第20回　回路とシステム
軽井沢ワークショップ
The 20th Workshop on Circuits and Systems
in Karuizawa, April 23-24, 2007

1次元位相限定相関法に基づく画像の高精度回転計測アルゴリズムとその評価
High-Accuracy Rotation Estimation Algorithm Based on 1D Phase-Only Correlation and Its Evaluation

長嶋 聖 † 伊藤 康一 † 青木 孝文 † 石井 秀昭 ‡ 小林 孝次 ‡
† 東北大学大学院情報科学研究科
‡ 株式会社山武

Sei NAGASHIMA† Koichi ITO† Takafumi AOKI† Hideaki ISHII‡ Koji KOBAYASHI‡
† Graduate School of Information Sciences, Tohoku University
‡ Yamatake Corporation

1 はじめに

高精度な画像マッチングは，画像センシング，画像・映像信号処理，コンピュータビジョン，工業用ビジョンなどさまざまな分野で重要になる基本処理である．これまでに，画像マッチング手法として各種の相関関数を用いる方法，フーリエ変換を利用する方法，画像の特徴点のマッチングに基づく方法などさまざまな方法が提案されている [1, 2]．これらの手法の中でも，位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) [1] に基づく手法が，高精度かつノイズに対してロバストな点から注目されている [3]．

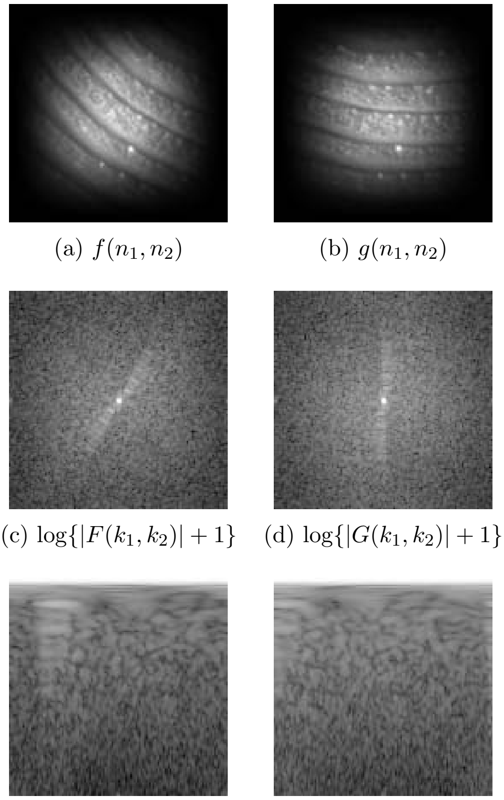
これまで，筆者らの研究グループにおいても，POC に基づく高精度画像マッチング技術の研究開発を行ってきた．POC を用いることで，画像間の平行移動量を 0.01 ピクセル，回転量を 0.03 度，拡大縮小率を 0.02%の誤差と極めて高い精度で推定可能である [4]．これらの技術は，さらに，バイオメトリクス個人認証 [5, 6]，映像の動き推定 [7]，ステレオビジョン [8, 9] などに応用されている．最近では，1 次元位相限定相関法を利用したステレオ画像の対応付け手法が考案され，高精度化と同時に処理の高速化が達成されている [10]．

本論文では，ステレオ画像の対応付け手法に用いられる 1 次元位相限定相関法が画像の回転計測に対しても有効であることを示す．画像の回転量を計測する場合には，極座標展開により展開画像を作成し，画像の回転を画像の平行移動（ここでは水平方向の移動とする）に変換して推定する [11]．ここで，展開画像の平行移動が水平方向のみに制限されることに着目すると，展開画像の移動量推定の問題を 2 次元から 1 次元の移動量推定に置き換えることが可能である．提案する回転計測アルゴリズムは，展開画像中の水平方向の各ラインで 1 次元 POC 関数を計算し，その結果を統合して最終的な回転量を求めている．その際，回転計測に有効なラインを自動的に選択することで，高精度化を実現している．画像の回転量計測の実験から，提案手法を用いることで，計算量を半分以下に削減しつつ，高い精度で画像の回転量を計測できることを示す．

