

レンズアレイを用いた多段光接続網†

河 合 滋††

電子デバイスの高密度化、高速化に伴い、配線量の増加、信号伝播の遅延、配線路の帯域制限などの問題が、表面化している。これらの問題は、自由空間伝播光の有する高並列、無誘導、高帯域、高速等の性質によって、解決できる可能性がある。特に、レンズアレイを用いて、光源の像を受光素子に結ぶ方法は、単純構成かつ高光利用率である。この論文では、新しいレンズ構成による光配線法を用いて、種々の多段接続網が構成されることを示し、レンズを用いた光配線に適した新しいセルフルーティングなネットワークを提案した。これらのネットワークを、レンズの収差や光利用率の点から評価し、提案したネットワークの有効性を確認した。このネットワークの配線原理を確認するために、平均 $62.5\mu\text{m}$ と $125\mu\text{m}$ の平板マイクロレンズアレイを試作し、 $31.25\mu\text{m}$ ピッチで配列されている直径 $10\mu\text{m}$ のパターンを結像して、所望の結果を得た。また、並列プロセッサのボード間インタコネクションに用いる場合の実装技術や具体的なプロセッサの配置方法について検討した。

1. はじめに

電子デバイスの高密度化、高速化に伴い、配線量の増加、信号伝播の遅延、配線路の帯域制限などの問題が、表面化している。極端な場合には、装置の中のほとんどの部分が、配線のためのケーブルで専有されたり、システムの速度が、プロセッサやメモリなどの処理速度ではなく、これらの間の通信に要する時間に支配されてしまうといったボトルネックが生じている。

光は、配線路を必要としない性質（高並列）、互いに干渉されずに伝播する性質（無誘導）、搬送周波数が高く、帯域が配線数に依存しない性質（広帯域）、浮遊容量などの影響を受けずに光速で伝播する性質（高速）などを有する。これらの特徴を生かした光配線が実現されれば、電気配線の問題を解決することができる。

高機能化された種々のシステム内部の配線は、階層化されており、チップ内、チップ間、ボード間、モジュール間、装置間、システム間に大別することができる。従来、光を用いた配線法として、光ファイバを用いるネットワークが広く知られており、装置間、システム間といったレベルの光配線は、すでに光 LAN として実用化されている。一方、ホログラム^{1)~3)}、プリズム⁴⁾、ミラー^{5)~7)}、レンズアレイ^{8),9)} などを用い、空間的に光を交錯させて、チップやボードレベルの配線を実現しようとする試み¹⁰⁾や、空間伝播光によって光クロスバスイッチを実現する方法^{11)~13)} が報告され

ている。光ファイバを用いる方法が、電気配線と同様に配線路を必要とするのに対して、これらの空間的な光配線法では、光が自由空間を伝播するために、配線密度を飛躍的に高めることができる。

種々の空間的な光配線法の中で、レンズアレイによって光源の像を受光素子に結ぶ方法は、単純構成、高光利用率で、ホログラムやプリズムを用いた他の光配線と同等の機能を実現することができる。この論文では、新しいレンズ構成による光配線法を用いて、種々の多段接続網が構成されることを示し、レンズを用いた光配線に適した新しいネットワークを提案する。また、これらのネットワークの評価と、平板マイクロレンズアレイ¹⁴⁾を用いた原理確認実験および並列プロセッサのボード間インタコネクションに用いる場合の具体的な応用について述べる。

2. レンズを用いた光配線

2.1 原 理

マトリクス状に配列されている光源と受光素子の間にレンズを置くと、図 1 に示すように、光源の像を受光素子に結ぶことができ、3 次元的な光配線が実現される。この時、レンズの大きさや位置を変えると、結像の位置が変化し、光源と受光素子の間を、ある程度自由に結線することができる。

多段接続網は、一般に、シャッフルやバタフライのような規則的な配線を組み合わせて構成されているので、このようないくつかの基本的な配線が実現されるように、レンズアレイを配置できれば、3 次元的なネットワークが構成される。この時の配線のためのレンズの位置は、点光源を仮定して、主光線に着目する

† Free-Space Multistage Optical Interconnection Networks Using Lens Arrays by SHIGERU KAWAI (Pattern Recognition Res. Lab., C&C Information Technology Res. Labs., NEC Corp.).

