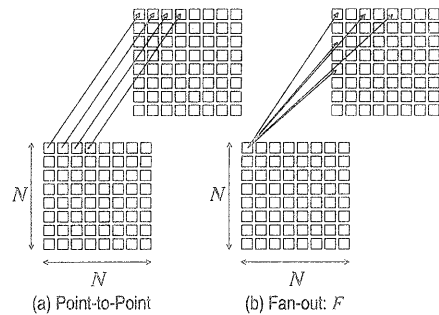


図 2 自由空間光インターコネクションにおける通信チャンネル

処理時間を低減でき、高いスループットを確保することができる。

このとき、層間に自由空間光インターコネクションを用いれば、実行されるアプリケーションの性質に合わせて、様々なネットワーク構造を構築することができ、また、通信路の数を飛躍的に高めることができる。

各層の通信チャンネル数を、 N を適当な整数として、 $N \times N$ とする。このとき、固定の 1 対 1 のインターコネクションの場合には、 N^2 個の通信路を構築できるが、自由空間光インターコネクションでは、単一のチャンネルから同時に F 個のチャンネルへの通信が可能であるとすれば (ファンアウト F のインターコネクション)、実効的には $N^2 \times F$ 個の通信路が用意できる。

また、光線の振幅や位相を SLM 等を用いて変調することによって、光線の行き先を N^2 個のピクセルの任意

の F 個として選択できれば, $N^2 C_F$ 個の通信パターンを用意できる.

ファンアウト数 F も制御できる場合には, 各通信パターン毎に計数した通信路数の総和は,

$$\sum_{F=1}^{N^2} N^2 \times F \times N^2 C_F \quad (1)$$

となり, 固定のインターコネクションにおいては, 実現がより困難, あるいは等価な機能の実現には非効率と思われる数の通信路を準備できると期待できる.

なお, 次章で示される光インターコネクションモジュールは, 4f 光学系を用いた光学的フーリエ変換を基本原理としており, 2次元光出力デバイスの発光パターンを $I(i, j)$, コンボリューションカーネルを $m(i, j)$ とすれば, 受光素子アレイ上に, $I(i, j)$ と $m(i, j)$ のコンボリューションが構築される. この場合, 全ピクセルの通信パターンは, $m(i, j)$ 規定される同一パターンとなる (シフトインバリエントなインターコネクション). このとき, $m(i, j)$ を可変とすることによって, 原理的には $\sum_{F=1}^{N^2} N^2 C_F$ 個の相互結合網を OE-VLSI チップ間に構成可能である (再構成可能な光インターコネクション).

3 光インターコネクションモジュール

階層的処理を可能とする光電子融合並列処理システムである OCULAR-II (Optoelectronic Computer Using Laser Arrays with Reconfiguration) [7] の光インターコネクションモジュールを示す. OCULAR-II では, 光インターコネクションモジュールと光入出力を有するプロセッサモジュールを交互に配置することによって, 層構造のシステムの実現が可能となる.

OCULAR-II の基本構成要素である光インターコネ

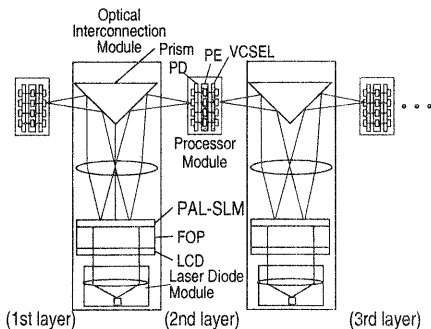


図 3 OCULAR-II システムの構造

クションモジュールとプロセッサモジュールは, 各々がビルディングブロックとなり, 全体システムが図 1 に示されるパイプライン状の構造を持つために, モジュラリティの高い構造を持たせ, 光インターコネクションモジュールの両面にプロセッサモジュールの発光面と受光面が各々配置される. パイプライン状の接続の概念図を図 3 に示す.

