

円環 Zernike モーメントを用いた高速回転不変画像照合

北海道大学大学院工学研究科 ○風穴 哲史 金子 俊一 五十嵐 悟
日立プロセスコンピュータ 清水英志 日立製作所 村松彰二

要旨

回転不変性および直交性を併せもつ Zernike モーメントを、円環領域において独自に定義した円環 Zernike モーメントとして改良し、それに基づく高速画像照合アルゴリズム及び角度推定法を提案する。実験的に円環 Zernike モーメントの特徴量としての性質や安定性について考察する。また実画像に本手法を適用し処理時間等の評価を行い有効性を示した。

1. 緒論

2枚の画像パターンの照合を求めるパターンマッチングはその単純性、柔軟性により生産ラインにおける目視検査の自動化、自動組立などの極めて広い応用分野で用いられている。本報告では、2次元的な回転を伴う画像の位置合わせ及び姿勢の推定を目的とし、独自に定義した円環 Zernike モーメントを用いた回転不変の画像照合アルゴリズムを提案する。モーメント法の欠点である計算コストを改善するために、Zernike モーメント（以下、ZM とする）の単位円領域内の積分（総和）計算に変えて、いくつかの円環領域内のモーメント計算を行う。また複素ベクトルであることを利用し、参照・対象の両画像に対するモーメントの狭角から角度推定を行う。本稿では円環 ZM（以下、CZM とする）の基本的な定式化、特性を示し、実画像による実験により有効性を検証する。

2. 円環 Zernike モーメント

2.1 Zernike モーメント

Zernike 多項式 $V_{n,m}(x,y)$ は、 $x^2 + y^2 \leq 1$ 内で完全な直交系を成す複素多項式である [1,2]。Zernike 多項式 $V_{n,m}(x,y)$ を極座標表現により定義すると、

$$V_{n,m}(x,y) = r_{n,m}(\rho)e^{jm\theta} \quad (0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq \theta \leq 1) \quad (1)$$

となる。ここで、

n : 次数。0以上の整数

m : 反復数。 $n - |m|$ が偶数、 $|m| \leq n$ を満たす整数

$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$: 中心からの距離

$\theta = \arctan(y/x)$: x 軸との偏角

である。なお半径多項式 $r_{n,m}(\rho)$ は、

$$r_{n,m}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)! \rho^{n-2s}}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!} \quad (2)$$

である。上式より、それぞれ次数 n と反復数 m による離散画像の ZM, $A_{n,m}$ は次式で定義される。

$$A_{n,m} = C_n \sum_{(x,y) \in E} f(x,y) V_{n,m}^*(x,y) \quad (3)$$

$$E = \{(x,y) \mid x^2 + y^2 \leq 1\} \quad (4)$$

ここで $C_n = \frac{n+1}{\pi}$ であり、記号 $*$ は複素共役を意味する。通常の離散画像においては位置座標は整数値で表現される。上式の座標値 x,y は、それらの整数座標値を画像サイズで正規化した値を用いる。

2.2 円環 Zernike モーメント

円形領域は円環領域の集合であることから、円環の幅を Δ とし、 l 番目の円環領域 S_l を次式で定義する。

$$S_l = \{(x,y) \mid E \cap (l < \sqrt{x^2 + y^2} \leq l + \Delta)\} \quad (5)$$

このとき ZM もまた CZM の集合であり、

$$A_{n,m} = \sum_{l=0}^{N-1} {}_l A_{n,m} \quad (6)$$

となる。なお $\Delta = 1$ のとき、 l は円環の半径に相当する。さらに離散画像に対する CZM, ${}_l A_{n,m}$ は

$${}_l A_{n,m} = C_n \sum_{(x,y) \in S_l} f(x,y) V_{n,m}^*(x,y) \quad (7)$$

である。

2.3 回転不変性

$f(\rho, \theta)$ に対して、反時計回りに角度 α 回転した画像を $f'(\rho, \theta)$ とする。このとき ZM と同様に、次のような回転前後に関する CZM の関係式を導出できる [3]。

$${}_l A'_{n,m} = {}_l A_{n,m} \cdot e^{-jm\alpha} \quad (8)$$

$$|{}_l A'_{n,m}| = |{}_l A_{n,m}| \quad (9)$$

このように回転に対して CZM の絶対値は不変である。なお CZM の不変性は、データ数の減少を意味し、処理時間の短縮を可能とする。

3. 角度推定

ZM は複素ベクトルであり、CZM においても回転前後に関して、2つのベクトルは複素平面上で回転関係にある。(8)式はオイラーの公式により、

$$\begin{aligned} |{}_l A'_{nm}| \exp(j\theta') &= |{}_l A_{nm}| \exp(j\theta) \exp(-jm\alpha) \\ \exp(jm\alpha) &= \exp(j(\theta - \theta')) \end{aligned} \quad (10)$$