[1]一般的には，位相相関 (Phase Correlation) と呼ばれることもある．

2 従来法による画像の回転計測アルゴリズム

これまでに提案されている 2 次元 POC 関数を用いた画像の回転計測アルゴリズムについて概説する [4, 11]．画像間の回転を求めるには，回転中心を基準として画像を極座標展開し，回転を平行移動に置き換え，平行移動量から回転角度を求める．しかし，画像間に回転と平行移動が同時に存在すると，回転中心を求めることが困難である．そこで，画像を離散フーリエ変換して得られる振幅スペクトル間の回転中心が必ず原点となることを利用する．振幅スペクトルを極座標展開することで，画像間の回転を平行移動に置き換えることができる．このように極座標展開された振幅スペクトル（以下，展開画像）の



(a) $f(n_1, n_2)$　(b) $g(n_1, n_2)$

(c) $\log\{|F(k_1, k_2)| + 1\}$　(d) $\log\{|G(k_1, k_2)| + 1\}$

(e) $F_P(l_1, l_2)$　(f) $G_P(l_1, l_2)$

図 1: 回転量推定の各ステップで生成される画像

移動量から回転量を求めることができる．

以下に回転角度推定の処理の流れを，図 1 に各処理で生成される画像を示す（詳しくは，文献 [4] を参照されたい）．

入力: 登録画像 $f(n_1, n_2)$，入力画像 $g(n_1, n_2)$

出力: 回転量 θ

Step 1: 登録画像 $f(n_1, n_2)$ と入力画像 $g(n_1, n_2)$ の 2 次元離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform: DFT) を計算し，それぞれ $F(k_1, k_2)$ と $G(k_1, k_2)$ とする．ここで，離散空間のインデックスを $n_1 = -M, \cdots, M$ および $n_2 = -M, \cdots, M$ とし，周波数空間のインデックスを $k_1 = -M, \cdots, M$ および $k_2 = -M, \cdots, M$ としている．画像サイズは $N \times N$ $(N = 2M + 1)$ である．また，画像端の不連続性の影響を削減するため，登録画像 $f(n_1, n_2)$ と入力画像 $g(n_1, n_2)$ のそれぞれにハニング窓を適用している（図 1(a), (b)）．

Step 2: それぞれの振幅スペクトル $|F(k_1, k_2)|$ と $|G(k_1, k_2)|$ を求める．自然画像では，そのエネルギーの大部分が低周波領域に集中し，高周波成分のエネルギーは相対的に小さいことが知られている．そのため，実際には，$|F(k_1, k_2)|$ と $|G(k_1, k_2)|$ の代わりに，$\log\{|F(k_1, k_2)| + 1\}$ と $\log\{|G(k_1, k_2)| + 1\}$（図 1(c),(d)）を用いている．

Step 3: 振幅スペクトルを極座標展開し，展開画像 $F_P(l_1, l_2)$ および $G_P(l_1, l_2)$ を求める（図 1 (e), (f)）．ここで，展開画像のインデックスを $l_1 = -M, \cdots, M$ および $l_2 = -M, \cdots, M$ としている．

Step 4: $F_P(l_1, l_2)$ と $G_P(l_1, l_2)$ との平行移動量を 2 次元 POC 関数 [4] により求め，画像間の回転角度 θ を算出する．ここでは，l_2 方向の移動量が画像の回転量に対応している．

3　1 次元 POC 関数に基づく回転計測アルゴリズム

1 次元 POC 関数を使った画像の高精度回転計測アルゴリズムを提案する．提案手法は，2 つの展開画像（図 1 (e), (f)）間の平行移動が水平方向 (l_2 方向) に制限されることに着目している．展開画像間の移動が l_2 方向に制限されると，画像間の回転量推定の問題を 2 次元画像の移動量推定問題から 1 次元画像の移動量推定問題に置き換えることが可能である．これにより，DFT の次元を従来の 2 次元から 1 次元に抑えることができるので，計算量を削減できる．また，展開画像を 1 次元画像信号に分解して移動量推定を行うため，展開画像の性質に応じて，回転量推定に有効なラインを柔軟に選択できる．

