

光学系を用いたカラー画像相関の原理と応用

大山 永昭・角田 貢・山口 雅浩・小尾 高史

デジタル画像処理の分野では、これまでに様々なカラー画像処理手法が開発されているが、これらの手法のなかに、物体の色と形を考慮した物体認識手法の一つとしてカラー画像相関が提案され、カラー画像の認識に有効であることが示されている。本文ではこのカラー画像相関の原理と応用について解説する。さらに、コヒーレント光学系を用いた光演算法と実験結果を紹介する。

1. カラー画像相関手法

カラー画像は一般的に、RGB等の3次元空間により表現されるため、ここでは、与えられた任意のカラー画像を式(1)のように表現する。

$$f(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^3 f_k(\mathbf{r}) \mathbf{e}_k \quad (1)$$

ここで、 $f(\mathbf{r})$ はカラー画像を、 $f_k(\mathbf{r})$ ($k=1, 2, 3$)は k 番目のバンドの画像を、 \mathbf{e}_k ($k=1, 2, 3$)は各バンドを規定する単位ベクトルである¹⁾。また、ベクトル \mathbf{r} は画像の位置ベクトルである。一般化されたカラー画像相関は、式(1)で与えられるカラー画像をモノクロ画像の相関式に代入することで定義されるが、文献2)に述べられているように、カラー相関の利用目的に依存して、しばしば1次元または2次元の投影手法が用いられる。以下にこれらの手法を簡単に解説する。

1次元投影手法は、3次元で与えられるカラー画像をカラー空間内に定義される適当な単位ベクトル \mathbf{u} に投影した後に相関をとる手法で、これらのプロセスは以下の式で与えられる。

$$f_{1D}(\mathbf{r}) = f(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{u} \quad (2)$$

$$C_{1D}(\mathbf{r}) = \int f_{1D}(\mathbf{s}) g_{1D}(\mathbf{s} + \mathbf{r}) d\mathbf{s} \quad (3)$$

ここで、 $f_{1D}(\mathbf{r})$ は1Dベクトルに投影されたカラー画像を、 $C_{1D}(\mathbf{r})$ は1次元のカラー相関関数である。この手法の特徴は、以下のようにまとめられる。

- 1) カラー画像の投影演算は、投影ベクトル \mathbf{u} との内積で与えられるため、高速な演算が可能である。
- 2) 投影ベクトルを適切に選択することで、彩度および色相の色成分と輝度等で与えられる明るさ成分に対する重みを最適化することができる。その結果、例えば相関ピークの先鋭度や同一物体を検出する感度等を自由に調整できる(文献2)参照)。

2次元投影手法は、カラー空間に定義される2次元平面にカラー画像を投影する手法であり、以下の式により定義される。

$$f_{2D}(\mathbf{r}) = (f(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{u}) \mathbf{u} + (f(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}) \mathbf{v} \quad (4)$$

$$C_{2D}(\mathbf{r}) = \int f_{2D}(\mathbf{s}) \cdot g_{2D}(\mathbf{s} + \mathbf{r}) d\mathbf{s} \quad (5)$$

ここで、式(4)はカラー画像の2次元面への投影演算を、式(5)は2次元カラー画像相関関数を表している。また、 \mathbf{u} 、 \mathbf{v} は2次元投影面内の単位ベクトルである。

2次元カラー画像相関は、投影面を適切に選択することにより、対象物体の形状と色とを段階的に識別することも可能である。さらに、複素関数を用いる手法では、複素画像を光の強度と位相に変調することにより、光学系による高速・並列演算が可能である。

2. 光学系を用いたカラー画像相関手法³⁾

光学系を用いてカラー画像相関を実行するために、本章で述べた2次元投影面内に複素座標系を定義する。具体的には例えば式(4)で用いられる \mathbf{u} 、 \mathbf{v} をそれぞれ複素座標系の実軸および虚軸と定義する。その結果式(4)および式(5)は次のように書き換えることができる。

$$f_c(\mathbf{r}) = (f(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{u}) + j(f(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}) \quad (6)$$

$$C_c(\mathbf{r}) = \int f_c(\mathbf{s}) g_c^*(\mathbf{s} + \mathbf{r}) d\mathbf{s} \quad (7)$$

ここで、添字の c は複素関数を、肩字の $*$ は複素共役を表している。さらに、式(6)を複素振幅表示することにより次式を得る。

$$f_c(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) \cdot \exp\{-jP(\mathbf{r})\} \quad (8)$$

ここで、 $A(\mathbf{r})$ および $P(\mathbf{r})$ はそれぞれ振幅および位相成分画像である。

モノクロ画像の相関は、よく知られているように、光学系を用いて簡単に実現されるが、式(8)により変換されたカラー画像の相関演算を光学系により行うためには、与えられたカラー画像の強度および位相の情報を光

