

研究

平板マイクロレンズアレーを用いる微小光学イメージ
前処理系の基礎的検討

秋葉 敦・村重 仁勇・伊賀 健一

東京工業大学精密工学研究所 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1991年2月23日受付, 1991年5月20日受理)

Fundamental Study on a Microoptic Image Preprocessor
Composed of Planar Microlens Array

Atsushi AKIBA, Kimio MURASHIGE and Kenichi IGA

Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology,
4259, Nagatsuta, Midori-ku Yokohama 227

(Received February 23, 1991; Accepted May 20, 1991)

An optical parallel preprocessor based on image multiplexing scheme is proposed for an all optical pattern recognition subsystem. The preprocessor employs a parallel Walsh expansion with a combination of a spatial mask array and a duplicated images produced by an image multiplexer (IMX) composed of a planar microlens array. A preliminary experiment on optical Walsh expansion has been performed and the experimental result was evaluated by comparing with a numerical simulation through the cross-correlation. From the result, it is found that the expansion can be achieved with high accuracy with the system. Also the capability of Walsh expansion for character pattern recognition is demonstrated by a numerical simulation. Allowable rotation and transverse shift of input images are derived.

1. はじめに

イメージ情報など大きな情報量を持つ多次元情報の高速処理への要求に対して、従来の逐次処理に代わる有効な手段として並列処理が期待されており、特にパターン認識など高速性が要求される部分で期待が持たれている。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の滞りをさけるために、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考えられる。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性を持ち、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、より効率的に並列処理系を利用することができると思われる。

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することが、情報への整合

性、処理の高速性から有用であると考えられる。ここで、光学系によるイメージプリプロセッサを考えた場合に、入力画像を多数複製し、その各々に並列的に処理を行うという方法が一つの有力な方法として考えられる。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る。従来、光学的なイメージ複製系としてはいくつかのものが提案されているが¹⁻⁵⁾、その大きさ、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^{6,7)}。

われわれは、並列光通信や並列光情報処理用の素子として、高集積可能、積層集積に適する平面構造などの特

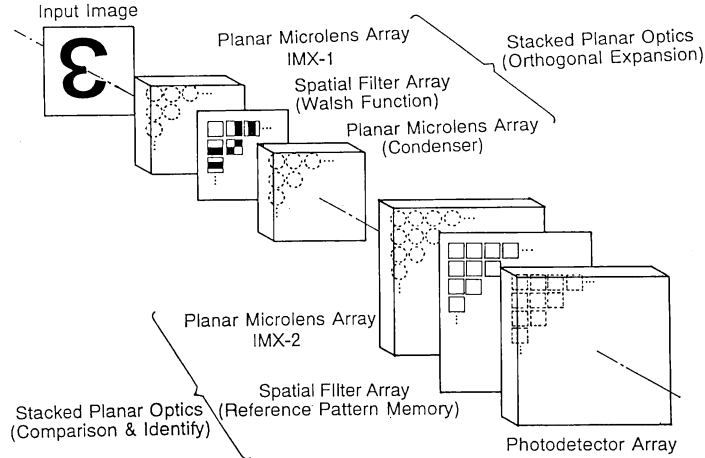


Fig. 1 An optical parallel preprocessor based on orthogonal Walsh expansion method by using a planar microlens array IMXs.

徴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⁸⁻¹⁰⁾。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¹¹⁾、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¹²⁻¹⁴⁾。これを用いて処理の高集積化や階層化を行うことで、従来にない光学系の機能性の拡張を行える可能性がある。このような背景から、特にパターン認識への応用を考え、より小型で、高性能なイメージ前処理系を実現することを目標に、この平板マイクロレンズアレーによるイメージ複製系と2次元 Walsh 関数マスクからなる並列イメージ Walsh 直交展開系を提案し、研究を進めてきた^{14,15)}。

本論文では、提案した系による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、光学的に精度よく展開が行えることを確認した。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らかにした。

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

Fig. 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。**Fig. 2** に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、直交関数系である2次元 Walsh 関数系^{6,16)}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。

