



三次元実物体マッチトフィルタリング

村田 文宏・浅野 晃・鈴木 裕・横関 俊介

九州工業大学情報工学部機械システム工学教室 〒820 飯塚市大字川津 680-4

(1994年1月31日受付, 1994年5月11日受理)

Matched Filtering for Recognition of Real Three Dimensional Objects

Fumihiko MURATA, Akira ASANO, Hiroshi SUZUKI
and Shunsuke YOKOZEKI

Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Computer Science
and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology,
680-4, Kawazu, Iizuka 820

(Received January 31, 1994; Accepted May 11, 1994)

A method of the matched filtering for recognition of real three dimensional objects is proposed that can discriminate between real 3-D object and its image or concave object and convex one. Coherent light wave reflected from objects is used instead of transmitted light through objects. Unshaded objects can also be employed. Simulational experiments are carried out to show the ability of our method. The correlation output of our method, however, depends on surface condition and positioning of the objects. The influences of the surface roughness and the shift between references and test objects are examined using the computer simulation. It's explained that the optical coordinate transformation method is effective to reduce the influences of rotation and shift of objects.

1. はじめに

光学的マッチトフィルタリングは1964年にVander Lugt¹⁾によって提案されて以来, 文字認識への応用をはじめさまざまな研究が行われている。三次元物体の光学的なパターン認識もそのひとつである。それらは主に三次元物体を投影して得た平面像を入力として認識を行っている。そして, 物体の回転や倍率などの異なった像に対してはこの物体の多数の投影像から最適なフィルターを構成し認識を行っている²⁻⁴⁾。しかし三次元物体を投影して得た平面像として取り扱おうと, 三次元物体を平面像に変換するための装置が必要となったり, 凹凸状の物体, 影のない物体や写真などでは認識や区別ができない場合がある。このような欠点を補うために, 物体をそのまま利用することを考えた。

本論文で我々は三次元実物体マッチトフィルタリングを提案する。この方法では, 物体からの反射光を直接,

入力として利用する。物体の投影像でなく, 物体そのものを認識する方法である。物体そのものを入力として使った方法としては, 1971年のJ.Ch. Vienot⁵⁾のものがある。この例では物体を後ろから照明しており, 照明光が通る物体にしか応用できず, 実験ではあまりよい結果を残していない。我々の方法では反射光を利用しているため, 光を通さない物体などさまざまな物体にも応用できる。

物体の反射光をそのまま入力として用いると, 物体の微妙な配置の変化や表面状態の変化により出力結果が大きく影響され, 同形状の物体でも認識できないことが考えられる。そこで, シミュレーションによって, 三次元物体からの反射光を直接入力として用いる場合の物体の配置と表面の条件を明らかにし, 今回提案した方法の可能性を検討する。そして, いくらかの条件を緩和する方法を示す。

本論文は, 2.で三次元実物体マッチトフィルタリング

の原理を説明して, 3. でシミュレーションによりこの方法の特徴を述べる. 4. ではこの方法に与えるさまざまな影響を調べ検討し, 5. でその改善方法の一例を示す.

2. 原 理

概略図を Fig. 1 に示す. 原理的には従来のマッチトフィルタリングとかわりはない. 従来の方法では, 三次元物体の認識を行うとき, CCD カメラなどで物体を平面像として取り込み, Fig. 1 の入力側レンズの前焦点距離の仮想平面 (virtual plane) の位置に平面像を出力し, それを平行光で照射し認識を行っている. それに対して, 我々の方法は物体にコヒーレント光をそのまま照射し, その反射光を用いている. 入力側レンズの前焦点距離の位置に仮想平面を考えると, そこに到達する物体からの反射光の波面は三次元形状を反映した位相分布をもつ. つまり我々の方法はこの位相分布に対して認識を行っている. 参照物体の反射光をフィルタ面 (filter plane) でホログラムに記録する. そして, 新たに被認識物体を参照物体の位置に配置し同様に照明すると, 参照物体と被認識物体との波面の相関が出力面 (output plane) でとれ, 物体そのものの認識が実時間でできる. このように物体の形状を反映した反射光を利用して物体そのものの相関をとるために, 従来の欠点であった, 写真と物体

