

パターン認識用並列イメージプリプロセッサ

村重仁勇 秋葉 敦 伊賀健一
東京工業大学 精密工学研究所

パターン認識など、大容量、高速性が要求される処理において有効な手段として並列処理が期待されている。それに必要な並列入力インターフェイスとして、画像複製系を用いる光学的イメージプリプロセッサが最も有力なものの一つであると考えられる。

そこで我々は、従来の光学的なイメージ複製系で問題点となっていた、大形化、機械的な不安定性などを解決できる平板マイクロレンズアレーを用いる光学的Walsh直交展開系を提案し、そのパターン認識への応用について研究を進めてきた。この方法によると将来、高密度集積が可能で積層集積に適する平面構造を持っており、かつ、インコヒーレント光にも適応できる。

本論文では、提案した系による光並列処理のための基礎的な検討として、単一の平板マイクロレンズを用いたWalsh展開実験を行い、これが精度良く行なえることを見いだした。さらに、文字認識への適用についても数値シミュレーションにより検討し、入力回転については $\pm 5^\circ$ が許容され、平行移動(横ずれ)についてもテンプレートマッチングより良好な結果が得られることを確認した。

Parallel Image Preprocessor for Pattern Recognition

Kimio Murashige, Atsushi Akiba, and Kenichi Iga
Tokyo Institute of Technology
Precision and Intelligence Lab.

The parallel processing is expected as a powerful method for high speed pattern recognition. It is considered that an image preprocessor consisting of an optical image multiplexer (IMX) is effective for a parallel input interface.

We have suggested an optical Walsh orthogonal expansion system using a planar microlens (PML) array for pattern recognition. The PML array can be highly integrated and has a flat surface which is suitable for stack integration. The PML arrayed IMX is free from mechanical instability and operated under incoherent light.

In this paper, we made a preliminary experiment of optical Walsh expansion using an planar microlens array to investigate an achievement of optical parallel processing by a proposed system. We demonstrated a pattern recognition with a computer simulation. We have made clear that $\pm 5^\circ$ rotation of an input pattern is tolerant. It is found that against transverse shift the Walsh expansion is more tolerant than by template matching.

1. はじめに

パターン認識など高速性が要求される処理においては、従来の逐次処理に期待されている。ここでこれらの並列処理系の効率的な利用を考えると、入力部分でのデータを速やかに取り入れるために、入力インターフェイスとしても並列的に動作する系が必要となる。さらにその入力インターフェイスが前処理系としての機能を持ち、後段に連なる並列処理系が扱いやすい形にまで入力情報を変換することができればより効率的な並列処理系の利用が可能となるであろう。

特にイメージ情報は、それが光情報である点から光学系でプリプロセッサを構成できれば、情報への整合性、処理の高速性という点においてすぐれ、入力画像を多数複製し、その各々に並列的に処理を行う方法が有力である。ここで、光学的なイメージ複製系 (Image Multiplexer : IMX) がキーデバイスとして必要不可欠であり、いくつかのものが提案されている [1-4]。しかし、それらのほとんどは、その大きさが、機械的な不安定性、さらにこれらが主にコヒーレント光の使用を前提としていることから、その利用が制限されていた。一方、Glaserによって、レンズアレーを用いるインコヒーレントイメージ複製系が提案され、レンズの特性の向上によってはコヒーレント系にまさる処理能力が得られることが示唆されている [5,6]。

我々は、並列光通信や並列光情報処理用の素子として、高い密度で集積が可能で積層集積に適する平面構造を持つ平板マイクロレンズアレーを提案し研究を進めてきた [7,8,9]。これがインコヒーレント照明された物体に対して、それ単体でイメージ複製機能を示すことが知られていたが [10]、最近の研究によってその結像特性が比較的良好なものであることが確認され、イメージ複製系として有効であることが確認されはじめた [11,12,13]。さらに、

