

## DCT 係数の正負符号と位相限定相関との関係について

伊藤 泉<sup>†</sup>      藤吉 正明<sup>†</sup>      貴家 仁志<sup>†</sup>

Relationship between Signs of DCT Coefficients and Phase-Only Correlation

Izumi ITO<sup>†</sup>, Masaaki FUJIYOSHI<sup>†</sup>, and Hitoshi KIYA<sup>†</sup>

あらまし 信号の離散コサイン変換 (DCT) 係数の正負符号が、その信号を拡張した離散フーリエ変換の位相項に相当することを理論的に述べ、これに基づきある特別な場合の位相限定相関として、DCT の正負符号による鏡像位相限定相関という新しい相関法を提案する。方向推定処理を追加することによって、位相限定相関と同様に、画像の並進移動に対し DCT の正負符号を用いて移動量を推定することができることが確認される。シミュレーションによって、本論文における理論の妥当性を整数ピクセル精度の移動量推定を例にして示し、更に DCT 係数の正負符号を用いる有意性が JPEG 符号化画像に対する画像同定問題において述べられる。

キーワード DCT 符号限定画像, DCT, 鏡像位相限定相関, 位相限定相関

### 1. ま え が き

離散コサイン変換 (Discrete Cosine Transform: 以降, DCT と略記) は, JPEG 及び MPEG をはじめ, 多くの画像符号化手法の基礎技術として採用されている。したがって, 符号化画像は, 既に DCT 変換された情報を保持しており, それを有効に利用した画像処理や画像マッチングの研究が期待されている。また, DCT 係数の正負符号は, 圧縮時に量子化処理を施しても符号反転を起こさず, 量子化に対してロバストな特徴量である。これらのことから, 符号化画像の同定問題に DCT の正負符号を用いた研究が行われている [1] ~ [3]。

一方, 位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: 以降, POC と略記) は, 2 枚の画像から移動量, 回転量及び拡大率をサブピクセル精度で推定する方法である [4] ~ [10]。現在, 生体認証への実用化, 電子顕微鏡向け画像解析, 高品質映像処理への応用等の研究が進められている。しかし, 符号化画像に対して位相限定相関法を適用する場合には, 一度逆 DCT を施して画像を復号した後に適用する必要がある。更に, 画像の特徴量として保存する際は, 位相情報は複素数であり, 多くのデータ量を必要としてしまう。また, DCT の

正負符号に比べ量子化誤差の影響も強く受けてしまう。

このような背景から, 符号化画像との融合性を期待し, DCT 係数の正負符号を用いた相関法の研究が試みられた [11]。しかし, DCT の正負符号と位相限定相関法の理論的な関係の導出, 方向を含めた画像の移動量の推定はいまだ考察されていない。そこで, 本論文では, DCT 係数の正負符号と DFT の位相項の関係を導出し, これに基づき, DCT 係数の正負符号を用いる鏡像位相限定相関を提案する。すなわち, DCT 係数の正負符号を用いることにより, 制約のある位相限定相関が計算可能となる。DCT 係数を用いることによるその制約と, 新たに生じる方向推定の課題を解決する方法が考察される。シミュレーションによって, 本論文における理論の妥当性を, 整数ピクセル精度の移動量推定を例にして示し, 更に DCT 係数の正負符号を用いる有効性が JPEG 符号化画像に対する画像同定問題において述べられる。

### 2. 関連技術

ここでは, まず準備として, POC, 位相限定画像及び DCT 符号限定画像について述べる。本論文では, 画像を扱うので信号表現は多次元で記述されるが, 簡略化のため, 混乱のない限り一次元の表現を使用する。

#### 2.1 POC

位相限定相関法 (POC) は, 位相成分に限定した相関を求める手法である。位相成分は,  $N$  点信号  $f(n)$ ,

<sup>†</sup> 首都大学東京大学院システムデザイン研究科, 日野市  
Faculty of System Design, Tokyo Metropolitan University,  
Hino-shi, 191-0065 Japan

$g(n)$  の  $N$  点の離散フーリエ変換 (DFT) を振幅成分で正規化することで求めることができる。

位相成分に限定した相関関数を POC 関数といい、POC 関数  $r(n)$  の合成スペクトル  $R(k)$  は、次式で与えられる。

$$R(k) = \frac{F(k) \cdot \overline{G(k)}}{|F(k) \cdot \overline{G(k)}|} \quad (1)$$

ここで、 $\overline{G(k)}$  は信号  $f(n)$ ,  $g(n)$  の DFT であり、 $\overline{G(k)}$  は  $G(k)$  の複素共役を表す。したがって、 $N$  点の POC 関数  $r(n)$  は、合成スペクトル  $R(k)$  の逆 DFT として次式で与えられる。ここで  $W_N = \exp(-j2\pi/N)$  である。

$$r(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} R(k) W_N^{-nk}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

### 2.2 DCT 符号限定画像と位相限定画像

DCT にはその対称性から四つのタイプがあり、DCT タイプ II はその特性より多くのデータ圧縮に使用されている [12], [13]。本論文において、単に DCT というとき、DCT タイプ II を表す。

サイズ  $N_1 \times N_2$  の位相限定画像  $\hat{f}(n_1, n_2)$  ( $n_1 = 0, 1, \dots, N_1 - 1, n_2 = 0, 1, \dots, N_2 - 1$ ) は、原画像  $f(n_1, n_2)$  の DFT である  $F(k_1, k_2)$  を振幅成分で正規化した値の逆 DFT として、式 (3) で与えられる。

$$\hat{f}(n_1, n_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1=0}^{N_1-1} \sum_{k_2=0}^{N_2-1} \frac{F(k_1, k_2)}{|F(k_1, k_2)|} \times W_{N_1}^{-n_1 k_1} W_{N_2}^{-n_2 k_2} \quad (3)$$

一方、 $N$  点の信号  $x(n)$  ( $n = 0, 1, \dots, N-1$ ) の DCT-II は式 (4) で定義され、その逆 DCT は式 (5) で定義される。

$$X_C(k) = \sqrt{\frac{2}{N}} C_k \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos \left( \frac{2\pi \left( n + \frac{1}{2} \right) k}{2N} \right) \quad (4)$$

$$x(n) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{k=0}^{N-1} C_k X_C(k) \cos \left( \frac{2\pi \left( n + \frac{1}{2} \right) k}{2N} \right) \quad (5)$$



図 1 DCT 符号限定画像  
Fig. 1 DCT sign-only image.