本節では，まず提案手法で基本となる 1 次元 POC 関数について述べる．次に，提案する回転計測アルゴリズムの詳細について述べる．

3.1　1 次元位相限定相関法

2 つの 1 次元画像信号を，$f(n)$ および $g(n)$ とする．ただし，定式化の便宜上，離散時間のインデックスを $n = -M, \cdots, M$ とし，1 次元画像信号の長さを $N = 2M + 1$ とする．なお，ここでは，説明を簡単にするために離散空間のインデックスを正負対称に取り，かつ 1 次元画像信号の長さを奇数にしているが，これは，本手法の構成において必須ではない．すなわち，通常よく用いられるように，0 以上の離散空間インデックスを用い，1 次元画像信号の長さを任意の正の整数に設定するように一般化することが可能である．通常は，N を 2 のべき乗の値にと

り，高速フーリエ変換を利用して計算することが多い．1 次元画像信号 $f(n)$ および $g(n)$ の 1 次元 DFT を次式で定義する．

$$F(k) = \sum_{n=-M}^{M} f(n) W_N^{kn} = A_F(k) e^{j\theta_F(k)} \quad (1)$$

$$G(k) = \sum_{n=-M}^{M} g(n) W_N^{kn} = A_G(k) e^{j\theta_G(k)} \quad (2)$$

ただし，$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ である．ここで，$A_F(k)$ および $A_G(k)$ は，それぞれ 1 次元画像信号 $f(n)$ および $g(n)$ の振幅成分，$e^{j\theta_F(k)}$ および $e^{j\theta_G(k)}$ はそれぞれの画像信号の位相成分である．一般性を失うことなく離散周波数のインデックスを $k = -M, \cdots, M$ とすることができる．このとき，合成位相スペクトル $R(k)$ は，次のように定義される．

$$R(k) = \frac{F(k)\overline{G(k)}}{\left|F(k)\overline{G(k)}\right|} = e^{j\theta(k)} \quad (3)$$

ここで，$\overline{G(k)}$ は $G(k)$ の複素共役であり，$\theta(k) = \theta_F(k) - \theta_G(k)$ である．$f(n)$ と $g(n)$ の 1 次元 POC 関数 $r(n)$ は $R(k)$ の 1 次元逆離散フーリエ変換 (Inverse Discrete Fourier Transform: IDFT) として，次のように表される．

$$r(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=-M}^{M} R(k) W_N^{-kn} \quad (4)$$

次に，1 次元画像信号 $f(n)$ と $g(n)$ が互いに微小移動した関係にある場合を考える．つまり，この $f(n)$ と $g(n)$ に含まれる位置ずれ量 δ をサブピクセル分解能で推定する問題を考える．いま，$f_c(x)$ を連続空間変数 x の上で定義された 1 次元画像信号とする．これを実数値だけ微小移動した 1 次元画像信号は $f_c(x-\delta)$ と表される．このとき，$f(n)$ と $g(n)$ が，$f_c(x)$ および $f_c(x-\delta)$ を適当な空間サンプリング間隔 T でサンプリングしたものであると仮定する．すなわち，$f(n)$ と $g(n)$ を次式で定義する．

$$f(n) = f_c(t)|_{t=nT} \quad (5)$$

$$g(n) = f_c(t-\delta)|_{t=nT} \quad (6)$$

以下では簡単のために $T = 1$ とする．ここで，$f(n)$ および $g(n)$ の DFT $F(k)$ および $G(k)$ の間には次の近似が成り立つ．

$$G(k) \simeq F(k) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}k\delta} \quad (7)$$