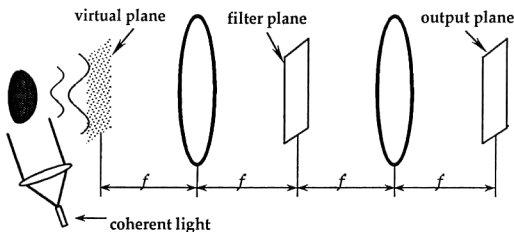


Fig. 1 Schematic illustration of proposed optical system.

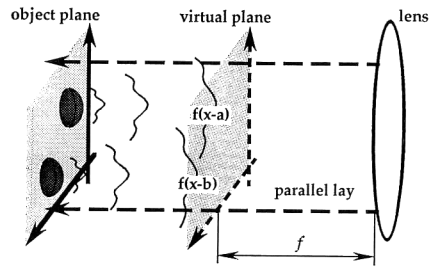


Fig. 2 Space invariance.

との区別, 凹凸の区別, 影のできない物体の認識や区別ができるようになると考えられる.

Fig. 2 のようにコヒーレントな平行光で物体を照明し, その光軸に対して垂直な面を物体を配置する基準面 (以後この基準面を物体平面 (object plane) と呼ぶ) とし, その面上に参照物体と平行にずれた位置に被認識物体を配置することができるならば, 参照物体と被認識物体の仮想平面上の波面は平行に位置だけずれたものとなる. そのため従来の方法と同様に位置不変で認識が可能であると考えられる.

3. シミュレーション

Fig. 3 のような光学系を想定してシミュレーションを行った. 物体平面上に物体を配置し, 物体平面に対して垂直に平行光が入射し, 物体を照明とする. またフィルタは binary phase only フィルタ⁶⁾ を使い, 物体から仮想平面までフレネル回折するとした. 仮想平面からは高速フーリエ変換を用いて相関計算を行った. 以下もすべてのシミュレーションをこの条件で行う.

Fig. 4 にシミュレーション結果を示す. 参照物体を (a), 被認識物体を (a), (b), (c) に示すような物体とした (すべての物体の図の基準平面部分を除いた部分を物体

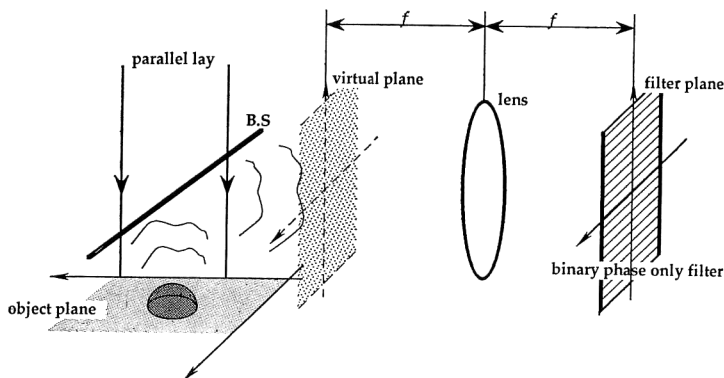


Fig. 3 Optical system in computer simulation.

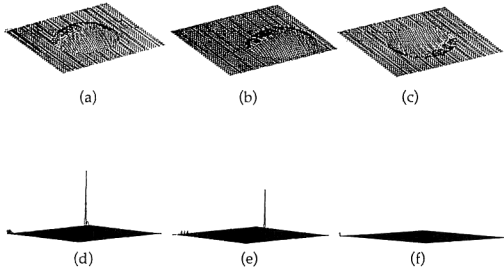


Fig. 4 Simulation results: (a) reference object, (a)-(c) test objects, (d)-(f) correlation intensity; (d): (a)★(a), (e): (a)★(b), (f): (a)★(c).