図 2 位相限定画像  
Fig. 2 Phase-only image.

$$C_k = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & k = 0 \\ 1, & k \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

サイズ  $N_1 \times N_2$  の DCT 符号限定画像  $\hat{f}_C(n_1, n_2)$  は、原画像  $f(n_1, n_2)$  の DCT である  $F_C(k_1, k_2)$  を絶対値で正規化した値、すなわち  $F_C(k_1, k_2)$  の正負符号の逆 DCT として式 (7) で与えられる。

$$\hat{f}_C(n_1, n_2) = \frac{2}{\sqrt{N_1 N_2}} \sum_{k_1=0}^{N_1-1} \sum_{k_2=0}^{N_2-1} C_{k_1} C_{k_2} \frac{F_C(k_1, k_2)}{|F_C(k_1, k_2)|} \times \cos \left( \frac{2\pi \left( n_1 + \frac{1}{2} \right) k_1}{2N_1} \right) \cos \left( \frac{2\pi \left( n_2 + \frac{1}{2} \right) k_2}{2N_2} \right) \quad (7)$$

図 1 に DCT 符号限定画像、図 2 に位相限定画像を示す。ただし、これらの画像は視覚的に判断できるように濃度補正を行っている。DCT 符号限定画像と位相限定画像は似通った画像であり、ともに原画像の輪

郭等の特徴をもつことが分かる .

### 3. DCT の正負符号を用いた鏡像位相限定相関法

ここでは , DCT の正負符号と DFT の位相成分の関係を導出し , それを用いた鏡像位相限定相関法について提案する .

**3.1 DCT の正負符号と DFT の位相項の関係**  
 $2N$  点の信号  $\hat{x}(n)$  を ,  $N$  点の信号  $x(n)$  の対称拡張として次式で定義する .

$$\hat{x}(n) = \begin{cases} x(n), & n = 0, 1, \dots, N-1 \\ x(2N-n-1), & n = N, N+1, \dots, 2N-1 \end{cases} \quad (8)$$

$2N$  点の信号  $\hat{x}(n)$  の  $2N$  点 DFT である  $\hat{X}(k)$  は式 (9) として定義され , 展開することができる .

$$\begin{aligned} \hat{X}(k) &= \sum_{n=0}^{2N-1} \hat{x}(n) W_{2N}^{nk} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_{2N}^{nk} + \sum_{n=N}^{2N-1} x(2N-n-1) W_{2N}^{nk} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_{2N}^{nk} + \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_{2N}^{(2N-n-1)k} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left( W_{2N}^{nk} + W_{2N}^{-(n+1)k} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式 (9) の両辺に  $\frac{1}{2} W_{2N}^{\frac{k}{2}}$  を掛けると

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} W_{2N}^{\frac{k}{2}} \hat{X}(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \frac{1}{2} \left( W_{2N}^{(n+\frac{1}{2})k} + W_{2N}^{-(n+\frac{1}{2})k} \right) \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos \left( \frac{2\pi \left( n + \frac{1}{2} \right) k}{2N} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

と展開され , 式 (10) の両辺に  $\sqrt{\frac{2}{N}} C_k$  を掛けると ,

$$\begin{aligned} &\sqrt{\frac{2}{N}} C_k \frac{1}{2} W_{2N}^{\frac{k}{2}} \hat{X}(k) \\ &= \sqrt{\frac{2}{N}} C_k \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos \left( \frac{2\pi \left( n + \frac{1}{2} \right) k}{2N} \right) \\ &= X_C(k) \end{aligned} \quad (11)$$

ただし ,

$$C_k = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & k = 0 \\ 1, & k \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

を得る . 式 (11) の右辺は , 式 (4) より ,  $N$  点信号  $x(n)$  の DCT である  $X_C(k)$  となることが分かる .

$X_C(k)$  を  $X_C(k) = |X_C(k)| X'_C(k)$  と , その絶対値  $|X_C(k)|$  と正負符号  $X'_C(k)$  を用いて表す . 同様に ,  $\hat{X}(k)$  を  $\hat{X}(k) = |\hat{X}(k)| \hat{X}'(k)$  と , その振幅成分  $|\hat{X}(k)|$  と位相項  $\hat{X}'(k)$  を用いて表す . これらの表現を用いて式 (11) の両辺を絶対値で正規化すると , 次式が導かれる .

$$X'_C(k) = \frac{X_C(k)}{|X_C(k)|} = W_{2N}^{\frac{k}{2}} \hat{X}'(k), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (13)$$

したがって ,  $N$  点の信号  $x(n)$  の DCT の正負符号  $X'_C(k)$  は ,  $2N$  点に拡張した信号  $\hat{x}(n)$  の DFT の位相項に  $W_{2N}^{\frac{k}{2}}$  だけ掛けたものに相当することが分かる .

### 3.2 鏡像位相限定相関

式 (1) と同様に ,  $N$  点の信号  $x(n), y(n), (n = 0, 1, \dots, N-1)$  の DCT 符号積  $R_C(k)$  を式 (14) で定義する .

$$R_C(k) = \frac{X_C(k) \cdot Y_C(k)}{|X_C(k) \cdot Y_C(k)|} = X'_C(k) \cdot Y'_C(k) \quad (14)$$

ここで ,  $X_C(k), Y_C(k)$  は  $x(n), y(n)$  の DCT ,  $X'_C(k), Y'_C(k)$  は  $X_C(k), Y_C(k)$  の正負符号を表す . 2 枚の画像の DCT 符号積  $R_C(k)$  は , 図 3 に示すように , 2 枚の画像をそれぞれ対称拡張し , それらの位



図 3 対称拡張した原画像  
 Fig. 3 Original image extended symmetrically.

