階調領域ベクトル相関に基づく濃淡画像照合*

斉藤 文彦** 堀場 貴史***

Gray-scaled Image Matching Based on Correlation between Gradation Area Vectors

Fumihiko SAITOH and Takashi HORIBA

This paper proposes a method to search a target image area that has an arbitrary location and inclination to a registered template image in an objective gray-scaled image. The gradation area vectors that indicate locations of regions with reduced gradations in a circular image area are used for matching. The relations between the gradation area vectors are invariant not only to a movement but also to a rotation of a circular image pattern. A target image area can be searched by measuring a correlation of inner products between a template image and a circular image area. The experimental results show that the target image area with arbitrary locations and inclinations were searched successfully by the proposed method.

Key words: image matching, template matching, gray-scaled image, gradation area vector

1. 結 論

2次元のテンプレート画像と類似した部分画像領域を対象画像内から探索するテンプレート画像照合は、産業用画像処理の広い分野で利用されている¹⁾²⁾。一般に用いられている手法は、濃度正規化相関による照合³⁾であるが、探索すべき部分画像領域は、テンプレート画像に対してほぼ正立していることが適用条件となる。従って、部分画像領域の平行移動に対しては追従性を持つが、カメラの光軸回りの回転移動には対応できない。一般的に、対象物が機構系などによって固定されていない場合は、探索すべき部分画像領域は、カメラに対して回転移動している可能性がある。このような状況下では、対象物の x および y 方向への平行移動だけでなく、回転移動に対しても追従性を持つ画像照合手法が必要となる。工業分野などの一般的な用途では、対象物とカメラ間の距離が大幅に変化するような場合はさほど発生しないため、対象物の縮尺が変化する可能性は比較的低い。従って、2次元のテンプレート画像照合では、対象物の縮尺変化に対してよりも、回転移動に対する追従性を高めることが重要と考えられる。

本論文では、カメラに対する平行移動だけでなく、回転移動に対しても自由度を持つ部分画像領域を探索するための手法を提案する。画像の平行移動と回転移動に対して不変な特徴量として、各濃度階調領域の位置を示すベクトルに着目し、これらのベクトルの相関からテンプレート画像と一致性の高い部分画像領域を探索する。

2. 回転対応画像照合手法

2次元のテンプレート画像に対して、平行移動と回転移動の双方について自由度を持つ部分画像領域を探索可能な手法としては、多種姿勢テンプレートによる照合⁴⁾、フーリエ記述子法⁵⁾、一般化 Hough 変換⁶⁾等がある。多種姿勢テンプレートによる照合は、2次元的に姿勢が異なる複数のテンプレート画像について照合を行う手法であるが、多数回の探索処

理に計算コストを要する。フーリエ記述子法は、対象物の輪郭形状に基づいて照合を行うため、輪郭のかすれやノイズの影響を受けやすい。一般化 Hough 変換は、縮尺変化にも対応可能な優れた手法であるが、姿勢候補値を表す多次元のパラメータ空間を構成するために膨大なメモリ資源が必要であり、また、このパラメータ空間への投票処理に計算コストを要する。他には、図形の輪郭線上の曲率を利用する照合手法も提案されているが⁷⁾⁸⁾、対象図形は、連続した閉曲線であることが適用条件となる。

以上に述べた従来手法の多くは、近傍画素間で濃度が急激に変化しているエッジ画素における幾何学的な特徴を用いて照合を行うため、エッジ検出のための前処理の影響を強く受ける。また、明瞭なエッジを含まない濃淡の対象画像には適用が困難である。

提案手法では、濃淡画像における各濃度階調領域の重心位置を示すベクトルに基づいて照合を行う。従って、エッジ検出のような前処理が不要であり、また、対象画像のコントラスト変化の影響も受けにくいという特長がある。

3. 階調領域ベクトル相関

3.1 全体の流れ

図1に提案手法の全体の流れを示す。まず、濃淡の参照画像内から、円形の画像領域をテンプレート画像として切り出す。次に、テンプレート画像に含まれる濃度階調範囲を等分割し、濃度階調数の少ないテンプレート画像に変換する。そして、削減された各々の濃度階調を持つ領域の重心位置を求め、テンプレート画像の中心から各濃度階調領域の重心までのベクトルを階調領域ベクトルとして求める。得られたすべての階調領域ベクトルから基準ベクトルを生成し、この基準ベクトルと各々の階調領域ベクトル間で内積を求める。

部分画像領域の探索過程では、対象画像内の各画素を中心とするテンプレート画像と同じ半径の円形の画像領域について、同様に階調領域ベクトルと基準ベクトルを求め、両者の内積を得る。次に、得られた内積とテンプレート画像から得られた内積との誤差を求める。対象画像内の全画素について、

* 原稿受付 平成16年12月24日

** 正会員 岐阜大学工学部 (岐阜市柳戸1-1)

*** 岐阜大学大学院工学研究科 (岐阜市柳戸1-1)

Fig.1 Flow-chart of the proposed method

Fig.3 Relation between contrast of image area and histogram for gray-levels distribution