†† 日本電気(株) C&C 情報研究所パターン認識研究部

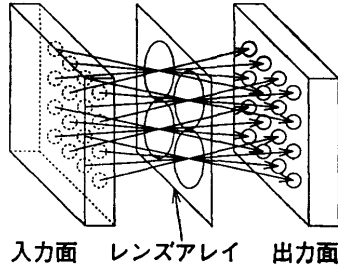


図1 レンズを用いた光配線

Fig. 1 Optical interconnection using a lens array.

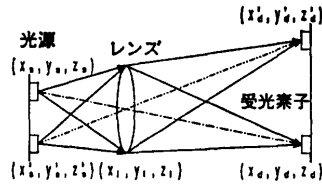


図2 配線の原理

Fig. 2 Principle of optical interconnection using a lens array.

と、図2に示すように、幾何学的に求めることができる。座標 (x_i, y_i, z_i) にある光源から出射した光が、座標 (x_d, y_d, z_d) にあるレンズに入射すると、光学系の横倍率（光源からレンズまでの距離に対するレンズから集光点までの距離に対する比）を m とすれば、

$$x_d = (1+m)x_i - mx_i \quad (1)$$

$$y_d = (1+m)y_i - my_i \quad (2)$$

$$z_d = (1+m)z_i - mz_i \quad (3)$$

で表される座標の位置に集光する。この位置に、受光素子を置けば、光源と受光素子の間で光で配線することができる。

1個のレンズを用いて、同時に複数本の配線を行う場合については、次のように考えることができる。光源と受光素子が、ピッチ p で配列されているとして、(1)~(3)式の条件に加えて、座標 (x'_i, y'_i, z'_i) にある光源から出射した光が、座標 (x_d, y_d, z_d) にあるレンズに入射して、座標 (x'_d, y'_d, z'_d) に集光すると仮定すると、 k, l を整数として、次の関係が得られる。

$$|x'_i - x_i| = kp \quad (4)$$

$$|x'_d - x_d| = lp \quad (5)$$

$$|y'_i - y_i| = k'p \quad (6)$$

$$|y'_d - y_d| = l'p \quad (7)$$

で表される。これらの式を用いて、

$$m|x'_i - x_i| = lp \quad (8)$$

$$m|y'_i - y_i| = l'p \quad (9)$$

の関係が得られる。したがって、

$$l = km \quad (10)$$

$$l' = k'm \quad (11)$$

の関係を満たすように、レンズを配置すれば、1つのレンズによって、2本の2次元的な配線が、同時に実現される。3本以上の配線についても同様に考えることができる。

2.2 従来の配線法への適用

ネットワークを構成する基本的な配線として、シャッフル配線が知られているが、この配線は、すでに、レンズを用いて光学的に実現されている⁸⁾。このほかに、バンヤン網¹⁵⁾を構成するバタフライ配線やクロスオーバー網¹⁶⁾の各段を構成する配線についても、レンズによって実現できる。以下に、レンズを用いて、シャッフル配線とバタフライ配線を光学的に実現する方法について述べる。

図3は、通常の4-シャッフル (N 個のエレメントを p のグループに分けるシャッフル配線を k -シャッフルと呼ぶ) の配線路を示したものである。図4は、これをレンズによって実現した従来例である。図において、一点鎖線は、主光線を表し、配線路に相当する。レンズを用いた光配線法は、空間を全く自由に配線できるわけではなく、必ずしも図3に示すような通常の配線路と同じように光で配線することはできない。図4に示した従来例では、出力の並びを入力と逆

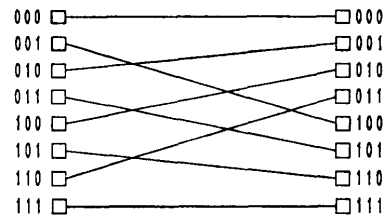


図3 通常の4-シャッフル配線

Fig. 3 Ordinary electric 4-shuffle exchange.