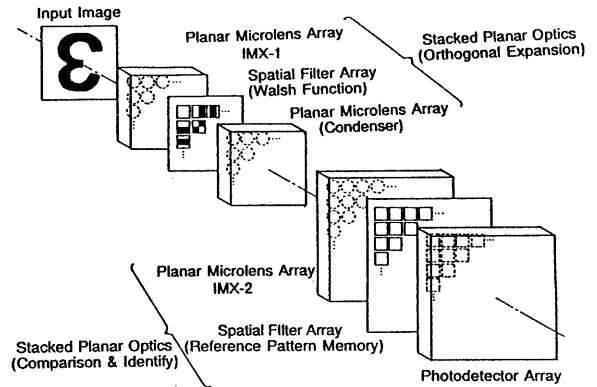


図1 Walsh直交展開法に基づくイメージ前処理系

これを用いて処理の高集積化や階層化を行うことにより、新しい光学系の機能を拡張できる。このような背景から、平板マイクロレンズアレーを用いる光学的Walsh直交展開系を提案し、研究を進めてきた [13,14]。

本論文では、提案した系による光並列処理のための基礎的な検討として、単一の平板マイクロレンズを用いたWalsh直交展開実験を行い、その精度を調べる。さらに、この系の文字認識への適用を数値シミュレーションにより検討し、入力回転、平行移動などに対する適応能力を明かにする。

2. 平板マイクロレンズアレーを用いるイメージ前処理系

図1に平板マイクロレンズアレーを用いるイメージ前処理系を示す。この系は、平板マイクロレンズアレーによる画像複製系とその各々の複製画像に対して独立に光学マスク処理を行う系を基本構造として、これが2段に従属接続された構成となっている。

まず、前段の基本構造についてその動作を説明する。インコヒーレント照明された入力イメージは、平板マイクロレンズアレーによって多数複製される。その各々に空間マスクが作用することでイメージに対する並列処理が実現される。図2に平板マイクロレンズ

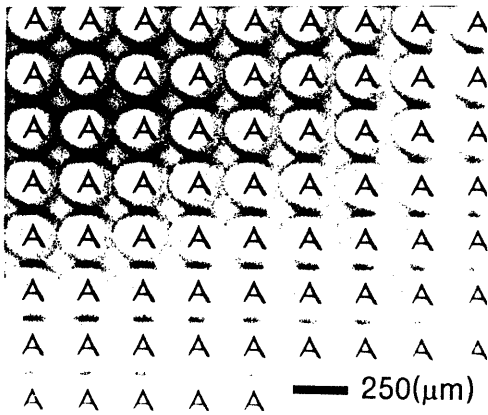


図2 平板マイクロレンズアレーによって複製されたイメージアレー

アレーによって複製されたイメージアレーを示す。ここで、空間マスクとして、2値イメージである文字情報の取り扱いを目的として、2値からなる直交関数系である2次元Walsh関数系[5,15]を採用した。任意の2次元画像 $f(x,y)$ はWalsh関数 $W_{ij}(x,y)$ を用いると以下のように展開できる。

$$f(x,y) = \sum_{i,j=0}^{\infty} w_{ij} W_{ij}(x,y) \quad (1)$$

図3に4次までの関数パターンを示す。この関数 W_{ij} は正規直交系をなし正負の2値を持つので、0と1の透過率を持つ2枚の光学マスクを用いる方法[16]でインコヒーレント照明下でこの関数を実現する(図4)。

また、後段において用意されている空間マスクは、系への入力が見込まれるイメージに対応したWalsh展開後の光量分布に一致する。つまり、Walsh展開されたイメージのメモリーとなっている。そして、これらのマスクを、対応する入力イメージが入力されたときに最大の透過光量を与える様に用意すれば、その出力間で大小比較をすることのみで入力パターンを判定することができ、イメージ認識系として動作する。ただし、最大値の検出を行うには、この後段の空間フィルタを透過し

