



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

清水 勲*・浅川修一郎**・亀丸 俊一***

* 茨城工業高等専門学校機械工学科 〒312 勝田市中根深谷津 866

** 横浜国立大学工学部 〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156

*** 茨城大学工学部精密工学科 〒316 日立市中成沢 4-12-1

(1988年3月1日受理)

Simultaneous Discrimination of the Shapes of Multiform Objects and the Object's Position by a New Multiplexed Matched Spatial Filter

Isao SHIMIZU,* Shuuichiro ASAKAWA** and Shun-ichi KAMEMARU***

* Department of Mechanical Engineering, Ibaraki College of Technology,
866, Nakane, Katsuta 312

** Department of Electronic Engineering, Yokohama State University,
156, Tokiwa-dai, Hodogaya-ku, Yokohama 240

*** Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University,
4-12-1, Nakanarusawa, Hitachi 316

The purpose of this study is to clarify the characteristics of the multiplexed Matched Spatial Filter (MSF) which has been developed to recognize the shapes of objects and to locate the object's position simultaneously and instantaneously. A conventional MSF could not recognize some different figures simultaneously, by one hologram constructed without multiple exposures. In this paper a new concept as well as a new technique for the multiplexed MSF constructed by a single exposure is described. The presence and the location of many desired patterns are recognized by one MSF. Each autocorrelation signal from the MSF is reconstructed as a bright spot on a reserved area in the observation plane. This MSF, by a new technique, has had a good performance for multiple and parallel information processing.

1. ま え が き

電子回路基板の検査, 文字認識, 一般物体形状認識のためのロボットの眼, 微生物・生体細胞の識別などのために, 多数の異なる形状の物体の形状と位置およびその数を同時に実時間で識別するための技術を早急に開発することが望まれている。

物体の形状とその位置を測定する方法の一つとして, CCD カメラで画像情報をコンピュータに取り込み, デジタル的に図形処理して識別する方法が考えられる。しかしこの画像識別法は, 物体形状を定量的に把握するた

めには膨大な時間が必要となり, 実時間的な識別を行なうには超大規模のコンピュータを必要とし, 実際的な応用は困難である。一方, 物体形状識別のために並列処理能力の高いマッチトスペーシャルフィルタ法が用いられ, 珪藻類の識別¹⁾ や指紋の鑑定²⁾ などに効力を発揮している。しかし, この方法は被測定物体がフィルタ作製物体とまったく同一形状, 同一寸法, 同一の傾き角のものしか識別できない。そのうえ, 1枚のマッチトフィルタで異なる形状物体を同時に識別することは非常に困難である。

そこでマッチトフィルタ法において, 複数の物体形状

を1枚のフィルタで同時に識別する方法として、数種の物体をそれぞれ参照光の傾きを変化させて多重露光する方法が考えられる。このフィルタによる物体の検出は、参照光の方向による完全に独立した信号が測定できる利点をもつ。しかしこの方法はフィルタ作製用感光材料の特性から、露光回数が多いほど各露光間での露光量に差が生じ、各物体形状識別用フーリエ変換像の回折効率が低下する。したがって、多重露光フィルタでは多形状の物体の形状判別能力が劣るという欠点があった。

さて、マッチフィルタ法によって異なる形状物体を一枚のフィルタで同時に識別する方法としては Vander Lugt の報告がある³⁾。この報告では3×3列に並べられた各種の形状をもつ物体を一度の露光で記録し、複数の種類の物体の判別が行なわれた。しかしこの報告においては、検出しようとする複数の物体の出力信号をその物体を特定できる場所に出力させるという概念はとり入れられておらず、単にフィルタ個々の impulse response と入力物体が重ならない配置をとるよう配慮されているだけであった。また、これには被測定物体の識別信号の座標の特定が行なわれておらず、被識別物体の複雑な配置に対しては識別信号の同定が不可能となるという欠点があった。

