



## 線素成分参照パターンと相関ダイアグラムを用いた パターン認識システムの基礎研究

小林 光明\*・中澤 真康\*・亀丸 俊一\*\*

茨城大学 \* 大学院工学研究科システム工学専攻, \*\* 工学部システム工学科  
〒316 日立市中成沢町 4-12-1

(1994年4月5日受付, 1994年6月2日受理)

### Fundamental Description of a Pattern Recognition System Using Linear Primitive Components for Reference Patterns and Correlation Diagrams

Mitsuaki KOBAYASHI,\* Masayasu NAKAZAWA\* and Shun-ichi KAMEMARU\*\*

\* Graduate Student, \*\* Department of Systems Engineering, Faculty of  
Engineering, Ibaraki University, 4-12-1, Nakanarusawa, Hitachi 316

(Received April 5, 1994; Accepted June 2, 1994)

In this paper, a new approach using linear primitive patterns as reference patterns of a matched spatial filter for a shape invariant character recognition system is described. Twelve bar patterns are used as primitive patterns for recognizing 26 English alphabets which show good results of recognition in fundamental experiments. After the fundamental experiments by the optical system, another approach based on the correlation diagram is studied by computer simulations, which shows further feasibility of the rotational invariance of the system.

#### 1. 緒 言

現在われわれの身の回りで使用されているパターン認識システムは、専用プロセッサを用いたデジタル処理を中心に構成されているものが多い。しかしパターン認識の用途の拡大や認識対象の多様化に伴い、これらのシステムが行っている認識処理の一層の高速化が求められている。

われわれはこの解決策の一つとして、高速性、並列性に優れた光情報処理を従来のデジタル処理に組み込むことで、総合的な能力を向上させたパターン認識システムを構築することを目指してきた。そしてこのシステム実現のために従来から、参照パターンと入力パターンとの相関演算を並列に実行できる、多重マッチトフィルタ<sup>1)</sup>を用いたマッチトフィルタリング<sup>2)</sup>の手法と、デジタル処理系を組み合わせたハイブリットパターン認識システム<sup>3)</sup>に関する研究を行ってきた。

このハイブリットシステムの研究において重要な問題となるのが、マッチトフィルタ作製のための参照パターンの決定である。これまでにさまざまな参照パターンおよびパターンの決定方法が提案されてきた<sup>4,5)</sup>が、各手法で得られた参照パターンのほとんどは入力パターンの形状そのものであったり、あるいはその形状の一部を抽出し、作製されたものであった。したがってこれらの参照パターンは、認識対象とするパターンの情報を直接用いているため、特定の入力パターンの識別に対しては極めて有効であるが、それ以外のパターンが入力された場合にはもちろんのこと、参照パターンの基となっているパターンが傾いて入力されたときの認識も困難であった。

そこで本研究では、この問題点を改善するため、アルファベットやカタカナを初めとするさまざまな入力パターンに同時に対応可能な、認識対象の拡張性を有する参照パターンの選定を目的としている。そして、複数の

線分を用いれば認識対象とするどのような入力パターンもその合成で表せることに着目し、Fig. 1 に示すような角度を持った線素成分をマッチフィルタ作製のための参照パターンに用いることを提案する<sup>6)</sup>。

本論文ではわれわれが提案した参照パターンが従来のパターンと比較して、拡張性、普遍性に優れたマッチフィルタの作製に有効であることを検討するため、アルファベットを認識対象として、光学系を用いて行った基礎実験について述べる。そしてその結果をふまえて、アルファベット 26 文字すべてを認識可能な手法を構築することができたので、この実験についても報告する。

## 2. 基礎データの収集

### 2.1 基礎実験の概要

Fig. 1 に示した参照物体が、多重マッチフィルタを用いるパターン認識に対して有効であるかどうかを検討するためのデータを、光学実験を行って求める。

認識対象である入力パターンには、アルファベットの大文字 26 個と空白を合わせた 27 文字を用いる。それぞれのパターンについてはインスタントレタリング (フーツラメディウム 36 pt J 86 C) を使用する。入力物体としては、この 27 パターン中から 4 パターンずつを選び出し、それを  $2 \times 2$  の正方形に配置する。これを写真乾板に露光後、現像、漂白処理を施し入力物体を透過物