プロセッサモジュールの垂直共振器型面発光レーザ (VCSEL) の出射光は, 光インターコネクションモジュール内のプリズム, ミラー, フーリエ変換 (FT) レンズを通過後, フーリエ面に設置された位相変調型空間光変調素子 (Parallel Aligned Nematic Liquid Crystal Spatial Light Modulator (PAL-SLM)) により変調され, 反射光は再び FT レンズ, ミラー, プリズムを通過し, 次段のプロセッサモジュールのフォトディテクタ (PD) アレイに入射する. 全ての光学系は, 入射面と出射面に挟まれる $140\text{mm} \times 250\text{mm} \times 62\text{mm}$ の体積内に実装されている. VCSEL 及び PD のアレイサイズは 8×8 , ピッチは $250\mu\text{m}$ である. 図 4 に構造図, 図 5 に外観を示す.

FT レンズの焦点距離は, VCSEL の発振波長 (850nm), VCSEL アレイ, PD アレイのピクセルピッチ ($250\mu\text{m}$), CGH の最小縞間隔により決定されるが, 温度変化に起因するアレイの発振波長等の変動に対応可能とするために, FT 変換レンズの焦点距離を可変とし, $400 \pm 40\text{mm}$ とした. FT 変換レンズは 3 群構成となっており, 中央のレンズを移動させることで焦点距離を可変としている. 同時に, 全体の光学系をコンパクトに収めるために, 3 群レンズに望遠タイプ機能を持たせ, 作動距離を 155mm から 200mm に抑えている.

また, プリズムの利用により, 光線の入射面と出射面を対向させることにより, 光学系に構造的なモジュール性を付与するとともに, 原理的には光の利用効率を高めることができる. すなわち, 反射型の空間光変調素子の利用方式としてハームミラーを用いた場合に発生する光量のロスを基本的には回避でき, また, SLM 入射面には光線が傾いて入射するものの, PAL-SLM の回折効率は入射角度が 45 度程度まで劣化しない [8] ことから, 光の利用効率が高まる. さらに, FT レンズを SLM への入射光と出射光で共有できることから, システムのコンパクト化も可能としている. しかし, 現状の光インターコネクションモジュールでは, VCSEL の拡がり角と FT レンズの NA が適合していないことから, 出射光量の 3.6% の光が SLM に到達している.

プロセッサ層の光インターコネクションパターンは, 計算機ホログラム (Computer Generated Hologram (CGH)) により規定される. CGH パターンは, オ

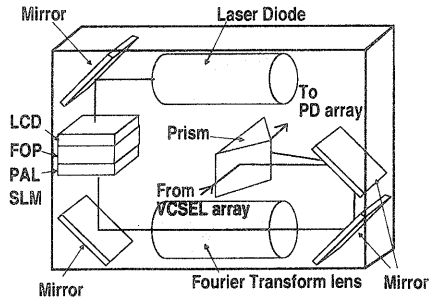


図 4 光インターコネクションモジュールの内部構造

ラインでシュミレーテッドアニーリングと呼ばれる最適化手法を用いて作成し、液晶ディスプレイ (LCD) に表示し、半導体レーザーの照明により PAL-SLM に書き込まれる。LCD のピクセル数は 640×480 、画素ピッチは $44.4 \mu\text{m}$ である (ソニー LCX012BL)。PAL-SLM は、解像度 20 lp/mm で 2π 以上の位相変調能力を有し、理論限界に迫る回折効率を提供する能力を有する [10]。

LCD と PAL-SLM のカップリングには、前世代光インターコネクションモジュールでは、平板マイクロレンズ (Planar Micro Lens (PML)) を用いていたが [9]、解像度不足により、回折効率に問題があった。そこで、ファイバオプティックプレート (FOP) を用いて回折効率の向上を試みた。FOP の厚みは 5 mm 、各ファイバの直径は $3 \mu\text{m}$ 、NA は 1.0 である。これにより、LCD と PAL-SLM を含めた書き込み系の全長は 15 mm

