

研究

特徴抽出に基づくマッチトフィルタリングと ニューラルネットワークを用いたパターン認識

伊藤 義之*・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7月12日受付, 1994年10月21日受理)

Pattern Recognition by Matched Spatial Filtering Based on Feature Extraction and Neural Networks

Yoshiyuki ITOH* and Shun-ichi KAMEMARU**

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

(Received July 12, 1994; Accepted October 21, 1994)

In this paper, we propose and describe a new technique for pattern recognition that is based on feature extraction. Pattern recognition is performed in a hybrid system consisting of an optical processing part and a digital one. In the optical part, a matched spatial filter (MSF) is synthesized by partial reference patterns extracted from some desired patterns. In the digital part, the correlation signals by filtering, which are normalized by maximum peak correlation intensity of each reference pattern, are processed by an algorithm of a neural network. In the experiment, using the MSF synthesized by eight feature-extracted reference patterns, we can distinguish 47 perfect Japanese letters called "kata-kana" including a blank space. Moreover imperfect Japanese letters that include missing parts are recognized as well as the perfect ones.

1. 緒 言

人間の脳神経回路網は、外界から入ってくる文字、音声、イメージなど極めて多くのパターン情報を的確に素早く判断・識別する能力を持っている。そして人間のパターン認識能力のごく一部の機能（文字認識など）は、コンピュータ等の情報処理装置によって実用化された例もある¹⁾。しかしそれらのほとんどはシーケンシャルなディジタル処理で行われていることから、大量の演算時間とメモリ容量を必要とする。そこでこれらの処理を行うための高速化された処理システムが切望されている²⁾。

こうした問題に対し、光の高速性・並列処理性に注目し光を用いた文字認識に関する研究が行われている³⁾。この光学文字認識はシステムの大半が光学素子で構成されるため、入力された文字に対する応答が高速である

利点を備えている。またこのシステムは、空間的な情報処理が可能であるため、並列処理を行う際にも有効となる。さらに近年では、液晶などに代表される空間光変調素子をこのシステムの一部として用いることにより、文字認識も容易に実時間の処理が可能となるため、それらの応用範囲も広くなってきていている。これらのことから、光学的手法を導入することはこれからの文字認識の分野において有効であると考えられる。

従来からわれわれは光学文字認識システムを構築する一手法として、マッチトフィルタリング⁴⁾の応用を提案してきた。マッチトフィルタリングは、ある2次元の画像の中から特定のパターンの存在とその位置の情報を検出可能とするものである。このフィルタを情報処理のために用いる光学系が非常にシンプルであることなどから、文字認識^{5,6)}や指紋の鑑定⁷⁾などに用いた例が報告さ

れている。

このマッチトフィルタリングを用いたパターン認識システムを構築するにあたり、これまで多重マッチトフィルタ⁸⁾作製の際に用いる参照パターンに関する提案が、矢野らによって行われた⁹⁾。それによると被認識パターンより抽出した特徴部分を参照パターンとして用い、さらにこのフィルタから得られた相関信号を処理する際にフィールドの概念を導入することによって、アルファベット 26 文字と空白を含めた 27 文字の識別が可能であることが示された。

しかしこの認識システムは、光学処理系で出力された相関信号を 2 倍化することにより得られる相関信号の 2 倍化情報の分布パターンと、理想的な相関信号の分布パターンを単純に比較するアルゴリズムに基づいて未知入力パターンを認識するものであった。そのため、欠け・かすれ等が存在する文字が入力された場合や、光軸のわずかなズレなどの外的な要因は、理想的な相関信号とは異なる信号が output されるため認識が不可能であった。

そこで、われわれはこれらに対応したシステムを実現する一手法として、光学系により得られた相関信号から被認識対象を識別する部分に、人間の神経回路網を模倣したニューラルネットワークを用いることを提案した。そしてマッチトフィルタリングとニューラルネットワーク（アソシエイション¹⁰⁾）を組み合わせたハイブリット認識システム¹¹⁾を構築することによって、欠け・かすれのある文字が入力された場合にも、正確なパターンを想起しこれを認識できる可能性のあることが報告されている¹²⁾。しかし從来報告されたシステム¹²⁾では、認識対象であるカタカナ文字セットが 47 種類ものパターンを持っているため、このすべてを認識するための特徴抽出された参照パターンは見つけられておらず、その一部 10 文字が認識されたのみであった。

