

マイクロレンズアレイを用いるパターン認識系の基礎的検討 —ポストプロセッサの設計と製作—

片山 健夫・宗高 友貴・伊賀 健一

東京工業大学精密工学研究所 〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259

Fundamental Study on an Optical Pattern Recognition System by Using Microlens Array: Design and fabrication of the postprocessor

Takeo KATAYAMA, Yuki MUNETAKA and Kenichi IGA

Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology, 4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8503

An optical parallel preprocessor for the image recognition system by using microoptical devices has been proposed in our previous work. In this paper, a postprocessor which discriminates the output from the preprocessor is proposed. In the postprocessor, the preprocessor output is reproduced by the planar microlens array according to the number of reference patterns. The reproduced images are then compared with each reference patterns. In the first experiment, in order to confirm the design of reference filters, these filters were exchanged one after another without reproduction in the postprocessor and light intensities through the system were measured. Next, a parallel optical recognition experiment was conducted. The reference filter was parallelized and the system which discriminates three arabic numerals was constructed. The recognition result shows that this system performs an image discrimination. Finally, the recognition characteristic as a function of input image rotation was investigated and compared with the simulation.

1. はじめに

近年、高度情報化に伴い、扱われる情報量も飛躍的に増大しつつあり、情報処理の高速性がいちだんと求められている。特に画像情報処理においては、情報量が膨大であることに加えてリアルタイム処理が必要とされることが多いことから、高性能コンピューターであっても十分な処理能力があるとはいえない。また、超高速の実時間パターン認識は各種の安全認識装置などに必要であるものの、必ずしも実現されていない。そこで最近、これら多量の情報を高速に処理するための有効な手段として、並列処理が注目されている。特に、画像情報を直接入力として扱える並列光処理に寄せられる期待は大きい。

筆者らは1981年に、平板マイクロレンズ(planar microlens: PML)などの微小光学素子を、2次元アレイ状に配列した並列光学系を縦続して重ね合わせた、積層光学系(stacked planar optics)を提案した^{1,2)}。従来の光学系で

は、各素子は光学台の上の独立に配置されるのが普通であり、簡単な処理を行う場合でも数十cm四方の広さを占有することになる。また各素子が独立していることから光軸の調整に手間がかかり、その安定性にも問題があった。しかし、集積化された微小光学素子の並列積層集積化により光軸の調整も必要なく、系の安定性も一様に保たれる。

また、マイクロレンズアレイは、インコヒーレント照明された物体に対して、単体で結像特性が比較的良好な、イメージ複製機能を示すことが知られ、PMLでも同様の結果が示されている³⁻⁶⁾。その特徴を生かし、マイクロレンズアレイで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^{7,8)}がひとつの有力な方法として考えられている。

筆者らは前著⁹⁾において、平板マイクロレンズアレイを画像複製系に利用し、2次元Walsh関数¹⁰⁾マスクによりイメージを直交展開する前処理系について提案した。この前処理系は、イメージの認識や圧縮に応用可能であり、実験によりイメージを光学的に精度よく展開できることを明ら

E-mail: tkatayam@pi.titech.ac.jp

かにした。さらに、パターン認識を行う場合、展開係数を選択的に利用したほうが、識別パターン間の分散が大きくとれ、識別が容易になることをシミュレーションで示した。しかし、システムの後段となるべき後処理系（ポストプロセッサ）についての具体化が進められていなかった。そこで本研究では、光学的にパターン認識を行うために、Walsh 直交展開した結果について識別を行う後処理系を設計、製作し、これらを用いて基礎的な認識実験を行った。

2. Walsh 展開によるパターン認識の原理

2.1 並列文字認識システムの基本的構成

Fig. 1 が、平板マイクロレンズアレイを利用した並列光文字認識システムである。このシステムは、プリプロセッサとポストプロセッサの2つの処理系から成り立っている。そして、それぞれのプロセッサは、平板マイクロレンズアレイによる画像の複製と、複製された各々の像に対する光学フィルター処理によって、像の形や光強度を並列的に変える。そして、識別結果は光の強度の形で表れる。