そこで、本研究では Vander Lugt の多重フィルタ法の欠点を補うため、フィルタ作製時の測定視界の大きさと被測定物体の測定視界の大きさを意識的に変化させた。そして物体の位置による位相偏移を積極的に利用して、識別物体形状に関する信号が出力される領域や位置を、ほぼ任意に決定することができるような多重マッチフィルタを作製した。また被測定物体の認識位置を理論的に特定し、実験的にこれを確認した。その結果、Vander Lugt の識別法に比べてすぐれた多重マッチフィルタ法が開発され、それによって良好な識別結果を得ることができた。これにより複数の物体形状と位置および数を一枚のフィルタで同時に実時間的に識別することが可能となり、マッチフィルタ法による形状認識に新しい局面を開くことができた。

2. 原 理

用いられたマッチフィルタ作製用光学系および形状識別光学系の概略を Fig. 1 に示す。

多数の異なる形状の物体を同時に識別する方法の原理の大略は以下のものである。まず広い平行光束中に被測定形状物体を互いに遠く離して配置し、レンズ L_1 の前側焦点面 P_1 に置く。各形状の物体から生じた回折光

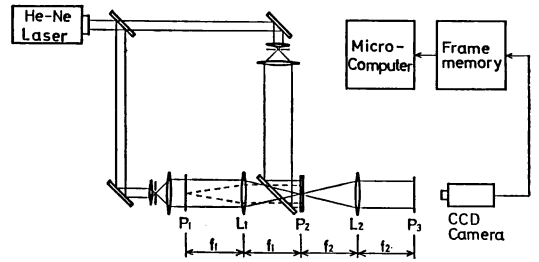


Fig. 1 An optical measuring system for the shapes of multiform objects and the object's location using a multiplexed matched spatial filter.

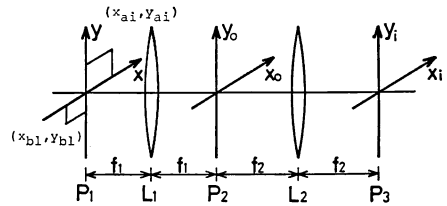


Fig. 2 The coordinate system for the input object plane $P_1(x, y)$, the filtering plane $P_2(x_0, y_0)$ and the output plane $P_3(x_i, y_i)$.

は、レンズの後側焦点面 P_2 上に物体の位置に依存する位相偏移情報と形状情報を含む回折パターンを形成する。これらの回折パターンを同時に一つの参照光と干渉させれば、各物体の形状および位置の情報が一度の露光で一枚のホログラムに記録される。マッチフィルタを用いて物体形状とその位置を識別するためには、マッチフィルタを P_2 へ挿入し、 L_1 の前側焦点面 P_1 にフィルタ作製時の物体光の光束に比べて出力信号光が重ならないように狭い平行光束をあて、測定視界を形成する。 P_1 上の測定視界中に被測定物体群をいれると、 P_3 上に現れる出力光の輝点の存在する領域によって被測定物体の形状が識別され、その領域の中心点に対する輝点の位置関係によってその形状の物体の現存する位置が決定される。

さて以上のことを、数式的に表わすと次のようになる。入力面、フィルタ面、出力面の座標系を Fig. 2 に示す。 P_1 面の X - Y 直交座標系において、基準面での像関数が $g_i(x, y)$, $i=1, \dots, n$ で表わされる n 個の多形状物体を、基準位置から x, y 方向へ任意にそれぞれ x_{ai} , y_{ai} だけ離して配置する。全物体による像 $u(x, y)$ は各物体の和になるので

$$u(x, y) = \sum_{i=1}^n g_i(x - x_{ai}, y - y_{ai}) \quad (1)$$

と表わされる。この物体により、焦点距離 f_1 のレンズ

L₁ の後側焦点面 P₂ には次に示されるフーリエ変換像 F {u(x, y)} がつくられる。

$$F\{u(x, y)\} = \sum_{i=1}^n G_i(x_0/\lambda f_1, y_0/\lambda f_1) \cdot \exp\{-j2\pi(x_{a_i}x_0/\lambda f_1 + y_{b_i}y_0/\lambda f_1)\} \quad (2)$$

