

三次元情報の空間シフト多重化による物体の姿勢変化に耐性のある三次元物体認識

Three-dimensional object recognition using spatial shift multiplexing of three-dimensional information

吉川 宣一
Nobukazu Yoshikawa

1. はじめに

物体の三次元情報を利用した物体認識法としてフーリエ変換形状計測法(FTP) [1]に基づいた格子パターン相関法(FPC)が提案されている[2]. この手法は光計測による高精度な三次元情報取得と相関演算による認識処理を組み合わせた手法であり, 高精度かつ効率的な認識処理が可能である. FPC は三次元的なシフトインバリエント特性を有しており, 物体の並進に対して耐性がある[3,4]. しかし, 回転に対する認証性能は低い. そのため, 物体の回転に対して耐性をもつような機構を導入する必要がある.

本研究では, FPC において一定間隔で回転させた物体の三次元情報のデータ列が回転角に関して相互非相関性をもっていることを示す[5]. さらに, この相互非相関性データ列を空間シフト多重化により一つの三次元情報として統合し, それを用いた回転に耐性のある FPC を提案する. 提案手法では回転に対する認識能力が向上するため, 物体の並進および回転に対して耐性のある高精度な三次元物体認識が実現できる.

2. 空間シフト多重化による格子パターン相関法

FPC の基本原理は, 高さ情報を複素数の位相項に割り当てることによる三次元物体の記述およびこの複素振幅を使った実効的な三次元相関演算による物体認識である. この複素振幅を本研究では高さ変換複素振幅(HCA)と呼ぶことにする.

FPC の基本手順は次のようになる. 図1の光学系において, プロジェクタで生成した格子パターンを三次元物体に投影し, 別方向からカメラで撮影すると, 変形格子像 $g(x,y)=a+b\cos\{2\pi f_x x+\phi(x,y)\}$ が得られる. ここで $\phi(x,y)$ は物体形状によって発生した位相変化, a はバイアス項, b は格子の変調度, f は格子周波数を表す. 変形格子像の一次フーリエ成分 $G_1(v_x, v_y)$ をバンド幅 W で抽出する. これを逆フーリエ変換すると,

$$\hat{g}(x,y) = \mathcal{F}^{-1}[G_1(v_x, v_y)] = b \exp\{i\phi(x,y)\} \quad (1)$$

となり三次元物体の高さ情報は複素振幅の位相項に変換されていることがわかる.

FPC では HCA を用いた二次元相関演算により三次元物体認識を行う. HCA の位相項には高さ情報が含まれているため, この二次元相関演算は実効的な三次元相関演算と考えることができる. 参照物体と検査物体の HCA をそれぞれ $G_R(v_x, v_y)$, $G_I(v_x, v_y)$ とすれば, 相関出力は

$$C_{RI} = \mathcal{F}^{-1}[G_R(v_x, v_y) G_I^*(v_x, v_y)] \quad (2)$$

より求めることができる. 式(2)からわかるように FPC では実際の三次元形状を再構成しなくても実効的な三次元相関演算に基づいて物体認識が可能になる.

図2に, 原点に置かれてカメラ方向を向いている物体(0度)と,

X, Y 軸に関して2度おきに回転させた物体の HCA のデータ列との間の実効的な三次元相関強度の結果を示す. 検査物体と参照物体の回転角が一致するとき, 自己相関となり鋭いシングルピークが発生する. 検査物体の回転角が増えると相関ピークは急激に低下する. 大きな回転角を伴う検査物体の相関強度は検査物体が参照物体と異なる物体の相関強度とほぼ等しい値であった. このデータ列は回転角 θ に関して互いに相関性が低いことがわかる.

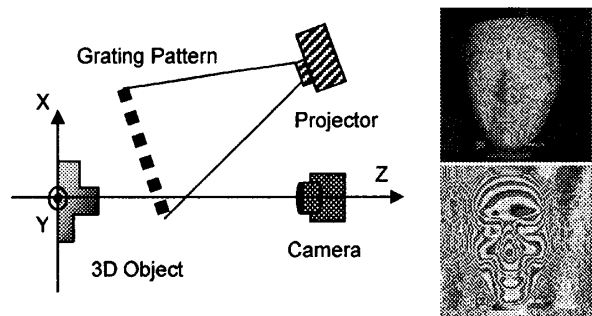


図1. (左)三次元計測システム, (右上)変形格子像, (右下)高さ分布.

