

回転不変位相限定相関法に基づく画像照合手法とその評価

An Image Matching Algorithm Based on Rotation Invariant Phase-Only Correlation and Its Evaluation

○大槻浩之*, 青木孝文*, 樋口龍雄*, 小林孝次**

○ Hiroyuki Ohtsuki*, Takafumi Aoki*, Tatsuo Higuchi*, Koji Kobayashi**

*東北大学大学院情報科学研究科, **株式会社 山武

*Graduate School of Information Sciences, Tohoku University **Yamatake Corporation

キーワード: パターンマッチング (pattern matching), 位相限定相関 (phase-only correlation), 回転不変位相限定相関 (rotation invariant phase-only correlation), 角度計測 (angle measurement)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 05 東北大学 大学院情報科学研究科 樋口研究室
大槻浩之, Tel.: (022)217-7169, Fax.: (022)263-9406, E-mail: hiro@higuchi.ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

画像照合は医療分野や生産分野, セキュリティ分野等において今後ますます重要になると考えられる. 従来の特徴抽出法による画像照合は画像の領域やエッジ等の特徴を用いて行われるが, 対象物に応じてアルゴリズムを作成する必要がある.

筆者らの所属する研究グループは, これまでに位相限定相関法 (Phase-Only Correlation, POC) を用いた画像照合手法とその応用について検討してきた. 位相限定相関法は対象によらない高精度な画像照合を可能にすることが知られており, 指紋照合やスマートセンサなどの応用において高い認識率と高速処理を達成している^{1, 2, 3)}.

本稿では以上の手法を拡張した回転不変位相限定相関法 (Rotation Invariant Phase-Only Correlation, RIPOC) に基づく画像照合手法について述べる. 回転不変位相限定相関法は Rotation Invariant Pattern Matching と呼ばれる手法を基本としてお

り⁴⁾, 2つの画像間に平行移動や回転が存在しても高精度な画像照合が可能である⁵⁾. その際, 画像間の回転角度を高い精度で計測することが照合において重要となる.

従来, 画像間の回転角度を計測する際には, 登録画像を少しずつ回転させ, 入力画像と照合を行い, 最も高い類似度を示した画像の回転角度を画像間の回転角度とする手法が用いられてきた. しかし, 計測精度を高めるには回転角度を細かくする必要があり, 計算量の増大につながる. これに対して, 回転不変位相限定相関法は画像の回転を平行移動に変換した画像に位相限定相関法を実行することにより実現される. そのため, 高速フーリエ変換 (FFT) を利用した一連の計算で回転角度を計測することができる.

回転不変位相限定相関法により回転角度を計測することができるが, 特定の角度では誤差が他の角度に比べて大きくなる現象が見られる. 本稿

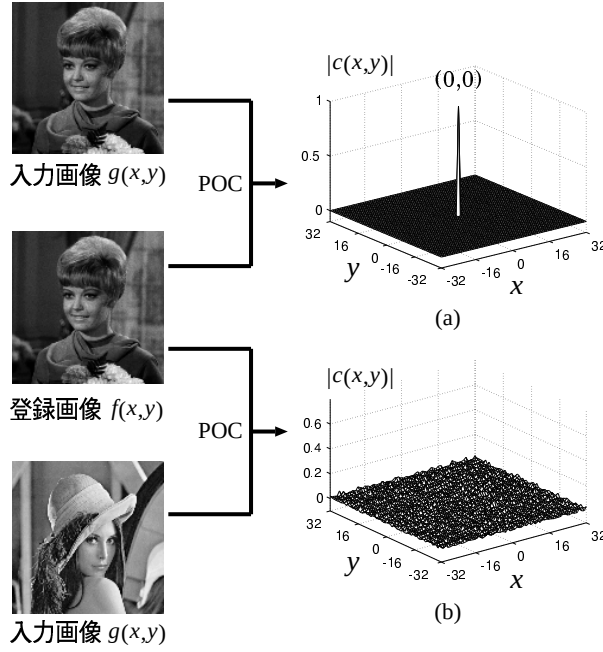


Fig. 1 位相限定相関法を用いた画像照合: (a) 同じ画像の場合, (b) 異なる画像の場合

ではこのような現象に対して誤差を低減し, 高い精度で角度の計測を行う手法を提案する.

2. 位相限定相関法に基づく画像照合

位相限定相関法 (POC) は画像をフーリエ変換して得られる振幅スペクトルと位相スペクトルのうち, 位相スペクトルのみを用いて相関関数を計算する手法であり, 画像の輝度の変化とノイズの存在に対してロバストである. また画像の移動量に対して鋭敏な特性を示すことが知られている.