ただし、ここで λ は入射光の波長であり、g_i(x, y) のフーリエ変換を

$$G_i(x_0/\lambda f_1, y_0/\lambda f_1) = F\{g_i(x, y)\} \quad (3)$$

とした⁴⁾。

F {u(x, y)} を物体光とし、この物体光に光軸方向から x₀, y₀ 方向にそれぞれ θ_x, θ_y だけ傾いて進行する平面波 R(x₀, y₀) すなわち

$$R(x_0, y_0) = R_0 \cdot \exp\{-j2\pi(x_0 \sin \theta_x / \lambda + y_0 \sin \theta_y / \lambda)\} \quad (4)$$

を参照波として互いに干渉させると、次のような振幅透過率分布をもつホログラムを得る。ただし、ホログラムの感光材が露光量と比例した振幅透過率を与えるものとする。

$$T(x_0, y_0) = \left| \sum_{i=1}^n G_i(x_0/\lambda f_1, y_0/\lambda f_1) \cdot \exp\{-j2\pi(x_{a_i}x_0/\lambda f_1 + y_{b_i}y_0/\lambda f_1)\} + R_0 \cdot \exp\{-j2\pi(x_0 \sin \theta_x / \lambda + y_0 \sin \theta_y / \lambda)\} \right|^2 \quad (5)$$

このうちフィルタリングに寄与する項は

$$T_1(x_0, y_0) = (1/2) \sum_{i=1}^n R_0 G_i^*(x_0/\lambda f_1, y_0/\lambda f_1) \cdot \exp\{j2\pi(x_{a_i} - f_1 \sin \theta_x)x_0/\lambda f_1 + (y_{b_i} - f_1 \sin \theta_y)y_0/\lambda f_1\} + (1/2) \sum_{i=1}^n R^* G_i(x_0/\lambda f_1, y_0/\lambda f_1) \cdot \exp\{-j2\pi(x_{a_i} - f_1 \sin \theta_x)x_0/\lambda f_1 + (y_{b_i} - f_1 \sin \theta_y)y_0/\lambda f_1\} \quad (6)$$

で表わされる。ただし、肩付きの * は複素共役を表わす。本測定法では、式(6)に示されるような物体の形状と位置の情報を含む搬送周波数をもつホログラムを、P₂ 面上に置きマッチトフィルタとする。

さて、レンズ L₁ の前側焦点面上の狭い測定視界中に像関数 g_i(x, y) で表わされる物体群を、x, y 軸方向に基準点からそれぞれ x_{b_i}, y_{b_i} だけ離して入力すると、新たな被測定物体光としてレンズ L₁ によってフーリエ変換された

$$U_0(x_0, y_0) = F\left\{\sum_{i=1}^m g_i(x - x_{b_i}, y - y_{b_i})\right\}$$

$$= \sum_{i=1}^m G_i(x_0/\lambda f_1, y_0/\lambda f_1) \cdot \exp\{-j2\pi(x_{b_i}x_0/\lambda f_1 + y_{b_i}y_0/\lambda f_1)\} \quad (7)$$

が与えられる。P₂ 面で U₀ 面がフィルタに入射すると、フィルタによって回折される +1 次光 U_{D1} は、式(6)、(7)から次のように表わされる。

$$U_{D1} = U_0(x_0, y_0) \cdot T_1(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^n R_0 G_i(x_0/\lambda f_1, y_0/\lambda f_1) \cdot G_i^*(x_0/\lambda f_1, y_0/\lambda f_1) \cdot \exp[j2\pi\{(x_{a_i} - f_1 \sin \theta_x - x_{b_i})x_0/\lambda f_1 + (y_{a_i} - \sin \theta_y - y_{b_i})y_0/\lambda f_1\}] \quad (8)$$