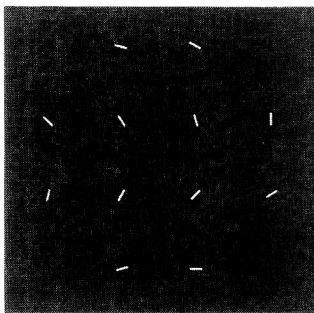


Fig. 1 Reference patterns.

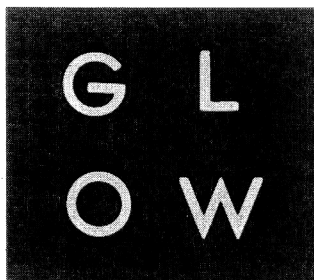


Fig. 2 Input patterns.

体として作製する。Fig. 2 に今回使用した入力物体の一例を示す。アルファベット 26 文字と空白をすべてカバーするために、これと同様の物体を 7 種類作製した。多重マッチフィルタを作製するための参照物体についても同様の露光、現像、漂白処理を行い透過物体として作製する。これが Fig. 1 に示した参照物体である。この物体は、線分の水平状態を  $0^\circ$  として、 $180^\circ$  までを  $15^\circ$  ずつ傾きを変化させた 12 個のパターンより構成されている。各線素パターンは、それぞれ長さ 1.5 mm、幅 0.3 mm として乾板上に記録されている。この物体を、従来から使用しているマッチフィルタ作製<sup>7)</sup> のための光学系に用い、マッチフィルタを作製する。

### 2.2 マッチフィルタリングによる認識実験

2.1 節で作製されたフィルタと入力物体を、ハイブリット認識システム<sup>8)</sup> に用いることでマッチフィルタリングを行う。この結果、入力物体と参照物体との相関信号が出力されるので、この信号を CCD カメラを用いてフレームメモリに 256 階調で取り込み、マイクロコンピュータでデジタル処理を行い、入力物体を認識する。

### 2.3 認識手法

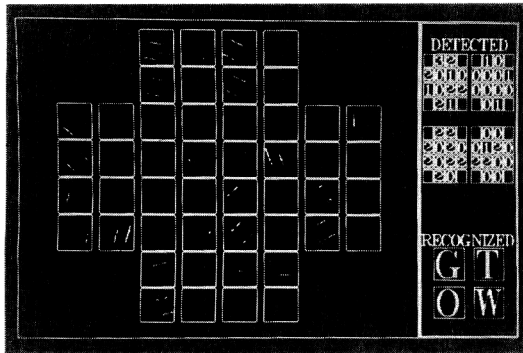
光学的に得られた相関信号に対してマイクロコンピュータにより二値化処理を施し、その結果得られるピークの状態から認識を行う。二値化処理の際のしきい値としては、各参照パターンごとに得られるピーク強度の平均値を用いる。この理由としては、今回得られたピーク強度のデータに対しては、その平均値が算術的かつ一意的に決定できること、光源の強度変化への対応が容易であることなどが挙げられる。

また認識に用いるピークの信号は、テンプレートマッチングに基づく参照物体によるフィルタリングのように単純にピークの ON, OFF を用いるのではなく、分布しているピークの個数の情報を検出するアルゴリズムにより処理されている。これは、例えば横棒という特徴にしても、それが各文字に何個含まれているかということが、個々の文字の識別において極めて重要であるという理由からである<sup>4)</sup>。

このアルゴリズムを用いることにより、類似した文字 E, F あるいは V, W 等の認識も容易になると考えられる。

### 2.4 認識結果

Fig. 2 に示した物体を入力した場合の認識結果を Fig. 3 に示す。この図の左側は、相関ピークにフィールドを設定し、各参照パターンの平均値をしきい値として二値化処理を行った画面である。そして各フィールド