上式が近似であるのは，連続時間信号と離散時間信号に対するフーリエ変換の性質の違いに起因する（連続時間のフーリエ変換においては等式が正確に成立することに注意されたい）．このとき，$f(n)$ および $g(n)$ の合成位相スペクトル $R(k)$ および 1 次元 POC 関数 $r(n)$ は，次のように表せる．

$$R(k) = \frac{F(k)\overline{G(k)}}{\left|F(k)\overline{G(k)}\right|} \simeq e^{j\frac{2\pi}{N}k\delta} \quad (8)$$

$$r(n) \simeq \frac{\alpha}{N} \frac{\sin\{\pi(n+\delta)\}}{\sin\left\{\frac{\pi}{N}(n+\delta)\right\}} \quad (9)$$

ここで，$\alpha = 1$ である．上式 (9) は 1 次元画像信号が δ だけ位置ずれした場合における 1 次元 POC 関数の一般形を表している．相関ピークの座標は波形間の位置ずれを表し，相関ピークの高さ α は波形間の類似度の指標となる．画像にノイズが加わると，α の値が減少することが実験で確認されているため，実際には $\alpha \leq 1$ となる．実際の 1 次元 POC 関数 $r(n)$ の計算値からこのピークの位置を検出することにより，1 次元画像信号 $f(n)$ と $g(n)$ の位置ずれ δ を検出することができる．

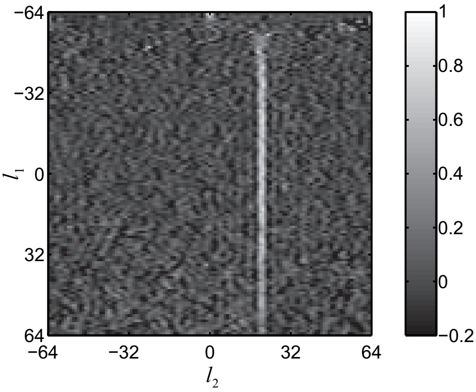
1 次元 POC 関数を利用した画像マッチングにおいては，位置ずれ量推定のさらなる高精度化のため，窓関数による画像端の不連続性の除去，低域通過型のスペクトル重み付け関数による高周波成分の除去を行う．高精度化の詳細は文献 [10] を参照されたい．

3.2　画像の高精度回転計測アルゴリズム

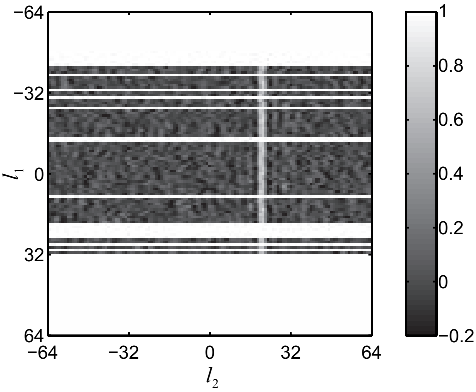
提案する回転計測アルゴリズムは，展開画像の各ラインで 1 次元 POC 関数を計算し，その結果を統合して，最終的な回転量を求めている．その際，回転計測に有効なラインを自動的に選択することで，高精度化を実現している．提案アルゴリズムは，(i) 有効ラインの自動抽出，(ii) 1 次元 POC 関数を用いた回転計測の 2 つのステップから成り立っている．以下に 2 つのステップの詳細について述べる．なお提案手法において，展開画像生成までの処理（節 2 および図 1 を参照）は従来法と同一である．

(i) 有効ラインの自動抽出

この処理では，登録画像 $f(n_1, n_2)$ からその画像に含まれる回転計測に有効なラインを自動で選択する．この処理では，登録画像を一定量だけ回転し，元の画像と回転した画像との回転量を展開画像の各ライン毎に求める．このとき，回転量を正しく計測できたか否かを判定し有効なラインを決定する．この処



(a) 全てのラインを計算した場合



(b) 回転計測に有効なラインのみを計算した場合

図 2: ライン毎に計算した 1 次元 POC 関数

理では，画像回転によるノイズが加わるため，各ラインのノイズ耐性を評価することになる．本稿では，画像回転の際の補間によるノイズのみであるが，白色ノイズなどを人工的に加えてもよい．