としている). 参照物体, 被認識物体ともに乱数で表面粗さの最大高さが約 0.015 波長の表面粗さを与え鏡面に近い物体とした. 出力面内の座標を平面内に, 相関強度を高さ方向にとって相関結果を表した. 参照物体と被認識物体が同じ凸の球面の (a) で, 同じ位置に配置した場合, 相関結果は (d) のように高く鋭い相関ピークが得られる. (a) の物体から物体平面上を平行にずれた (b) を被認識物体とすると, 相関結果は (e) のように (d) に比べて出力面上を, 被認識物体の位置のずれに相当しただけずれた位置に高く鋭い相関ピークを得る. また (a) を裏返した凹の球面の (c) を被認識物体とし, 参照物体と同じ位置に配置した場合, 相関結果は (f) のように全く相関ピークは得られない.

このように三次元実物体マッチトフィルタリングは従来の方法では区別することができなかった, 影のない物体や, 凹凸を区別することができ, 物体平面上の平行な位置ずれでは位置不変で認識できることがわかった. またこの方法は物体からの反射光を用いているため, 光の波長オーダーで認識ができ, 鏡面に近い物体に対して有効であることがわかる.

4. さまざまな原因による相関結果への影響

現実的に考えると, 参照物体と被認識物体を物体平面上で平行移動しただけの位置にセットすることはほとんど不可能で, 参照物体と被認識物体が光軸方向にずれたり, 傾いたり, 光軸に対して回転したりすることが考えられる. また物体の表面の状態に対しても敏感に影響することが考えられる. そこで, この章ではさまざまな原因による相関結果に与える影響を調べた.

4.1 物体表面の粗さによる影響

三次元実物体マッチトフィルタリングでは, コヒーレントに照明された物体から反射してくる三次元形状を反

映した波面に対して相関をとり認識を行っている. しかし同形状の物体でも表面状態が違うものでは, 反射光の波面は異なり認識できないことが考えられる. この節では, シミュレーションにより, 相関結果にいちばん影響すると考えられる表面粗さについて調べた.

参照物体と被認識物体を同形状の Fig. 4 (a) とし, 両方の表面に乱数で同程度の粗さを与えシミュレーションを行った. Fig. 5 にその結果を示す. Fig. 5 は物体の表面に与える表面粗さの最大高さを最大表面粗さとし, その最大表面粗さを変化させたときの相関強度の最大値の変化をプロットしている. 縦軸は理想鏡面の場合を 1.0 とし, 横軸は波長を単位としている. 相関ピークは両方の最大表面粗さの増加とともに減少し, 物体の最大表面粗さが 0.75 波長以上になると, 相関ピークは他のノイズと区別できなくなることがわかった.

このように同形状の物体どうしても最大表面粗さが 0.75 波長をこえるものでは同一物体とは見なされることがわかる. しかし言い換えると, それ以下の表面粗さをもつ物体どうしても高く鋭い相関ピークを得るため, 鏡面に近い物体の認識や, 検査に対して三次元実物体マッチトフィルタリングが有効なことがわかる.

4.2 参照物体と被認識物体の配置ずれによる相関結果への影響

4.1 では参照物体と被認識物体が正確に同じ位置に配置できたものとしてシミュレーションを行ってきた. しかし両方の物体を同じ位置に配置することはほとんど不可能である. そのため仮想基準平面上での両方の反射光の波面は鏡面の物体を用いたとしても異なり, 前に示した物体の物体平面上の平行な位置ずれ以外では, 相関がとれないことが考えられる. この章では Fig. 6 のように, 被認識物体が参照物体に対して光軸方向に平行にずれた場合, 傾いた場合, 光軸周りに回転した場合に相関

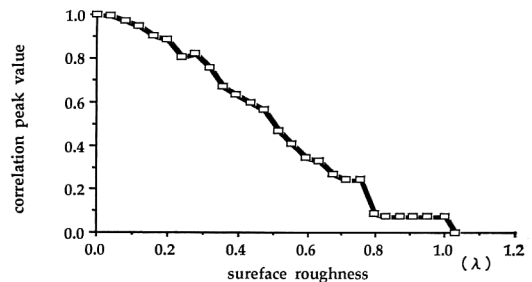


Fig. 5 Influence of the surface roughness of objects on the correlation result; correlation peak value varied by maximum roughness of surface.