このシステムは、インコヒーレントなイメージの処理を目的としている。つまり、光源としてレーザーのような特殊なものを用意する必要がなく、自然光によって照明されたイメージを認識することができることは、大きな特徴である。また Fig. 1 では、最終段でフォトディテクターにより、光の強さを電気に変換するシステムを示しているが、結果を光強度のまま出力し、次の処理系の入力とすることもできる。つまり、光学的なりピーターをおくことで、このシステムを別の光情報処理系のイメージ（文字）入力モジュールとしての利用も可能である。

2.2 2次元 Walsh 関数マスクによるプリプロセッサ

プリプロセッサの役割は、入力画像の空間周波数スペクトルを得ることである。一般的な光学的イメージ処理では、イメージの空間周波数スペクトルを得るのに、レンズ

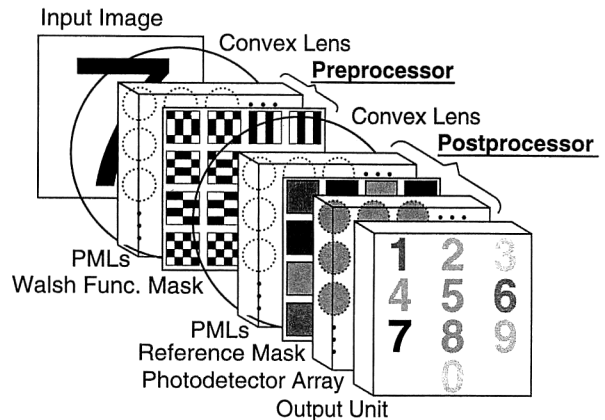


Fig. 1. Schematics of the stacked parallel optical pattern recognition system.

によるフーリエ変換を利用することが多い。しかし、フーリエ変換による方法だと、(i) 位置合わせに精密さが要求される、(ii) 文字のような白黒の2値画像だと、高い次数までスペクトルが広がる、(iii) 不必要な（特徴を表していない）次数も展開してしまうという欠点がある。

これに対し筆者らは、2値画像である文字情報の取り扱いを目的とし、前著⁹⁾で述べたように2値完備直交関数である Walsh 関数を基底関数に採用し、2次元 Walsh 変換によって空間周波数スペクトルを求めることにした。そして、基底関数の次数は、識別の目的に合わせて選択的に利用し、1つの展開係数は正と負の2つのチャンネルに分けられ、それぞれ1つのマイクロレンズごとにチャンネル化している。こうして、使用する空間周波数をデジタル化しているため、誤差の低減が期待でき、さらに認識対象パターンに変更があっても、チャンネルの次数を変更するだけでよく、システム構成法の柔軟性も高い。

2.3 ポストプロセッサ

ポストプロセッサは、プリプロセッサによって出力された、入力イメージの Walsh 展開係数ベクトルと、参照

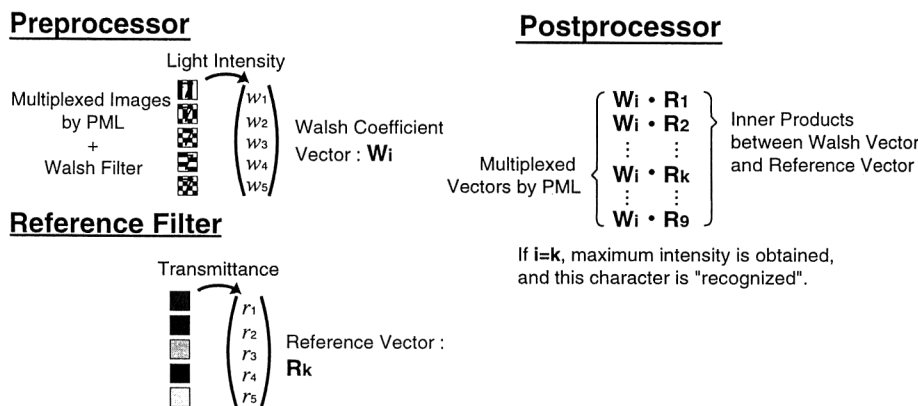


Fig. 2. Role of the preprocessor and postprocessor and recognition principle.