さらにこの光は焦点距離 f₂ のレンズ L₂ でフーリエ変換され、P₃ 面上で次のように表わされる。

$$F\{U_{D1}\} = \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^n R_0 g_i^*(f_1 x_0/f_2, f_1 y_0/f_2) \cdot g_i(-f_1 x_0/f_2 + x_{a_i} - f_1 \sin \theta_x - x_{b_i}, -f_1 y_0/f_2 + y_{a_i} - f_1 \sin \theta_y - y_{b_i}) \quad (9)$$

ここで * はコンボリューションを表わす。この出力分布を相関関数の形で表わすと次のようになる。

$$F\{U_{D1}\} = R_0 \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^n G_i^*(x_0/\lambda f_1, y_0/\lambda f_1) \cdot G_i(x_0/\lambda f_1, y_0/\lambda f_1) \cdot \exp[-j2\pi\{(x_{b_i}x_0/\lambda f_1 - x_{a_i}x_0/\lambda f_1 + x_0 \sin \theta_x / \lambda) + (y_{b_i}y_0/\lambda f_1 - y_{a_i}y_0/\lambda f_1 + y_0 \sin \theta_y / \lambda)\}] \cdot \exp\{-j2\pi(x_0 x_i / \lambda f_2 + y_0 y_i / \lambda f_2)\} \cdot d(x_0/\lambda f_2) d(y_0/\lambda f_2) = R_0 \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^n g_i^*\{(f_1/f_2)x_i, (f_1/f_2)y_i\} \cdot g_i\{-(f_1/f_2)x_i, -(f_1/f_2)y_i\} \cdot \delta\{x_i + (f_2/f_1)x_{b_i} - (f_2/f_1)x_{a_i} + f_2 \sin \theta_x, y_i + (f_2/f_1)y_{b_i} - (f_2/f_1)y_{a_i} + f_2 \sin \theta_y\} \quad (10)$$

ここで

$$g(x, y) * f^*(-x, -y) = g(x, y) \star f(x, y) \quad (11)$$

を用いる⁵⁾ と式(10)は

$$F\{U_{D1}\} = R_0 \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^n [g_i^*\{(f_1/f_2)x_i, (f_1/f_2)y_i\} \star g_i\{(f_1/f_2)x_i, (f_1/f_2)y_i\}] \cdot \delta\{x_i + (f_2/f_1)(x_{b_i} - x_{a_i})\}$$

$$\begin{aligned}
 &+f_2 \sin \theta_x, y_i + (f_2/f_1)(y_{b1} - y_{a1}) \\
 &+ f_2 \sin \theta_y \} \quad (12)
 \end{aligned}$$

となる。ここで★は相関演算を表わす。また g_i と g_i^* の相関関数は、 $g_i = g_i$ のとき最大値をもつ。したがって、マッチトフィルタリングではフィルタに記録されている形状と同一形状の物体が入力されると、出力面 P_3 上の次の位置に自己相関信号の明るい輝点が現れる。

$$\begin{aligned}
 x_i &= -(f_2/f_1)x_{b1} + (f_2/f_1)x_{a1} - f_2 \sin \theta_x \\
 y_i &= -(f_2/f_1)y_{b1} - (f_2/f_1)y_{a1} - f_2 \sin \theta_y \quad (13)
 \end{aligned}$$

被測定物体の出力位置をさらに明確に把握するために、 P_3 面上のフィルタ作製物体の位置を基準とした座標軸上に被識別物体の認識信号光点の座標を求める。

フィルタ作製物体 $g_i(x, y)$ を、たとえば $\square : i=1, g_1(x, y)$, $\circ : i=2, g_2(x, y)$, $\triangle : i=3, g_3(x, y)$ とし、入力面 P_1 で、それぞれの物体を $g_1(x-x_{a1}, y-y_{a1})$, $g_2(x-x_{a2}, y-y_{a2})$, $g_3(x-x_{a3}, y-y_{a3})$ と配置してフィルタを作製する。そして4個の被識別物体 $g_i, l=1, 2, 3, 4$ をそれぞれ出力面 P_1 の位置 $g_1(x-x_{b1}, y-y_{b1})$, $g_2(x-x_{b2}, y-y_{b2})$, $g_3(x-x_{b3}, y-y_{b3})$, $g_4(x-x_{b4}, y-y_{b4})$ に配置する。ただし $g_3(x, y) = g_4(x, y)$ とする。そしてレンズ L_2 の後側焦点面 P_3 で出力の観察を1次回折光で行なえば、この1次回折光の光軸は $(-f_2 \sin \theta_x, -f_2 \sin \theta_y)$ にあるため、 g_i と g_i の相関による出力はこの光軸を中心とする座標で