結果に与える影響をシミュレーションにより調べた。

4.2.1 光軸方向の位置ずれによる影響

参照物体と被認識物体を同形状の Fig. 4 (a) とし、前節で示したように相関結果に影響を与えない鏡面に近い物体とするために、物体表面には約 0.015 波長の最大表面粗さを与えた。参照物体を物体平面上に配置し、Fig. 6 (a) のように被認識物体を光軸方向に平行に移動させて相関結果の変化を調べた。その結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 は原点を参照物体の基準位置として、被認識物体を前後に移動させた距離を横軸に波長を単位としてとった。被認識物体が原点にあるときの相関強度の最大値を 1.0 とし、そのときの相関強度の最大値の変化をプロットしている。相関強度は参照物体と被認識物体のずれが広がっていくにつれ急激に減少し、前後のずれが約 4 波長の距離で最初の極小値となり相関ピークは見られないようになった。その後、相関強度は再び増加し相関ピークが見られるようになるが、約 8 波長ごとに増減を繰り返しながら相関強度は減衰していく。

4.2.2 傾きによる影響

参照物体と被認識物体を同形状の Fig. 4 (a) とし、物体表面には約 0.015 波長の最大表面粗さを与えた。参

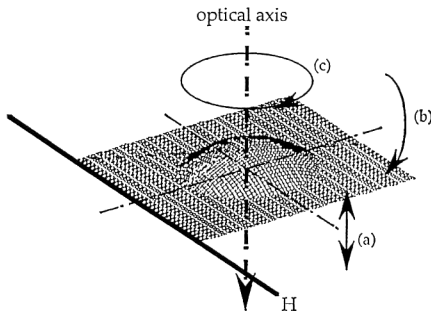


Fig. 6 Movement directions of the test objects; shift along the optical axis, (b) inclination on the axis H, (c) rotation.

照物体と被認識物体を物体平面上の同じ位置に配置し、被認識物体を Fig. 6 (b) のように H 軸を中心に 0.1° ずつ傾かせたときの相関結果の変化を調べた。Fig. 8 にその結果を示す。Fig. 8 は横軸に被認識物体の傾斜角度をとり、縦軸に傾斜が 0.0° のときの相関強度の最大値を 1.0 とした相関強度の最大値をとった。相関強度の最大値は被認識物体の傾斜が増すにつれて振動しながら減少し、約 6° の傾斜で他のノイズと区別ができなくなる。この振動は被認識物体の中心で傾斜させてないために、物体の光軸方向のずれが加わったためおこったものと考えられる。

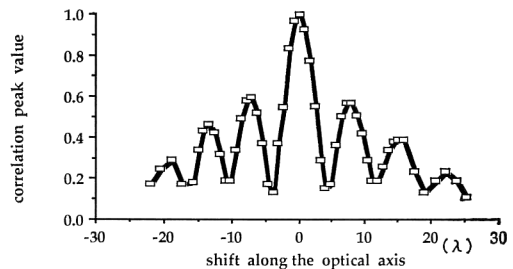


Fig. 7 Influence by the shift between reference and test object along the optical axis; correlation peak value varied by the shift.

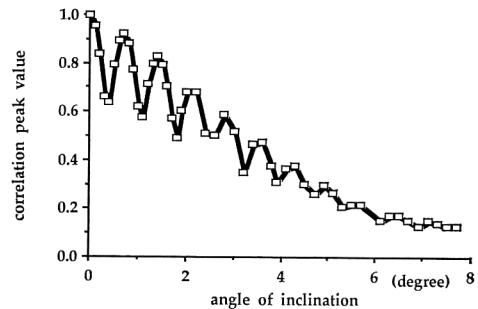


Fig. 8 Influence due to the object inclination: correlation peak value is varied by the angle difference of inclination.