そこで本論文では、認識対象を全カタカナ文字と空白を含めた 47 パターンとした場合において、特徴抽出の概念に基づき決定された参照パターンによって、特徴抽出された文字により多重化されたマッチトフィルタを作製する手法の有効性の確認を行う。さらに本研究では、マッチトフィルタリングによる相関信号を処理する部分にニューラルネットワークを導入し、外的な要因やパターン中にノイズ（欠け・かすれ）が存在する場合にも対処可能なパターン認識システムの検討を行ったので報告する。

2. 特徴抽出フィルタ

従来よりパターン認識に応用されてきたマッチトフィルタリングでは、被認識パターンそのものを参照パターンとするテンプレートマッチングを基本にパターンの識別が行われてきた。しかしこの手法では、相関度の非常に高いパターン同士（例えば、カタカナ「エ」とそれに含まれてしまう「ニ」の場合など）の識別が困難となる場合が生じていた。そのうえフィルタ作製のためには、被認識パターンの数と同じ数の参照パターンを用意しなければならない。このため多重マッチトフィルタリングの手法をもってしても、多數のパターンを認識しようとする場合（例えば今回の実験のようにカタカナ文字の場合）、多重露光の回数の限界から観測面における多数の出力信号は相当な広がりを持って分布することになり、これを限られた範囲の面内で観測する手法はもちろんのこと、そのフィルタ作製にも極めて高い精度が求められることになる。

これらの問題点を解決するため、本研究では参照パターンとして被認識パターンそのものを用いるのではなく、被認識パターンの一部から切り出した構成部分要素¹³⁾を用いる。この部分要素より作製した多重マッチトフィルタは、一種の特徴抽出フィルタと考えられる。そこでこれを用いてフィルタリングを行うと、得られる相関信号の有無によって入力文字を特徴づけている構成部分要素が抽出されることになる。したがって類似したパターンが同時に入力された場合にも、この特徴抽出フィルタを用いることによりそれらの相関信号の分布に相違をもたらせることが可能となり、両者のパターンを識別することが可能となる。

以上の点について、類似したパターンの例として認識対象を Fig. 1 に示すカタカナ「エ」および「ニ」とした場合について説明する。特徴抽出フィルタとして、まずそれらの文字の構成部分要素である縦棒と横棒を参照パターンに用いてマッチトフィルタを作製する。そしてこのフィルタを用いて入力パターン「エ」とのマッチトフィルタリングを行う。このとき一般的に光学的マッチトフィルタリングを行うと、二重回折系が実験装置として用いられているため各参照パターンの中心に対して反転した位置に相関信号が出力されることを考慮すると、今の場合であれば参照パターンが縦棒のフィールドに関しては「エ」の縦棒の寄与による相関信号が中心に、横棒のフィールドに関しては上、下段に 2 本の横棒からの相関信号が出力される。ここで、光学的相関出力面にフィ

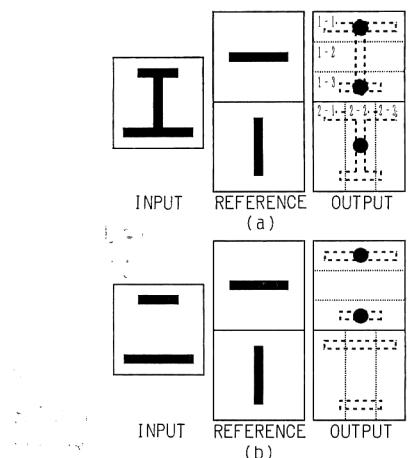


Fig. 1 A concept of multiplexed matched spatial filtering by feature-extracted reference patterns.