$$\begin{aligned}
 \square &: ((f_2/f_1)x_{a1}, (f_2/f_1)y_{a1}) \\
 \circ &: ((f_2/f_1)x_{a2}, (f_2/f_1)y_{a2}) \\
 \triangle &: ((f_2/f_1)x_{a3}, (f_2/f_1)y_{a3}), \\
 &((f_2/f_1)x_{a4}, (f_2/f_1)y_{a4})
 \end{aligned}$$

の方向に観測される。 $(f_2/f_1)x_{a1} = \hat{X}_1, (f_2/f_1)y_{a1} = \hat{Y}_1$ とすれば、 $\square, \circ, \triangle$ の出力フィールドは Fig. 3 に示すようになる。

さらに被識別物体 g_i による相関信号は P_3 面上で次の座標点に現れる。

$$\begin{aligned}
 \square &: (\hat{X}_1 + x_{b1}, \hat{Y}_1 + y_{b1}) \\
 \circ &: (\hat{X}_2 + x_{b2}, \hat{Y}_2 + y_{b2}) \\
 \triangle &: (\hat{X}_3 + x_{b3}, \hat{Y}_3 + y_{b3}), (\hat{X}_4 + x_{b4}, \hat{Y}_4 + y_{b4})
 \end{aligned}$$

すなわち自己相関信号は点 $((f_2/f_1)x_{a1}, (f_2/f_1)y_{a1})$ を中心として、 $(-f_2/f_1)x_{b1}, (-f_2/f_1)y_{b1})$ に生じ、 $g_i(x, y)$ の位置とは上下、左右が逆向き(点対称の位置)になって出力している。

3. 測定法の特徴

本研究の特徴はつぎのようである。第一の特徴は多数の異なる形状の物体のそれぞれの形状を同時に明確に識別するために、マッチトフィルタを作製するときの標本形状物体を互いに離して配置することによりフラウンホーファ回折像に大きな位相差を導入し、これを一つの参照光と干渉させることである。すなわち一度の露光で多重露光ホログラムと同等の効果をもつホログラムを作製することにある。これによって従来参照光の方向を次々と変えて作らなければならなかった多重露光ホログラム作製の困難な作業を解消することができた。また、本手法で得られるフィルタの場合、おのおのの形状認識に対する回折効率は多重露光フィルタのそれに比べて均一であり、その効率は非常に良い。

特徴の第二は、検出信号の出現位置をフィルタ作製物体の位置を中心にして明確に特定できるようにしたことにある。すなわちフィルタ作製時と測定時には測定視界の大きさを変えて、それぞれの被測定物体の各形状ごとの被識別物体の位置を式(13)に示すように特定した。

特徴の第三は、被測定物体の各形状ごとにその数と位置が実時間的に測定できることである。それは、上述の特徴1, 2によって被測定物体の形状識別信号の輝点が物体形状ごとに、それぞれフィルタ作製物体設置位置を中心として実時間的に現れるからである。

4. 形状および位置の識別実験

Fig. 1 に示す光学系において、光源は 50 mW He-Ne レーザーを用い、フーリエ変換レンズ L_1 およびイメージレンズ L_2 にはそれぞれ焦点距離を $f_1 = f_2 = 500$ mm、口径は 100 mm のものを用いた。マッチトフィルタを作製するためにマッハ・ツェンダ―光学系が組み込まれている。フィルタ作製時には物体光および参照光の径をそれぞれ 40 mm とした。物体識別にあたっては測定視界の大きさ(直径)を 20 mm と縮小する。被識別物体は硬調フィルム(ミニコピーフィルム HR II)の上に文字や単純な図形を撮影したものをを用いた。被測定物