2 枚の画像を $f(x,y)$ (登録画像), $g(x,y)$ (入力画像), それらのフーリエ変換を $F(u,v)$, $G(u,v)$ とするとき, 位相限定相関関数 $c(x,y)$ は以下の $C(u,v)$ を逆フーリエ変換することで得られる.

$$C(u,v) = \frac{F(u,v)G^*(u,v)}{|F(u,v)G^*(u,v)|} \quad (1)$$

ただし G^* は G の複素共役を表す. 位相限定相関関数 $c(x,y)$ を相関画像と呼ぶ. Fig. 1に, 位相限

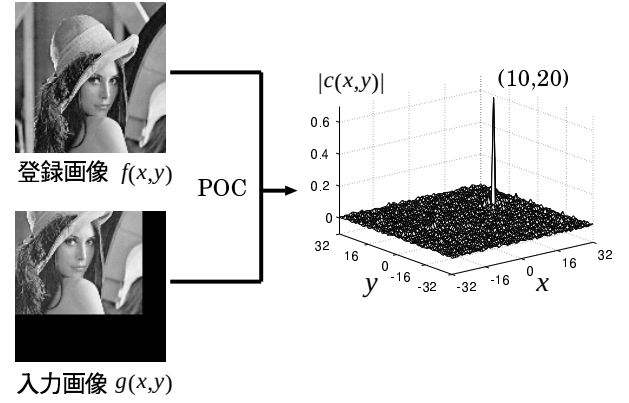


Fig. 2 位相限定相関法による移動量計測

定相関法による画像照合の様子を示す. 登録画像, 入力画像ともに同一の画像を用いた場合, 相関画像 $c(x,y)$ の原点に大きさ 1 のピークが現れる. 一方, 異なる画像を入力した時には相関画像に大きなピークは現れない. また, 登録画像を平行移動させた画像を入力すると, ピークは画像の移動量に応じた位置に現れる. Fig. 2 は登録画像を x 軸方向に 10 ピクセル, y 軸方向に 20 ピクセル平行移動させた画像との画像照合の結果である. 相関画像の中心から (10,20) の位置にピークが現れている. 画像の移動量がサブピクセルレベルの場合にも, 相関画像に対して適当な補間法を用いることで移動量の高精度な計測が可能である.

以上より, 相関画像のピークの値および位置から画像間の類似度および移動量を計ることが可能である.

3. 回転不変位相限定相関法に基づく画像照合

平行移動している 2 枚の画像については位相限定相関法により正しく照合が行われるが, 相対的に回転している 2 枚の画像は全く異なったものとして認識される (Fig. 3). これに対して, 本章で述べる回転不変位相限定相関法に基づく画像照合は, 入力画像が登録画像に対して回転している

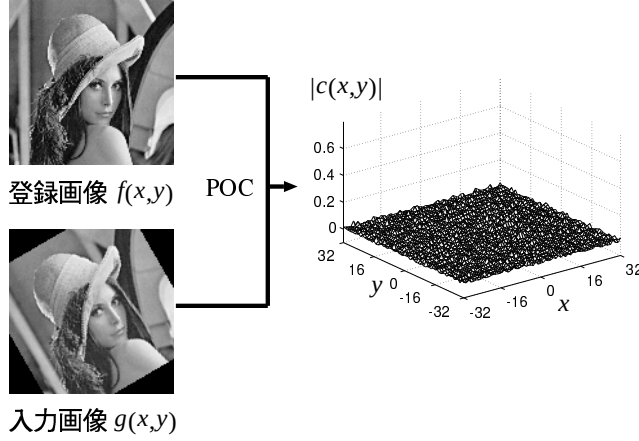


Fig. 3 回転した画像との位相限定相関法

場合でも画像間の照合を行うことができる。この手法は回転角度計測フェーズ、画像照合フェーズの2つからなる。回転角度計測フェーズは画像の回転を画像の平行移動に変換し、回転角度を計測するものである。画像照合フェーズは、回転角度計測フェーズにおいて計測された角度だけ入力画像を回転し、登録画像との回転角度を等しくして平行移動のみとした後、位相限定相関法を実行して照合をするものである。Fig. 4にフローを示す。また、以下に回転角度計測フェーズの具体的な処理手順を示す。示される式は離散時間信号により議論する。

登録画像、入力画像を $f(n_1, n_2), g(n_1, n_2)$ とする。画像は $N \times N$ ピクセル ($N = 2^n, n$:自然数) であり、 $n_1 = 0 \sim N-1, n_2 = 0 \sim N-1$ となる。

- 1) 各画像を離散フーリエ変換し、周波数スペクトルを得る。

$$F(k_1, k_2) = \mathcal{F}[f(n_1, n_2)] \quad (2)$$

$$G(k_1, k_2) = \mathcal{F}[g(n_1, n_2)] \quad (3)$$

$$(k_1 = 0 \sim N-1, k_2 = 0 \sim N-1)$$

- 2) F, G のゼロ周波数成分 (DC 成分) が画像の中央に来るように再配置する。

$$CF(k_1, k_2) = F((k_1 + \frac{N}{2}) \bmod N, (k_2 + \frac{N}{2}) \bmod N) \quad (4)$$