**Fig. 3** Result of recognition when the input patterns shown in Fig. 2 are inserted in the proposed system.

内を検索することにより、ピークの個数を検出する。検出した個数は右側上部に表示する。右側下部には個数の情報を基に行った認識結果を示す。Fig. 2 と Fig. 3 を比較すると明らかのように、LをTと誤認識している。この2文字は構成要素が同じであるため、ピークの出力される参照パターン、出力されるピークの個数が共に同一である。そのためこの2文字は、今回提案した手法では認識不可能であった。しかしLとT以外の24パターンについては、そのすべてを認識することが可能であった。

### 2.5 基礎実験の考察

今回の基礎実験より得られたデータを基に、提案した参照パターンおよびこれを用いて行うマッチトフィルタリングの手法の有効性について検討を行った。その結果、アルファベット26文字中24文字の認識が可能であることから、線分による参照パターンがシステムに対してほぼ有効であるという結論を得た。そしてこれをさらに完全なものにするために、得られる光学的ピーク信号の処理をいかに行うかが重要なポイントになると思われる。そこで以下にこの点について考察したことを述べる。

今回使用した、光学ピークから入力された文字の認識を行うためのアルゴリズムでは、同一の構成要素を持っているLとTの識別が不可能であることがわかった。このことは、アルファベット以外のパターン、例えばカタカナをこの参照パターンによるフィルタに入力した場合には、エ、コ、ユなど認識不可能なパターンが存在することを示しており、参照パターンの普遍性に問題が生ずることとなる。また二値化処理の際基準となるしきい値についても、今回の実験では各参照パターンごとに得られるピーク強度の平均値を用いたが、この場合外部からの影響によりピーク強度の値が変化し、それにとまら

て認識結果も変化する可能性があるという問題が存在する。

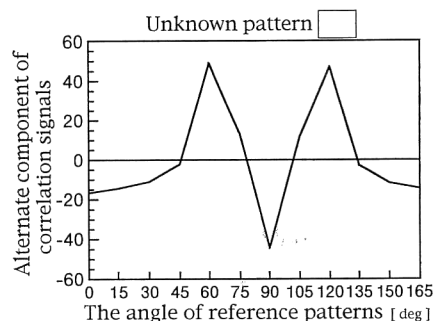
以上のことから、線分をマッチトフィルタ作製のための参照パターンに用いることの有効性は確認できたが、ここで提案するピーク信号処理のアルゴリズムに問題があり、この手法のままでは、参照パターンの普遍性が望めない。

そこで今回の基礎実験で認識不可能だったLとTの認識を可能にすることや、参照パターンの拡張性の能力向上のために新たな手法を考案する必要がある。

### 3. 新たなデジタル処理アルゴリズムの構築

前章で行った基礎実験より生じた問題点を改善するための新たな手法として、Fig. 4 に示すような相関ダイヤグラムを用いた認識手法を提案する<sup>9,10</sup>。このグラフは、横軸に線素成分参照パターンの角度、縦軸には正規化されたピーク強度の最大値を示している。すなわちある文字パターンがシステムに入力された場合、12個の参照パターンに対してそれぞれどの程度の相関ピーク強度が出力されているかを示している。つまり、これまでは12個の参照パターンから得られた信号に二値化処理を施し、一つの参照パターンからの信号を1か0かの値をもって利用していた。しかし今回提案する手法は、一つのパターンから得られるピークの信号の値を、すべて使用するというものである。

本章では、この相関ダイヤグラムを用いて行った認識実験について説明する。なお今回は、光学実験に先立ち行ったシミュレーションで、良好な結果が得られたのでそれを示す。シミュレーションの概要はFig. 5 に示されている。認識システムに入力した未知パターンと、12個の参照パターンから作製した多重マッチトフィルタから得られる光学的相関のピーク信号の強度を計算機によ



**Fig. 4** Correlation diagram drawn by the correlation data between the unknown input object and the primitive reference patterns.