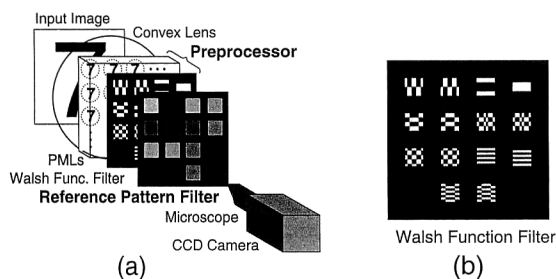


Fig. 3. Experimental arrangement to the reference filters.

パターンの Walsh 展開係数ベクトルを比較し、識別する部分である。識別の基本となる原理は、『大きさが一定の 2 つのベクトルの内積は、ベクトルの向きが一致したときが最大になる』というものである。この様子を Fig. 2 で説明する。まず、プリプロセッサの出力である Walsh 展開係数ベクトル (W_i) を、識別を行うパターンの個数だけ、例えばアラビア数字の認識を行う場合には 10 個に平板マイクロレンズアレイで複製する。そして、それぞれを“0”から“9”までの文字に対応させて設計した参照フィルター ($R_k; k=0\sim 9$) に通す。するとその透過光量の和は、 W_i と R_k の内積で、それが最大になったものを認識結果とする。

参照フィルターの透過率ベクトル (R_k) は、標準イメージの Walsh 展開係数ベクトル (W_k) から

$$R_k \equiv \frac{W_k}{|W_k|} \quad (1)$$

とする。また、入力イメージ (i) の展開ベクトル (W_i) は、ポストプロセッサの PML で複製されるため、すべての参照パターンに対する入力の大きさは一定である。すべての R_k の大きさは自身の大きさに規格化されているため一定で、入力イメージ (i) がシステムに入力されたときには、2 つのベクトルの向きが一致する R_i との内積が最大、つまり透過光量が最大になる。参照フィルターの透過率の設計法の具体例を付録 A に示しておく。

プリプロセッサの Walsh 関数フィルターの段階で、1 つの展開係数について正と負の 2 つのマスクに分けたため、実際の各文字に対する光強度を求めるには、参照フィルターを透過後の光量を引き算する必要がある。また、どの参照パターンの出力が最大かを判別するために、筆者らは現在、フォトディテクターアレイと差動増幅器を組み合わせた回路を検討している。

3. 微小光学系による文字認識の実験

ここでは、前節までに述べた設計法に基づき設計した光学系によって、アラビア数字の認識についての実験を行った結果を述べる。プリプロセッサの設計、製作について

は、前著の論文⁹⁾で、Walsh 係数をパターン間の分散を用いて、選択的に利用したほうがパターン間の相互相関が大きくとれるという設計方針を示し、シミュレーションに対し 99% 以上の精度で光学展開を行うことを実験で確認している。