相項の積をとり、 $W_{2N}^k$  を乗じたものに相当することが分かる。

次に、式 (13) の DCT の正負符号と DFT の位相成分の関係に基づき、 $N$  点の DCT 符号積  $R_C(k)$  を  $2N$  点に拡張した DCT 符号積  $\hat{R}_C(k)$  を考え、その  $2N$  点逆 DFT である  $\hat{r}(n)$  を式 (15) で定義する。本論文ではこの  $\hat{r}(n)$  を鏡像位相限定相関と呼ぶ。

$$\hat{r}(n) = \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^{2N-1} \hat{R}_C(k) W_{2N}^{-nk}, \quad n = 0, 1, \dots, 2N-1 \quad (15)$$

ただし、

$$\hat{R}_C(k) = \begin{cases} R_C(k), & k = 0, 1, \dots, N-1 \\ 1, & k = N \\ R_C(2N-k), & k = N+1, N+2, \dots, 2N-1 \end{cases} \quad (16)$$

とする。ここで、式 (16) の  $R_C(k)$  の拡張は、式 (15) が実数となることを保持するものである。すなわち、 $R_C(k)$  が実数であることに注意すると、

$$\begin{aligned} \hat{R}_C(k) &= \overline{\hat{R}_C(2N-k)} \\ &= R_C(2N-k), k = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (17)$$

の制約を課している。このとき  $n = N$  にのみ自由度が与えられることになり、ここでは 1 を選択する。

鏡像位相限定相関は、原画像、原画像の左右対象画像、原画像の上下対象画像、原画像の点対象画像におけるピークをそれぞれ鏡像のようにもち、図 4 に示すように 4 本のピークが現れる。すなわち原画像に対する一つの動きに起因して、四つの動きが生成される [14]。次章ではこの四つの相関ピークから一つの値を特定する方法について議論する。

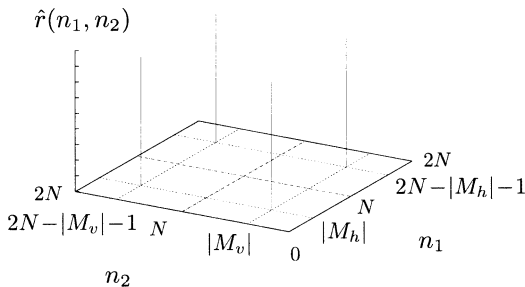


図 4 鏡像位相限定相関  
Fig. 4 Mirror image phase-only correlation.

### 3.3 提案法の実行手順

提案法の実行手順は以下のようにまとめられる。

[手順 1]  $N$  点の信号  $x(n), y(n), n = 0, 1, \dots, N-1$  に対して、それぞれ DCT を適用し、 $X_C(k), Y_C(k)$  を得る。

[手順 2]  $X_C(k), Y_C(k)$  から正負符号を抽出し、式 (14) に従い DCT 符号積  $R_C(k)$  を得る。

[手順 3] 式 (16) に従い DCT 符号積  $R_C(k)$  を拡張し、 $\hat{R}_C(k)$  を作成する。

[手順 4]  $\hat{R}_C(k)$  を式 (15) に従い  $2N$  点逆 DFT することにより、鏡像位相限定相関  $\hat{r}(n)$  を得る。

[手順 5] 4. で述べる方法により移動方向の推定を行う。

ここで、手順 3 及び 4 の処理は、後述するようにより簡潔な式 (18) の計算に置き換えることもできる。また、JPEG 等の DCT 変換に基づく符号化画像に対して、提案法を適用する場合には、画像がブロック分割されていることを配慮する必要がある。原理的にはブロック分割された各信号を  $N$  点と考え、手順 1 から各ブロックごとに適用することになる。したがって、符号化画像中からブロックごとに DCT 係数の正負符号を抽出し、手順が実行されることになる。ただし、推定精度はブロックサイズの影響を受ける。

## 4. 画像マッチングへの応用例

画像の移動には、並進移動（水平、垂直移動）と回転移動がある。ここでは、図 5 及び図 6 に示すように、サイズ  $N \times N$  の原画像とその並進移動した画像から、その移動量を推定する問題を考える。

### 4.1 移動量の大きさの推定

2 枚の画像間の移動量  $(M_h, M_v)$  は、大きさ



図 5  $N \times N$  原画像  $x(n_1, n_2), (0,0)$   
Fig. 5  $N \times N$  Original image  $x(n_1, n_2), (0,0)$ .



図 6  $N \times N$  対象画像  $y(n_1, n_2)$ ,  $(M_h, M_v)$   
Fig. 6  $N \times N$  Object image  $y(n_1, n_2)$ ,  $(M_h, M_v)$ .

$(|M_h|, |M_v|)$  とその方向 (正負) により表現される. 移動量の大きさを推定するためには, サイズ  $N \times N$  の原画像  $x(n_1, n_2)$  と検査対象となる画像  $y(n_1, n_2)$  (以降, 対象画像という) の鏡像位相限定相関  $\hat{r}(n_1, n_2)$  を求め, 相関ピークの一つの座標を知ることにより, 求めることができる. 上述した四つの相関ピークの座標は,  $(|M_h|, |M_v|)$ ,  $(2N - |M_h| - 1, |M_v|)$ ,  $(|M_h|, 2N - |M_v| - 1)$ ,  $(2N - |M_h| - 1, 2N - |M_v| - 1)$ , すなわち  $\hat{r}(n_1, n_2)$  のピーク値座標は, DFT の循環性の仮定より  $(|M_h|, |M_v|)$ ,  $(-|M_h|, |M_v|)$ ,  $(|M_h|, -|M_v|)$ ,  $(-|M_h|, -|M_v|)$  と対応する. これより, 鏡像位相限定相関  $\hat{r}(n_1, n_2)$  のピークの一つから移動量の大きさ  $(|M_h|, |M_v|)$  を求めることができる.