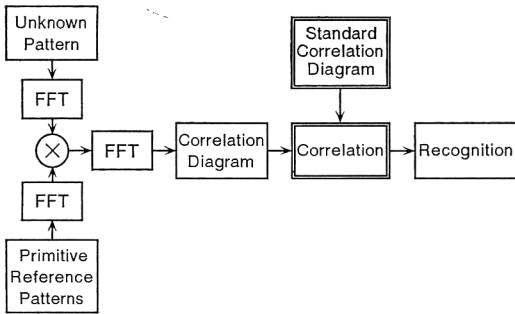


Fig. 5 Block diagram of the concept of character recognition using correlation diagrams.

って求めるため、まず未知入力パターンと参照物体との相関演算をFFTを用いて行う。その結果得られたデータを基に、Fig. 4に示すような相関ダイアグラムを作成する。この波形と、あらかじめ予備実験を行って検出しておいた基準となる波形との相関度を求め、入力されたパターンの認識を行うのが今回提案する手法である。

### 3.1 相関波形 (ダイアグラム) の作成

本研究で提案する手法では、基準ダイアグラムと、入力パターンダイアグラムの2種類の相関波形をシミュレーションによって作成する。このうち基準ダイアグラムとは、今回認識対象とするパターンがアルファベットの大文字26個であるので、この26文字1個ずつとFig. 1の参照物体との相関をとった結果得られる26個の相関波形のことである。一方入力パターンダイアグラムとは、未知入力パターンと12個の線素参照パターンの相関から得られる相関波形のことである。

これらの相関波形を得るためには文字パターンと、Fig. 1の参照物体とをそれぞれ画像データとしてコンピュータへ取り込み、このデータにFFTを施した後、両者の相関演算を行う。その結果、各参照パターンごとにピーク強度が出力されるのでそれぞれについてその強度を求める。一つの入力パターンに対して12個の値が得られるので、次にこれらの平均値を求める。その値をそれぞれのピークの最大値から引くことによって12個の値を正規化する。その後この値を各参照パターンに対してプロットすることにより、相関ダイアグラムが作成される。この過程をFig. 6に示す。

ここで、縦軸のピーク強度を正規化している理由について述べる<sup>11)</sup>。グラフを作成する際、出力されるピーク強度の値をそのまま用いると、入力されたアルファベットによって、ピーク強度全体が高い波形 (Fig. 7の実線のダイアグラム) や全体に低い波形 (破線のダイアグラム) などさまざまな性質を持った波形が得られる。認識

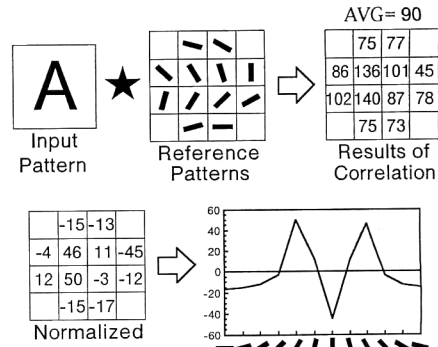


Fig. 6 The concept of drawing a correlation diagram. Correlation intensities are given as results of correlation between an input pattern and the reference patterns. The averaged intensity (in this case 90) of each result is subtracted from the data for normalization. A correlation diagram is drawn by the normalized data.

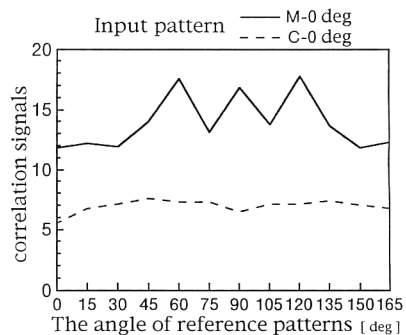


Fig. 7 Correlation diagrams drawn without normalization.