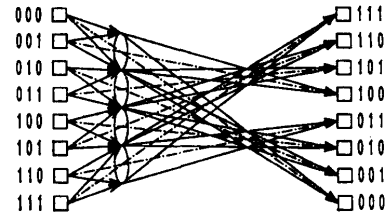


図4 レンズを用いた4-シャッフル光配線の従来例

Fig. 4 Previous example for optical 4-shuffle exchange using a lens array.

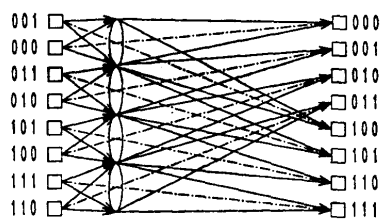


図 5 レンズを用いた新しい 4-シャッフル光配線
Fig. 5 New optical 5-shuffle exchange using a lens array.

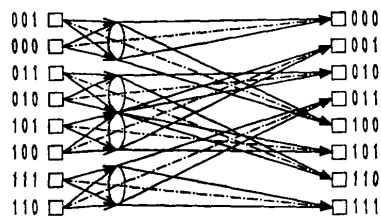


図 6 レンズを用いた新しいバタフライ光配線
Fig. 6 New optical butterfly exchange using a lens array.

の順序にすることによって、シャッフル配線を実現している。

一般に、シャッフルなどの配線を多段接続網で用いる場合には、各配線が、 2×2 以上のスイッチによって接続されている。図 5 は、このことに着目して、従来の配線の、奇数番目の配線と偶数番目の配線のスイッチの出力先を入れ替えたものである（クロス配線と呼ぶ）。このようにしても、レンズによってシャッフル配線が実現できる。この配線は、スイッチの出力先を入れ替えれば、通常の配線（ノーマル配線と呼ぶ）と等価である。

図 6 は、クロス配線法によって、大きさ 8 のバタフライ配線を実現した場合の主光線を記したものである。大きさの異なるバタフライ配線を組み合わせることによって、バンヤン網が構成される。

これらの図は、1 次元に配列された入出力の間の 2 次元の配線について記したが、実際には、2 次元に配列された入出力の間の 3 次元の配線を構成できる。

3. 新しいネットワーク

2 章で述べたように、点光源を仮定して、主光線に着目した理想の場合では、レンズの大きさやピッチを変えることによって、自由な配線が実現できる。しかし、実際には、光源が有限な大きさであるために像が大きくなり、受光量が小さくなる問題や、レンズの収差によって、レンズの中心を通らない光線が、所望

の位置に集光しない問題を考慮しなければならない。出力面における像は、レンズの横倍率の 2 乗に比例して大きくなるために、所望の受光素子へ入射する光のパワー密度を大きく、隣接する素子へ入射する迷光を少なくするためには、横倍率の小さい光学系が望ましい。また、一般に、光学系の収差は、レンズ径を等しくした場合には、物点の高さ（光配線の場合には、レンズの中心軸から光源までの高さに相当する）とともに増加するので、光源の位置が、レンズの中心軸に近い光学系が望ましい。例えば、2 章で述べたクロス配線法を用いれば、従来の光配線法に比べて、特に、ベースライン網¹⁷⁾に用いる 4-シャッフル配線において、主光線が、レンズの中心軸に近づき、収差が、大きく改善される。

今までに述べた配線法は、従来から知られているものをそのまま光に置き換えたものである。レンズを用いた光配線では、低収差で、横倍率の小さい光学系が理想的であるが、従来の配線法は、配線の数が増えると、無理な光学配置となって、収差や横倍率が大きくなりやすく、必ずしもレンズを用いた光配線には適していなかった。そこで、レンズに適した新しい配線法を検討した。

3.1 新しい配線法

図 7 は、低収差で、光利用率の高い配線を実現するための光学系を示したものである。このように、 r 枚のレンズによって s 組の配線を行う方法を r -クロスシャッフルと呼ぶ。この配線法をレンズで実現した場合

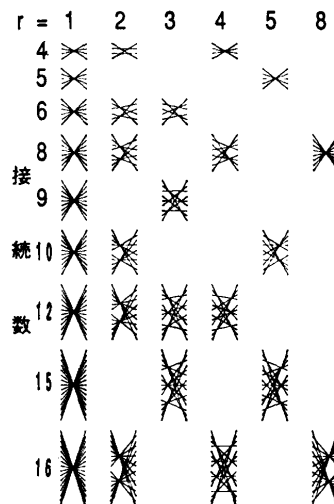


図 7 新しい光配線法
Fig. 7 New optical interconnection using a lens array.