移動量の大きさは,  $n = 0, 1, \dots, 2N - 1$  に対して, 式 (15) を計算することにより求められる. しかし, 上述した相関ピーク座標の対称性より,  $n = 0, 1, \dots, N$  に対してのみ  $\hat{r}(n)$  を求めれば, 移動量の大きさを求めることができる. このことと, 式 (16) の  $\hat{R}(k)$  の対称性を考慮すると, 式 (15) は次式として整理される.

$$\hat{r}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N F_k R_C(k) \cos\left(\frac{\pi nk}{N}\right) \quad (18)$$

$$n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (19)$$

$$F_k = \begin{cases} \frac{1}{2}, & k = 0, N \\ 1, & k = 1, 2, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (20)$$

これは DCT-タイプ I の式に相当することが分かる [12], [13]. したがって, 2 枚の画像の鏡像位相限定相関を計算することは, 2 枚の画像にそれぞれ DCT-タイプ II を施し, 抽出した正負符号の積に DCT-タイプ I を施す演算であることが分かる.

今, 式 (15) 及び式 (18) に  $n = 0$  を代入すると,

$$\begin{aligned} \hat{r}(0) &= \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^{2N-1} \hat{R}_C(k) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N F_k R_C(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} R_C(k) \quad (21) \end{aligned}$$

を得る. 上式における最後の式の修正は, 移動量が 0 のとき,  $R_C = 1$  であり,  $F_0 R_C(0) = F_N R_C(N) = 1/2$  であることを利用して行われている. 式 (21) は, DCT 符号積の平均を求める計算に相当する. すなわち, 2 枚の画像間の DCT 符号積の平均により, 二つの信号の移動量が 0 の場合の相関を計算でき, 信号の同一性の判定に用いることが分かる.

#### 4.2 移動方向の推定

いくつかの応用では移動量の大きさ  $(|M_h|, |M_v|)$  のみで十分な場合もある [1] ~ [3]. しかし, 一般的には方向の推定も求められる. 方向推定を行う二つの方法を以下で説明する. 原理的に両者は同じであるが, 応用ごとに適切に選択されることになる.

##### 4.2.1 移動原画像の使用

移動方向を推定するために, 原画像  $x(n_1, n_2)$ , 対象画像  $y(n_1, n_2)$  に加え, 原画像を既知の移動量で並進移動させた画像  $\tilde{x}(n_1, n_2)$  (以降, 移動原画像という) を導入する方法を提案する.

対象画像の移動量を  $M_i$ ,  $i = h, v$ , その大きさを  $|M_i|$  とし, 移動原画像の移動量を  $\sigma_i \geq 0$ ,  $i = h, v$  とする. 今, 原点を原画像  $x(n_1, n_2)$  の左下端  $x(0, 0)$  に定めると, 対象画像の移動量が  $(M_h, M_v)$  のとき, 対象画像の左下端の座標は, その移動方向により,  $y(|M_h|, |M_v|)$ ,  $y(|M_h|, -|M_v|)$ ,  $y(-|M_h|, |M_v|)$ ,  $y(-|M_h|, -|M_v|)$  のいずれかで表される. また, 移動原画像の移動量が  $(\sigma_h, \sigma_v)$  のとき, 移動原画像の左下端の座標は,  $\tilde{x}(\sigma_h, \sigma_v)$  と表される (図 7 参照). 対象画像と原画像の鏡像位相限定相関の移動量の大きさは  $(|M_h|, |M_v|)$  となり, 対象画像と移動原画像の鏡像位相限定相関の移動量の大きさを  $(|\tilde{M}_h|, |\tilde{M}_v|)$  とすると,  $(|\tilde{M}_h|, |\tilde{M}_v|)$  は, 対象画像の移動量  $(M_h, M_v)$  と移動原画像の移動量  $(\sigma_h, \sigma_v)$  の 2 点間の直線距離として次式で表すことができる.

$$(|\tilde{M}_h|, |\tilde{M}_v|) = (|M_h - \sigma_h|, |M_v - \sigma_v|) \quad (22)$$

2 種類の移動量の大きさ  $(|M_h|, |M_v|)$  及び  $(|\tilde{M}_h|, |\tilde{M}_v|)$  から, 移動方向の判別は, 式 (23) に示す判定式  $D_i$  ( $i = h, v$ ) を用いて実行される.

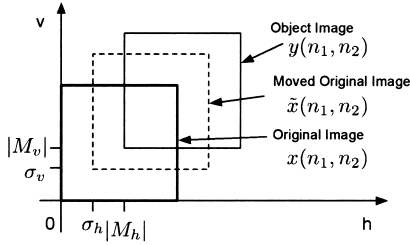


図 7 画像の位置関係  
Fig. 7 Placements of three images.

表 1 移動原画像による方向判別  
Table 1 Discrimination using the moved original image.

	$D_i < 0$	$D_i = 0$	$D_i > 0$
$\sigma_i > 0$	$ M_i $	$ M_i $	$- M_i $

$$D_i = |M_i - \sigma_i| - |M_i|, \quad (i = h, v) \quad (23)$$

ただし、後述するように、上式により移動方向を判別するためには、式 (24) に示す  $\sigma_i$  と  $M_i$  の相対的条件を満たす必要がある。

$$\frac{\sigma_i}{2} \leq |M_i| \quad (24)$$

式 (24) の条件のもとで、移動原画像の移動量  $\sigma_i$  及び判定式  $D_i$  の符号から表 1 に従い方向判別を行う。

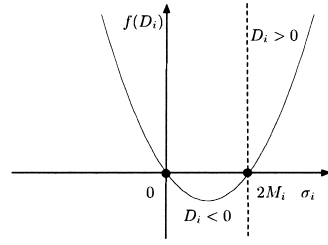
式 (24) の条件は、以下のように導出される。まず式 (23) から、 $D_i = 0$  が成立する条件を考えると、

$$\begin{aligned} D_i &= |\tilde{M}_i| - |M_i| = |M_i - \sigma_i| - |M_i| = 0 \\ \Leftrightarrow |M_i - \sigma_i| &= |M_i| \\ \Leftrightarrow (M_i - \sigma_i)^2 &= M_i^2 \\ \Leftrightarrow M_i^2 - 2M_i\sigma_i + \sigma_i^2 - M_i^2 &= 0 \end{aligned} \quad (25)$$