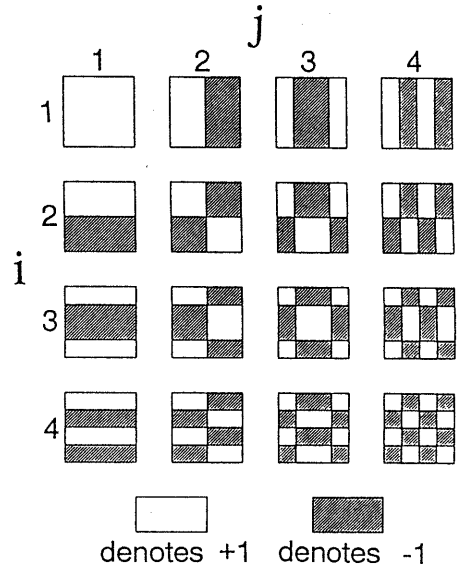
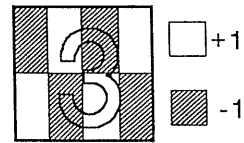


図3 2次元Walsh関数パターン

Dual Mask Method

Bipolar Function Mask



2 Positive Masks

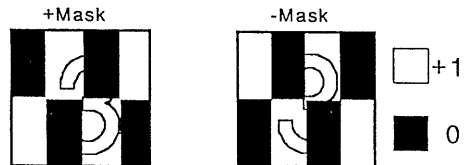


図4 2マスク法による負値の実現

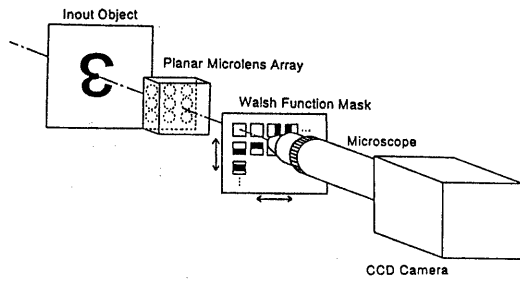


図5 光学的Walsh展開実験系（逐次処理）

た光をフォトダイオードのような光電変換器によって電気信号に換えた後に電気的に行うことを想定している。さらに光学系が続く場合は、光学的なリピータの挿入によってそれが可能となるであろう。

我々の提案した系では、光処理部分によって、フェムト秒程度までの高速処理が行えると推測される。

3. 光学的Walsh展開

ここでは、並列Walsh展開光学系を実現するための基礎的実験として、レンズアレイ中の単一のレンズによる結像に順次展開マスクを作用させその透過光量を計測し逐次的に光学的Walsh展開を行いその精度について検討する。

3.1 光学実験

図5に実験系を示す。入力物体として"0"から"9"までの10個の数字パターンを用いた。数字パターンは、ミニコピーフィルムを用いた写真縮小によって透過スライドとして用意した。これを、後方からインコヒーレント光で透過照明されている拡散板に張り付け、入力イメージとした。これを、平板マイクロレンズアレイ中の1つのレンズによって結像する。実験に用いた平板マイクロレンズの基本特性を以下に示す。

直径 : 0.84 mm
 焦点距離 : 1.92 mm

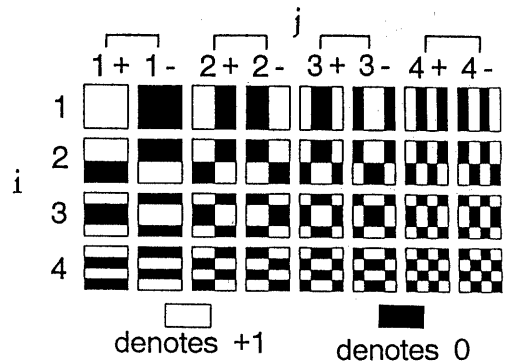


図6 2マスク法に基づくWalsh展開マスク

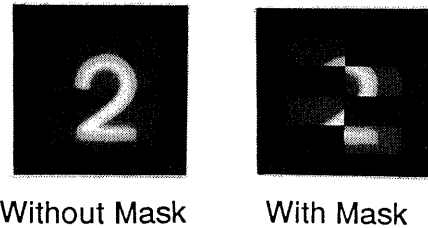


図7 空間フィルタリングされた入力イメージ

NA : 0.21

入力イメージとレンズ間の距離は約38mmで、スライド上のイメージの高さは、どの数字に対しても約8.5mm、結像面では約0.4mmの高さを持つことから、結像倍率は約0.05倍である。