入力: 登録画像 $f(n_1, n_2)$

出力: 有効なラインのインデックス i

Step 1: 登録画像 $f(n_1, n_2)$ と登録画像を Θ 度（本稿では 30 度）回転した画像 $f'(n_1, n_2)$ を生成する．

Step 2: $f(n_1, n_2)$ と $f'(n_1, n_2)$ の展開画像 $F_P(l_1, l_2)$ と $F'_P(l_1, l_2)$ を求める．

Step 3: 2つの展開画像から水平方向（l_2 方向）に 1 本ずつ 1 次元画像信号の組を取り出し，$N = 2M+1$ 本の 1 次元 POC 関数 $r_{l_1}(l_2)$ を計算し，相関ピーク値 α_{l_1} および移動量 δ_{l_1} を求める．

Step 4: 求めた N 個の δ_{l_1} と既知の回転量 Θ を比較し，回転計測に有効なラインのインデックス i を以下の式より求める．

$$i = \{l_1 : |\delta_{l_1} - N\Theta/\pi| < \delta_{th}, -M \leq l_1 \leq M\} \quad (10)$$

ここで，$N\Theta/\pi$ は回転量 Θ を展開画像の移動量に変換した値である．また，本稿では $\delta_{th} = 1$ としている．

Step 5: Step 4 で得られた有効なラインの中で相関ピーク α_i が高いラインの上位半分を求め，インデックス i を更新する．

図 2 に実際に計算された 1 次元 POC 関数の例を示す．色は相関強度を表している．図 2(a) は，全てのインデックスに対して 1 次元 POC 関数を計算した例である．図 2(b) は，有効なラインのみを計算した例であり，有効でないと判定されたラインは空白にしている．この例では，$l_2 = 20$ 付近が正しい回転量の位置である．この結果からわかるように，図 2(a) では回転量（相関ピークの位置）が誤って計測されているラインが見受けられる．それに対して図 2(b) では，抽出された全てのラインで正しい回転量が計測されている．

(ii) 1 次元 POC 関数を用いた回転量計測

この処理では，(i) で得られた有効なラインの 1 次元 POC 関数を用いて回転量の計測を行う．

入力: 登録画像 $f(n_1, n_2)$，入力画像 $g(n_1, n_2)$，有効なラインのインデックス i

出力: 回転量 θ

Step 1: $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ の展開画像 $F_P(l_1, l_2)$ と $G_P(l_1, l_2)$ を求める．

Step 2: 2 枚の展開画像から $l_1 = i$ となる 1 次元画像信号の組を取り出し，1 次元 POC 関数 $r_i(l_2)$ を計算する（ここで，i の要素数分だけ 1 次元 POC 関数が得られる）．

Step 3: 1 次元 POC 関数 $r_i(l_2)$ の平均 $r_{all}(l_2)$ を計算する．$r_{all}(l_2)$ より移動量 δ を求め，最終的な画像の回転量 $\theta = \delta\pi/N$ を求める．図 3 に実際に計算された $r_{all}(l_2)$ の例を示す．

提案する回転計測アルゴリズムでは，登録画像に変更がない場合，(i) の処理は 1 度だけで良い．後述する計算時間の評価でも，登録画像の変更がない場合を想定している．