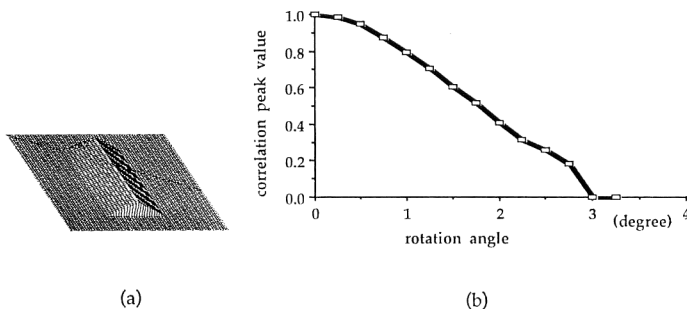


Fig. 9 Influence of the object rotation: (a) the reference and test objects. (b) correlation peak value is varied by the object rotation.

4.2.3 光軸回りの回転による影響

参照物体と被認識物体は Fig. 9 (a) を用い、物体表面には約 0.015 波長の最大表面粗さを与えた。始めに物体平面の光軸を中心とした位置に両方とも同方向で配置し、Fig. 6 (c) のように被認識物体を光軸を中心として 0.25° ずつ回転させたときの相関結果の変化を調べた。横軸に被認識物体の回転角度をとり、縦軸に被認識物体の回転角度が 0.0° のときの相関強度の最大値を 1.0 とした相関強度の最大値をとったものを Fig. 9 (b) に示す。参照物体と被認識物体との回転方向のずれが増加するにしたがって急速に相関強度の最大値は減少し、回転方向のずれが 3° で相関は全くとれなくなることがわかった。

5. 光学的座標変換による改善

三次元実物体マッチトフィルタリングは参照物体と被認識物体の配置ずれによる影響を強く受けることがわかった。これらの影響は、実際にこれを使用する場合厳しい条件となるため、これらの影響を改善する方法を考える必要があると思われる。そこで、この章では、光軸方向のずれと回転方向のずれについて光学的座標変換を応用して改善を試みた。

物体からの反射波の波面は距離に依存して広がっていくと考えられる。被認識物体が参照物体に対して光軸方向にずれたときの仮想平面上の波面は、参照物体の波面に対して倍率が異なっただけの波面と考えられる。また、物体が光軸を中心に回転すると波面も回転したただけのものとなる。そのため倍率不変と回転不変で認識できる方法を考える。これらの方法は、今までに、フーリエ展開のハーモニクスを利用した方法や光学的座標変換^{7,8)} を用いた方法など多数報告されている。

今回、我々は物体からの反射波を利用する三次元実物体マッチトフィルタリングの特徴を生かして、光学的座標変換を応用した改善を試み、シミュレーションによりその効果を確かめた。Fig. 3 の仮想平面の位置に座標変換フィルタを挿入し、フィルタ面で座標変換後の出力を得るものとする。座標変換後の座標が $\ln r - \theta$ (ここで、 r は仮想平面上の半径方向の座標、 θ は回転角である) となるための座標変換フィルタは式(1)の位相をもつフィルタである。

$$\phi(x, y) = \begin{cases} \phi_+(x, y) = -(2\pi/\lambda f) \{y \tan^{-1}(y/x) \\ \quad - (x/2) \ln(x^2 + y^2) + x\}, \text{ for } x > 0, \\ \phi_-(x, y) = \phi_+(x, y) - (2\pi^2/\lambda f)y, \text{ for } x < 0. \end{cases}$$