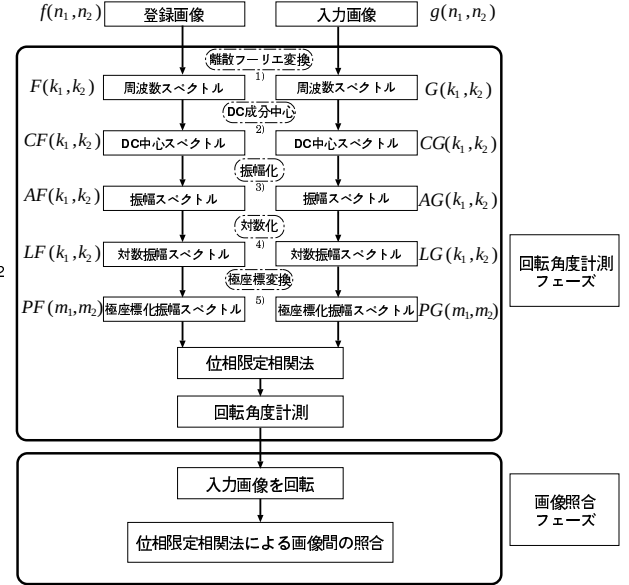


Fig. 4 回転不変位相限定相関法に基づく画像照合のフロー

$$CG(k_1, k_2) = G((k_1 + \frac{N}{2}) \bmod N, (k_2 + \frac{N}{2}) \bmod N) \quad (5)$$

- 3) CF, CG の振幅スペクトルを取り出す。振幅スペクトルには画像 $f(n_1, n_2), g(n_1, n_2)$ の平行移動に関する情報が含まれないので AF, AG は平行移動に依存しない量となる。

$$AF(k_1, k_2) = |CF(k_1, k_2)| \quad (6)$$

$$AG(k_1, k_2) = |CG(k_1, k_2)| \quad (7)$$

- 4) AF, AG の対数をとる。これは振幅画像の高周波成分を強調し、回転角度の計測精度を上げるために行われる。

$$LF(k_1, k_2) = \log(AF(k_1, k_2) + 1) \quad (8)$$

$$LG(k_1, k_2) = \log(AG(k_1, k_2) + 1) \quad (9)$$

- 5) LF, LG を極座標変換する。

$$PF(m_1, m_2) = \widetilde{LF}(\frac{N}{2} + r_{m_1} \cos \theta_{m_2}, \frac{N}{2} + r_{m_1} \sin \theta_{m_2}) \quad (10)$$

$$PG(m_1, m_2) = \widetilde{LG}(\frac{N}{2} + r_{m_1} \cos \theta_{m_2}, \frac{N}{2} + r_{m_1} \sin \theta_{m_2}) \quad (11)$$

$$(m_1 = 0 \sim N-1, m_2 = 0 \sim N-1)$$

ただし,

$$\begin{cases} r_{m_1} = \left(\frac{N}{2} - 1\right) \frac{m_1 + 1}{N} \\ \theta_{m_2} = \frac{m_2}{N} \pi \end{cases} \quad (12)$$

である. $\widetilde{LF}, \widetilde{LG}$ は双線形補間により変換後の画像が連続になるように LF, LG を拡張したものである. 極座標変換により, 画像の回転移動が画像の平行移動に変換される.

実際の画像に対し, 上記の処理を行った結果を Fig. 5 に示す. 振幅スペクトル (c), (d) の対数をとることで (e), (f) では高周波成分まで表示されている. また極座標変換によって (e), (f) における画像の回転が, (g), (h) では平行移動に変換されていることが確認できる.

以上の処理を施した画像について位相限定相関法により相関ピークの値とその位置を求めることで, 画像間の移動量すなわち回転角度を計測することができる. 回転角度計測フェーズによる回転角度計測の様子を Fig. 6 に示す. 相関ピークの現れた位置が, 画像間の回転角度に対応している. 回転角度が 0° のときに相関画像の原点にピークが表れ, 角度が増すにつれて m_2 軸の正方向にピーク位置が移動する.

このように回転不変位相限定相関法に基づく画像照合では, 画像間の回転角度を高い精度で得られることが重要となる.

4. 回転角度計測フェーズにおける高精度な角度計測手法

本章では, 回転不変位相限定相関法に基づく画像照合の中で最も重要な回転角度計測フェーズに注目し回転角度の計測実験を行い, 特定の角度については誤差が非常に大きくなる現象を示す. そのうえで, このような現象に対して計測角度誤差を低減する手法を2つ提案する.