はFig. 5で述べたように波形間で相関を取るが、Fig. 7のような波形をそのまま用いると、破線のダイアグラムの自己相関より、実線のダイアグラムと破線のダイアグラムとの相互相関の方が高くなり正しい認識を行うことができない。今回はピーク強度の高低よりも、その変化に注目した相関を必要としているため、前述のプロセスに基づく正規化を行った。

また本提案のように相関ダイアグラムを使用した認識手法を用いることにより、以下に示すような点を改善することができる。第一に、従来の手法では2.5節に述べたように二値化処理の際のしきい値に問題が生じていたが、今回の手法では得られるピーク強度をそのまま使用しているため、この二値化処理のプロセスを排除することができる。第二に、光源の強度変化に対しても、ピーク強度を正規化しているため出力される波形の揺らぎの影響が生じにくく、それにより認識結果が安定すること

などがある。

3.2 認識方法

このダイアグラムを用いた未知入力パターンの認識方法は、以下のように実行される。まずあらかじめ3.1節と同様の手法を用いて、アルファベット26文字の基準ダイアグラムを求める。Fig. 8に26個のダイアグラムのうちの代表例として、文字パターンA、Bより得られる二つの波形を示す。

認識したい未知の入力パターンに対しても同様の処理を行うことにより、先に示したFig. 4のような相関ダイアグラムを作成する。このダイアグラムとFig. 8に示した26個の基準ダイアグラムとの相関度を順次求めていき、その中で最も高い相関度が得られた基準ダイアグラムを、入力された未知文字パターンとして認識する。Fig. 4の場合、Aの基準ダイアグラムと最も高い相関度が得られるので、未知入力パターンはAであると認識される。

また、未知入力パターンが回転している場合には（ここでは具体的にAを45°回転させたパターンを例として用いている）、Fig. 9に示すダイアグラムが求められる。先ほどと同様にFig. 9と基準ダイアグラムとの相関度を求めていくと、最も高い相関度が得られるのはAの基準ダイアグラムであるので、傾いて入力されたAであってもこれを正確にAと認識することが可能である。

さらにFig. 4の相関ダイアグラムと基準ダイアグラムとの相関の結果、最も高い相関度は、90°の位置に出力され、Fig. 9の場合には45°の位置に出力される。すなわち、Fig. 1のような参照物体を使用しているため、入力パターンであるAの回転角度が相関度のシフト量となって表れる。したがってこのシフト量を調べることで、入力パターンの傾いている角度の検出も可能となる。

以上のことから今回提案した手法は、正立したパター

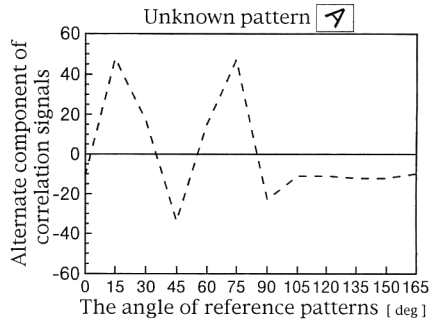


Fig. 9 Correlation diagram when the input pattern was unknown.

ンの認識だけでなく、回転したパターンの認識にも有効であると考え、本研究ではこの手法の検討を行った。

4. コンピュータシミュレーション

本実験は実際の光学実験に先立ち、FFTを用いたコンピュータシミュレーションにより行った。参照物体にはFig. 1に示した物体を用い、未知入力パターンとしては、アルファベット26文字それぞれについて以下のような5種類のパターンを用いる。その一つとして提案した手法の有効性を検討するため、Fig. 10(a)に示すような正立パターンを用いる。また、前述したように今回の手法では回転したパターンの認識も可能であると考えられるので、その可能性を調べるために、(b), (c), (d)に示すような反時計方向に180°, 270°, 315°に回転させたパターンも合わせて使用する。さらに参照物体は15°ずつに等分した線分を使用しているので、入力パターンの15°ずつの回転に対しては対応可能であると予想できる。そこでその他の回転角度、例えば10°, 20°などの回転に対しても提案した手法は有効であるか検討するために、任意の角度回転させたパターンについても調べる。今回はその一例として、(e)に示す38°に回転させたパターンを使う。以上のようなパターンのそれぞれ