ールド（横棒のフィールドは Fig. 1 の 1-1, 1-2, 1-3 を合わせた領域）およびフィールドをさらに三分割するパート（Fig. 1 の 1-1 の領域）を設定しているのは、今回の実験のようにカタカナ文字を認識しようとする場合、縦棒、横棒の存在する位置はカタカナ “エ”, “コ”, “ニ”, “ユ”, “ヨ”, “ロ” のようにそれぞれ異なるため、その部分要素が入力文字のどの位置に存在するのかという情報が非常に重要なからである⁹⁾。

次に、得られた相関信号の分布パターンから入力文字を推測する論理式を $(1-1=\text{true}) \text{ and } (1-3=\text{true}) \text{ and } (2-2=\text{true})$ then 「エ」、とすることにより入力パターンを決定することができる。

一方、入力パターン「ニ」とのマッチトフィルタリングを行った場合には、横棒のフィールドに出力される相関信号の分布は「エ」を入力した場合と同様であるが、縦棒のフィールドに関しては相関信号が検出されない。よってこの手法とアルゴリズムを用いれば、入力パターン「エ」と「ニ」では、その光学的な相関信号の出力パターンが異なり、この違いから両者の識別が可能となる。

したがって、参照パターンとして最適な部分要素を用いて作製したマッチトフィルタでフィルタリングを行えば、相関度の高いパターン同士の識別も容易となることが予想される。

また従来のテンプレートマッチングの手法では、 N 個の入力パターンを識別するフィルタには N 個の参照パターンを記録することが必要であった。しかし本研究で提案する部分参照パターンを用いることによって作製した特徴抽出フィルタでは、参照パターンの数を減らす

ことができ、その結果フィルタの回折効率の向上が図られる。

3. ニューラルネットによる信号処理

欠け・かすれ等の存在する文字の認識を行おうとする場合、認識パターンそのものを参照パターンとする従来のテンプレートマッチングの手法に基づいたまでは、マッチトフィルタリング後の相関信号強度の低下を伴うため他の入力文字との識別が困難であった。そこで入力文字の構成部分要素より作製した特徴抽出フィルタを用いることにより、欠け・かすれのある文字が入力された場合でも、観測者は他の部分要素に対する相関信号の分布から入力パターンを推測することが可能となる。この「観測→推測」の過程に、連想記憶機能を持つニューラルネットワークを導入することが、本システムによる認識率を向上させる上で有効であると考えられる。

例えば参照パターンを横棒と縦棒として特徴抽出フィルタを作製し、Fig. 2 に示す欠け・かすれのある文字 “エ” の光学的マッチトフィルタリングを行う場合を考える。このとき入力された文字 “エ” の横棒の部分が欠けていることから、出力面の 1-3 部分における相関信号が低下する。しかし残された相関信号の分布パターンをニューラルネットワークに入力すれば、ニューラルネットワークの連想記憶機能により、その文字の認識も可能になると考えられる。このニューラルネットワークを導入した認識システムは、欠陥文字を含むすべての文字の入力に対して利用している。

そこで本研究では、従来からわれわれが用いてきたハイブリット認識システムのディジタル処理部にニューラルネットのモデルとして階層型のパーセプトロン¹⁴⁾を導入する。このパーセプトロンは Fig. 3 に示すように入力層、中間層、出力層の 3 層から構成されており、一つの層の中でのユニット間の結合ではなく、層間結合は入力

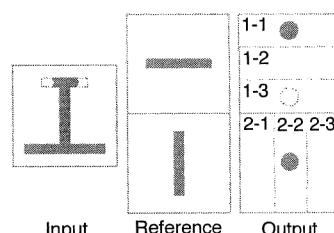


Fig. 2 Distribution of peak correlation signals by matched spatial filtering with an imperfect input letter ‘エ’。A peak signal observed in a part area of 1-3 by a perfect input is missing.