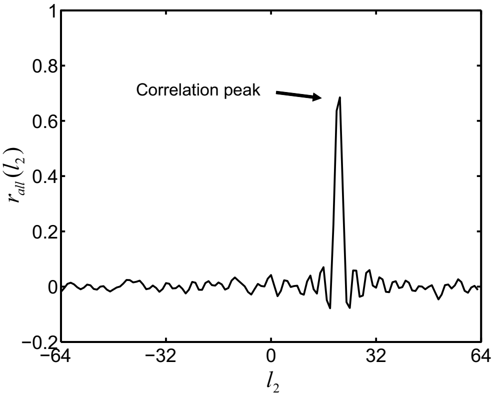


図 3: 1 次元 POC 関数の平均 $r_{all}(l_2)$

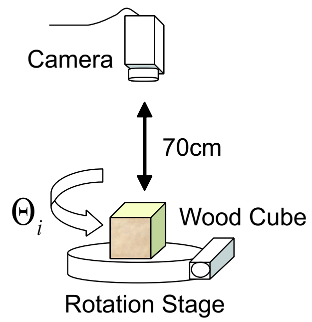


図 4: 実験システム

4　実験と考察

本実験では，工業用 CCD ビデオカメラ（JAI CVM10，640×480 ピクセル，モノクロ 256 階調，レンズ VCL–16WM）およびキャプチャボード（Coreco Imaging Technology AM–STD–RGB）からなる比較的簡便な入力系から得られた画像を用いて回転量の推定を行った．撮影対象は，一辺が 10 cm の木製立方体であり，回転移動を可能とするマイクロステージ上に設置した（図 4）．回転量計測実験では，カメラと立方体の距離を 70 cm とし，マイクロステージを用いて 1 [degree] 間隔の回転を合計で 90 段階行い，各段階で 30 フレーム（1 秒）の積算画像を取得した．画像上での立方体の大きさは約 350 × 350 ピクセルであり，撮影画像から木のテクスチャのみが含まれるように画像を切り出して回転計測を行った．移動前の画像を基準画像とし，立方体を移動させて取得した画像のそれぞれについて回転量を推定する．具体的には，2 節で述べた方法を用いて 2 枚の画像

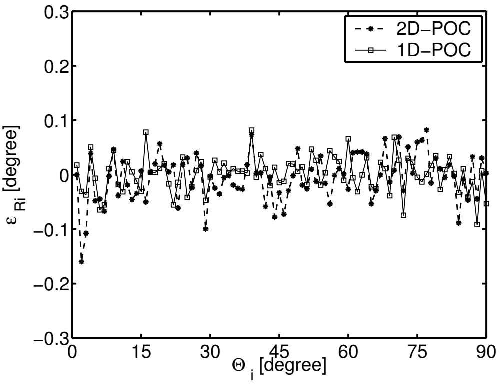


図 5: 回転量の計測誤差

間の回転を画像間の平行移動に変換した展開画像を作成し，これまで利用されている 2 次元 POC 関数を用いた手法および 3 節で提案した 1 次元 POC 関数を用いた手法の 2 つで平行移動量を推定し，最終的な回転量を求めた．回転計測誤差 ϵ_{R_i} は次式で評価する．

$$\epsilon_{R_i} \quad = \quad \theta_i - \Theta_i \tag{11}$$

ここで，θ_i [degree] は i 段階の移動で推定した回転量を表し，Θ_i [degree] は実際の回転量を表す．

図 5 は物体の回転量 Θ_i [degree] に対する画像の回転量の推定誤差 ϵ_R をプロットしたものである．ここで，“2D-POC” は 2 次元 POC で展開画像の移動量を求める従来手法，“1D-POC” は 1 次元 POC で展開画像の移動量を求める提案手法である．画像サイズは 128 × 128 ピクセルである．この結果より，提案手法は，従来手法と同等の性能を達成していることがわかる．表 1 は，画像サイズを変化させた場合の回転量計測の RMS 誤差および最大誤差である．この結果から，すべての画像サイズで提案手法が優れていることがわかる．

次に，計算量の評価を行う．登録画像を固定し，入力画像のみが変化することを想定する．そのため，登録画像による有効ラインの自動抽出処理（節 3.2 の (i)）および登録画像の処理にかかる計算時間は考慮しない．画像の回転量計測においては，その処理の 90%以上が DFT の計算に費される．ここでは，比較を簡単化するため，DFT の計算量のみを比較する．評価に用いる画像サイズを $N \times N$ ピクセルとし，2 次元 DFT の計算は 1 次元 DFT を利用した行列分解

表 1: 回転量の計測誤差 [degree]

	2D-POC		1D-POC	
Image size	RMS	Max.	RMS	Max.
64 × 64	0.1637	0.4926	0.1433	0.3168
128 × 128	0.0433	0.1597	0.0324	0.0915
256 × 256	0.0286	0.0803	0.0241	0.0598