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

Fig. 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、インコヒーレントにこれを実現するために、また、各次数の関数を表すために、0と1の透過率を持つ2枚の光学マスクを用いる方法¹⁷⁾をとった。これは、2値イメージに整合性がよい2値関数であり、幾何学的に簡単に準備が

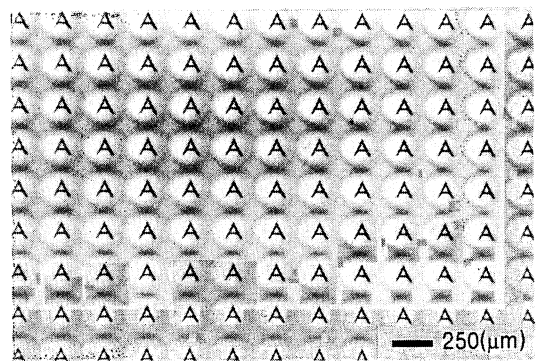


Fig. 2 Duplicated image array by using a planar microlens IMX.

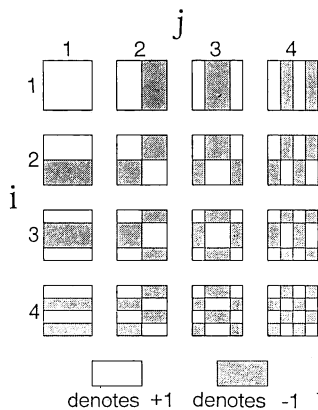


Fig. 3 2D Walsh function pattern up to 4th order.

しやすい点などが利点である。その実現の仕方の概念図を Fig. 4 に示す。実際の Walsh 展開係数を求めるためには、関数の正值と負値に対応するマスクの出力間で引算を行わなければならないが、全体としての情報量は保存されている。最終的には、各マスクを透過した光量が各々集光され、入力イメージの Walsh 展開係数を反映した光強度分布が得られる。

つぎに後段であるが、基本的な動作は前段の系と同じである。前段によって得られた強度分布が後段の平板マイクロレンズアレーによって複製され、その各々に空間マスクが作用する。ここで異なるのは、後段において用意されている空間マスクは、系への入力が予想さ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

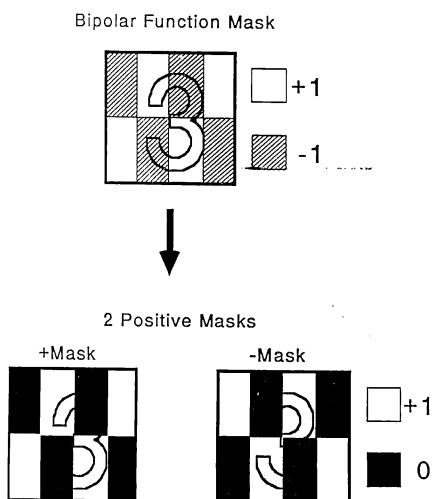


Fig. 4 Realization of negative value by using dual mask method.

点である。つまり、Walsh 展開されたイメージのメモリーとなっている点である。そして、これらのマスクを、対応する入力イメージについて最大の透過光量を与えるように用意すれば、その出力間で大小比較をすることのみで入力イメージがどのメモリーに最も似ているか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氣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、光サイリスタや発光ダイオード等を組み合わせた光学的なリピータの挿入によってそれが可能となると考えられる。

これに類似する系としては、Agu らによって提案されたマッチドフィルタを前処理系とするニューラルネットワークパターン認識系が、生物の視覚認識系のモデルとして提案されている¹⁸⁾。この系は、特徴抽出部分を光学的にマッチドフィルタを用いて実現し、その出力を電氣的なニューラルネットワークで統合比較してパターン認識を行おうとするもので、われわれが提案している系とは全処理系に占める光処理の割合が異なる。われわれの提案した系では、光処理部分によって、原理的にはフェムト秒程度までの高速処理が行えると考えられる。

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、レンズアレー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逐次各次数のマスク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

Fig. 5 に実験系を示す。入力物体としては“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、ミニコピーフィルタ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ー中の一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
- NA : 0.21

入力イメージとレンズ間の距離は約 38 mm 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 8.5 mm、結像面では約 0.4 mm の高さを持つことから、結