合のレンズの位置 (x_i, y_i, z) は、次式で表される。

$$x_i = \begin{cases} \left\{ 2r-1 - \frac{2(s-r)}{r+1} \right\} \frac{a}{r-1} \left\{ 1 + \frac{\text{sgn}(i)}{2} \right\} & (r: \text{even}) \\ \left\{ 2r-1 - \frac{2(s-r)}{r+1} \right\} \frac{a \cdot \text{sgn}(i)}{r-1} & (r: \text{odd}) \end{cases} \quad (12)$$

$$y_i = \begin{cases} \left\{ 2r-1 - \frac{2(s-r)}{r+1} \right\} \frac{a}{r-1} \left\{ 1 + \frac{\text{sgn}(j)}{2} \right\} & (r: \text{even}) \\ \left\{ 2r-1 - \frac{2(s-r)}{r+1} \right\} \frac{a \cdot \text{sgn}(j)}{r-1} & (r: \text{odd}) \end{cases} \quad (13)$$

$$z = \frac{f(r+1)}{r} \quad (14)$$

ただし、

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & (x > 0) \\ 0 & (x = 0) \\ -1 & (x < 0) \end{cases} \quad (15)$$

この配線は、他の配線に比べて、光源の位置が、レンズの中心軸に近い光学系になっている。したがって、横倍率（この光学系の横倍率は r に等しい）の小さい配線によって、多段接続網が構成されれば、大きなネットワークに適用できる可能性がある。

3.2 新しい多段接続網

図8に、新しいセルフルーティングな多段接続網の構成を示す。このネットワークは、 $N \times N$ の接続に対して、 $n (= \log_2 N)$ 段から構成され、 k 段目の配線が、大きさ $N/(n-k-1)$ の2-クロスシャッフルになっている。ここで、奇数段目（図では1段目と3段目）はクロス配線、偶数段目（図では2段目）はノーマル配線によって構成されている。この方法は、各段の配線とも、常に、横倍率が2であるために、低収差の配線を実現できる。また、隣接するレンズによって、所望しない受光素子に結像する迷光は、光源とレンズの間を遮蔽することによって、除くことができ

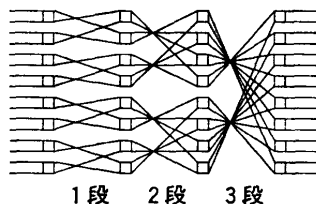


図8 新しい多段接続網のネットワーク構成図
Fig. 8 Diagram for new multistage interconnection network with self-routing function.

る。

4. レンズを用いた光配線の性能評価

2章および3章で述べたネットワークの議論は、理想的な場合であり、現実的には、レンズの収差や、横倍率による像の拡大などの影響で、クロストークや光利用率の低下などの問題が生じる。この章では、これらの影響を検討し、今回提案したネットワークと、従来から知られているネットワークの中からバンヤン網、オメガ網¹⁸⁾、ベースライン網、クロスオーバー網をレンズによって実現した場合の配線数の限界を評価する。

4.1 レンズの収差の影響

ネットワークを構成するレンズの収差を評価する1つの指標として、レンズ径に対する物点の高さの比を求めた。収差は、この値に比例するために、この値が小さいほど光利用率は高く、ノイズは小さくなる。図9は、2章および3章で述べた各光ネットワークの大きさに対して、この値を求めたものである。新しく提案したネットワークでは、オメガ網、クロスオーバー網に比べ、この値が小さく、低収差な光学系を実現できる。

4.2 像の拡大の影響

レンズを用いた光配線法は、隣接するレンズによる迷光の影響を避けるために、拡大結像にすることが望ましく、出力面における光源の像は、横倍率の2乗に比例して大きくなる。したがって、受光素子の大きさを固定して考えれば、横倍率が大きくなるに従って、光利用率が小さくなるとともに、素子のピッチ程度以上に像が拡大されれば、隣接する素子へ光が入射してノイズ光となる。図10は、無収差のレンズを想定して、各光ネットワークの大きさに対する光利用率の減少の様子を示したものである。受光素子の大きさを光源の大きさの10倍として、受光素子に入射するガウスビームの光量を求めた。新しく提案したネットワー