法を用いるものとする．つまり，$N \times N$ ピクセルの画像の 2 次元 DFT は，$2N$ 回の N 点 1 次元 DFT で計算できることになる．提案手法は選択されるラインの数に計算時間が依存する．ここでは，選択されるラインの数を $N/2$ としている．

- 展開画像作成までの処理（図 1 参照）
  2D POC: 2N
  1D POC: 2N
- 展開画像の平行移動量推定（節 2，3 参照）
  2D POC: 4N
  1D POC: N/2 + 1
- 計算量の合計
  2D POC: 6N
  1D POC: 2.5N + 1

上記のように画像の回転量計測に 1 次元 POC 関数を用いることで，計算量を半分以下に抑えることができる．以上の結果から，1 次元 POC 関数を用いることで，精度向上と計算量の削減を同時に実現可能である．

5 まとめ

本章では，1 次元位相限定相関法を用いた高精度回転計測アルゴリズムについて述べた．画像の回転量を計測する際には，極座標展開を利用して展開画像を作成し，画像の回転を展開画像の平行移動に変換して推定する．従来，展開画像の平行移動量推定には 2 次元 POC 関数を利用していた．これに対して，提案手法は，展開画像の移動が水平方向のみに制限されることに着目し，1 次元 POC 関数を利用して移動量を推定する．また，展開画像の有効なラインのみを抽出して展開画像の移動量を推定する．これにより，処理の高速化だけでなく，高精度化も同時に達成できることを示した．提案アルゴリズムは有効な領域のみを利用して推定するため，展開画像の S/N が低い場合（ぼけて低周波にエネルギーが集まった画像や幾何パターンなどの特定周波数にエネルギーが集中する画像）などの特に有効であると考えられる．今後はその点を検討していく予定である．

参考文献

[1] L. G. Brown, "A survey of image registration techniques," *ACM Computing Surveys*, Vol. 24, No. 4, pp. 325 – 376, Dec. 1992.

[2] B. Zitova and J. Flusser, "Image registration methods: a survey," *Image and Vision Computing*, Vol. 21, No. 11, pp. 977 – 1000, Oct. 2003.

[3] C. D. Kuglin and D. C. Hines, "The phase correlation image alignment method," *Proc. Int. Conf. Cybernetics and Society*, pp. 163 – 165, 1975.

[4] 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.

[5] K. Ito, H. Nakajima, K. Kobayashi, T. Aoki, and T. Higuchi, "A fingerprint matching algorithm using phase-only correlation," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E87-A, No. 3, pp. 682 – 691, Mar. 2004.

[6] K. Miyazawa, K. Ito, T. Aoki, K. Kobayashi, and H. Nakajima, "An efficient iris recognition algorithm using phase-based image matching," *Proc. the 2005 IEEE Int. Conf. Image Processing*, No. II, pp. 49 – 52, Sept. 2005.

[7] H. C. Loy and T. Aoki, "Robust motion estimation for video sequences based on phase-only correlation," *Proc. of the 6th IASTED Int. Conf. Signal and Image Processing*, pp. 441 – 446, Aug. 2004.

[8] K. Takita, M. A. Muquit, T. Aoki, and T. Higuchi, "A sub-pixel correspondence search technique for computer vision applications," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E87-A, No. 8, pp. 1913 – 1923, Aug. 2004.

[9] M. A. Muquit, T. Shibahara, and T. Aoki, "A high-accuracy passive 3D measurement system using phase-based image matching," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E89-A, No. 3, pp. 686 – 697, Mar. 2006.

[10] 柴原琢磨, 青木孝文, 中島寛, 小林孝次, "一次元位相限定相関法に基づくステレオ画像のサブピクセル対応付け手法," 第 21 回信号処理シンポジウム, No. B6-3, pp. 1 – 6, Nov. 2006.

[11] E. De Castro and C. Morandi, "Registration of translated and rotated images using finite Fourier transforms," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 9, No. 5, pp. 700 – 703, Sept. 1987.