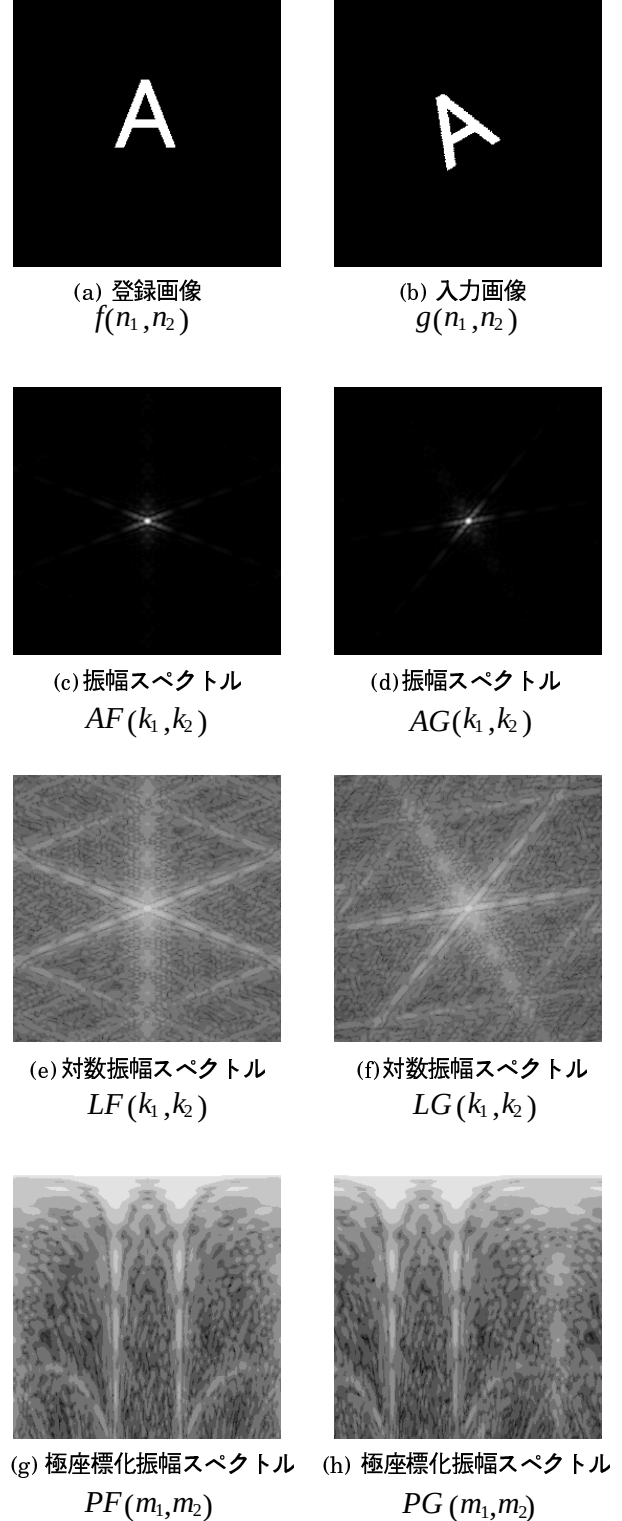


Fig. 5 回転角度計測フェーズにおけるスペクトルの様子

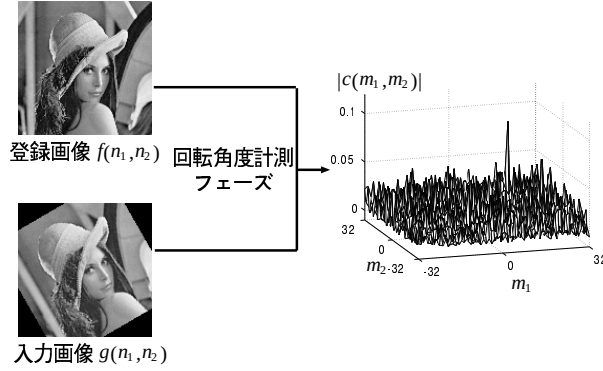


Fig. 6 回転角度計測フェーズにおける回転角度計測

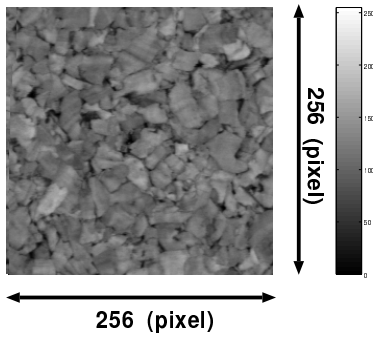


Fig. 7 角度計測に用いたコルク画像

4.1 回転不変位相限定相関法を用いた回転角度計測

回転不変位相限定相関法を用いた回転角度の計測を行う。登録画像は Fig. 7 に示す 256×256 ピクセル、グレースケール 256 階調のコルク板画像である。計測の流れを以下で示す。

- 1) 登録画像の回転角度を 0° として、 0° から 0.1° ずつ 179.9° まで回転し、撮影したコルク画像 1800 枚を入力画像とする。
- 2) 回転不変位相限定相関法で画像間の回転角度を計測する。