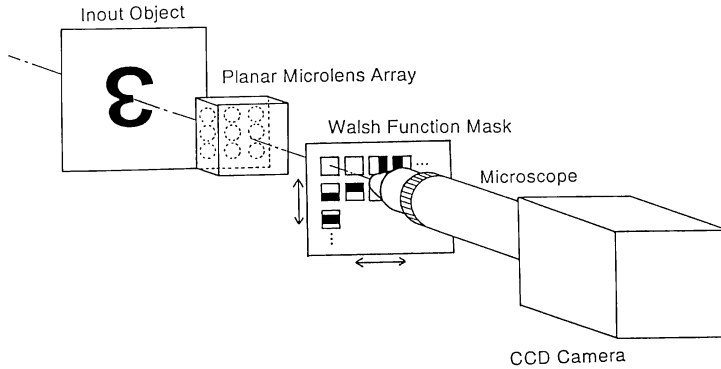


Fig. 5 An experimental system for preliminary optical Walsh expansion.

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 $2 \times (4 \times 4) = 32$ 種類のマスクを製作した。Fig. 6 に実験に用いた Walsh 関数マスクパターンを示す。2マスク法に基づく正のマスクと負のマスクはこの図のような配置をその一例とする。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ニカハイレゾリューションプレートを用いた。各次の Walsh 関数マスクは一辺が約 0.54 mm の長さを持ち、ほぼレンズの直径に内接する寸法である。

Fig. 7 に空間フィルタリングされた入力イメージの例を示す。光量の測定は、Fig. 7 のよう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。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。

結果として得られた、Walsh 展開係数の例としてパターン“3”の係数を Fig. 8 の実線で示す。

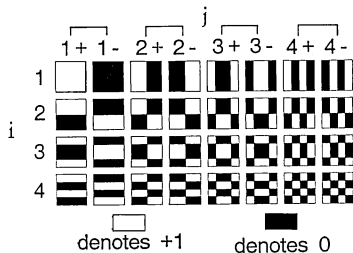
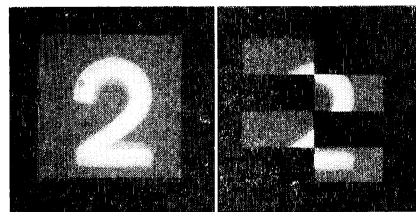


Fig. 6 Prepared Walsh function masks based on the dual mask method.



(a) without filter (b) with filter

Fig. 7 An example of filtered image. A function mask ($i=4, j=2, \text{sign}=+$ in Fig. 6) is utilized.

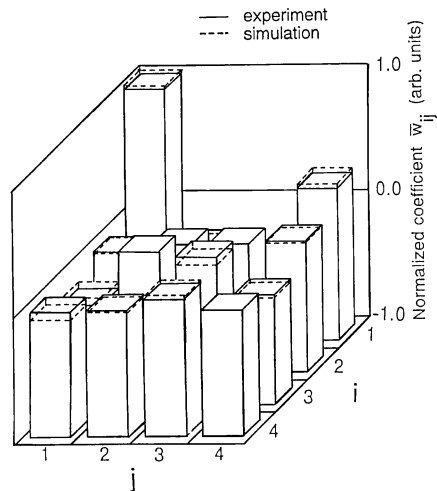


Fig. 8 Experimentally and numerically obtained normalized Walsh expansion coefficient matrices of numeral “3.”

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値画像を数値的に用意した。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。Fig. 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 Fig. 8 の破線で示す。

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。相互相関は正規化を除けば積と和のみによって計算でき、インコヒーレント光学系で容易に行えることから、将来の光学的なデータ照合系のシミュレーションの意味からも採用した。実験による展開係数を w_{ij} 、シミュレーションによる展開係数を \bar{w}_{ij} とすると、相互相関値 R は次式で定義される。

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

これは、各係数が直交関数で展開されていることを考えれば、二つのベクトルの内積を計算していることとなり、パターン認識の分野での単純類似度¹⁹⁾に相当する。

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 Fig. 9 に示す。ほぼすべての入力に対して、99%以上の相関度がとれている。この結果から、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。

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次数である4次までの

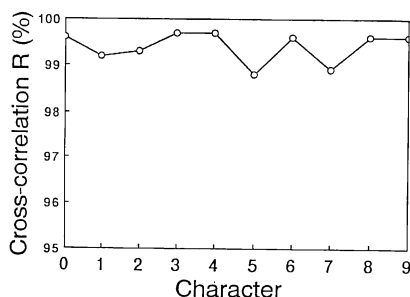


Fig. 9 Cross-correlation value between experimentally and numerically obtained Walsh expansion coefficient matrices.