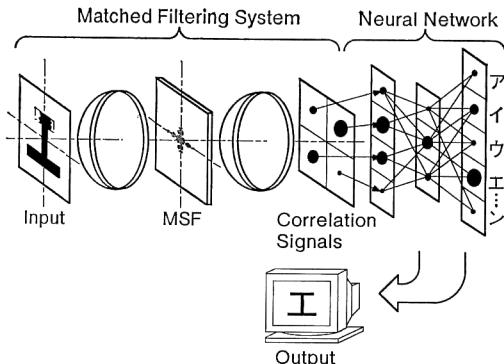


Fig. 3 A concept of a proposed pattern recognition system. The system is composed of a matched filtering system and a digital system which is based on neural networks. The system can recognize an imperfect character.

層から出力層への一方である。また入力層と中間層の間および中間層と出力層の間の結合は可変であり、それらの結合係数はバックプロパゲーションモデル¹⁴⁾の学習方法によって決められる。そして、このニューラルネットにあらかじめ完全な文字に対して得られる相関信号の分布パターンを入力し学習を行っておく。

次にニューラルネットの入力層に、Fig. 2 の出力面に設定しているパートで検出される相関信号の 2 値化した情報を提示する。そして未知入力文字の認識を行うと、ニューラルネットは正しいパターンを想起するので、欠け・かすれのある文字の認識が可能となる。

ディジタル処理部では、具体的に以下の操作が実行される。

- (1) CCD カメラで取り込んだ相関信号を CRT 画面に表示
- (2) 未知入力文字数によって決定されるフィールド、およびパートからなる枠を相関信号の出力面に設定
- (3) 各フィールドごとに相関信号を 2 値化
- (4) 2 値化された相関信号を検索し、得られた相関信号の on-off 情報を多層ペーセプトロンの入力層に提示
- (5) 多層ペーセプトロンの出力層に示される信号の最大値が、設定値以上であれば未知パターンの認識結果を CRT 画面へ表示

4. 実験

4.1 マッチトフィルタリング

本実験では認識対象を、全カタカナ 46 文字と空白 1

個を合わせた 47 パターンとし、それらを識別可能な部分参照パターンを FFT (高速フーリエ変換) を用いたコンピュータシミュレーション⁹⁾によって決定した (Fig. 4 参照)。また、これらによってマッチトフィルタリングを行う際に、観測面において Fig. 4 に示すフィールド、パートからなる枠を設定することにより、相関信号の位置の情報が増加し、47 パターンの識別能力が向上している。

実際に、マッチトフィルタ作製の際に用いた参照パターンを Fig. 5 に示す。Fig. 5 中の部分パターン“縦棒”的乾板上での大きさは、カタカナ “ホ” の縦棒の半分であり、太さ 0.15 mm, 長さ 0.6 mm である。また他の部分パターンも同様の大きさである。各部分パターンごとの間隔は、マッチトフィルタリングによる相関信号が

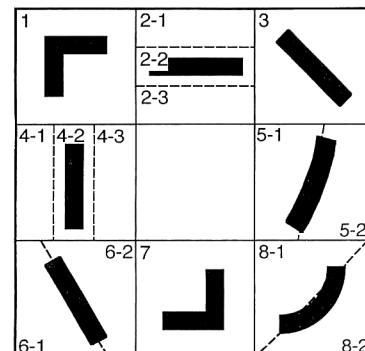


Fig. 4 Eight reference patterns extracted and selected by the results of computer simulations. Field distribution is also shown according to each feature-extracted pattern. Twelve parts in five fields are set to the position where the correlated signals with the feature-extracted patterns could be detected.

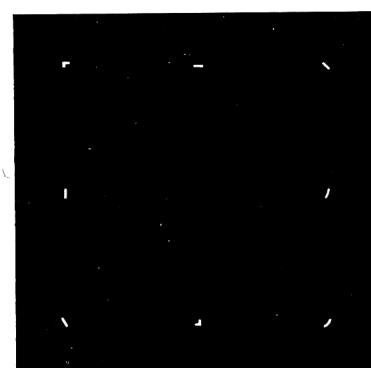


Fig. 5 Reference patterns. Eight feature-extracted patterns are recorded on a photographic plate as a transparency.