この像に順次各次数のWalsh関数マスクを作用させる。今回、1次から4次までの次数について、先に述べた2マスク法に基づいて32種類のマスクを製作した。マスクの製作方法は、入力イメージの製作法とほぼ同様で記録媒体によりコントラストが大きくとれ、解像度にも優れるコンカ高分解能プレートを用いた。図6に実験に用いたWalsh関数マスクパターンを示す。各次のWalsh関数マスクは一辺が約0.54mmの長さを持ち、ほぼレンズの直径に内接する。

図7に空間フィルタを通過した入力イメージの例を示す。光量の測定は、図7の様な光学マスク透過後の光パターンをCCDカメラ上に結像した後、コンピュータ内のイメージメモリに取り込み、各ピクセルの値を足し合わせることで定量化した。2枚のマスクからWalsh関数の正負の部分に対応した透過光強度が得られるので、それらを引算してWalsh展開係数を求めた。得られた、Walsh展開係数の例としてパターン"3"に対するの係数を図8に示す。

3. 2 シミュレーションによる実験結果の評価

得られた実験結果を定量的に評価するために、数値シミュレーションを行った。光学実験で用いた入力イメージ10個をCCDカメラでデジタル化し、理想的な2値入力画像を用意した。これを、数値的にWalsh展開して展開係数を求めた。ここで、マスクに対する入力イメージの大きさや、その位置などの条件は実験時と等しくなるように調整してある。図8に示したパターン"3"の実験による展開行列に対応するシミュレーション結果を図9に示す。

実験結果の評価法として、実験とシミュレーションで得られた展開行列間に相互相関を適用した。実験による展開係数を w_{ij} とすると、相互相関値Rは次式で定義される。なお、シミュレーションの場合も同様の式で表される。

$$R = \frac{\sum_{i,j} w_{ij} \cdot \bar{w}_{ij}}{\sqrt{\sum_{i,j} w_{ij}^2 \cdot \sum_{i,j} \bar{w}_{ij}^2}} \quad (2)$$

式(1)において、 w_{ij} と \bar{w}_{ij} が完全に同じであれば、 $R = 100\%$ となる。これを、"0"から"9"の10個の入力イメージについて計算した結果を図10に示す。ほぼ全ての入力に対して、99%以上の相関度がとれていることから、光学的に精度よくWalsh展開が行われ得ることが確認された。