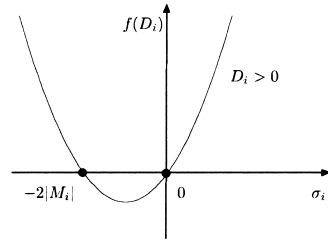
となり、したがって、

$$f(D_i) = \sigma_i(\sigma_i - 2M_i) = 0 \quad (26)$$

を得る。ゆえに、式 (26) に示す  $\sigma_i$  を変数とする二次方程式の解を境界として、二次不等式  $D_i < 0$  及び  $D_i > 0$  の解の存在領域が決定される。 $\sigma_i \geq 0$  の仮定のもとで、それぞれの場合について考えると、解は図 8 に示すように、以下の四つに分類される。



(a)  $M_i > 0$



(b)  $M_i < 0$

図 8 二次不等式

Fig. 8 Quadratic inequality.

(I)  $D_i < 0$  の解

場合 1)  $M_i > 0$  のとき

$$\sigma_i < 2M_i$$

場合 2)  $M_i < 0$  のとき

解なし

(II)  $D_i > 0$  の解

場合 3)  $M_i > 0$  のとき

$$\sigma_i > 2M_i$$

場合 4)  $M_i < 0$  のとき

$$\sigma_i > 0$$

以上のように、 $\sigma_i \geq 0$  でかつ式 (24) のもとであれば、 $M_i < 0$  及び  $M_i > 0$  の両方において解が存在する。したがって、これらの条件のもとで、表 1 の方向判別が可能となる。また、 $|M_i| = 0$  であるときは、移動量が 0 であると判断する。

4.2.2 移動対象画像の使用

対象画像の移動量が既知である移動対象画像を導入する方法を、方向推定の他の方法として提案する。

原画像と対象画像の  $N \times N$  の領域における鏡像位相限定相関の移動量の大きさを  $(|M_h|, |M_v|)$  とし、対象画像をもとに移動した移動対象画像の移動量を  $(\delta_h, \delta_v)$ ,  $\delta_i > 0, i = h, v$  とすると、原画像と移動対象画像との移動量の大きさ  $(|\tilde{M}_h|, |\tilde{M}_v|)$  は次式のように

表 2 移動対象画像による方向判別  
Table 2 Discrimination using the moved object image.

	$\bar{D}_i < 0$	$\bar{D}_i = 0$	$\bar{D}_i > 0$
$\sigma_i > 0$	$- M_i $	$- M_i $	$ M_i $

表すことができる .

$$(|\check{M}_h|, |\check{M}_v|) = (|M_h + \delta_h|, |M_v + \delta_v|) \quad (27)$$

移動方向の判別は式 (28) に示す判定式  $\bar{D}_i$  を用い、表 2 に従い判別する .

$$\bar{D}_i = |\check{M}_i| - |M_i| = |M_i + \delta_i| - |\delta_i| \quad (28)$$

ただし、式 (24) の導出と同様の手順により、式 (28) から求めた二次不等式の解の存在領域から以下に示す方向の判定可能範囲を導出することができる .

$$\frac{\sigma_i}{2} \leq |M_i| \quad (29)$$

### 5. シミュレーション

整数ピクセル精度の画像間における相関のシミュレーションを行い、本論文における議論の妥当性及び有効性を検証する .

#### 5.1 相関余裕度による比較

並進移動量の推定の信頼度を評価するために、次式に示す相関余裕度  $r_{1,2}$  という尺度を定義する .

$$r_{1,2} = \frac{|p_1| - |p_2|}{|p_1|} \quad (30)$$

ここで  $p_1$  は相関関数の第 1 ピーク値を表し、 $p_2$  は第 2 ピーク値を表す . 鏡像位相限定相関については、サイズ  $N \times N$  の画像に対して  $2N \times 2N$  の領域に 4 本のピーク値が存在するため、相関余裕度を求める際には、 $N \times N$  の領域における第 1 ピーク値と第 2 ピーク値から式 (30) より計算する . 相関余裕度  $r_{1,2}$  は  $0 \leq r_{1,2} \leq 1$  の値をとり、1 に近いほど、ピーク座標値におけるピークの独立性が高いことを示す . 以下では、並進移動量を整数画素であると仮定し、この相関余裕度に基づき各相関法を比較する . これは、サブピクセル精度の並進移動量では、真のピーク座標が整数画素値にないため、隣接する整数画素値が第 1 ピークと第 2 ピークとして表現されてしまうからである .

図 5 及び図 6 に示す 2 枚の画像 (サイズ  $512 \times 512$ , lena) より、対象画像を任意の移動量  $(M_h, M_v)$  で並進移動させ、位相限定相関、鏡像位相限定相関及び振

表 3 相関余裕度の比較 (lena)  
Table 3 Comparison of  $r_{1,2}$  (lena).

移動量	POC	鏡像位相限定相関	相関
(0,0)	1	1	0.0021
(20,20)	0.9864	0.9336	0.0019
(50,50)	0.9747	0.9346	0.0021
(100,100)	0.9529	0.9479	0.0021
(150,150)	0.9754	0.9362	0.0014
(200,200)	0.9417	0.9277	0.0012

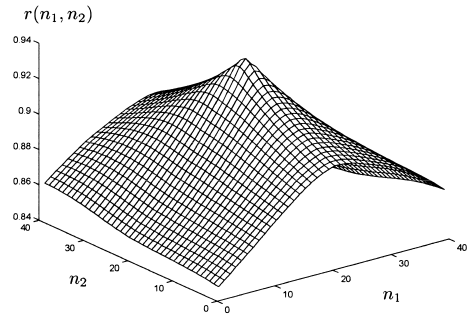


図 9 相関関数  $(M_h, M_v) = (-20, 20)$   
Fig. 9 Correlation  $(M_h, M_v) = (-20, 20)$ .