3.1 参照フィルターによる識別動作の確認

まず今回提案を行ったポストプロセッサの参照フィルターで、識別が可能であるかどうかを数値シミュレーションと光学実験で調べた。プリプロセッサの係数の選択は、“5”、“6”、“8”の Walsh 展開係数間の分散が最大になるように、7 個の係数を選んだ。シミュレーションはアラビア数字の 2 値画像に対し、選択した係数の Walsh 展開を数値的に行い展開係数ベクトルを求め、その値から求めた参照ベクトルとの内積を計算した。つぎに実験では Fig. 3(a) のように、プリプロセッサの直後に参照フィルターを置き、“0”から“9”に対応した参照フィルターを逐次に入れ換えて、各々の光量を測定し、比較した。光の強さは、CCD カメラで測定し、正のフィルターを通ってきた光の強さと、負のフィルターを通ってきた光の強さの引き算は、計算機で行った。入力するアラビア数字のパターンは、シミュレーションに用いた 2 値画像から文字の部分が透過するスライドを製作し、白色光のコールドランプで照射した。平板マイクロレンズアレイは、直径が 0.84 mm、ピッチが 1.00 mm、焦点距離が 19.2 mm の特性のものを製作し、実験に使用した。2 次元 Walsh 関数フィルターは、スライドガラスにクロムを蒸着し、電子線描画により Fig. 3(b) のパターンを描画し、クロムをエッチングして製作した。1 つの係数の一辺は 0.5 mm で、係数ごとの間隔は、平板マイクロレンズアレイに合わせて 1.0 mm である。参照フィルターには写真フィルム (富士写真フィルム: MINICOPY) を用いた。あらかじめ高解像度プリンター (AGFA: Selectset 5000) で印刷したものの濃度と、それを撮影したときのフィルムの透過率の関係を求めておき、Walsh 関数フィルターの大きさに合わせて“0”から“9”までの参照フィルターを製作した。

光学実験を行った結果、すべてのアラビア数字について、光量はシミュレーションとよく一致し、正解のときの光の強さが最大になっていて、良好に識別ができています。Fig. 4 に“5”、“6”を入力したときの、各々の数字の参照フィルターを透過した光出力の値を示しておく。

3.2 小規模ポストプロセッサによる並列実験

前節の結果をふまえて、ポストプロセッサで PML を使用して複数の参照パターンのフィルターを並べたシステムの構築を行い、並列認識の実験を行った。この実験では

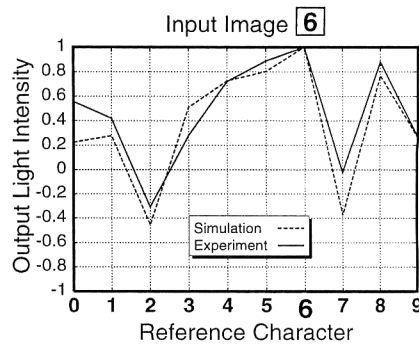
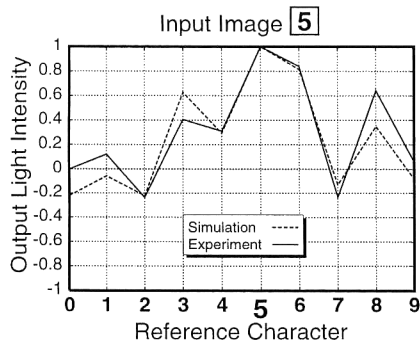


Fig. 4. Recognition results of simulation and experiment.

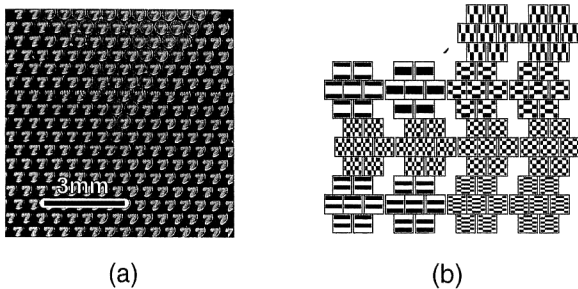


Fig. 5. Multi-channel preprocessor. (a) Multiplexed images by rod lens array, (b) clustered Walsh function filter.

アラビア数字の“5”，“6”，“7”の3種類の文字の識別を並列に行うことにした。はじめは前節と同様に、プリプロセッサでは1つのWalsh展開係数に1つのレンズを割り当て、ポストプロセッサでは参照フィルターを写真フィルムで製作しようとした。しかし、それでは参照フィルターを通過して最終的に得られる光の強度が弱くなり過ぎるうえ、参照フィルターの要素が小さく、フィルムでは精度を保って製作ができなかった。