内積の誤差が最小となる位置をテンプレート画像と最も一致性が高い部分画像領域として検出する。以下に、処理過程について詳しく説明する。

3.2 濃度階調の分割

提案手法では、テンプレート画像は濃淡の参照画像内で切り出された円形領域とする。この円形領域内に含まれる全画素の濃度分布ヒストグラムは、図2に示すように、画像パターンの回転に対して影響を受けない。つまり、円形領域内の画像パターンから得られる濃度分布ヒストグラムは、回転によって変化しにくい。また、線形な濃度変化が生じた場合は、図3に示すように、濃度分布ヒストグラムの形状も線形に変化するが、最大濃度と最小濃度間の範囲を等分割して濃度階調数を削減すると、削減された各階調に含まれる画素数は変化しない。つまり、濃淡の円形領域内に含まれる全階調範囲を等分割して階調数を削減すると、濃度変化が発生しても、こ

Fig.2 Relation between rotation of image area and histogram for gray-levels distribution

Fig.4 Generation of gradation area vectors

の円形領域内の画像パターンは変化しにくい。このように階調数を削減した円形領域内の画像パターンは、 x および y 方向への位置の移動だけでなく、回転と濃度変化の影響も受けにくいといえる。

提案手法は、以上に述べたように、画像パターンの移動および回転に対して、円形領域内の濃度分布ヒストグラムの形状が大きく変化しない、あるいは線形にしか変化しないことが適用条件となる。例えば、対象物の移動に伴って、背景領域の濃度やパターンが大幅に変化する場合や、対象物の移動や回転によって、対象物表面の明るさが変化するような場合は、濃度分布情報も変化するため、提案手法は適さない。提案手法では、対象物の背景領域が安定しており、また、移動と回転が生じても、対象物表面の明るさが変化しにくい照明が与えられていることが条件となる。

3.3 階調領域ベクトルの生成

図4は、例として、円形領域内の全画素の濃度分布ヒストグラムを4等分し、4種類の階調に削減した場合を示している。この場合、円形領域内の濃淡画像も4階調に変換され、各階調を持つ画素が円形領域内に分布することになる。ここで、図4に示すように、円形領域の中心 O を始点として、各

Fig.5 Rotation of gradation area vectors and standard vector

階調について、その階調を持つ画素によって構成される領域の重心位置へのベクトルを階調領域ベクトルとする。すなわち、 N 等分したある階調 $n(n=1,2,\dots,N)$ の階調領域ベクトル $G_n(X_n, Y_n)$ は、次式によって求められる。

$$X_n = \frac{1}{P_n} \sum_{k=1}^{P_n} x_n(k) \quad (1)$$

$$Y_n = \frac{1}{P_n} \sum_{k=1}^{P_n} y_n(k) \quad (2)$$

ここで、 P_n は階調 n を持つ画素の総数、 $x_n(k)$ および $y_n(k)$ は、階調 n を持つ画素 k の円形領域の中心位置に対する x 座標と y 座標である。

3.2 節で述べたように、階調領域ベクトルは、濃度変化の影響を受けにくい。また、円形領域内の画像パターンが回転した場合、その回転角だけ階調領域ベクトルも回転するが、各々の階調領域ベクトル間の相対的な関係は回転の影響を受けにくい。提案手法では、階調領域ベクトルが持つこれらの性質を利用して、対象画像内から、移動と回転に対して自由度を持つ部分画像領域を探索する。

3.4 基準ベクトルの生成

次に、各階調について得られた N 個の階調領域ベクトルから、基準ベクトルを生成する。図 5 に示す G_1, G_2, G_3 は、 $N=3$ の場合の各階調領域ベクトルを表している。画像パターンが回転すると、 G_1, G_2, G_3 の各ベクトルも回転するため、これらのベクトルを照合処理に直接的に用いることは困難である。そこで、回転の影響を受けない画像特徴量を得るために、階調領域ベクトル G_1, G_2, G_3 から、基準となるベクトル B を生成する。回転しても、各階調領域ベクトル間の関係は保持されるので、基準ベクトル B と各階調領域ベクトルとの相対的な関係も変化しない。つまり、基準ベクトル B と各階調領域ベクトル G_1, G_2, G_3 との相対的な関係を表す各内積を求めると、これらの値は、回転の前後で変化しないことになる。

提案手法では、基準ベクトルと各々の階調領域ベクトルとの内積の値に基づいて照合処理を行う。すなわち、事前にテンプレート画像について、基準ベクトルと各階調領域ベクトルとの内積を求めておき、次に、対象となる部分画像領域についても、同様に基準ベクトルと各階調領域ベクトルとの内積を求め、両者の間で、各内積の一致度が高い場合に、その部分画像領域は、テンプレート画像と類似性が高いとする。

以上の処理では、安定な基準ベクトルを生成する必要がある。最長な階調領域ベクトルを基準ベクトルとする方法が考えられるが、1 種類の階調領域ベクトルのみを用いるため、安定性に劣る可能性がある。そこで、すべての階調領域ベ