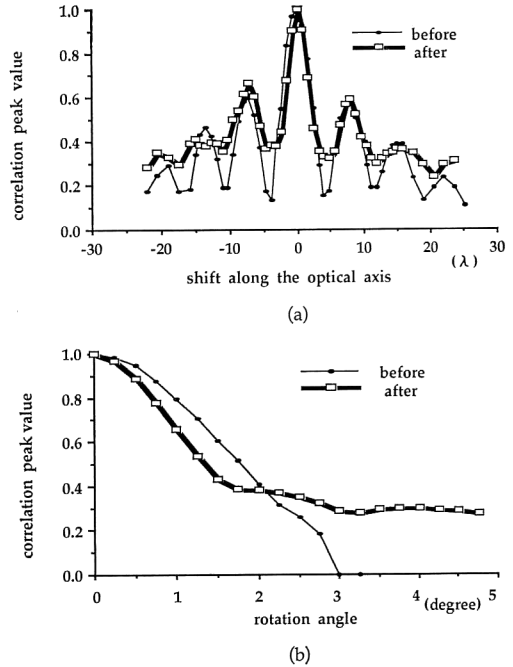


Fig. 10 The correlation result after optical coordinate transformation : (a) correlation peak value is varied by the shift. (b) correlation peak value is varied the rotation.

(1)

ここで、 λ は光源の波長、 f は焦点距離、 x, y は仮想平面上の座標である。

この出力をあらためて入力物体としてマッチトフィルタリングを行うことを考える。4.2.1, 4.2.3 と同様な条件でシミュレーションを行い、Fig. 10 にそれぞれの結果を示す。光軸方向のずれの改善では (a) のように、座標変換フィルタを用いない場合に相関ピークが見られなかった位置で相関強度の最大値は引き上げられ相関ピークは見られるようになった。また、回転方向のずれでは、(b) のように、1.5° で相関強度の最大値の減少は止まり、座標変換フィルタを用いない場合に相関強度が得られなくなった 3.0° 以降も相関強度は得られ、相関ピークは見られるようになった。

6. ま と め

光学的三次元物体の認識において、従来の方法ではできなかった凹凸状の物体の区別などができ、また従来と同様の認識ができる方法として三次元実物体マッチトフィルタリングを提案し、シミュレーションにより検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

物体の最大表面粗さに対しては波長の約3/4以上、光軸方向のずれに対しては波長の8倍おき、傾きのずれに対しては約6°以上、回転方向のずれに対しては約3°以上では相関ピークは得られないことがわかった。

光軸方向と回転方向のずれの影響に対しては、光学的座標変換を応用して改善できた。しかし、これを用いると位置不変の特徴がなくなる問題点がある。今後、他の影響に対しての改善や実験での検証が期待される。

なお、ここに得られた結果と粗面の平面物体に対するシミュレーション結果とは、ほぼ等しくなると思われる。定量的な検討はこれからの課題である。

本研究は財団法人マツダ財団の助成金の援助を得て行われたものであり深く感謝します。

文 献

- 1) A. Vander Lugt: "Signal detection by complex spatial filtering," IEEE Trans., **IT-10** (1964) 139-145.
- 2) D. Mendlovic, E. Marom and N. Konforti: "Improved rotation or scale invariant matched filter," Appl. Opt., **28** (1989) 3814-3819.
- 3) R. Wu and H. Stark: "Three-dimensional object recognition from multiple views," J. Opt. Soc. Am. A, **3** (1986) 1543-1557.
- 4) G.F. Schils and D.W. Sweeney: "Optical processor for recognition of three-dimensional targets viewed from any direction," J. Opt. Soc. Am. A, **5** (1988) 1309-1321.
- 5) J. Ch. Vienot, J. Bulabois and L.A. Guy: "Three dimensional object recognition in real time by multiplex spatial filtering," Opt. Commun., **2** (1971) 431-434.
- 6) J.L. Horner and J.R. Leger: "Pattern recognition with binary phase-only filters," Appl. Opt., **24** (1985) 609-611.
- 7) Y. Saito, S. Komatsu and H. Ohzu: "Scale and rotation invariant real time optical correlator using computer generated hologram," Opt. Commun., **47** (1983) 8-11.
- 8) D. Casasent, S. Xia, A.J. Lee and J. Song: "Real-time deformation invariant optical pattern recognition using coordinate transformations," Appl. Opt., **26** (1987) 938-942.