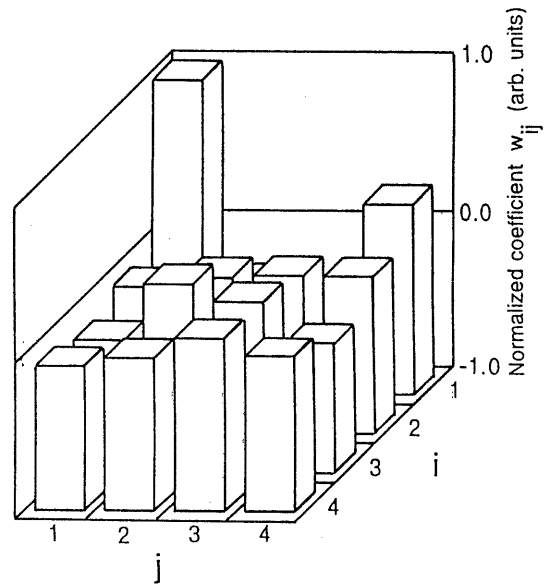


図8 光学的実験で得られた"3"のWalsh展開係数

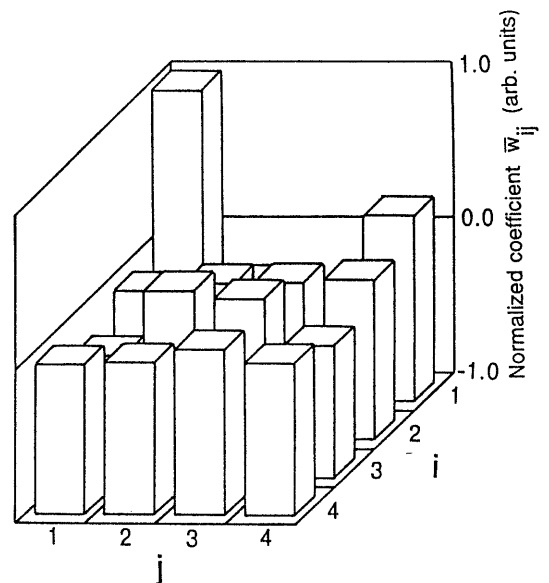


図9 シミュレーションで得られた"3"のWalsh展開係数

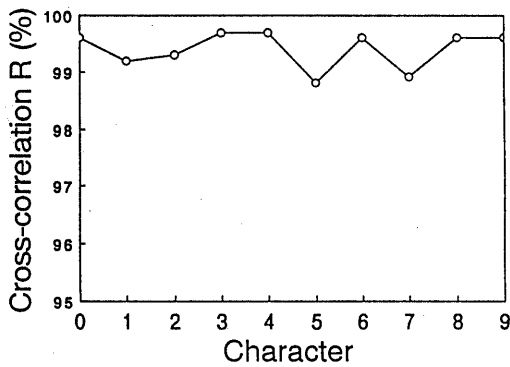


図10 実験結果とシミュレーション結果との比較

4. Walsh展開の文字認識への適応性の検討

ここでは、前節で述べたシミュレーションによるWalsh展開データを用いて、Walsh展開の文字パターン認識への適応性について検討する。

検討に用いた入力イメージはこれまでの検討同様"0"から"9"の10個の数字パターンである。

4.1 4次係数まででの評価

まず、実験で行ったのと同じ4次までのWalsh展開係数を用いて、異種文字のWalsh展開行列間で相互相関値を求める。異なる文字間での相互相関は式(1)と同様に、次のように定義される。例として、文字"3"と文字"5"の間での相互相関を考える。各々の文字のWalsh展開係数行列の要素を $w_{ij}^{(3)}$, $w_{ij}^{(5)}$ とする。

$$R_{3,5} = \frac{\sum_{ij} (w_{ij}^{(3)} \cdot w_{ij}^{(5)})}{\sqrt{\sum_{ij} w_{ij}^{(3)2} \cdot \sum_{ij} w_{ij}^{(5)2}}} \quad (3)$$

ここで、自分自身との相互相関は100%となる。

同時に、入力イメージが $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$ 回転した場合のWalsh展開行列についても同様の計算を行った結果、異なるパターン間で最も相互相関値が接近するのは、"6"と"8"の99.8%であるが、 $\pm 5^\circ$ までの入力の回転に対して

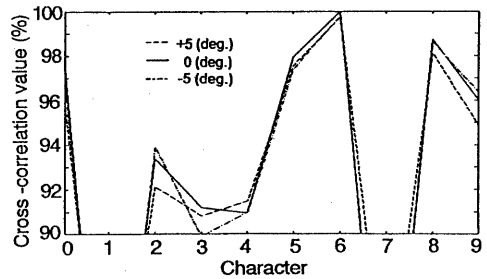


図11 4次までの展開係数を用いた文字間相互相関:使用係数16個, 基準パターン"6"

も自分自身との相互相関値と他のものとのが反転することはないことがわかった。従って、4次までの係数を全て相関計算に用いた場合には、入力に角度ずれが $\pm 5^\circ$ 程度ある場合にも、これら10個の数字パターンを認識できると結論できる。また、パターン"5", "6", "8"の間で、相互相関値が100%に接近しており分離しにくいことがわかった。図11に最悪値として、"8"と各文字パターン間での相互相関値を示す。