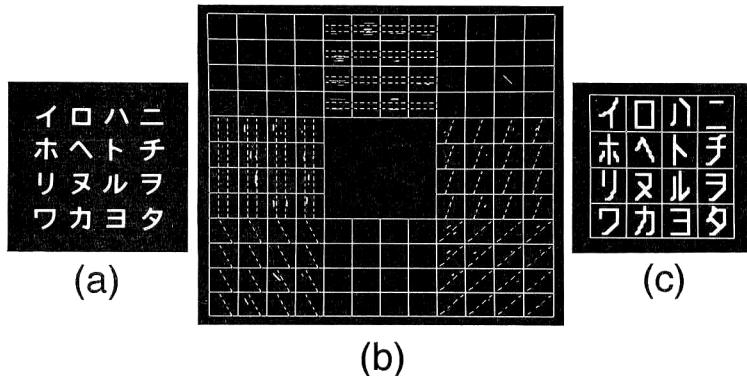


Fig. 6 (a) Perfect input patterns. (b) Binarized peak correlation signals on the CRT display. Overlapped frames help to show in which field or part the peak is. (c) Result of recognition on the CRT display.

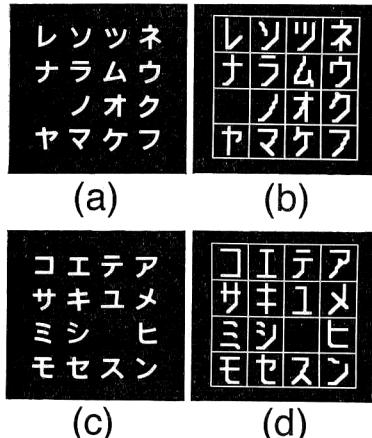


Fig. 7 Experimental results by perfect input patterns (left). Results of recognition on the CRT display (right).

各部分パターンごとに分離されて観測されることを考慮し⁸⁾、6.8 mmとした。

マッチトフィルタは、Fig. 5に示す参照パターンを用いて反射型フーリエ変換プログラム作製の手法に基づいて作製され、露光した乾板 (Agfa 社 8E 75 HD) に現像 (CW-C2)、漂白 (PBQ-2) 处理を施すことで、乳剤の収縮の影響が無視できる反射型のマッチトフィルタが得られる⁹⁾。ただしフィルタ作製の露光の際、乾板の乳剤面は物体光側とし、露光時間は 15 s である。

また未知入力パターンとして用いた透過物体を Fig. 6(a) および Fig. 7(a), (c) に示す。乾板上で文字の寸法は、“ア”の横幅を基準として 1.0 mm に定めた。

次に実験で用いたハイブリット認識システムの概略を

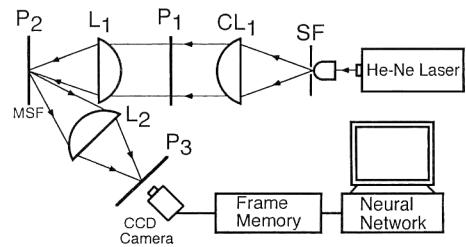


Fig. 8 Schematic diagram of a hybrid pattern recognition system with the MSF and the neural network.

Fig. 8 に示す。このシステムはレーザーから P_3 面までの光学処理系と、CCD カメラより後段のデジタル処理系から構成される。 P_1 、 P_2 、および P_3 はそれぞれ、未知入力物体面、マッチトフィルタ面、そして光学的相関出力面であり、 L_1 および L_2 はフーリエ変換レンズである。またデジタル処理の計算部分にニューラルネットワークを用いている。

この認識システムの P_2 面に、特徴抽出した参照パターンから作製したマッチトフィルタを配置し、未知入力パターンとして、Fig. 6(a) に示す完全な文字の透過物体を P_1 面に挿入する。そしてこの物体にレーザー光を照射しマッチトフィルタリングを行った。このとき P_3 面には光学的な相関信号が実時間で出力される。この出力された相関信号を CCD カメラでフレームメモリに格納する。そしてデジタル処理系において未知入力パターンの部分要素の種類とその位置の情報を得るために枠の設定処理を行い、各フィールドごとに光学処理で得られた相関信号を、最大 247 レベルのうちしきい値レベル 87 で 2 値化する (Fig. 6(b))。さらに各フィール