Walsh 展開係数を用いて、異なる文字の 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。

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

当然、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。その結果、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98.8%であるが、 $\pm 5^\circ$ までの入力の回転に対しても自分自身との相互相関値と他のものが反転することはないことがわかった。したがって、4次までの係数をすべ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、比較的分離しにくいことがわかった。Fig. 10 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分散 v_{ij} を計算した。つまり、各文字の Walsh 展開係数を $w_{ij}^{(5)}$ 、 $w_{ij}^{(6)}$ 、 $w_{ij}^{(8)}$ とすると、次のような演算を行った。

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

ここで、 μ_{ij} は

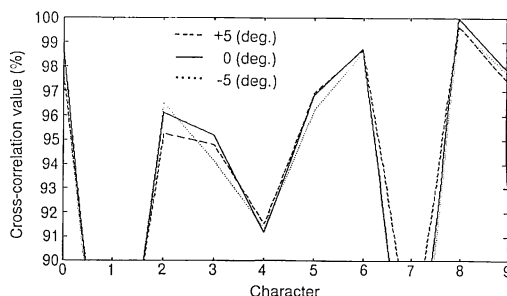


Fig. 10 Cross-correlation value of Walsh expansion coefficient matrices of different patterns against “8.” Coefficients up to 4th order is used.

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

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。Fig. 11 にその結果を示す。また、Fig. 12 に 8 次までの係数要素をすべて用いた場合の相関値を示してある。ここで、パターン“6”についてデータを示したのは、これが最悪値となるからである。

これらを見比べると、分散によって利用係数の次数を最適化したものは、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 $\pm 5^\circ$ ある場合でも、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 Walsh 関数マスクの大きさの 2.4% まで相関値の差が 5% 以上

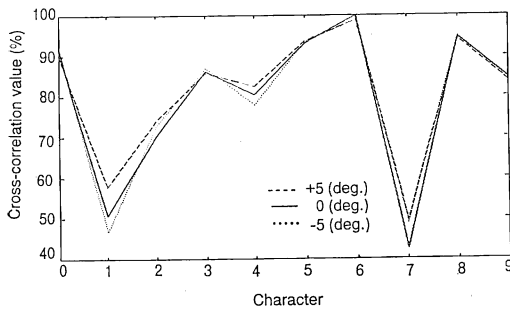


Fig. 11 Cross-correlation value of Walsh expansion coefficients set of different patterns against “6.” Twenty-five coefficients selected from 8th ordered expansion by a variance analysis are used.

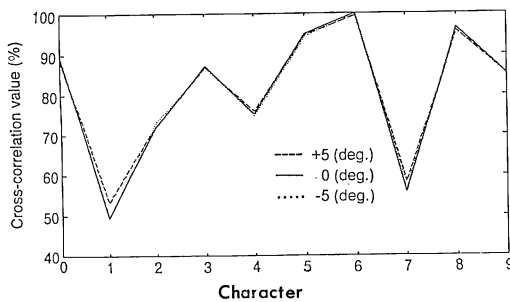


Fig. 12 Cross-correlation value of Walsh expansion coefficient matrices of different patterns against “6.” Sixty-four coefficients included in 8th order of expansion are used.

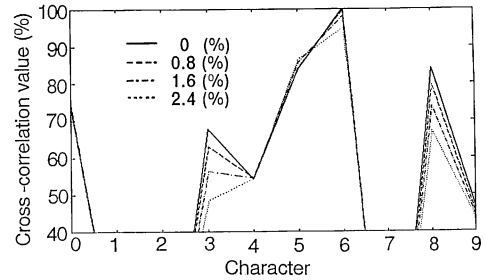


Fig. 13 Cross-correlation value of Walsh expansion coefficient matrices of different patterns with transverse shift against “6.” Twenty-four coefficients included in 8th order of expansion by a variance analysis are used.