4.2 係数間での分散を用いた利用係数次数の最適化

次に、相関値が100%に接近している"5", "6", "8"について、8次までの64個の展開係数について、異なる文字間の各次数の係数間で次式で表される分散 v_{ij} を計算した。ここでは、各文字のWalsh展開係数を $w_{ij}^{(5)}$, $w_{ij}^{(6)}$, $w_{ij}^{(8)}$ とした。

$$v_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=5,6,8} (w_{ij}^{(k)} - \mu_{ij})^2 \quad (4)$$

ここで、 μ_{ij} は

$$\mu_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=5,6,8} w_{ij}^{(k)} \quad (5)$$

であり、各次数の係数の異なるパターン間での平均値である。

その後、その中から、分散 v_{ij} が大きな上位25個の次数を選び出し、それらの係数を用いて各文字間の相関値を

計算した。図12にその結果を表す。また、図13に最悪値としてパターン"6"について8次までの係数要素をすべて用いたときの相関値を示してある。

これらを見比べると、分散によって特徴的な係数を抽出した場合、利用係数の数が半分以下であるにもかかわらず、相関係数間での分離がよくとれており、入力パターンの回転角が $\pm 5^\circ$ の場合でも、相関値の差が5%以上とれ、95%に固定したしきい値で、良好に認識が行えることが確認された。

また、入力パターンに横ずれがある場合にも関数マスクの大きさの2.4%まで相関値の差が5%以上とれることが確かめられた。さらにこのとき、横ずれ量が大きい時に最適な係数要素を用いればそれよりも小さいずれに対応できることもわかった(図14)。また、この2.4%の横ずれがある場合に分散によって選択された要素からWalsh展開次数(1,1)の要素を取り除き、相互相関値を求めた。その結果、テンプレートマッチングによる方法よりも相関値の差が大きくとれることも確認された(図15)。ここでも最悪のケースとしてパターン"6"を用いた。

5. むすび

本研究では、並列処理装置の入力インターフェイスとして働く微小光学系を用いる並列プリプロセッサの検討を行い、次の結論を得た。

(i) 光学的Walsh展開方式を並列プリプロセッサの有用な構成例として検討し、光学実験により精度よく展開が行えることを確認した。また、

ii) Walsh直交展開の文字認識への適用を試み、認識に必要な展開次数は最低4次まで、また、回転に対する対応能力は $\pm 5^\circ$ まで、および、横ずれに対しては2.4%までという一つの限界を明かにした。

さらに、今後のパターン認識用並列プリプロセッサの発展を考えると、並列システムへの入力インターフェイスとしての用途の他にも、それ自体機能性を持ちシステムへの発展の可能性があると考えられる。特に大規模並列素

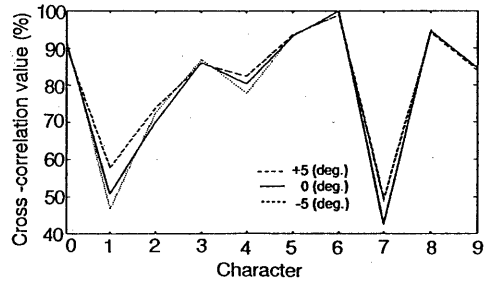


図12 係数間での分散によって使用係数を選んだ場合の文字間相互相関:使用係数25個, 基準パターン"6"

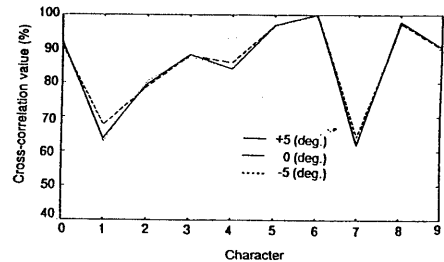


図13 8次までの展開係数を用いた文字間相互相関:使用係数64個, 基準パターン"6"

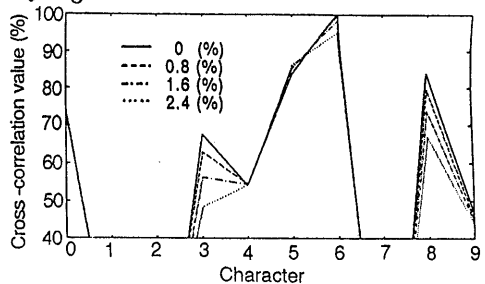


図14 入力パターンに横ずれがある相互相関場合の文字間相互相関:使用係数24個, 基準パターン"6"