幅成分を制約しない相関それぞれについて、相関余裕度を求めた結果を表 3 に示す . ここで、振幅に制約を加えない相関は次式により定義される値である .

$$r(n) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k) \cdot \overline{G(k)} W_N^{-nk} \quad (31)$$

ただし、 $F(k), G(k)$  は  $N$  点信号  $f(n), g(n), n = 0, 1, \dots, N-1$  の離散フーリエ変換、 $\overline{G(k)}$  は  $G(k)$  の複素共役を表す .

表に示す結果より、相関余裕度の値は、振幅成分を制約しない相関に比べ、位相限定相関及び鏡像位相限定相関は極めて高い値を示していることが分かる .

対象画像の移動量  $(M_h, M_v) = (-20, 20)$  のときの相関の結果を図 9 に、鏡像位相限定相関の結果を図 10 に示す . 振幅成分に制約を加えない相関では、ピーク座標の周囲も高い値をもち、相関余裕度が相対的に小さくなる . これに対して、鏡像位相限定相関のピークは、位相限定相関のピークと同様に、移動量を示す座標値に 1 本のインパルスが立つ .

5 種類のサイズ  $512 \times 512$  の濃淡画像を用いた相関余裕度の比較を図 11 に示す . 対象画像の移動量  $(M_h, M_v)$  は (100,100) とした . 振幅成分を制約しない相関の相関余裕度は極めて低い値で、画像 boat 及び stream and bridge では移動量を誤推定した . 一方、位相限定相関及び鏡像位相限定相関はほぼ等しい相関

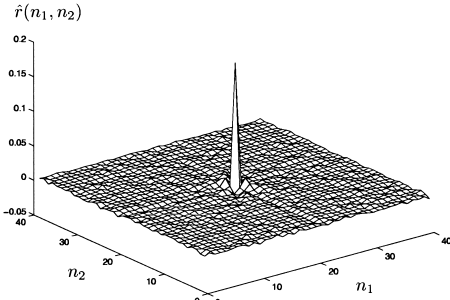


図 10 鏡像位相限定相関  $(M_h, M_v) = (-20, 20)$   
 Fig. 10 Mirror image phase-only correlation  $(M_h, M_v) = (-20, 20)$ .

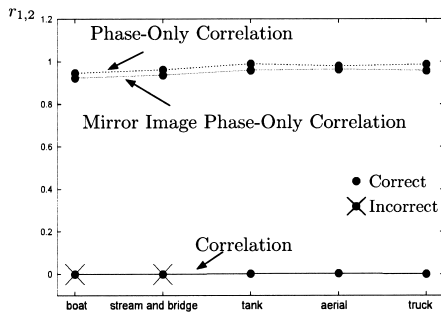


図 11 相関余裕度の比較 (5 種類の画像),  $(M_h, M_v) = (100, 100)$   
 Fig. 11 Comparison of  $r_{1,2}$  (5 images),  $(M_h, M_v) = (100, 100)$ .

余裕度もち、5 種類の画像の移動量を正確に推定できた。位相限定相関に比べ、鏡像位相限定相関の相関余裕度は若干低下する。これは信号を対称に拡張させたことにより、ある信号の動きが四つの動きを生成し、それらが互いに雑音として作用することに起因すると考えている。ゆえに、動きがない場合は互いに作用する雑音はない。したがって、表 3 に示すように、移動量  $(0, 0)$  における POC と鏡像位相限定相関の相関余裕度はともに 1 となる。

5.2 判定式の有効性

2 種類の方向推定法の有効性を検討するために、2 枚の画像の移動方向の推定を行う。画像には、サイズ  $512 \times 512$  の濃淡画像 lena を用いた。

シミュレーション結果を表 4 及び表 5 にそれぞれ示す。表 4 より、式 (23) 及び式 (24) の判定式と判別条件の正当性が確認できる。表内の ○ 印は正しく判定できたことを示し、× 印は誤判定 (判定不能) を示す。表より、 $(\sigma_h, \sigma_v) = (50, 50)$  のとき、 $|M_i|$  が 1 から 24 までは判定不能であり、これは式 (24) に示す

表 4 移動量推定 (移動部分の濃度値を 0 とする場合) (移動原画像)

Table 4 Estimation of movement (the intensity = 0) using moved original image.

$(M_h, M_v)$	$(\sigma_h, \sigma_v)$		$(M_h, M_v)$	$(\sigma_h, \sigma_v)$	
	(1,1)	(50,50)		(1,1)	(50,50)
(1,1)	○	×	(-1,-1)	○	×
(-1,1)	○	×	(1,-1)	○	×
(24,24)	○	×	(-24,-24)	○	×
(-24,24)	○	×	(24,-24)	○	×
(25,25)	○	○	(-25,-25)	○	○
(-25,25)	○	○	(25,-25)	○	○
(50,50)	○	○	(-50,-50)	○	○
(-50,50)	○	○	(50,-50)	○	○
(255,255)	○	○	(-255,-255)	○	○
(-255,255)	○	○	(255,-255)	○	○
(300,300)	○	○	(-300,-300)	○	○
(-300,300)	○	○	(300,-300)	○	○
(400,400)	○	○	(-400,-400)	○	○
(-400,400)	○	○	(400,-400)	○	○
(500,500)	×	×	(-500,-500)	×	×
(-500,500)	×	×	(500,-500)	×	×

$(M_h, M_v)$ : 対象画像の移動量  $(\sigma_h, \sigma_v)$ : 移動原画像の移動量  
 ○ 印: 正しい判定, × 印: 誤判定 (判定不能)

表 5 移動量推定 (移動部分の濃度値を 0 とする場合) (移動対象画像)

Table 5 Estimation of movement (the intensity=0) using moved object image.