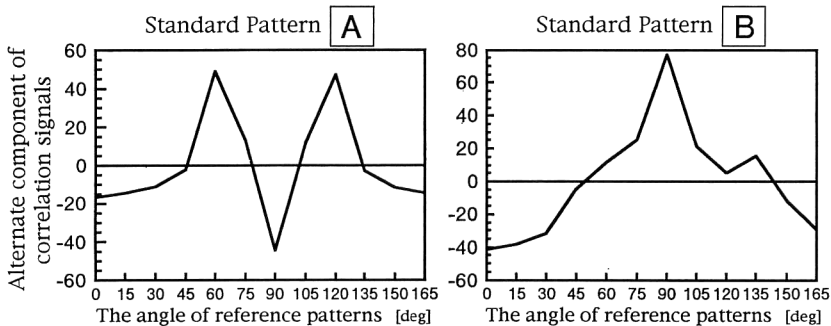
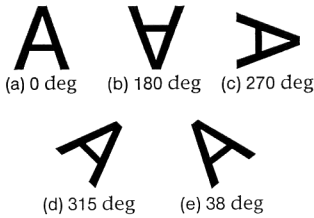


Fig. 8 The standard diagrams of the letter A and B.



**Fig. 10** Input patterns used for computer simulations. An upright pattern and rotated ones are examined.

についてシミュレーションを行う。

**5. 結果および考察**

アルファベット 26 文字の正立した入力パターンについては、光学実験で認識できなかった L と T を含むアルファベット 26 文字すべてを認識することが可能であった。ここで基礎実験で不可能であった L と T の識別が、今回の手法で可能となった理由を考える。

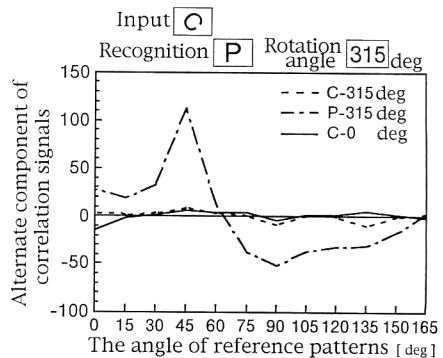
直感的には、同一の要素で構成されている L と T は、Fig. 1 との相関演算の結果各参照パターンに対してほぼ同値のピーク強度が出力されると考えられる。しかし 12 個の参照パターンから得られる相関信号は、二値化して ON, OFF で取り扱った場合と、今回提案した相関ダイアグラムの手法の場合とでは、まったく違うデータであると考えられる。すなわち、今回提案した手法では、二値化によらず得られたピークの強度そのものを 12 個すべて利用しているため、L と T それぞれと 12 個の線素の相関分布に違いが生じたものと考えられる。

一方回転したパターンへの有効性を確かめる計算機シミュレーションの結果については、180° 回転させたパターンは、26 文字すべてを認識することが可能であった。さらに 270°, 315° 回転させたパターンでは、C と G を除くすべてのパターンを認識することができた。ここで認識できなかった C と G について、その原因は以下のように考えられる。