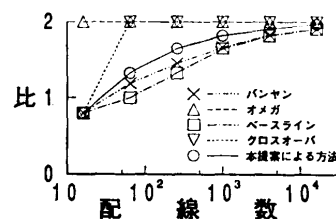


図9 レンズの収差の比較
Fig. 9 Comparison of lens aberrations.

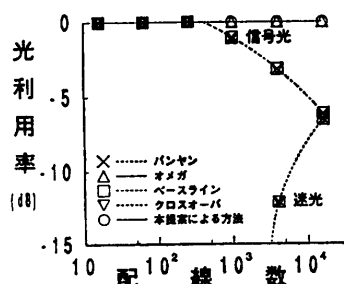


図 10 光利用率の比較

Fig. 10 Comparison of light power efficiency.

クの各光配線の横倍率は、ネットワークの大きさに依存せず、常に2であり、大きなネットワークに対しても、光利用率は一定である。受光素子のピッチを受光素子の直径の2倍にした場合に、隣接する素子へ入射する光の量を、図10に合せて示した。パンヤン、ベースライン、クロスオーバー網においては、配線数が 32×32 程度で影響が始め、 128×128 では、信号光とノイズ光の量が、ほとんど等しくなる。新しく提案したネットワークでは、横倍率の影響で、隣接する素子に光が入射することはない。

4.3 結像性能

ネットワークを構成しているレンズの収差を評価するために、両凸の単レンズから構成されるレンズアレイを想定し、レンズの光線追跡を行った。光線追跡では、点光源を仮定して、出力面上におけるビームの最小錯乱円の半径（ビームの拡がり）を求め、信号光と迷光の影響を計算した。図11は、開口数（NA：レンズの明るさ）が一定になるように、受光素子の大きさとピッチを調整して、2章と3章で述べた各ネットワークの中から、提案したネットワークとオメガ網、および、それ以外のネットワークの中で、最も収差の小さいパンヤン網に対する結果を示したものである。図12は、この時の入力面から出力面までの距離とレンズの半径を示したものである。図11より、提案したネットワークとオメガ網では、 128×128 程度で、迷光の影響が大きくなる。一方、パンヤン網では、配線数が大きくなっても、迷光の影響は少ないが、 64×64 程度で、入力面から出力面までの距離が、100 mmを越え、光配線の特長である高並列性、高速性を生かすことができない。

シミュレーションでは、単純な両凸レンズを仮定したが、実際に光学系を構成する場合には、結像性能の高いレンズアレイを用いることができるので、配線限界は、高められるものと思われる。

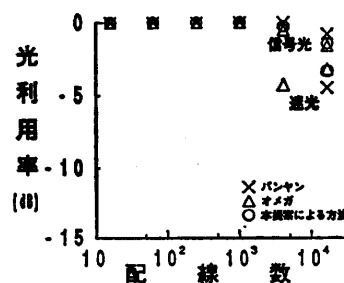


図 11 結像性能の比較

Fig. 11 Comparison of imaging characteristics.

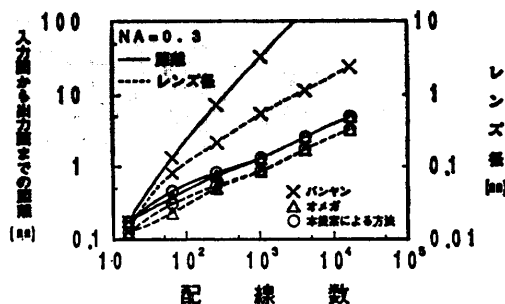


図 12 光学系の大きさの比較

Fig. 12 Comparison of size for optics.