ここで、画像の振幅スペクトルは 180° 周期であるので、本実験は入力画像の回転角度を 0° から 179.9° とした。

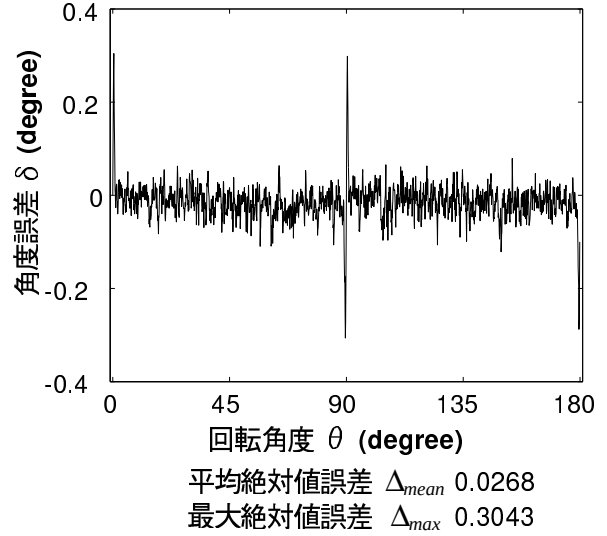


Fig. 8 回転不変位相限定相関法による角度計測の結果

計測結果を Fig. 8 に示す。横軸は入力画像の正確な回転角度 θ ，縦軸は θ と計測された角度 ϕ の誤差 δ である。ここで、 δ は以下の式で表されるものとする。

$$\delta = \theta - \phi \quad (13)$$

また、各誤差 δ の絶対値の和を入力画像の総数 M で割った平均絶対値誤差 Δ_{mean} を以下の式で表す。

$$\Delta_{mean} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |\delta_k| \quad (14)$$

ただし本実験では M は 1800 である。 k は入力画像のインデックスであり、 θ が 0° の入力画像のときに $k = 1$ とする。

さらに、各入力画像における誤差の絶対値が最も大きいものを最大絶対値誤差とし、

$$\Delta_{max} = \max_k |\delta_k| \quad (15)$$

で表す。Fig. 8 から Δ_{mean} は 0.0268° となり精度の高い角度の計測が行われている。しかし、 0° , 90° , 180° 付近では誤差が大きく、最大絶対値誤差 Δ_{max} は 0.3043° である。このように回転不変位相限定相関法を用いて非常に高い精度で回転角度の計測が行われているものの、特定の角度に関しては誤

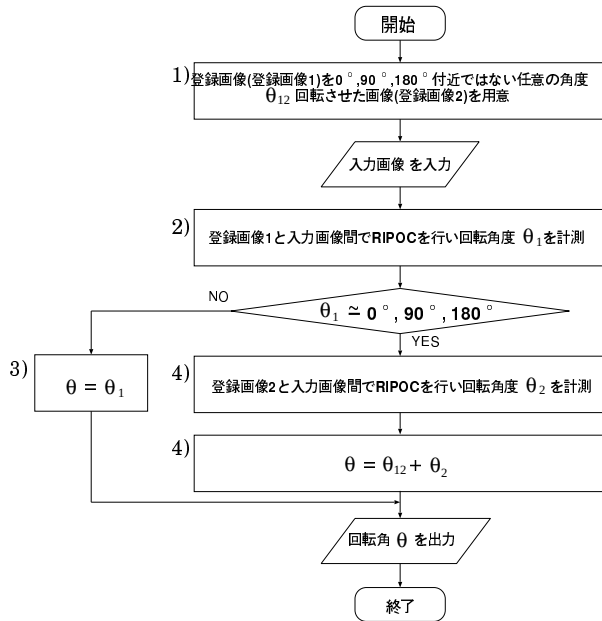


Fig. 9 複数画像を用いた角度補正手法のフロー

4.2 登録画像を2枚用いた補正手法

角度誤差を低減する手法として登録画像を2枚用いた角度誤差の補正手法について述べる。この手法は登録画像の他に1枚、登録画像を回転させた画像を登録画像として用意する。回転不変位相限定相関法を用いた角度計測の結果が誤差が大きくなる範囲であるときは、先ほど用意した登録画像ともう一度角度計測を行う。得られた結果と、もとの登録画像と用意した登録画像の回転角度をくわえることで、正しい角度を求めるものである。以下に補正手法の流れを示す。また、Fig. 9 にフローで示す。

- 1) 登録画像 (今後は登録画像1と呼ぶ) を回転させた画像をあらかじめ用意する。これを登録画像2とする。登録画像1と2の回転角度は 0° , 90° , 180° 付近ではないものとし、予め角度が既知であるとする。回転角度を θ_{12} とする。