ド、各パートにおける相関信号の有無を検索し、入力パターンの特徴を示す部分要素の種類とその位置の情報を得る。同様にして、他の未知入力パターンについてもマッチトフィルタリングを行い、そのパターンの特徴を示す部分要素の種類とその位置の情報を得た結果、8個の部分参照パターンにより認識対象である全カタカナ46文字と空白1個を合わせた47パターンの識別が可能であった(Fig. 6(c)、およびFig. 7(b)、(d)参照)。

したがって多重マッチトフィルタ作製の際に用いる参考パターンに、被認識パターンより抽出した特徴部分を用いることの有効性を確認できた。

4.2 欠け・かすれのある文字の認識

さらに本研究では、今回提案したシステムによって欠け・かすれのある文字の認識の可能性についても検討を行った。そのため、まず完全なカタカナ文字の入力に対して得られた相関信号の分布パターンを従来より用いていたニューラルネットワークモデルのアソシアトロンに入力し、学習(記録)を行った。ところがアソシアトロンのモデルが記憶できたパターン数は、47パターンのうちわずか4パターン程度であった。

この理由は、以下のように考えられる。今回の実験で

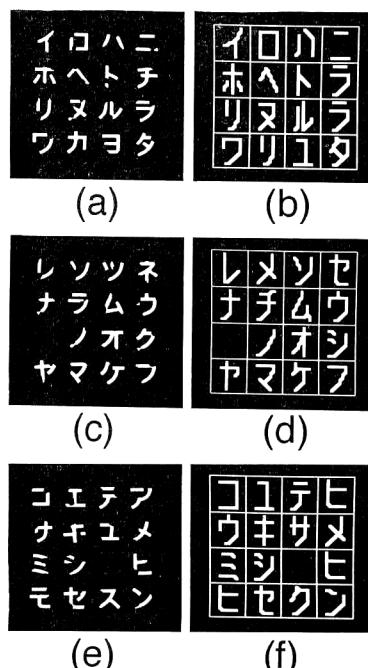


Fig. 9 Experimental results by binarized peak correlation data. Imperfect input patterns (left). Results of recognition when binarized peak signals are put into neural networks (right).

用いたアソシアトロンのモデルは相互結合型である。したがって一般に N 個のパターンを記憶させるためのニューロンの数は記憶させるパターン数 N の10倍程度が必要とされており、それ以下のニューロンの数では記憶パターン間の混同が起こり、連想記憶として正確に動作しなくなることが知られている¹⁴⁾。そのため従来用いているアソシアトロンにおけるニューロンの数は、出力面に設定されるパートの数、すなわち15個であることから、本実験のために記憶可能なパターンの数は2パターンが限度であると考えられる。

そこで今回アソシアトロンに代って、ネットワークの学習能力が高く、有効な学習方法を持つ階層型のパーセプトロンを導入した。またこのパーセプトロンは入力層、中間層、出力層の3層型とし、各層におけるユニット数はそれぞれ15個、11個、そして47個と設定した。

そして完全な文字入力に対して得られた相関信号の分布をパーセプトロンの入力層に提示しバックプロパゲーションのアルゴリズムによって学習を行った。学習回数が1000回で、出力層では教師信号どおりの出力が得られることからこの時点での学習を終了した。

次に完全な文字の場合と同様にして、Fig. 9(a)、(c)、(e)に示す欠け・かすれのある文字をそれぞれP1

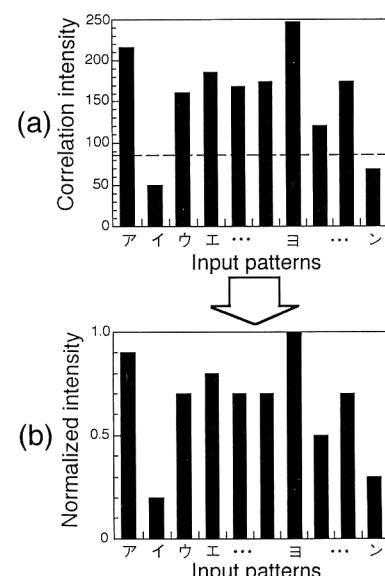


Fig. 10 A concept of normalization of peak signals. Correlation signals between Japanese letters and the horizontal bar reference pattern are shown in (a). Normalized intensity of (a) by the peak intensity of letter ‘ヨ’ is shown in (b).