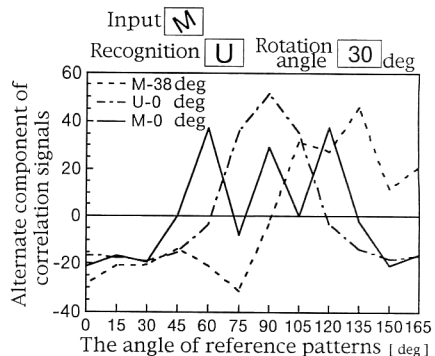
**Fig. 11** に示した図は、C を 315° 傾けたパターンの認識を試みた場合である。実線のダイアグラムは C の正立時の波形、破線のダイアグラムは認識対象である C を 315° 回転させたパターンより得られる波形、一点鎖線のダイアグラムは P を 315° 傾けた時の波形である。直感的にみると実線のダイアグラムと破線のダイアグラムとの相関度が最も高いように見えるが、シミュレーションによる実験では破線のダイアグラムと一点鎖線のダイアグラムとの相関度の方が高くなり P と認識された。また C を 90° 回転させたパターンは O と認識され、G につい

ても同様に 270°, 315° 回転させたパターンについてはそれぞれ L, Z と認識された。すなわち、今回の入力パターンは CRT 上で 128×128 ピクセルに離散化して作製したものであり、回転したパターンについても同様の画面上で作製している。この作製の際量子化誤差が生じ、これにより C, G のダイアグラムに微妙な変化が生じたために上記したような結果になったと考えられる。

以上の 4 種類の回転パターンとは別に、任意の回転角度の一例として 38° 回転させたパターンもテスト物体として用いたが、このパターンでは、出力される相関ダイアグラムが著しく変形することがわかった。具体例として、M を 38° 回転させたパターンのダイアグラムを **Fig. 12** に示す。図中の実線は M の正立時のダイアグラム、破線は M を 38° 回転させたときのダイアグラム、一点鎖線は U の正立時のダイアグラムを表している。破線のダイアグラムを実線のそれと比較すると、波形がシフトしただけでなく明らかに変形している。この理由について以下のように考える。



**Fig. 11** Correlation diagrams for explanation of misrecognition of the letter C rotated by 315 degrees.



**Fig. 12** Correlation diagrams for explanation of misrecognition of the letter M rotated by 38 degrees.

過去に, Casasent ら<sup>12)</sup> によって一般的なマッチトフィルタリングにおいて, 物体を  $3.5^\circ$  回転させて入力することにより, 回転させる以前に比べピーク強度が  $1/10$  に低下することが報告されている. したがってこれまでの手法では一つの参照パターンの, 回転した入力パターンに対する有効性は,  $\pm 2^\circ \sim \pm 3^\circ$  程度であろうと考えられる. 実験に用いた  $38^\circ$  回転したパターン, 実質的には  $7^\circ, 8^\circ$  回転したパターンは, 有効性のある角度と比較して回転角度が大きく, このため前述したように相関ダイヤグラムが変形してしまったと思われる. したがって本来高いはずである実線のダイヤグラムと破線のダイヤグラムとの相関度より, 破線のダイヤグラムと一点鎖線のダイヤグラムとの相関度の方が高くなり, Mを  $38^\circ$  回転させたパターンは U と認識された. 他の  $38^\circ$  回転させた 26 パターンについても, そのほとんど(18 パターン)を正しく認識することができなかった.

今回の実験の結果, 回転したパターンを入力した場合の計算機シミュレーションにおいては, そのうちの幾つかを認識できなかった. しかしわれわれがこのフィルタを実際のシステムに応用することを考える場合, 例えば航空機の識別問題などは,  $15^\circ$  の倍数あるいはその近傍に回転した機影に関しては, われわれのコンセプトを応用することでこれを識別することが可能であると考えられる. 一方  $15^\circ$  以下の小さい回転に関して応用する際, 例えば製品に刻印された文字などを認識する場合には, それらの刻印バラツキにより実際にどの程度回転しているかを調べ, 前述の一般的な場合の  $\pm 2^\circ \sim \pm 3^\circ$  ということを踏まえて最大  $\pm 5^\circ$  くらいを目安として, われわれの提案する手法をこれに対応できるようにすることが必要であると考えられる.