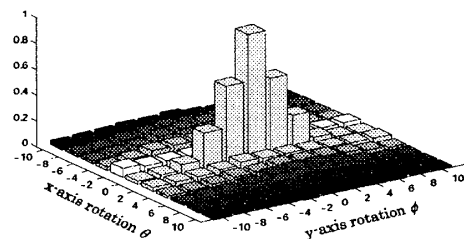


図2. 高さ変換複素振幅からなるデータ列の相互相関強度.

本研究では, この相互非相関性データ列に含まれる個々の情報がある回転に対する参照情報として考え, 空間シフト多重化法により一つの参照情報に統合し, FPC への適用を考える. 以下にその手順を説明する.

1) 回転する物体の HCA のデータ列 $\{g_k(x)\}$, $k=1\sim N$, そのフーリエ変換 $\{G_k(v)\}$ とする. 物体は一定間隔 $\Delta\phi$ で回転するものとし, データ列の順番は回転角が増える順番に並べたものとする. このデータ列は上述したような相互非相関特性をもっており, ある閾値以上の相関強度を出力する範囲を σ と定義する.

2) 空間シフト $\delta(x-x_k)$ のフーリエ変換に相当する複素係数 $\exp(-i2\pi x_k v)$ を $G_k(v)$ に掛け算して, $k=1\sim N$ まで和を求める.

$$H(v) = \sum_{j=1}^N G_j(v) \exp(-i2\pi x_j v) \quad (3)$$

これが多重化された参照情報となる. これは一つの物体から派生する N 個の三次元情報が異なる複素係数で分割された状態で同時に存在していると考えられることができる.

3) 回転角 ϕ_k で回転した物体を検査物体として認識プロセスを行うとき、実効的三次元相関出力は、

$$C = \sum_{j=k-\sigma}^{k+\sigma} (g_j \star g_k) * \delta(x-x_j) + \sum q \quad (4)$$

ここで、 \star は相関演算を表す。 $\sum q$ は閾値以下の相関強度の寄与を表しており、相互非相関特性より無視することができる。相関演算の結果は第1項より複素係数に対応した位置に独立に出力される。つまり、 $x = x_k$ の位置は $G_k(x)$ に関する相関出力が現れることになる。以後、この点像を相関評価点(CEP)、CEPを中心とした幅 Δx の領域を相関評価領域(CEA)と呼ぶことにする。相関ピークの有無を調べることで、たとえ物体に回転が発生していても、参照物体と同一の物体の存在を認識することができる。

$\sigma > 0$ より、検査物体と同じ回転角およびその近傍の回転角をもつ参照物体との間に相関ピークが発生する。すなわち、物体の回転角が多重化に用いた範囲内であれば、連続的な回転変化であっても物体認識が可能になる。参照情報は空間シフト多重化により一つの参照情報に統合されているので、1回の相関演算で多数の回転に関する参照データとの相関演算を同時に行うことができる。

3. 実験

三次元計測のための光学系(図1)において、デジタルカメラ(OLYMPAS C5050Z)、プロジェクタ(CASIO XJ350)を用いて実験を行った。基準平面はXY平面とした。投影される格子の周期は基準平面上で約1.8mmであった。三次元物体はお面を用いた。この物体は回転ステージに固定されており、X、Y軸に関して回転させることができる。実験では最小回転角を2度と設定した。本実験ではZ軸に関する回転は考えないが、これは原理的な制約ではない。変形格子像は1024×1024画素(8bit)で撮影した。HCAのバンド幅は128×128画素とした。あらかじめ基準平面のみのHCAを取得して、光学系の歪み補正を行った。

回転した物体のHCAのデータ列をつくった後に空間シフト多重化により参照情報の統合を行う。複素係数は点像をフーリエ変換してつくった。点像はCEPに対応しており、多重化数と同じだけ必要である。CEPの配置と回転角の間には制約はないが、クロストークを避けるため、できるだけ互いの点が分離するように $M \times M$ の格子状に等間隔でCEPを配置した。本研究では最大11×11多重化を行った。