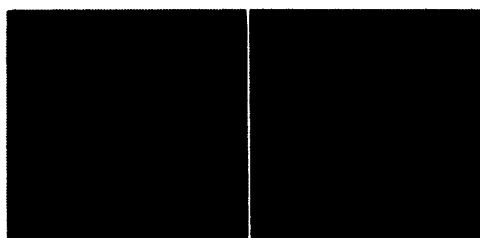
4.4 配線限界

これらの結果をまとめると、提案したネットワークとオメガ網での配線限界は、数万（ $128 \times 128 \sim 256 \times 256$ ）程度、その他のネットワークでは、1,000（ 32×32 ）以下と考えられる。オメガ網の段数が他の多段接続網よりも1段多く、提案したネットワークに比べて収差が大きいことを考えると、新しいネットワークは、レンズによる光配線に適していると考えられる。

5. 接続実験

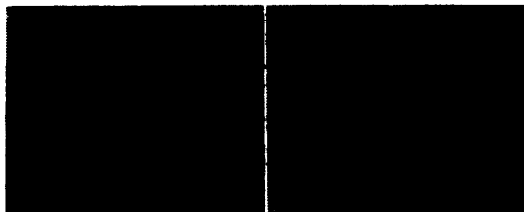
提案した光配線の原理を確認するために、3章で述べた規則で配置されている平板マイクロレンズアレイによる結像実験を行った。

プロセッサの数が多い場合には、それらを光配線するために、多数の光源、レンズ、受光素子が必要となる。これらを小さくモジュール化するためには、各素子が、100 μm 程度以下のピッチでアレイ状に集積されていることが望ましい。平板マイクロレンズは、厚さ600 μm のガラス板の中に、屈折率分布を持たせて、10 $\mu\text{m} \sim 1 \text{ mm}$ 程度の直径のレンズを形成したもので、このような用途に適している。提案した光配線法の原理を確認するために、平均62.5 μm と125 μm ピッチのレンズを試作し、その性能と結像パターンを評価した。



第1段目 (平均 61.25 μm) 第2段目 (平均 125 μm)

図 13 試作した平板マイクロレンズアレイ
Fig. 13 Planar micro lens array.



第1段目 第2段目

図 14 マイクロレンズによる結像パターン
Fig. 14 Imaging patterns using planar micro lens arrays.

図 13 は、試作した平板マイクロレンズの概観を示したものである。このレンズは、理論的な回折限界（ビームを収束できる限界）の 1.2 倍程度までビームを収束させることができ、光配線用のレンズとして十分な性能を有する。試作した平板マイクロレンズアレイを用い、31.25 μm ピッチで入力方面に配列されている 10 $\mu\text{m}\phi$ のパターンを結像した。図 14 は、第1段目と第2段目のレンズを用いて、パターンを結像させたもので、所望の配線を実現することができた。

6. 並列プロセッサのボード間配線への応用

6.1 実装化技術

空間伝播光を用いた配線では、光源、受光素子と配線のための光学部品の空間的な位置によって配線路が作られているので、これらの間の位置関係は、絶対的なものでなければならない。特に、光配線を電子デバイスが実装されているボード間の配線に用いる場合には、振動や熱によるボードの変形などの影響を考慮せねばならず、光素子と光学部品をモジュール化する技術が必要である。図 15 は、パンプの技術を用いて、これらを実装した場合の概念図である。光源アレイ、マイクロレンズアレイ、受光素子アレイが、それぞれの上に形成された半田などのパンプによって、

100 μm 程度の間隔で隣接して配置されている。パンプの技術は、電子回路の実装技術として確立されており、2つのチップを、数 μm 以下の精度で一体化することがきる。このようにモジュール化された光配線チップは、電子部品と同様に取り扱うことが可能である。面状に配列された電気的なスイッチを介して、これらを多段に接続することによって、3次元的なネットワークが構成される。

6.2 並列プロセッサ間の光配線

プロセッサやメモリの間を多段接続網で結合する場合には、配置できるプロセッサの数は、ネットワークの入出力数に等しい。一方ネットワークの各スイッチにプロセッサを配属する方法では¹⁹⁾、プロセッサの数は、スイッチの数に等しい。このような配置にすることによって、接続できるプロセッサの数を N から $N \log_2 N$ に拡大することができる。