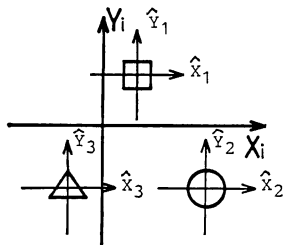


Fig. 3 Explanation of coordinate system. X_i and Y_i are centering coordinates on the output plane. \hat{X}_i and \hat{Y}_i are axes used for the positioning of the master shape.

体の大きさは、複数の物体がビーム幅 20 mm 以内に納まるよう最大寸法を 1~3mm 程度とした。相関信号のピーク光の検出は硬調写真フィルムで撮影するとともに、CCD カメラによって出力信号をフレームメモリに取り込み、マイクロコンピュータによる光強度レベル処理を行なった。なお、マッチトフィルタ作製には写真乾板 Agfa-Holotest 8E75, 現像液は D-19 を用いた。被識別形状は四角形, 三角形, 丸および文字 R, A, O を用いた。Fig. 4(a) にフィルタ作製物体の形状とその配置の一例を示した。また Fig. 4(b) には被識別物体の形状およびその配置の一例が示されている。

さて、Fig. 4(a) に示される形状配置で作製されたフィルタを用いてそれぞれ口, O, Δ 形状の物体を一つずつ測定視界のほぼ中央に設置したとき、得られる相関信号の出力結果を Fig. 5 に示した。Fig. 5 の左側は被

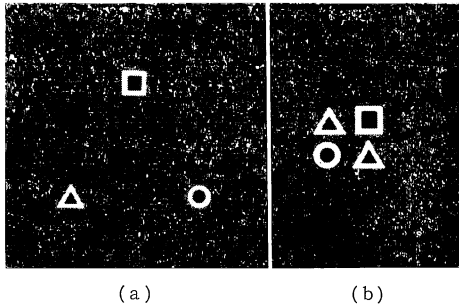


Fig. 4 (a) reference patterns of a filter and (b) composition of input objects.

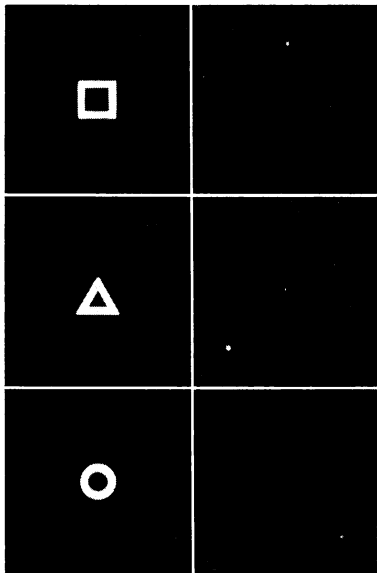


Fig. 5 Location of the output correlation peaks of three single signals. (a) input objects, (b) output correlation peaks.

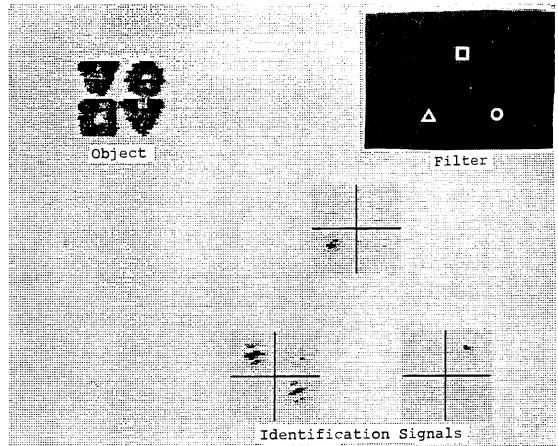


Fig. 6 Experimental result for simultaneous identification of shapes and positions of objects. (Top of right) reference objects, (top of left) the zero order image in the output plane and (bottom) the identification signals in the output plane.