東京工業大学工学部情報工学研究施設 (〒226 横浜市緑区長津田町 4259)
E-mail: yama@isl.titech.ac.jp

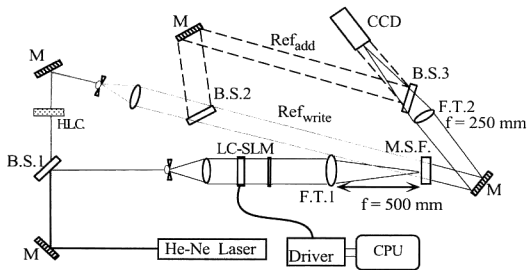


図1 光学的なカラー画像相関系の概念図。

学系に入力する必要がある。そこで、画像の入力デバイスとして強度および位相の変調可能な液晶表示装置を用い、さらに相関演算を行うために、コヒーレントマッチトフィルター系を利用することを考える。具体的な光学系の例としては、図1に示される光学系が挙げられる。この光学系では、まずはじめに、マッチトフィルターを光学的に作成するために、ターゲットとなるカラー画像を画像入力デバイスに表示し、ホログラムを作成する。次に、別の画像を表示することで、出力面に相関演算の結果を得る。相関演算の結果が得られる点は、従来のマッチトフィルターと同じであるが、本手法では、入力画像が複素振幅変調されているため、式(7)で与えられる結果は、複素数になる点が異なっている。ただしいうまでもなく、出力面で観測される結果は強度信号となってしまうため、そのままでは、位相成分を得ることができない。そこで図1に示される光学系では、従来の手法と異なって、参照光も同時に入力することで出力光と参照光とを干渉させる。さらに、干渉系で広く使われているフリンジスキャン手法を導入することで位相成分を得る。このフリンジスキャンは、入力画像に適切な位相成分を付加することで実現される。

3. 実験³⁾

上記の原理の妥当性を確認するために行った実験と得られた結果について紹介する。実験に用いた光学系は、図1に示されるものであり、用いられた画像入力デバイスは、(株)エプソンから提供された位相変調用の液晶表示装置である。またマッチトフィルターは、アグファの10 E 75 写真乾板を用いて光学的に作成され、対象物体は、色の異なる2つの模型の自動車(赤と青)である。これらの物体は、CCDカメラによりコンピューターにRGB画像として入力され、式(6)および式(8)に従って複素画像に変換される。この実験で用いられた物体

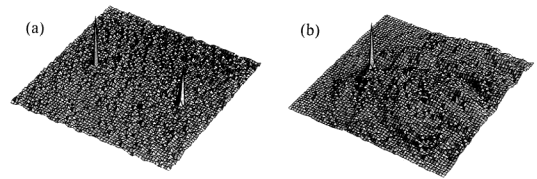


図2 実験的に得られた相関結果。(a) 参照光なしでの出力結果、(b) 参照光との干渉により得られた相関結果。

は、彩度情報の変化が少なかったため、簡単のために式(8)における振幅成分を定数とした。

図2に得られた相関結果を示す。図2(a)は、出力面で観測された相関結果であり、この結果は、色の異なる2つの物体を相関光学系に同時に入力し強度で観測したために、2つの相関ピークが得られている。一方、図2(b)に示される結果は、参照光を同時に入力して得たものであり、参照光と相関出力との干渉が起きているために、2つのピークの強度が異なっている。具体的には、向かって右側の相関ピークが自己相関結果を示しているのに対し、左側は形は同じであるが色の異なる物体との相互相関結果である。この図では、自己相関出力が最大になるように入力画像に一定の位相を付加し、参照光の強度を差し引いたため、ほぼ反対色の物体との相互相関ピークは非常に小さくなっている。このことから、この実験結果から手法の妥当性が確認できる。また、フリンジスキャンを用いて相関結果の位相成分が得られることも実験的に確認されている。

本解説ではカラー画像相関手法の原理と光学系を用いた高速演算手法について紹介した。また光学系を用いた実験により、形は同じだが色が異なる物体を高速に識別できることを示した。さらに本解説では位相変調を可能とする画像表示デバイスとフリンジスキャン手法を利用することにより、2次元複素関数の相関演算を光学系により高速に行うことが可能になることを明らかにした。

文献

- 1) N. Ohyama, M. Yachida, E. Badique, J. Tsujiuchi and T. Honda: J. Opt. Soc. Am. A, 5 (1988) 19-24.
- 2) E. Badique, Y. Komiya, N. Ohyama, J. Tsujiuchi and T. Honda: Opt. Commun., 67 (1988) 335-340.
- 3) M. Kakuta, T. Obi, M. Yamaguchi and N. Ohyama: Opt. Commun., to be published.

(1997年2月3日受理)