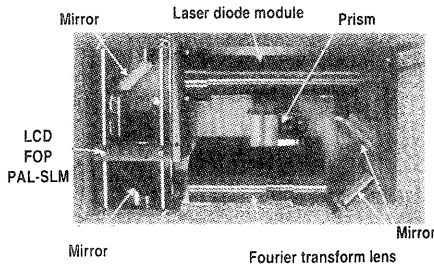


図 5 光インターコネクションモジュールの外観図

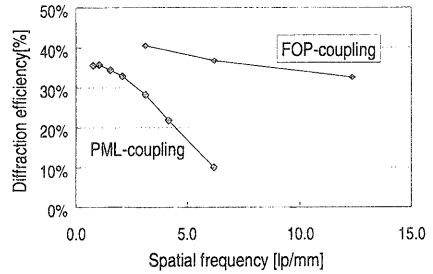


図 6 FOP 利用による回折効率の改善

となり、PML の作動距離 (32 mm) に比べてコンパクト化されている。

FOP を用いた場合には、原理的には LCD の画素構造が PAL-SLM に伝搬し、これに起因する光の回折が生じる。しかし、PAL-SLM 自体の特性として、高空間周波数に対する回折効率が低減することや、LCD と FOP 間距離の調整等により、画素構造に起因する効果は実効的には低減でき、図 6 に示されるように、画素構造が存在しない PAL-SLM の特徴を生かし、PML を用いた場合に比べて回折効率の向上を得ている。

階層的なシステム例として、入力情報全体に渡る情報を効率良く抽出可能なネットワークの一つである Quad Tree と呼ばれるネットワーク構造をパイプラインシステムに実装する場合のインターコネクションパターンの実現例を図 7 に示す。

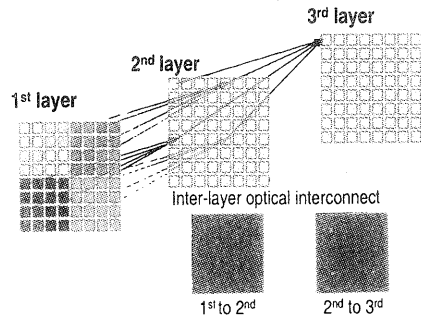


図 7 パイプラインシステムへの木構造の実装

4 まとめ

階層的並列処理のための自由空間光インターコネクションモジュールについて全体システムの機能設計から導かれる特徴を示すとともに、具体的な設計と評価を示した。今後は、システムの詳細な評価とともに、アライメントの問題等も含めて本システムの限界を明らかにし、さらなる安定化や小型化等の検討が必要である。

参考文献

- [1] J. W. Goodman, F. J. Leonberger, S.-Y. Kung, and R. A. Athale, "Optical interconnections for VLSI systems", Proc. IEEE, **72**, 850-865 (1994).
- [2] 成瀬, 石川, "光インターコネクションを用いたシステムのための並列アルゴリズムの構築," 情報処理学会論文誌, vol.41, no.5, 2000. (to appear)
- [3] B. Robertson, D. Kabal, G. C. Boisset, Y. Liu, W. M. Robertson, M. R. Taghizadeh, and D. V. Plant, "Design and operation of an *in situ* microchannel alignment-detection system", Appl. Opt., Vol. 37, pp. 5638-5376, 1998.
- [4] T. -Y. Yang, J. Gourlay, and A. C. Walker, "Adaptive alignment with 6-degrees of freedom in free-space optoelectronic interconnects", *Technical Digest of Optics in Computing 1999*, pp. 8-10, 1999.
- [5] 成瀬, 石川, "特異値分解を用いた光インターコネクションのアライメント解析", 光学, Vol. 29, No. 2, pp. 101-107, 2000.
- [6] M. Ishikawa and N. McArdle, "Optically Interconnected Parallel Computing Systems", IEEE Computer, **31**, 61-68 (1998).
- [7] N. McArdle et al. , "Optoelectronic Parallel Computing Using Optically Interconnected Pipelined Processor Arrays," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 5, no. 2, pp. 250-260, 1999.
- [8] Y. Kobayashi, Y. Igasaki, N. Yoshida, N. Fukuchi, H. Toyoda, T. Hara, and M. H. Wu, "Compact High-efficiency Electrically-addressable Phase-only Spatial Light Modulator", Proc. SPIE, Vol. 3951, pp. 158-165, 2000.
- [9] H. Toyoda et al., "Compact optical interconnection module for OCULAR-II: a pipelined parallel processor," Technical Digest of Optics in Computing '99, no.OThE4, pp.205-207, Colorado, USA, Apr. 1999.
- [10] H. Toyoda et al., "High efficient electrically-addressable spatial light modulator module for reconfigurable optical interconnection," Technical Digest of Spatial Light Modulator and Integrated Optoelectronic Arrays '99, no.SMB3, pp.14-16, Colorado, USA, Apr. 1999.