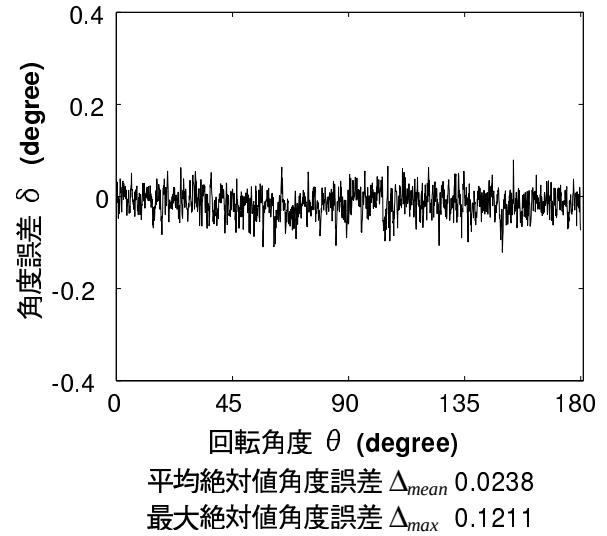


Fig. 10 複数画像を用いた角度補正手法の結果

- 2) 回転不変位相限定相関法により入力画像と登録画像1の回転角度を計測する。これを θ_1 とする。
- 3) 2) で得られた θ_1 が 0° , 90° , 180° に近い値でないときはFig. 8から計測誤差は小さいと考えられる。よって、 θ_1 を画像間の回転角度 θ として出力する。
- 4) θ_1 が 0° , 90° , 180° に近い値であるときは誤差が大きいと考えられる。よって再び回転角度を計測する。その際、登録画像には登録画像1との回転角度が既知である登録画像2を用いる。計測された角度を θ_2 とする。 $\theta = \theta_{12} + \theta_2$ として出力する。

この手法は回転角度計測フェーズにおいて回転角度を計測した結果、 0° , 90° , 180° 付近を除いては角度が高い精度で計測されていることを利用している。

本手法を用いた回転角度計測の結果を示す。今回の実験では、計測された登録画像1と入力画像の回転角度 θ_1 が以下の範囲にあるときに補正を

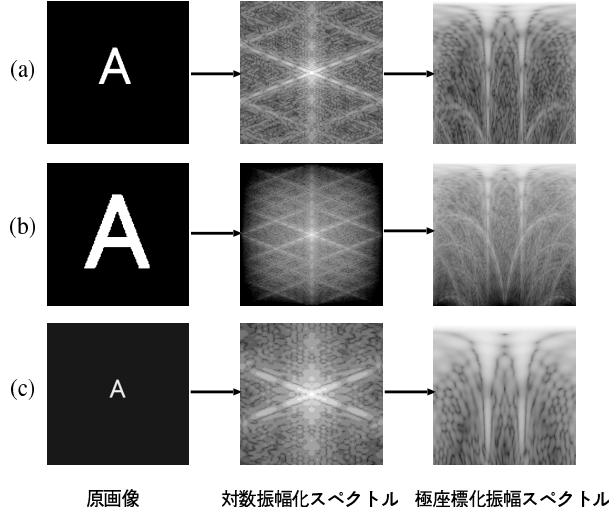


Fig. 11 拡大・縮小率 α の画像の対数振幅スペクトルおよび極座標化振幅スペクトル (a) $\alpha = 1$ (b) $\alpha > 1$ (c) $\alpha < 1$

行うものとする．

$$0^\circ \leq \theta_1 \leq 2^\circ$$

$$88.0^\circ \leq \theta_1 \leq 92.0^\circ$$

$$178.0^\circ \leq \theta_1 \leq 180^\circ$$

結果は Fig. 10 のようになり， θ が 0° , 90° , 180° 付近のときの誤差が改善されている．平均絶対値誤差 Δ_{mean} は 0.0238° ，最大絶対値誤差 Δ_{max} は 0.1211° であり，通常回転不変位相限定相関法に比べ高い精度で角度が計測されている．

4.3 拡大・縮小画像を登録画像として用いる手法

登録画像を拡大・縮小した画像を新たな登録画像とするとときに回転不変位相限定相関法により回転角度を計測することを考える．Fig. 11に拡大・縮小した画像の対数スペクトル，極座標化振幅スペクトルを示す．極座標化振幅スペクトルは m_1 方向に伸縮しており，このままでは正しい回転角度を計測することができない．そこで，極座標変換の際に，式 (12) を以下の式に置き換えることで画像の拡大・縮小率 α ($\alpha > 0$) を m_1 軸方向の平

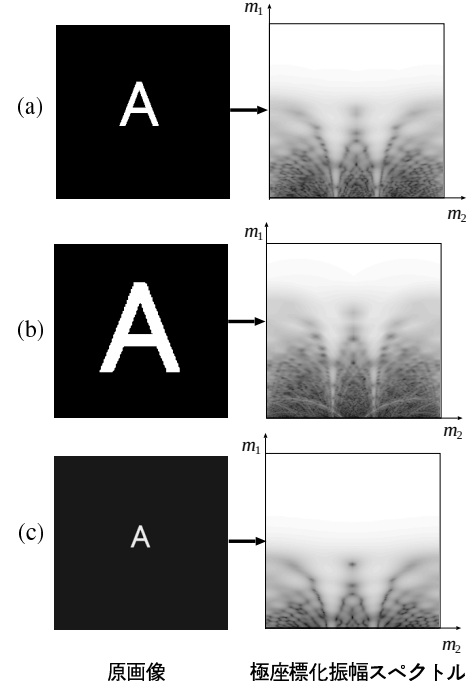


Fig. 12 極座標変換に式 (16) を用いた場合の極座標化振幅スペクトル: (a) $\alpha = 1$, (b) $\alpha > 1$, (c) $\alpha < 1$