また今回の実験では, 認識対象とするアルファベットのフォント内に,  $45^\circ, 60^\circ$  傾いた線分が含まれていることを考慮し,  $15^\circ$  ずつ傾きを変化させた 12 本の線分を参照パターンとして用いている. しかし, ここで仮に提案した参照パターンよりもその数を増加させ, 等分割の角度を小さくすれば, 回転した入力パターンに対する認識システムの冗長性を増すことができる. ところが参照パターン数の増加は, デジタル処理部における処理が重くなり処理時間が増大するという欠点が生ずる. 反対に参照パターンの数を減少させ, 等分割の角度を大きくすれば処理の軽減は図れるが, その分回転した入力パターンに対するシステムの冗長性は減ることとなる. この二点を考えると, 今回用いた参照パターンは, 数として

はちょうど良い値と考える. しかし今後実際の応用を考える場合は, 今回提案した線素成分を用いたパターン認識システムにおける最適な参照パターンの数を, 対象とする認識物体を考えながら決定することが重要である.

## 6. 結 言

今回の報告では, 各線素成分の参照パターンに用いて行うマッチトフィルタリングの有効性を, まず基礎実験として行った光学実験により確認した. しかし, その際のデジタル処理で用いられているアルゴリズムが不完全であったため, LとTの区別のみが不可能であった.

そこでさらに本論文では, 光学的相関信号を二値化せず, そのデータをすべて用いる相関ダイヤグラムの手法を提案した. この有効性を計算機によるシミュレーションで確かめたところ, 正立した 26 個のアルファベットはすべて認識可能であることが示された.

今後は光学実験によってこれを認識すること, 参照パターンの数の検討などが課題である.

## 文 献

- 1) 清水 勲, 浅川修一郎, 亀丸俊一: “マッチトフィルタの多重化とそれを用いた複数の物体形状とその位置の同時識別法”, 光学, **17** (1988) 361-366.
- 2) A. Vander Lugt: “Signal detection by complex spatial filtering,” IEEE Trans. Inf. Theory, **IT-10** (1964) 139-145.
- 3) S. Kamemaru, T. Nagaoka, M. Kakuta and I. Shimizu: “Multiple matched spatial filtering with corresponding symbols by the hybrid system,” Jpn. J. Appl. Phys., **29** (1990) L1557-L1560.
- 4) 矢野潤一, 亀丸俊一: “特徴抽出された参照パターンによるマッチトフィルタとそれを用いた文字認識”, 光学, **21** (1992) 319-326.
- 5) 中澤真康, 山口 茂, 亀丸俊一: “パターン間の非共通部分要素による文字認識システムの研究”, 第23回画像工学コンファレンス論文集, 15-4 (1992) pp. 305-308.
- 6) 小林光明, 山口 茂, 中澤真康, 亀丸俊一: “線素成分を参照パターンに用いたマッチトフィルタリングに関する基礎研究”, 第40回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 3, 29 a-SZB-10 (1993 春季) p. 867.
- 7) S. Kamemaru and J. Yano: “Analysis of an autocorrelation signal by the new theory of matched spatial filtering,” Proc. SPIE, **1347** (1990) 169-178.
- 8) 亀丸俊一, 矢野潤一, 伊藤晴康: “単純パターンを用いた図形認識の基礎研究”, 第7回光波センシング技術研究会論文集, LST 7-11 (1991) pp. 73-79.
- 9) 小林光明, 中澤真康, 亀丸俊一: “線素成分を参照パターンに用いたマッチトフィルタリングに関する基礎研究(II)”, 第54回応用物理学学会学術講演会講演予稿集 3, 30 a-F-2 (1993 秋季) p. 900.
- 10) 小林光明, 中澤真康, 亀丸俊一: “線素成分を参照パターンに用いたパターン認識の研究”, 第24回画像工学コンファレンス論文集, 10-6 (1993) pp. 331-334.
- 11) 雨宮好文, 佐藤幸男: 信号処理入門 (オーム社, 1987).
- 12) D. Casasent and D. Psaltis: “Position, rotation, and scale invariant optical correlation,” Appl. Opt., **15** (1976) 1795-1799.