この問題に対しプリプロセッサについては、直径の大きなレンズを用いる方法と、1つの展開係数に割り当てるレンズの数を増やして、システムを通過する光の量を増やす方法が考えられる。しかし大口径のレンズアレイを精度よく均一に製作することは困難であることから、レンズの数を増やすことにした。凸レンズなどの通常の光学素子を使用する場合は、使用するレンズの個数の増加がそのままコストの増加につながるうえ、すべてのレンズの光軸の向きや焦点距離を合わせる手間が飛躍的に増大するため、有効な解決法にはならない。しかし、レンズアレイではそれらの問題が発生しないため、Fig. 5(a)のような複製イメージに対して、1つの係数に対して7つのマイクロレンズを割り当てたFig. 5(b)のフィルターを製作し、実験に使用した。

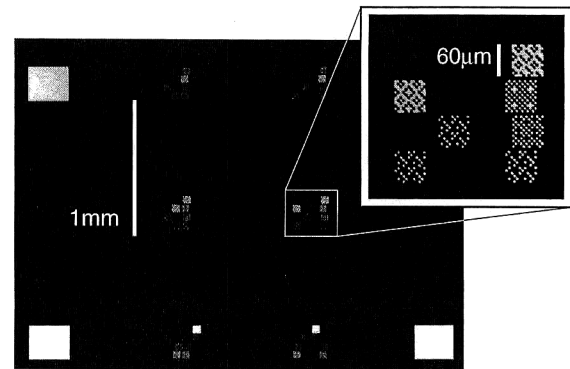


Fig. 6. Photograph of the fabricated reference filter.

参照フィルターの問題に対しては、Walsh関数フィルターと同様にクロム蒸着ガラスに電子線描画法で精密なパターンを描き、エッチングで製作して対応した。参照フィルターの透過率はアナログ値である必要があるが、クロム蒸着のフィルターでは離散的な透過率を表現することしかできない。クロムのエッチング条件から $5\mu\text{m}$ 角の矩形を最小単位にして、36階調の離散透過率のフィルターを製作した。参照フィルターの位置でのWalsh関数フィルターの像の最小ピクセルの大きさは $5\mu\text{m}$ より小さいが、1つの係数につき7つの像があり、それぞれ重なり合う位置は異なり、誤差は平均化されるため問題はない。Fig. 6が製作した参照フィルターである。

これらの素子を用い、Fig. 7(a)のようなシステムを構築した。実際の光学系の写真をFig. 7(b)に示す。今回の実験では、平板微小光学素子を用いる利点のひとつである積層化は行わず、通常の凸レンズを用い光学防振台の上に素子を配置した。積層化を行う場合には、凸レンズをロッドレンズに置き換えたイメージ複製系¹¹⁾にすることで実現できる。また参照フィルターから出てきた光の強度はCCDカメラで測定して比較した。Fig. 8はシステムに“7”を入力したときの参照フィルターを透過した光の様子をCCDカメラで撮影したものである。それぞれ破線で囲っている

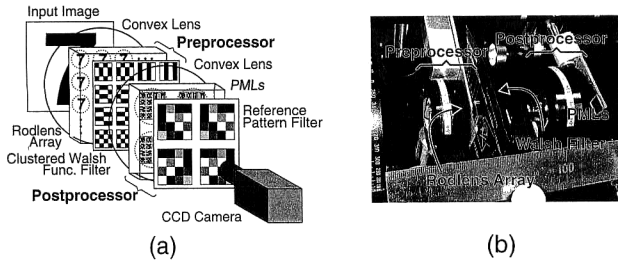


Fig. 7. Schematics and photograph of experimental setup for parallel recognition.

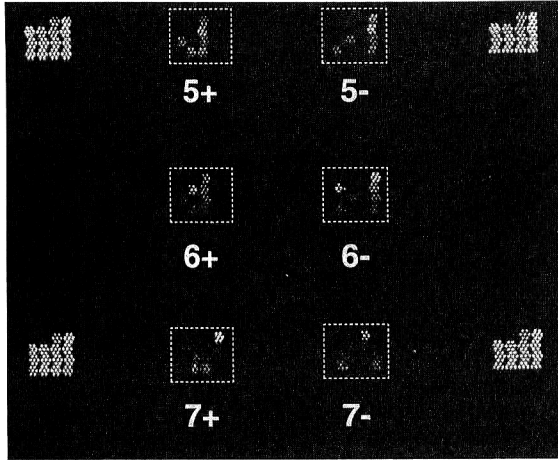


Fig. 8. Output image from reference filter.