行移動に変換することができる．

$$\begin{cases} r'_{m_1} = \frac{1}{2} N^{\frac{m_1}{N}} \\ \theta'_{m_2} = \frac{m_2}{N} \pi \end{cases} \quad (16)$$

以下でこのことを示す．

いま，画像 $f(k_1, k_2)$ を α 倍に拡大・縮小した画像を $g(k_1, k_2) = \tilde{f}(\alpha k_1, \alpha k_2)$ とする．ここで， $\tilde{f}(k_1, k_2)$ は， $f(k_1, k_2)$ が連続になるように補間した画像とする．このとき， $g(k_1, k_2)$ のフーリエ変換の振幅スペクトルは以下の式で表される．

$$|G(n_1, n_2)| \simeq \frac{1}{\alpha^2} |\tilde{F}(\frac{n_1}{\alpha}, \frac{n_2}{\alpha})| \quad (17)$$

ここで， $\tilde{F}(n_1, n_2)$ は $F(n_1, n_2)$ が連続になるように補間したスペクトルとする．したがって， α が 1 に近いときは，

$$LG(n_1, n_2) \approx LF(\frac{n_1}{\alpha}, \frac{n_2}{\alpha}) \quad (18)$$

の関係が成り立つ．このとき極座標変換化振幅ス

ベクトル PF' , PG' はそれぞれ式 (10),(11) から

$$PF'(m_1, m_2) = \widetilde{LF}\left(\frac{N}{2} + r'_{m_1} \cos \theta_{m_2}, \frac{N}{2} + r'_{m_1} \sin \theta_{m_2}\right) \quad (19)$$

$$PG'(m_1, m_2) = \widetilde{LG}\left(\frac{N}{2} + r'_{m_1} \cos \theta_{m_2}, \frac{N}{2} + r'_{m_1} \sin \theta_{m_2}\right) \quad (20)$$

と表される．式 (16), (18) ~ (20) から以下の式が成り立つ．

$$\begin{aligned} PG'(m_1, m_2) &\approx \widetilde{LF}\left(\frac{N}{2} + \frac{r'_{m_1}}{\alpha} \cos \theta_{m_2}, \frac{N}{2} + \frac{r'_{m_1}}{\alpha} \sin \theta_{m_2}\right) \\ &= \widetilde{LF}\left(\frac{N}{2} + \frac{1}{2\alpha} N^{\frac{m_1}{N}} \cos \theta_{m_2}, \frac{N}{2} + \frac{1}{2\alpha} N^{\frac{m_1}{N}} \sin \theta_{m_2}\right) \end{aligned} \quad (21)$$

ここで, $\alpha = N^{\frac{\tau}{N}}$ を成り立たせるような τ が存在することから以下の式が成り立つ．

$$\begin{aligned} PG'(m_1, m_2) &\approx LF\left(\frac{N}{2} + \frac{1}{2} N^{\frac{m_1 - \tau}{N}} \cos \theta_{m_2}, \frac{N}{2} + \frac{1}{2} N^{\frac{m_1 - \tau}{N}} \sin \theta_{m_2}\right) \\ &= PF'(m_1 - \tau, m_2) \end{aligned} \quad (22)$$

以上から, $\alpha \approx 1$ のとき拡大・縮小率 α を m_1 方向の移動量 τ に変換することができる．このことは, 画像の拡大・縮小率が大きいとき, 画像の拡大・縮小率を計測できることを意味する．Fig. 12に式 (16) を用いた拡大・縮小画像の極座標化振幅スペクトルを示す．拡大・縮小率 α が1より大きいときは m_1 軸の正の方向へ1より小さいときは負の方向へ平行移動していることが確認できる．

以下では本手法を用いて画像間の回転角度を計測する．本実験では, 登録画像を0.5倍から0.01倍ずつ1.5倍まで縮小, 拡大した画像を新たな登録画像として回転角度を計測した．

Fig. 13に拡大縮小率ごとの (a) 最大絶対値誤差 Δ_{max} , (b) 平均絶対値誤差 Δ_{mean} を示す．拡大縮小率 α が0.50から1.28の間で回転角度が正しく計測されている． α が1の付近では Δ_{max} が大きい, その他では大きな誤差は現れていないことがわかる．本実験の場合, 登録画像の縮小率が