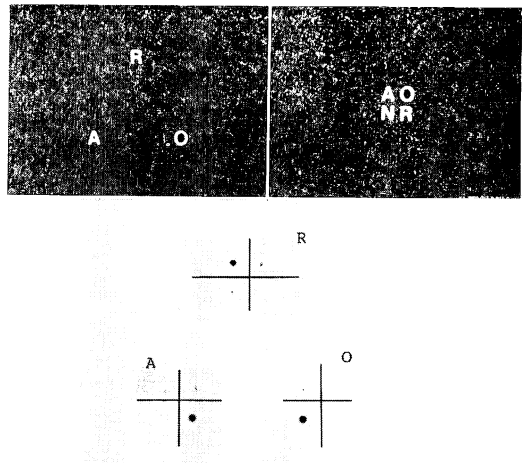


Fig. 7 Observed signals for the simultaneous identification of some letters. (Right top) composition of input objects, (left top) reference patterns for the filter, and (bottom) the location of the output correlation peaks.

測定物体, 右側は相関信号である。右の出力は Fig. 1 中の P_3 面を写真撮影したものである。出力信号光はフィルタ作製物体と同形状物体の占める位置に出力されることが確認された。

Fig. 6 には Fig. 4(b) に示す配置の複数の物体形状を同時に測定視界中に入れたときの識別結果を示す。Fig. 6 中の左上には被測定物体の形状とその配置を表わす 0 次光が観察される。出力面は入力面に対して点対称となっている。Fig. 6 中の出力面には、Fig. 5 に示されるピーク光の出力位置を原点とする座標が描かれて

いる。実験の結果、1次回折光軸 ($-f_2 \sin \theta_x, -f_2 \times \sin \theta_y$) を中心に □, ○, △ の出力位置を観察すれば、 $(-x_{b1}, -y_{b1})$, $(-x_{b2}, -y_{b2})$, $(-x_{b3}, -y_{b3})$, $(-x_{b4}, -y_{b4})$ の位置に各形状の数に対応した光点が出現することが明確になった。

Fig. 7 に文字 R, O, A を用いたフィルタ作製物体と、R, O, N, A を被識別物体として配置したときの識別結果を写真撮影し、後から R, O, A の座標軸を書き加えたものを示した(ただし、写真は白黒反転して焼いてある)。出力面には点对称にそれぞれ R, O, A が1個ずつ認識され、Nは相関をもたないので認識されないことが結果としてよく現われている。

5. ま と め

本研究では、一度の露光によって多重露光ホログラムより優れた多種類の形状の識別機能を有する多重マッチトフィルタの作製法が示された。このホログラム(マッチトフィルタ)のキャリア周波数の多重化は従来用いられたことのない位置による位相偏移が利用された。

この概念に基づいて作製された多重マッチトフィルタ

を用いて多形状物体の同時識別実験が実行された。そしてこの識別実験では被測定物体が各形状ごとに分類され、それぞれの物体の位置が正確に特定された。

以上のように理論と実験結果から、この方法を応用することにより物体の形状、数、および位置が同時に瞬時に測定されることが明らかになった。

文 献

- 1) S. P. Almeida and J. K. T. Eu: "Water pollution monitoring using matched spatial filters," *Appl. Opt.*, **15** (1976) 510-515.
- 2) J. Tsujiuchi, K. Matsuda and T. Takeya: *Applications of Holography*, E. S. Barrekette, et al. eds. (Plenum Press, New York, 1971) p. 247.
- 3) A. Vander Lugt, F. B. Rotz and A. Klooster, Jr.: "Character reading by optical spatial filtering," *Optical and Electro-Optical Information Processing*, J. T. Tippett, et al. eds. (M. I. T. Press, Cambridge, Mass., 1965) pp. 125-141.
- 4) J. W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill, New York, 1968).
- 5) J. D. Gaskill: *Linear Systems, Fourier Transforms, & Optics* (John Wiley & Sons, New York, 1978) pp. 172-178.