領域の画素値の総和を出力値とした。

こうして3種類の文字をそれぞれシステムに入力し、各参照フィルターからの出力をまとめた結果が Fig. 9 である。5がある小区分は“5”のイメージを入力したときの各参照フィルターからの光出力強度で、最大値で規格化している。“Simulation”はシステムの設計に用いた理想状態を仮定したときの出力を表し、残りの2つの値が光学実験の結果を表している。“6”を入力したときの“5”からの出力を除き、測定結果はシミュレーションと同じ傾向を示し、実験間誤差も少なく、入力したイメージに相当するフィルターからの出力が最大になっていて、正しく識別が行われている。誤差の主な原因は参照フィルターの大きさや位置のずれが原因と考えている。

3.3 入力画像の回転に対する耐性評価

システムに入力されるイメージが、多少変形していても正しく認識できることが望ましい。そこで、前節の実験に加えてシステムが正しく構築できていることを確認するためにも、入力イメージを回転したときの認識について前節と同じ実験系で調べ、シミュレーションと比較した。“7”を入力画像とし、 -45° から 45° まで 5° きざみで傾け、それぞれの参照フィルターを透過した光の強さを測定し、直

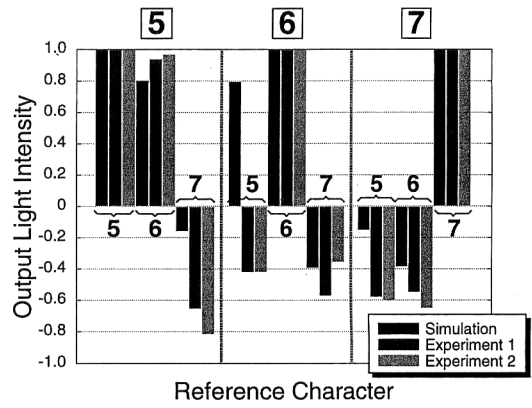


Fig. 9. Recognition results of simulation and parallel experiment.

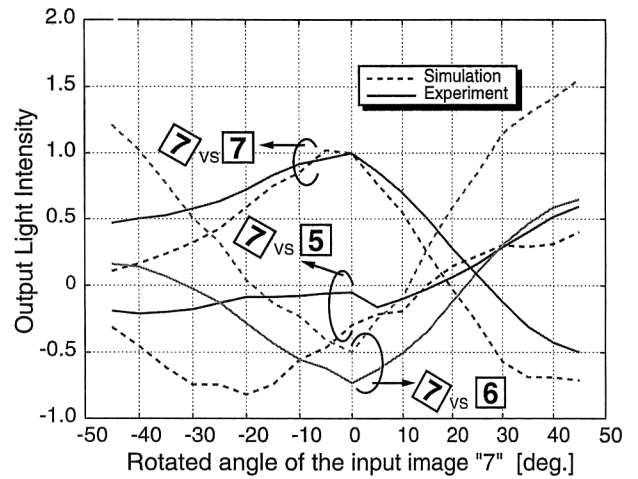


Fig. 10. Recognition results of rotated image.