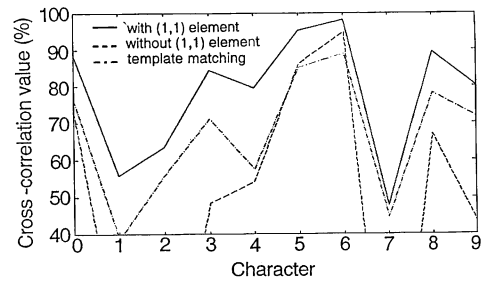


Fig. 14 Cross-correlation value with (1,1) element and without (1,1) element of Walsh expansion coefficient matrices of different patterns against “6.” Twenty-four coefficients included in 8th order of expansion are used.

とれることが確かめられた。さらにこのとき、横ずれ量が大きいとき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 (Fig. 13)。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 (Fig. 14)。ここでも最悪のケースとしてパターン“6”を用いた。

現在、相互相関を用いる認識で、Walsh 展開係数の中からより効率的に使用係数を選択する方法として、Karhunen-Löve (K-L) 展開等によるものも検討中である。これらを用いることで、さらに少ない展開係数の利用で文字認識が行える可能性がある。

5. ま と め

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イメージ前処理系の検討を行い、次の結論を得た。

- (i) 光学的 Walsh 展開方式をイメージ前処理系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 Walsh 関数マスクの大きさの 2.4% までという一つの限界を明らかにした。

さらに、今後のイメージ前処理系の発展を考えると、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の拡大が考えられる。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。

日頃ご指導いただく本学・末松安晴学長に感謝する。ご意見、ご討論、ご援助をいただいた日本板硝子(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。貴重など意見、ご討論をいただいた茨城大学・安久正紘教授に感謝する。

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) A. Kolodziejczyk: "Lensless multiple image formation by using a sampling filter," *Opt. Commun.*, **59** (1986) 97-102.
- 4) J. C. Kirsch, D. A. Gregory, T. D. Hudson and D. J. Lanteigne: "Design of photopolymer holograms for optical interconnect application," *Opt. Eng.*, **27** (1988) 301.
- 5) K. Hamanaka and T. Kishimoto: "Multiple imaging multiple fourier transformation using microlenses arrays," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29** (1990) L1277-L1280.
- 6) I. Glaser: "Noncoherent parallel optical processor for discrete two-dimensional linear transformation," *Opt. Lett.*, **5** (1980) 449-451.
- 7) I. Glaser: "Lenslet array processor," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 1271-1280.
- 8) 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.
- 9) M. Oikawa, K. Iga and T. Sanada: "Distributed index planar microlens array prepared from deep electromigration," *Electron. Lett.*, **20** (1981) L51-L54.
- 10) 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.
- 11) M. Oikawa and K. Iga: "Distributed index planar microlens," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 1052-1056.
- 12) S. Misawa and K. Iga: "Estimation of a planar microlens by oblique ray tracing," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 480-485.
- 13) K. Hamanaka, H. Nemoto, M. Oikawa and E. Okuda: "Aberration properties of the planar microlens array and its applications to imaging optics," *Proc. SPIE*, **1014** (1989) 58-65.
- 14) A. Akiba and K. Iga: "Image multiplexer using planar microlens array," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 4092-4097.
- 15) 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).
- 16) 谷萩隆嗣: デジタル信号処理の理論2 (コロナ社, 東京, 1985).
- 17) W. Swindell: "A noncoherent optical analog image processor," *Appl. Opt.*, **9** (1970) 2459-2469.
- 18) M. Agu, A. Akiba and S. Kamemaru: "A parallel-processing optical-digital recognition system as a model of biological visual perception," *Opt. Lett.*, **66** (1988) 69-73.
- 19) 飯島泰蔵: パターン認識理論 (森北出版, 東京, 1989).