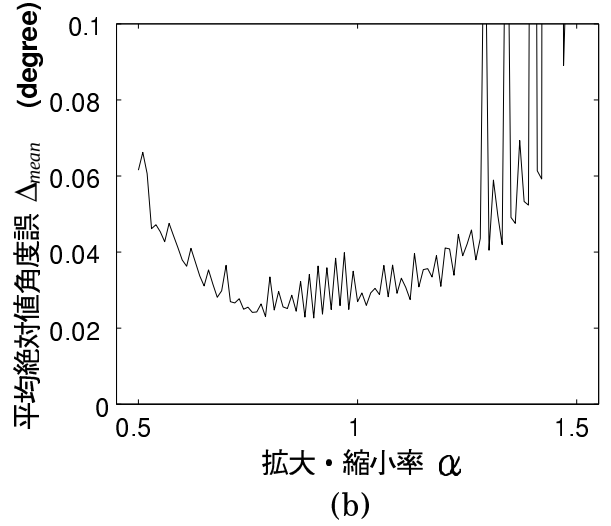
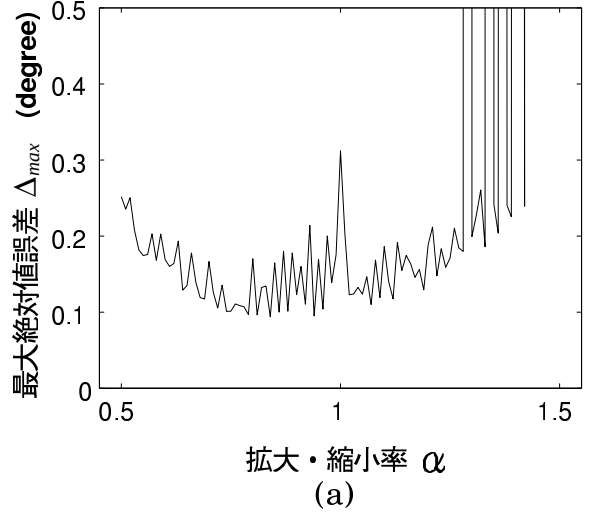


Fig. 13 拡大・縮小率ごとの最大絶対値誤差, 平均絶対値誤差: (a) 最大絶対値誤差, (b) 平均絶対値誤差

0.84 であるとき Δ_{max} が最も小さくなり, 0.0938° である．そのとき Δ_{mean} は 0.0251° である．以上から, 拡大・縮小した画像を登録画像として用いることにより, Δ_{max} を小さくすることが可能であることがわかる．

4.4 結果の考察

提案した2つの手法に基づく回転角度の計測結果を Table 1に示す．(a) は通常の回転不変位相限定相関法により回転角度を計測した結果である．角度計測の精度について, (b) の登録画像を2枚用

Table 1 各手法による角度計測の結果

	(a)	(b)	(c)
平均絶対値誤差 Δ_{mean} (deg.)	0.0268	0.0238	0.0251
最大絶対値誤差 Δ_{max} (deg.)	0.3043	0.1211	0.0938
登録画像の拡大縮小率 α	1	1	0.84
計算量	1(基準)	最大 2	1

- (a) 通常の回転不変位相限定相関法
 (b) 登録画像を 2 枚用いる手法
 (c) 拡大・縮小画像を登録画像として用いる手法

いる手法は (a) と比較して平均絶対値誤差 Δ_{mean} 、最大絶対値誤差 Δ_{max} とともに小さい。(c) の拡大・縮小画像を登録画像として用いる手法は、(a) と比較して Δ_{max} は小さくなるが、拡大・縮小率によっては Δ_{mean} が大きくなる。

計算量については通常の回転不変位相限定相関法による角度計測手法を基準とすると、(b) の手法は最大 2 倍となる。(c) の手法の場合、通常の手法と比較して極座標変換方法が異なるが、 r_{m_1} の値は式 (12),(16) より画像の画素数から決定することができる。よって r_{m_1} の値を予め保存しておくことで、計算量は同じとなる。

したがって、計測精度を重視する場合は (b) の手法が有効であり、演算量を重視する場合は (c) の手法が有効であると考えられる。

5. おわりに

本稿では回転不変位相限定相関法に基づく画像照合手法について述べた。

位相限定相関法では困難である、回転した画像との照合を回転不変位相限定相関法を用いることで実行できることを示した。また、精度の高い画像照合のための回転角度の計測の手法を 2 種類提案し、計測実験から手法が有効であることを示

した。

今後は本手法による複数物体からの対象物体の認識等の応用について考える。また、特定の入力角度に対して誤差が非常に大きくなる問題の原因を究明することも挙げられる。

謝辞

本稿を取りまとめるに当たり、親切なご助言を頂くとともに、画像データを提供して頂いた(株)山武の佐々木宏氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 中島寛, 小林孝次, 青木孝文, 川又政征, 樋口龍雄. 位相限定相関法の原理と指紋照合への応用. 第 2 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp. 15–20, 1997.
- 2) 小林孝次, 中島寛, 青木孝文, 樋口龍雄. 位相限定相関法の原理とその応用. 画像ラボ, pp. 23–26, March 1997.
- 3) 株式会社山武. 画像センサ Smart Vision Sensor. <http://www.compclub.com/svs/>.
- 4) Joseph N. Wilson Gerhard X. Ritter. *Computer Vision Algorithms in Image Algebra*. CRC Press, Inc, 1996.
- 5) 佐々木宏, 小林孝次, 青木孝文, 川又政征, 樋口龍雄. 回転不変位相限定相関法による回転角度計測について. 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 22, No. 45, pp. 55–60, September 1998.