立 (0°) 時の“7”のフィルターからの出力ですべての値を規格化した結果が、Fig. 10 である。

シミュレーションからは、入力を 15° 以上傾けると“6”のフィルターからの出力のほうが“7”からよりも強くなってしまい、入力像が“6”であると誤認識してしまうと推定できる。これに対し、実験では 25° 傾けたときに“5”のフィルターから出力のほうが大きくなったことを示している。それぞれの出力とも、シミュレーションと実験結果を比較すると、値は誤差を含んでいるが、変化の傾向は同じである。

4. ま と め

本研究では、自然光で照明されたイメージを光学的に認識することを目的として、光学 Walsh 展開を行ったイメージを識別するための後処理系の設計法を述べ、製作を行った。そして、基礎的な光学実験を行った結果、アラビア数字の認識に適応できることを示し、3種類の文字について

良好に識別ができることを示した。さらに入力イメージを回転した場合の出力の変化の様子からも、並列パターン認識の光学系が正しく構築できていることを表した。

光イメージ認識システムに関して、多くの研究が発表されているが、そのほとんどは、光源にレーザーなどのコヒーレント光を用い、ホログラムなどの素子によって構成されていて、取り扱いが困難である。光源として太陽光や電球などの普通の光が利用できれば、多くの場面で利用が可能になり、便利である。この研究により、インコヒーレント光によっても文字認識が可能であることが明らかになった。

また、今回は一文字単位での認識しか考慮していないが、このシステムは、大規模な並列化をすることで、複数の文字を同時に認識することも可能である。つまり、Fig. 1のシステムを、縦横に多数並べることで、紙に印刷された文章を、掃引することなく、高速に読み取ることができる。また、認識結果も光強度で表されることから、将来の光情報処理システムとの親和性も良好で、大きな可能性を秘めているといえる。

日頃から御指導やデバイスの提供をいただいている日本板硝子(株)の及川正尋氏に感謝する。また、本研究の一部は(財)ソフトピアジャパンと、文部省科学研究費補助金 COE 形成基礎研究費 (#07CE2003「超並列光エレクトロニクス」)の援助を得て行われた。

文 献

- 1) 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.
- 2) K. Iga and S. Misawa: "Distributed-index planar microlens and stacked planar optics: A review of progress," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 3388-3396.
- 3) M. Oikawa and K. Iga: "Distributed index planar microlens," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 1052-1056.
- 4) S. Misawa and K. Iga: "Estimation of a planar microlens by oblique ray tracing," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 480-485.
- 5) K. Hamanaka, H. Nemoto, M. Oikawa and K. Okuda: "Aberration properties of the planar microlens array and its applications to imaging optics," *Proc. SPIE*, **1014** (1989) 58-65.
- 6) A. Akiba and K. Iga: "Image multiplexer using planar microlens array," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 4092-4097.
- 7) M. Agu, A. Akiba and S. Kamemaru: "A parallel-processing optical-digital recognition system as a model of biological visual perception," *Opt. Commun.*, **66** (1988) 69-73.
- 8) M. Mori, Y. Hayasaki, I. Tohyama and T. Yatagai: "Optical learning neural network using a Selfoc microlens array for pattern recognition," *Opt. Rev.*, **1** (1994) 44-46.
- 9) 秋葉 敦, 村重仁勇, 伊賀健一: "平板マイクロレンズアレー

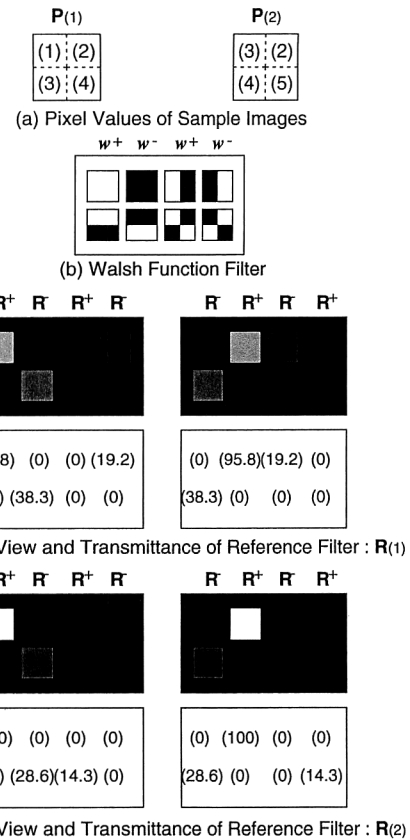


Fig. 11. An example of the design of the reference filters.