空間シフト多重化を用いたFPCを回転を伴う物体に対して適用し、その認識性能を調べた。典型的な実験結果として5×5多重化の場合を示す。CEPは $\Delta x = \Delta y = 50$ 画素間隔で配置した。図3に検査物体として $(\theta, \phi) = (+2, -2)$ の回転を伴う物体を用いたとき相関出力を示す。この検査物体は多重化に用いたデータの1つと同じなので、それに対応するCEPの位置に相関ピークが発生する。また、 $\sigma > 0$ なので、近傍のCEPにもピークが発生している。

次に、検査物体が多重化に用いたデータと異なる場合を考える。この場合、①全く異なる物体、②同一物体であるが多重化の範囲外のデータ、③同一物体で多重化の範囲内であるが最小回転角度よりも小さな回転を伴う場合が考えられる。①の場合、相関ピークは出ないことはすでにわかっているが、②の場合でも相関ピークは出ないことがわかった。これはHCAの相互非相関特性のためと考えることができる。図4に、③の場合として、 $(\theta, \phi) = (+1, +1)$ の回転を伴う検査物体に対する相関出力を示す。この回転に相当するCEPは実際には多重化されていないが、 $\sigma > 0$ のため、仮想的な $(+1, +1)$ 近傍のCEPの位置に大き

な相関ピークが発生している。また、これらの相関強度の位相が異なることが分かった。すなわち、これらの近傍相関ピークから③の条件でも物体認識は可能になる。それぞれの位相と相関強度の関係から多重化に用いられていない回転角の場合でも回転角の推定が期待できる。

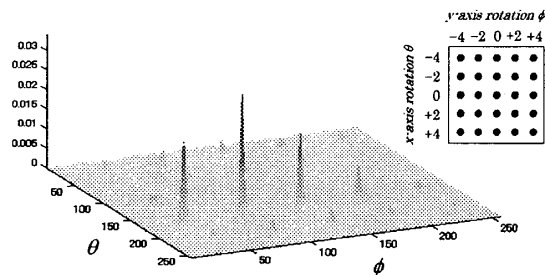


図3. $(\theta, \phi) = (+2, -2)$ の回転を伴う検査物体に対する相関強度。

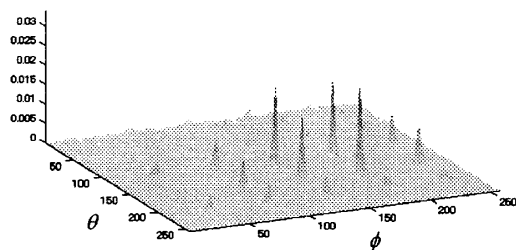


図4. $(\theta, \phi) = (+1, +1)$ の回転を伴う検査物体に対する相関強度。

多重化数に対する相関ピークの規格化相関強度および相関ピークとサイドローブの出力の比(PSR)のグラフを図5に示す。多重化数の増加とともにそれぞれ減少している。これは一つの相関演算に利用されるエネルギーが多重化により相対的に減っているためであると考えられる。11×11多重においてPSRは18.6であったので多重化数はさらに増やせる可能性がある。

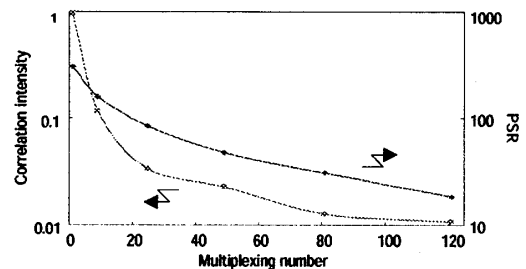


図5. 多重化数に対する規格化相関強度とPSR。

4. まとめ

本研究では、回転を伴う物体からつくられる相互非相関性データ列を空間シフト多重化により一つの三次元情報として統合し、回転に耐性のあるFPCを提案した。提案手法は回転・並進に対して耐性があり、対象物体の姿勢に影響されない柔軟な物体認識が可能になる。

参考文献

- [1] M.Takeda and K.Mutoh, Appl. Opt. 22, 3977 (1983).
- [2] N.Yoshikawa and T.Yatagai, Opt. Lett. 25, 1424 (2000).
- [3] 吉川宣一, 情報科学技術フォーラム, I62 (2002).
- [4] N.Yoshikawa, Information Photonics Topical Meetings, JWB6 (2005).
- [5] N.Yoshikawa, Optical engineering and Instrumentation, Optics & Photonics 2005, 5908-10 (2005).