面に挿入し認識実験を行った。その認識結果を Fig. 9 (b), (d), (f) に示す。

誤認識された欠け・かすれのあるパターン 15 例の原因としては、認識対象が 47 パターンと多いにもかかわらず、相関信号を 2 値化した情報 15 個によって認識対象を識別していることから、類似した相関信号の分布パターンの多いことが考えられる。

4.3 ニューラルネットへの信号入力方法の改善

さらに本システムの欠け・かすれを持つ文字の認識能力の向上を図ることを考えた。そこでマッチトフィルタリングによる相関信号をニューラルネットに入力する際、従来は相関信号を 2 値化した情報を用いていたので、これを相関信号の規格化による 0 から 1 の 0.1 ステップごとの情報を入力することで認識能力の向上を試みた。

したがって、完全なカタカナ文字と空白を含めた 47 パターンと Fig. 5 に示す参照パターンとの光学的マッチトフィルタリングによって得られる相関信号の中から、各部分参照パターンごとに最大値を選び、その値を基に相関信号の規格化を行う。例えば Fig. 5 中の参照パターン“横棒”と各カタカナ文字との相関信号を並べ

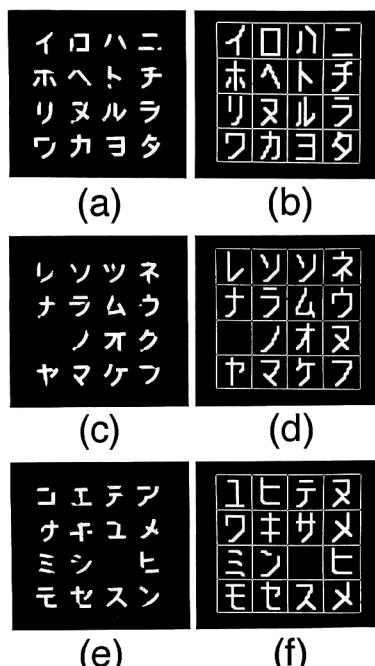


Fig. 11 Experimental results by normalized peak correlation data. Imperfect input patterns (left). Results of recognition when normalized peak signals are put into neural networks (right).

Table 1 Difference of recognition capability between binarized peak data and normalized peak data after processing by neural networks.

Input data	Recognition (%)
Binarized peak	68.8
Normalized peak	79.2

ると、Fig. 10(a) のように表される。従来は、これらの 2 値化の相関信号をニューラルネットに入力することで学習・認識を行っていた。

今回はこれらの相関信号の規格化を行うため、カタカナ 46 パターン中、相関信号が最大である “ヨ” の場合 (レベル 247) の相関信号を基準として、相関信号の規格化を行う (Fig. 10(b))。同様にして他の参照パターンの場合についてもそれぞれ最大値を選び、これを基準として規格化を実行した。

そして、規格化した相関信号をニューラルネットに入力し学習を行ったところ、学習回数が 1000 回で教師信号どおりの出力が得られた。ここで、パーセプトロンの各層におけるユニット数を入力層 15 個、中間層 15 個、そして出力層 47 個と設定した。

次に、未学習のパターンである Fig. 9(a) に示す欠け・かすれのある文字を P₁ 面に挿入し認識実験を行った。その認識結果を Fig. 11(b) に示す。従来の相関信号 2 値化による on-off 情報をニューラルネットに入力する場合と比較して、欠け・かすれのある文字「チ」、「カ」、「ヨ」の認識が可能となっていることがわかる。また欠け・かすれのある文字「ヲ」については、「ヲ」と「ヲ」の識別のポイントとなる部分が欠けていることから「ラ」に認識されたと考えられる。同様にして他の欠け・かすれのある文字についての認識実験の結果を Fig. 11 に示す。