を用いる微小光学イメージ前処理系の基礎的検討”, *光学*, **20** (1991) 507-513.

- 10) 遠藤 靖: *ウォルシュ解析* (東京電機大学出版局, 1993) pp. 162-165.
- 11) K. Hamanaka: "Integration of free-space interconnects using Selfoc lenses: image transmission properties," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) 1656-1662.

付録 A 参照フィルターの設計法

参照フィルターの透過率とその配置の決定法について例を示す。

次のような2つの2×2画素の画像を、2×2の次数のWalsh関数で展開して識別することを考える。イメージの画素値はFig. 11(a)のような配置で、

$$P_{(1)} = \begin{pmatrix} P_{(0,0)} \\ P_{(1,0)} \\ P_{(0,1)} \\ P_{(1,1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix}, \quad P_{(2)} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix}$$

とする。インコヒーレント光で負値を表現するために、Walsh関数の要素を、

$$\begin{aligned}
\mathbf{w} &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \\
&= \mathbf{w}^+ - \mathbf{w}^-
\end{aligned}$$

と正と負の要素に分け、2つのチャンネルに分けるため、Fig. 11(b)のWalsh関数を用いた場合、プリプロセッサで得られる展開係数は、次のようになる。

$$\begin{aligned}
\mathbf{W}_{(1)}^+ = \mathbf{w}^+ \mathbf{P}_{(1)} &= \begin{pmatrix} 10 \\ 4 \\ 3 \\ 5 \end{pmatrix}, & \mathbf{W}_{(1)}^- = \mathbf{w}^- \mathbf{P}_{(1)} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 6 \\ 7 \\ 5 \end{pmatrix} \\
\mathbf{W}_{(2)}^+ = \mathbf{w}^+ \mathbf{P}_{(2)} &= \begin{pmatrix} 14 \\ 7 \\ 5 \\ 8 \end{pmatrix}, & \mathbf{W}_{(2)}^- = \mathbf{w}^- \mathbf{P}_{(2)} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 7 \\ 9 \\ 6 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

また、参照ベクトルは、式(1)より、

$$\mathbf{R}_{(1)} = \frac{1}{\sqrt{120}} \begin{pmatrix} 10 \\ -2 \\ -4 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_{(2)} = \frac{1}{\sqrt{216}} \begin{pmatrix} 14 \\ 0 \\ -4 \\ 2 \end{pmatrix}$$

となる。これも同様に正 (\mathbf{R}^+) と負 (\mathbf{R}^-) に分けると、

$$\begin{aligned}
\mathbf{R}_{(1)} &= \frac{1}{\sqrt{120}} \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \frac{1}{\sqrt{120}} \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix} \\
\mathbf{R}_{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{216}} \begin{pmatrix} 14 \\ 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} - \frac{1}{\sqrt{216}} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

となり、このような透過率のフィルターを用意する。またここで、この参照フィルター ($\mathbf{R}_{(1)}$, $\mathbf{R}_{(2)}$) のすべての要素の中の最大値である $14/\sqrt{216}$ ですべての透過率を規格化して、最高透過率を100%にすることで、システムを透過する光量が増加し、S/N比の向上が期待できる。この規格化を行っても、参照ベクトルの大きさが同一であるという関係は崩れない。

正と負の要素に分けた各ベクトルの内積は、

$$\begin{aligned}
c_i &= (\mathbf{R}^+ - \mathbf{R}^-) \cdot (\mathbf{W}^+ - \mathbf{W}^-) \\
&= (\mathbf{R}^+ \cdot \mathbf{W}^+ + \mathbf{R}^- \cdot \mathbf{W}^-) \\
&\quad - (\mathbf{R}^+ \cdot \mathbf{W}^- + \mathbf{R}^- \cdot \mathbf{W}^+)
\end{aligned}$$

となるので、これを実現するための各フィルターの要素の配置は、Fig. 11(b)のWalsh関数フィルターの配置に対応して Figs. 11(c), (d) のようになる。