となる. そして α に関して上式を解くと,

$$\alpha = \frac{(\theta - \theta')}{m} + \frac{k(2\pi)}{m} \quad (11)$$

$$m \neq 0, k \in \{0, 1, 2, \dots, m-1\}$$

ここで α は推定する画像の回転角度であり, 時計回りを正とする. また $\theta - \theta'$ はモーメントの狭角である. このとき, $m > 1$ に関しては k の決定問題が生じるが, 本手法では複数の円環で同次のモーメントを計算できるため, $(n, m) = (1, 1)$ を用いて角度推定を行う. なお画像の半径を R を円環幅を Δ とした場合, $R - \Delta + 1$ 個の角度推定値 α_l を計算し, その平均値 $\hat{\alpha}$ を推定値とする.

4. 実験

CZMの回転不変性を確認するために濃淡画像(図1)のそれぞれの角度によるCZM値($\Delta = 1, l = 12, 13$)を求め, 表1にまとめた. なお図1は左端の画像をそれぞれ $30^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 回転したものであり, 右端の画像は用いた円環部分を示している. 表1から回転した画像に対するCZM値の不変性が次数・反復数の違いによりゆらぎがあることがわかる. CZMによる角度推定値を表2に示す. 用いた円環は $\Delta = 8$ の18個であり, 結果から推定値に最大約3%の誤差を含んでいることがわかる. また実画像(図2)による照合実験を行った. 参照画像(template)も併せて表示し, 比較のためにZMの結果を示した. 円環はより特徴のある $\Delta = 1, l = 9, 13$ を選択し, 独自に定義した相違度 d により評価した[3]. ZMによる照合結果は累積により, 類似したパターンが第1位の照合結果となっている. ZM, CZMによるそれぞれの処理時間を表3にまとめた. 用いているデータ数に比例した高速化が実現されている.



図1: シミュレーション画像(城 50×50)

表1: 異なる角度によるCZM

θ	n,m				
	0,0	1,1	2,0	2,2	3,1
0°	16249	1666	25874	1267	4368
30°	16571	1810	26342	1126	4781
60°	16267	1679	25847	1128	4431
120°	16137	1719	25700	1364	4514
μ	16306	1718.5	25940.8	1221.3	4523.5
σ	160.9	56.3	241	100.3	157.4
σ/μ	0.01	0.033	0.0093	0.082	0.035

表2: 角度推定結果(図1)

	30°	60°	120°
推定値(deg)	28.79	59.34	123.91

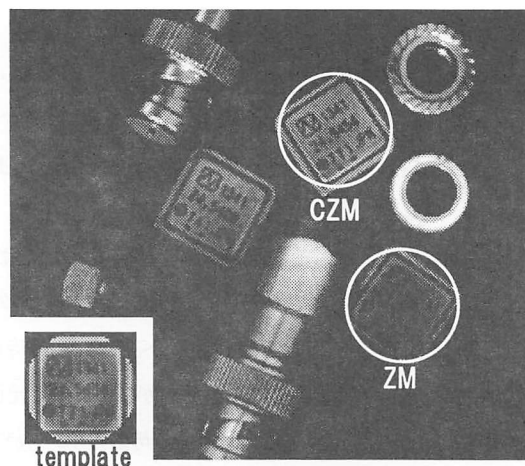


図2: 照合実験(水晶振動子)

表3: 処理時間

	円計算	円環計算
処理時間(s)	16.354	0.651
対象画像サイズ	256 × 220 (pixel)	
参照画像サイズ	50 × 50 (pixel)	
CPU	pentium II 450MHz	

5. 結論

本論文では, 独自に定義したCZMの回転不変性について解析し, 高速な照合アルゴリズムを提案した. 実験ではCZMの回転不変性について検証し, 近似的ではあるがその不変性を確認した. CZMによる角度推定法を提案し, 実験的にその推定精度を検証した. またこの特徴量を用いた実画像による照合実験を行った. 通常ZMによる照合に比べて良好な結果を得ることができ, さらに処理速度は約25倍となっている. 今後の課題として, 円環の選択問題を検討している.

参考文献

- (1) Alireza Khotanzad and Yaw Hua Hong: Invariant Image Recognition by Zernike Moments, IEEE Trans. Pattern An. Machine Intell., Vol.12, No.5, pp.489-497, 1990.
- (2) Simon X. Liao and Mirosław Pawlak: A Study of Zernike Moment Computing, Proc. of ACCV, pp.394-401, 1998.
- (3) 風穴哲史, 金子俊一, 五十嵐悟: 円環 Zernike モーメントに基づく高速回転不変画像照合, 信学技報, Vol.99, No.449, pp.75-80, 1999.