このようなネットワークについても、通常のスイッチに、ボードに垂直方向の入出力を2組付加することによって、3次元に拡張することができる。図 16 は、このネットワークを3次元の各方向から眺めた図である。両端のボード間を空間伝播光で配線できないことと、パンパン網が双方向にセルフルーティングであることにより、各スイッチ間では双方向にデータが転送される構成になっている。この時の通信長は、 $N(\log_2 N)^2$ のプロセッサに対して、最大 $2(\log_2 N - 1)$ である。また、このように3次元構造にすることによって、ボード1枚当たりのプロセッサの数を変えずに、ボードを多層に配置して、従来、 $N \log_2 N$ 個であったプロセッサの数を、 $N(\log_2 N)^2$ に増やすことができる。

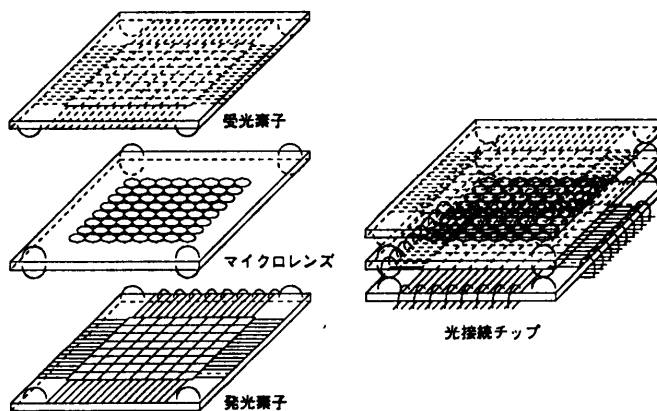


図 15 モジュール化の概念

Fig. 15 Optical interconnection module.

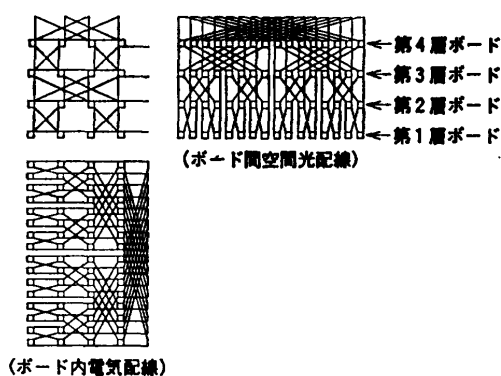


図 16 並列プロセッサの3次元光接続
Fig. 16 3-D optical interconnection networks between parallel processors.

7. おわりに

光は、自由空間を交錯して伝播できるために、大規模な配線を可能にする。特に、レンズを用いた光配線法は、構成が簡単で、光利用率が高いという利点を有する。光素子と光学部品の一体化してチップ状に実装すれば、素子間のずれの問題がなくなり、通常の電子デバイスと同じような配線チップが実現される。さらに、光素子を電子回路上に作ることができれば、光素子と電子回路の間の配線がチップ内で行われることになり、これらの間の配線の問題も解決される。このような空間型の光配線と平板ガラスなどを用いた導波型の2次元光バスを組み合わせれば、ボード内、ボード間にわたる大規模な光ネットワークが構築されるものと思われる。今後、面型光デバイスの集積化と、マイクロレンズの実装化技術の進歩が期待される。