以上により認識率を、“欠け・かすれのあるパターンの総数に対して正しく認識したパターンの比”として定義し、その計算結果が Table 1 に示されている。これよりニューラルネットに入力する相関信号の情報を、規格化した 0 から 1 のデータとして用いることで認識率の向上が図れたことがわかる。

さらに欠け・かすれのある文字を認識する完全なシステムを構築するためには、現在の手法のままでは誤認識となる場合が存在する。そこでこのような場合は単に認識不可能とリジェクトして処理を打ち切るか、あるいはあくまでも正確な認識を可能とするためには、得られたピーク信号処理方法の改善が必要である。

5. 結 言

本研究では、マッチトフィルタに用いる参照パターンとして、特徴抽出の概念に基づき決定した8個の部分パターンを用い、カタカナ46文字と空白1個を含めた47パターンを識別した。これによりカタカナ文字セットのように多数のターゲットを認識しようとする場合にも、多重マッチトフィルタ作製の際に用いる参照パターンに被認識パターンより抽出した特徴部分を用いることの有効性を確認できた。

さらに本研究では、ハイブリッドシステムの一部にニューラルネットワークを導入し、ニューラルネットに入力する際の光学的相関信号の情報を、規格化した0から1の0.1ステップごとのデータとして用いた。これにより、欠け・かすれのある文字の入力によって一部の相関信号が低下する場合でも、それらの文字を認識可能なハイブリッドシステムを構築できた。

しかし今回はニューラルネット学習時に与える教師信号に完全な文字の相関信号分布パターンのみを与えたため、幾つかの欠け・かすれパターンは認識不可能であった。したがって今後学習時に、ノイズを含む文字の相関信号分布パターンも用いることで、提案するシステムの認識能力を向上させることができるとと思われる。

今後の課題は、前述の点と合わせ、欠け・かすれのほかに一般的なノイズを含む文字が入力された場合の認識実験を行い、このシステムの認識能力を定量的に解析・評価することである。

文 献

- 安居院猛, 長尾智晴: 画像の処理と認識 (昭晃堂, 1992).

- 辻内順平, 一岡芳樹, 峰本 工: 光情報処理 (オーム社, 1989).
- 藏富靖規, 潤本昭雄, 秋山浩二, 小川久仁: “特徴抽出光ニューロン素子を用いた手書き文字認識光ニューラルネットワーク”, 光学, 22 (1993) 20-26.
- A. VanderLugt: “Signal detection by complex spatial filtering,” IEEE Trans. Inf. Theory, IT-10 (1964) 139-145.
- S. Kamemaru, J. Yano and H. Itoh: “Matched spatial filtering by feature extracted reference patterns using cross-correlated signals,” Proc. SPIE, 1564 (1991) 143-154.
- M. Nakajima, T. Morikawa and K. Sakurai: “Automatic character reading using a holographic data processing technique,” Appl. Opt., 11 (1972) 362-371.
- J. Tsujiuchi, K. Matsuda and T. Takeya: *Applications of Holography*, eds. E.S. Barrekette, et al. (Plenum Press, New York, 1971) p. 247.
- 清水 敏, 浅川修一朗, 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.
- 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.
- 知能システム研究会: 脳の情報システム (啓学出版, 1987) pp. 17-40.
- S. Kamemaru, T. Nagaoka, M. Kakuta and I. Simizu: “Multiple matched spatial filtering with corresponding symbols by the hybrid system,” Jpn. J. Appl. Phys., 29 (1990) L1557-L1560.
- S. Kamemaru and T. Baba: “Pattern recognition system by a matched spatial filter and neural networks for imperfect input characters,” Proc. SPIE, 2026 (1993) 185-193.
- G. Winzer and N. Douklias: “Improved holographic matched filter systems for pattern recognition using a correlation method,” Opt. Laser Technol., 4 (1972) 222-227.
- 中野 馨, 飯島一元, ニューロンネットグループ, 桐谷 澄: ニューロンコンピュータ (技術評論社, 1989).