$(M_h, M_v)$	$(\delta_h, \delta_v)$		$(M_h, M_v)$	$(\delta_h, \delta_v)$	
	(1,1)	(50,50)		(1,1)	(50,50)
(1,1)	○	×	(-1,-1)	○	×
(-1,1)	○	×	(1,-1)	○	×
(24,24)	○	×	(-24,-24)	○	×
(-24,24)	○	×	(24,-24)	○	×
(25,25)	○	○	(-25,-25)	○	○
(-25,25)	○	○	(25,-25)	○	○
(50,50)	○	○	(-50,-50)	○	○
(-50,50)	○	○	(50,-50)	○	○
(255,255)	○	○	(-255,-255)	○	○
(-255,255)	○	○	(255,-255)	○	○
(300,300)	○	○	(-300,-300)	○	○
(-300,300)	○	○	(300,-300)	○	○
(400,400)	○	○	(-400,-400)	○	○
(-400,400)	○	○	(400,-400)	○	○
(500,500)	×	×	(-500,-500)	×	×
(-500,500)	×	×	(500,-500)	×	×

$(M_h, M_v)$ : 対象画像の移動量  $(\delta_h, \delta_v)$ : 移動対称画像の移動量  
 ○ 印: 正しい判定, × 印: 誤判定 (判定不能)

判別可能な範囲外であることが確認できる。同様に、表 5 より、移動対象画像を使用した場合の式 (28) 及び式 (29) の正当性を確認することができる。

したがって、移動原画像及び移動対象画像の移動量は  $(\sigma_h, \sigma_v) = (1, 1)$  及び  $(\delta_h, \delta_v) = (1, 1)$  が推奨される。2 種類の方向推定法はともに、対象画像の移動量の大きさ  $(|M_h|, |M_v|) = (500, 500)$  のとき誤判定と



表 6 移動量推定 (画像から切り出した場合), 移動原画像  $(\sigma_h, \sigma_v)=(1,1)$  使用

Table 6 Estimation of movement (truncation), using moved original image  $(\sigma_h, \sigma_v) = (1, 1)$ .

$(M_h, M_v)$	$( M_h ,  M_v )$	方向判定
(100,100)	(100, 100)	○
(200,200)	(200, 200)	○
(300,300)	(300, 300)	○
(400,400)	(400, 400)	○
(500,500)	(1, 69)	×

$(M_h, M_v)$ : 対象画像の移動量

方向判定: ○ 印: 正しい, × 印: 誤推定

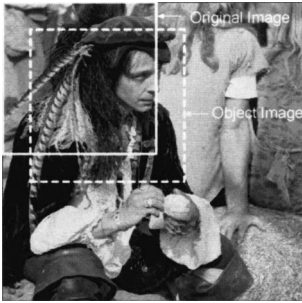


図 12 1024 × 1024 濃淡画像 Man  
Fig. 12 1024 × 1024 grayscale Man.

なる。これは、移動量の大きさを誤推定したことに起因する。すなわち、対象画像の移動量を大きくすると、原画像と対象画像の一致する部分が減少するため相関ピークが立たないことによるものである。

表 6 に画像から切り出した領域 (512 × 512) における方向推定法の有効性を示す。ここでは移動原画像  $(\sigma_h, \sigma_v)=(1, 1)$  を用いた。

原画像及び対象画像は図 12 に示すように濃淡画像 Man から切り出して作成した。表中の方向判定の ○ 印は正しく移動量の方向を推定できたことを示し、× 印は推定に誤りがあったことを示す。移動部分の濃度値を 0 とした場合と同様に移動量が正しく推定されることが分かる。対象画像の移動量  $(M_h, M_v) = (500, 500)$  のとき、移動量の大きさを推定できず、方向判定ができない。

### 5.3 画像同定

画像 A は画像 O から圧縮率  $R_A$  である方式で符号化され、画像 B は同じ画像 O から圧縮率  $R_B$  で A と同じ方式で符号化され、画像 C は O とは異なる画像から圧縮率  $R_C$  で A と同じ方式で符号化されたとする。このとき画像 A と B は同じ画像 O から生成されており、画像 C のそれは異なる。符号化画像中から

あるクエリー (query) 画像 (例えば画像 A) と同じ画像から上述の条件のもとで生成された画像を探す処理を画像同定と呼ぶことにする [1] ~ [3]。上述の例ではクエリー画像を A とすると、画像 B が同定される。ここで各画像の圧縮率は同じである必要はない。

ここでは、JPEG 符号化画像に対する画像同定を例にして、DCT 係数の正負符号を用いることの有用性を確認する。クエリー画像として、JPEG における圧縮率の制御パラメータを Q-Factor=50 に設定し、対象画像に対して Q-Factor を様々に変え、2 枚の画像間の相関計算を行う。この相関計算は移動量 0 の場合の計算に相当する。2 枚の画像は同じ画像から生成されるので、この例は同定されるべき課題である。画像にはサイズ 512 × 512 (8 × 8 を 1 ブロックとすると 4096 ブロック) の濃淡画像 lena を用いた。

POC を用いる方法では、JPEG で符号化した画像を一度復号化し、画像全体に対して DFT を施し、POC を求めている。一方、鏡像位相限定相関を用いる方法では、各 8 × 8 ブロックにおいて式 (32) を適用し、式 (21) に従い  $r_i(0)$  の総計をブロック数  $N_B = 4096$  で割る。

$$r_i(0) = \frac{1}{\lambda} \sum_{k=0}^{N-1} R_C(k) \quad (32)$$

$$r_J(0) = \frac{1}{N_B} \sum_{i=0}^{N_B-1} r_i(0) \quad (33)$$

式 (32) は、式 (21) の重み  $N$  を  $\lambda$  に修正したものに对应する。JPEG 符号化画像では、同じ画像から生成された場合、圧縮率が異なっても DCT 係数の正負符号は反転していない。換言すると、 $R_C(k)$  に  $-1$  は含まれない。したがって、非零係数の個数 (1 の係数の個数) を  $\lambda$  と選ぶと [1] ~ [3]、同じ画像から生成された場合の必要条件是  $r_J(0) = 1$  となる (すべての係数が 0 となる場合を除き)。ゆえに、式 (33) において  $r_J(0) = 1$  が成立するかどうかで、同じ画像から生成されたかどうかを判別することができる。ただし、同じ画像から生成されたという十分条件である更なる絞り込みを必要とする場合もある [1], [2]。

図 13 にシミュレーション結果を示す。POC を用いる方法では圧縮率の増加に伴い相関値が減少することが分かる。これより、POC は量子化誤差の影響を受けていることが分かる。これに対して、鏡像位相限定相関に基づく方法では、圧縮率を変化させても常に相関値は 1 であり、量子化に対してロバストであること

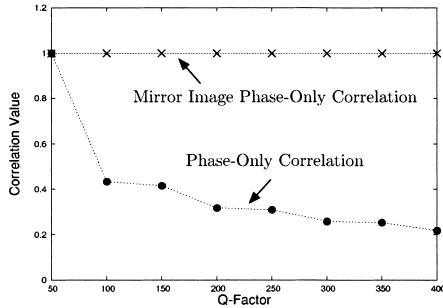


図 13 JPEG 画像に対するロバスト性  
Fig. 13 Robustness in JPEG compression.