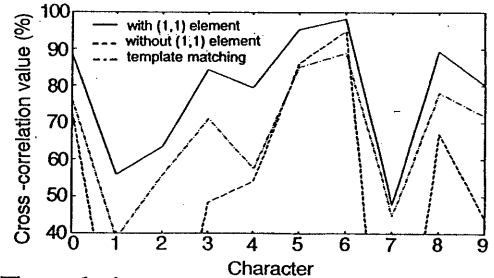


図15 入力パターンに横ずれがある場合の文字間相互相関の比較:基準パターン"6"

子による，光並列処理の多重にわたる階層化や並列化によって，受動素子のみからなる光処理系の機能が拡大されるであろう。これらは能動素子を用いないことから超高速処理への応用に期待を持つことができ，特定の用途には非常に有効に働くことが期待される。

謝辞 日頃ご指導頂く本学末松安晴学長に感謝する。御意見，御討論，御援助を頂いた日本板硝子(株)小泉健筑波研究所長，西沢紘一，岸本隆，及川正尋，浜中賢二郎，根本浩之各氏に感謝する。貴重な御意見，御討論を頂いた茨城大学安久正紘教授に感謝する。

参考文献

- [1] L. P. Boivin: "Multiple Imaging Using Various Types of Simple Phase Gratings," *Appl. Opt.*, **11** (1972) 1782-1792.
- [2] H. Machida, J. Nitta, A. Seko and H. Kobayashi: "High-efficiency Fiber Grating for Producing Multiple Beams of Uniform Intensity," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 330-332.
- [3] J. C. Kirsch, D. A. Gregory, T. D. Hudson and D. J. Lanteigne: "Design of Photopolymer Holograms for Optical Interconnect Application," *Opt. Eng.*, **27**, 301(1988)
- [4] K. Hamanaka and T. Kishimoto: "Multiple Imaging multiple Fourier transformation using microlenses arrays," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29** (1990) L1277-L1280.
- [5] I. Glaser: "Noncoherent parallel optical processor for discrete two-dimensional linear transformation," *Opt. Lett.*, **5** (1980) 449-451.
- [6] I. Glaser: "Lenslet array processor," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 1271-1280.
- [7] M. Oikawa, K. Iga, T. Sanada, N. Yamamoto and K. Nishizawa: "Array of distributed index planar microlenses prepared from ion exchange technique," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20** (1981) L296-L298.
- [8] M. Oikawa, K. Iga and T. Sanada: "Distributed index planar microlens array prepared from deep electro migration," *Electron. Lett.*, **20** (1981) L51-L54.
- [9] K. Iga, M. Oikawa, S. Misawa, J. Banno and Y. Kokubun: "Stacked planar optics: an application of the planar microlens," *Appl. Opt.* **21** (1982) 3456-3460.
- [10] M. Oikawa and K. Iga: "Distributed index planar microlens," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 1052-1056.
- [11] S. Misawa and K. Iga: "Estimation of a planar microlens by oblique ray tracing," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 480-485.
- [12] K. Hamanaka, H. Nemoto, M. Oikawa and E. Okuda: "Aberration properties of the planar microlens array and its applications to imaging optics," *proceedings of SPIE*, **1014** (1989) 58-65.
- [13] A. Akiba and K. Iga: "Image multiplexer using planar microlens array," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 4092-4097.
- [14] A. AKiba and K. Iga: "An optical lpreprocessor using planar microlens array based on Walsh transformation method," *Third optoelectronic conf.*, Chiba, no. 12B4-10, 1990.
- [15] 谷萩隆嗣，デジタル信号処理の理論2，(コロナ社，東京，1985)。
- [16] W. Swindell: "A noncoherent optical analog image processor," *Appl. Opt.*, **9** (1970) 2459-2469.