実験に用いた平板マイクロレンズを試作していた日本板硝子(株)筑波研究所の及川主任研究員に感謝いたします。また、日頃御指導いただく、C&C情報研究所 飯沼所長、天満部長、溝口課長に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Kostuk, R. K., Goodman, J. W. and Hesselink, L.: Optical Imaging Applied to Microelectronic Chip-to-Chip Interconnection, *Appl. Opt.*, Vol. 24, No. 12, pp. 2851-2858 (1985).
- 2) McManus, J. B., Putnam, R. S. and Caulfield, H. J.: Switches Holograms for Reconfigurable Optical Interconnection: Demonstration of a Prototype Device, *Appl. Opt.*, Vol. 27, No. 16, pp. 4244-4250 (1988).
- 3) Kawai, S. and Kohga, Y.: Modified Signed-Digit Optical Adder Using Computer-Generated Holograms, *Conference Record, Topical Meeting on Optical Computing*, JSAP/ICO, Kobe, paper 11 B 4 (1990).
- 4) Jahns, J. and Murdocca, M. J.: Crossover Networks and Their Optical Implementation, *Appl. Opt.*, Vol. 27, No. 14, pp. 3155-3160 (1988).
- 5) Lin, S. H., Krile, T. F. and Walkup, J. F.: 2-D Optical Multistage Interconnection Networks, *Proc. SPIE*, Vol. 752, pp. 209-216 (1987).
- 6) Brenner, K. H. and Huang, A.: Optical Implementation of the Perfect Shuffle Interconnection, *Appl. Opt.*, Vol. 27, No. 1, pp. 135-137 (1988).
- 7) Sheng, Y.: Light Effective 2-D Optical Perfect Shuffle Using Fresnel Mirrors, *Appl. Opt.*, Vol. 28, No. 13, pp. 3290-3292 (1989).
- 8) Sawchuk, A. A. and Glaser, I.: Geometries for Optical Implementation of the Perfect Shuffle, *Proc. SPIE*, Vol. 963, pp. 270-282 (1988).
- 9) Kawai, S.: Free-Space Multistage Optical Interconnection Networks Using Lens Arrays, *Post-Deadline Papers Technical Digest, Topical Meeting on Photonic Switching*, IEICE/IEEE, Kobe, paper 14 D-1 (PD) (1990).
- 10) Goodman, J. W., Leonberger, F. J., Kung, S. Y. and Athale, R. A.: Optical Implementation for VLSI Systems, *Proc. IEEE*, Vol. 72, No. 7, pp. 850-866 (1984).
- 11) Guha, A., Bristow, J., Sullivan, C. and Husain, A.: Optical Implementations for Massively Parallel Architectures, *Appl. Opt.*, Vol. 29, No. 8, pp. 1077-1093 (1990).
- 12) Athale, R. A., Szu, H. H. and Friedlander, C. B.: Optical Implementation of Associative Memory with Controlled Nonlinearity in the Correlation Domain, *Opt. Lett.*, Vol. 11, No. 8, 482-484 (1986).
- 13) Kawai, S., Tashiro, Y., Ogura, I. and Kasahara, K.: Optical Crossbar Interconnection with Self-Addressing, *Conference Record, Topical Meeting on Optical Computing*, JSAP/ICO, Kobe, paper 10 E 7 (1990).
- 14) Oikawa, M., Okuda, E., Hamanaka, K. and Nemoto, H.: Integrated Planar Microlens and Its Applications, *Proc. SPIE*, Vol. 898, pp. 3-11 (1988).
- 15) Goke, L. R. and Lipovski, G. J.: Banyan Networks for Partitioning Multiprocessor Systems, *Proc. 1st Annual Symp. on Computer Architecture IEEE/ACM*, Florida, pp. 21-28 (1973).
- 16) Jahns, J. and Murdocca, M. J.: Crossover Networks and Their Optical Implementation,

- Appl. Opt.*, Vol. 27, No. 15, pp. 3155-3160 (1988).
- 17) Wu, C. and Feng, T.: On a Class of Multi-stage Interconnection Networks, *IEEE Trans. Comput.*, Vol. C-29, No. 8, pp. 694-702 (1980).
- 18) Lawrie, D. H.: Access and Alignment of Data in an Array Processor, *IEEE Trans. Comput.*, Vol. C-24, No. 12, pp. 1145-1155 (1975).
- 19) 小池, 大森, 佐々木: 論理シミュレーションマシンのハードウェア構成, 情報処理学会論文誌, Vol. 25, No. 8, pp. 873-881 (1984).

(平成2年8月20日受付)

(平成3年1月11日採録)



河合 滋 (正会員)

1958年生. 1981年埼玉大学理学部物理学科卒業. 1983年筑波大学大学院修士課程修了. 同年日本電気(株)中央研究所入社. 現在 C & C 情報研究所パタン認識研究部勤務. 著書「Optical Computing in Japan (共著)」。主に, 光コンピューティング, 光インタコネクション, 並列計算機, ニューラルネットワークの研究に従事. 電子情報通信学会, 応用物理学会, 日本光学会, 日本物理学会, 米国光学会各会員.