が確認される。また、相関計算に用いた正負符号は、JPEG 符号化画像中から容易に抽出することができる。

## 6. む す び

本論文では、DCT の正負符号と DFT の位相項の関係性を明らかにし、鏡像位相限定相関という新しい相関法を提案した。新しい相関法は並進移動の移動量推定において、一度の推定では移動方向が推定できないことを述べ、その解決法を議論した。理論の検証及び提案法の有効性を確認するために、シミュレーションにより、2 枚の画像の整数ピクセル精度での移動量の推定を行った。JPEG 符号化画像に対する画像同定を行い、DCT 係数を用いる有用性を示した。

今後の課題として、POC で可能なサブピクセル精度の推定法の検討や符号化画像に対する画像同定以外の応用などがある。

## 文 献

- [1] F. Arnia, I. Iizuka, M. Fujiyoshi, and H. Kiya, "Fast image identification methods for JPEG images with different compression ratios," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E89-A, no.6, pp.1585-1593, June 2006.
- [2] F. Arnia, I. Iizuka, M. Fujiyoshi, and H. Kiya, "Fast and robust identification methods for JPEG images with various compression ratios," Proc. IEEE ICASSP, IMDSP-P4.6, May 2006.
- [3] 飯塚郁絵, フィトリアルニア, 藤吉正明, 貴家仁志, "変換係数の正負符号を用いた JPEG と JPEG2000 符号化画像間の画像同定法," 映像学技報, ME2006-101, May 2006.
- [4] C.D. Kuglin and D.C. Hines, "The phase correlation image alignment method," Proc. International Conference on Cybernetics and Society, pp.163-165, 1975.
- [5] N. Uchida, T. Shibahara, T. Aoki, H. Nakajima, and K. Kobayashi, "3D face recognition using passive stereo vision," Proc. IEEE ICIP, pp.II-950-II-953, Sept. 2005.
- [6] K. Ito, A. Morita, T. Aoki, T. Higuchi, H. Nakajima, and K. Kobayashi, "A fingerprint recognition algorithm using phase-based image matching for low-quality fingerprints," Proc. IEEE ICIP, pp.II-33-II-36, Sept. 2005.
- [7] Q. Chen, M. Defrise, and F. Deconinck, "Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.16, no.12, pp.1156-1168, Dec. 1994.
- [8] 青木孝文, "位相情報に基づく画像マッチングとその応用展開," 2005 信学ソ大, AS2-4, Sept. 2005.
- [9] 大竹 剛, 真島恵吾, 合志清一, 藤田欣裕, 藤井亮介, 伊藤 浩, 鈴木光義, 高井重典, 寛座武智, "動画画像特徴量と位相限定相関を用いた番組識別実験," 映像情報メディア学会年次大会, no.12-6, 2005.
- [10] K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi, and K. Kobayashi, "High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E86-A, no.8, pp.1925-1934, Aug. 2003.
- [11] 小林弘幸, 貴家仁志, "DCT 変換に基づく画像の位相限定相関法," 信学技報, IE2005-299, Feb. 2006.
- [12] 貴家仁志, 村松正吾, マルチメディア技術の基礎 DCT 入門, CQ 出版, 1997.
- [13] K.R. Rao and P. Yip, Discrete Cosine Transform, Academic Press. 1990.
- [14] 伊藤 泉, 藤吉正明, 貴家仁志, "DCT 符号限定画像とその画像マッチングへの応用," 映像学技報, ME2006-121, June 2006.

(平成 18 年 7 月 20 日受付, 12 月 14 日再受付,  
19 年 3 月 5 日最終原稿受付)



伊藤 泉 (学生員)

2007 都立大・工・電子・情報卒。現在、首都大東京大学院システムデザイン研究科博士前期課程に在学中。デジタル信号処理に関する研究について興味をもつ。IEEE 学生員。



藤吉 正明 (正員)

1995 埼玉大・教養・教養卒。2001 同大大学院理工学研究科博士後期課程了。博士(学術)。同年都立大大学院・工・電気助手。改組により, 2005 首都大・システムデザイン・情報通信システム研究員, 2007 同助教, 現在に至る。画像処理, スペクトル拡散通信, セキュア通信に興味をもつ。2005 年 5 月~2007 年 5 月本会会誌編集委員, 2005 年 5 月~スマートインフォメディア研究専門委員会委員。英文論文誌 A 第 19 回回路とシステム軽井沢ワークショップ小特集号編集委員。2001 本会学術奨励賞受賞。映像情報メディア学会, IEEE 各会員。



貴家 仁志 (正員)

1980 長岡技科大・工・電気電子システム卒。1982 同大大学院修士課程了。同年, 都立大・工・電気助手。2000 同大大学院工学研究科電気教授, 改組により, 2005 首都大・システムデザイン・情報通信システム教授, 現在に至る。工博。1995~1996 豪シドニー大 Visiting Fellow。デジタル信号処理, マルチレート信号処理, 適応フィルタ, 画像処理, マルチメディアセキュリティに興味をもつ。1998~2002 本会和文論文誌 A 編集委員。1998~2000 IEEE 論文誌 Signal Processing 編集委員。著書「高速フーリエ変換とその応用」, 「デジタル信号処理」, 「マルチレート信号処理」, 「よくわかる動画・静止画の処理技術」。映像情報メディア学会, 画像電子学会各会員。IEEE シニア会員。