クトルの平均ベクトルを基準ベクトルとする。すなわち、次式によって、基準ベクトル $B_A(X_{Ab}, Y_{Ab})$ を求める。

$$X_{Ab} = \sum_{n=1}^N X_n \quad (3)$$

$$Y_{Ab} = \sum_{n=1}^N Y_n \quad (4)$$

但し、各階調領域ベクトルの方向と長さによっては、平均ベクトルの長さがゼロに近くなる場合が起こりえる。そこで、次式に示すように、各階調領域ベクトルの長さ $|G_n|$ を重みとした平均ベクトルも基準ベクトル $B_W(X_{Wb}, Y_{Wb})$ として求める。

$$X_{Wb} = \sum_{n=1}^N \frac{|G_n|}{\sum_{n=1}^N |G_n|} \cdot X_n \quad (5)$$

$$Y_{Wb} = \sum_{n=1}^N \frac{|G_n|}{\sum_{n=1}^N |G_n|} \cdot Y_n \quad (6)$$

得られた 2 種類の基準ベクトル $B_A(X_{Ab}, Y_{Ab})$ と $B_W(X_{Wb}, Y_{Wb})$ の長さを比較し、長い方のベクトルを基準ベクトル $B(X_b, Y_b)$ として用いることにする。そして、テンプレート画像について、基準ベクトル $B(X_b, Y_b)$ と各々の階調領域ベクトル $G_n(X_n, Y_n)$ の内積 $D_n(n=1,2,\dots,N)$ を次式によって求めておく。

$$D_n = X_n \cdot X_b + Y_n \cdot Y_b \quad (7)$$

3.5 ベクトル相関による部分画像領域の探索

次に、対象画像内から、テンプレート画像と類似した部分画像領域を探索する過程について説明する。対象画像内において、ある画素を中心として、テンプレート画像と同じ半径を持つ円形の画像領域を設定する。この画像領域について、3.2 節から 3.4 節で述べた方法によって、 N 個の階調領域ベクトル $G_{on}(X_{on}, Y_{on})$ ($n=1,2,\dots,N$) と基準ベクトル $B(X_b, Y_b)$ を求め、各々の階調領域ベクトルと基準ベクトルとの内積 $D_{on}(n=1,2,\dots,N)$ を得る。

次に、テンプレート画像と対象となる画像領域間で、各階調領域ベクトルの内積同士の差異から、全ての階調領域ベクトルの誤差 E を次式によって求める。

$$E = \sum_{n=1}^N (D_n - D_{on})^2 \quad (8)$$

テンプレート画像と対象となる画像領域との類似性が高い場合、上式の E は小さな値となると考えられる。

対象画像内のすべての画素を中心とする円形画像領域について、上式によって E を求め、最小の E が得られた画素位置を中心とする円形領域を目的とする部分画像領域とする。

4. 実験と結果

4.1 実験条件

以上に述べた手法を用い、対象画像内から、テンプレート画像と類似した部分画像領域を探索する実験を行った。対象画像は 256 階調の濃淡画像であり、サイズは 320×240 画素である。図 6 は、実験に用いたテンプレート画像を示す。テンプレート画像の半径は、(a)Temp1 が 22 画素、(b)Temp2 が 25 画素である。図 7 は、実験に用いた対象画像の例を示す。

Fig.6 Template images

Fig.7 Examples of objective images

Fig.8 Gradation area vectors of template images

(a)Image1 と (b)Image2 の各々について、被写体となる写真を機械式ステージ上に載せ、 3° 単位に回転させながら各回転角において、 x および y 方向へ位置も移動させて対象画像を撮影した。従って、(a)Image1 と (b)Image2 の各々について、対象画像数は 120 枚となる。(a)Image1 内から Temp1, (b)Image2 内から Temp2 と類似した部分画像領域を探索する。

階調領域ベクトルを求める際の階調分割数 N は、 $N=4, 8, 16, 32$ の各々の場合を試した結果、 $N=4, 8$ の場合はベクトル数が不足する傾向があり、また、 $N=32$ の場合は各階調領域に含まれる画素数の減少によってベクトルが不安定となる傾向が見られたことから、 $N=16$ に設定した。図 8 は、 $N=16$ の場合にテンプレート画像から生成された階調領域ベクトルを示す。処理系には、Pentium4-3.2GHz、256MB のメモリを搭載したパーソナルコンピュータを用いた。

4.2 探索結果

図 9(a)は、Temp1 について探索を行った結果例、また、図 9(b)は Temp2 について探索を行った結果例を示す。いずれも対象画像内から、回転している部分画像領域を正しく探索していることがわかる。図 10(a)および(b)は、図 9(a)および(b)に示した各々の対象画像内から探索された部分画像領域について得られた階調領域ベクトルを示す。図 8 に示したテンプレート画像から生成された階調領域ベクトルと比較すると、多くのベクトルの長さや相対的な方向性が一致していることがわかる。但し、一部のベクトルについては、テンプレート画像と若干異なる傾向も見られる。これは、画像の回転による画素位置や画素濃度の量子化誤差、用いた照明の不均一性などが原因と考えられる。しかし、階調領域ベクトルの大局的な分布パターンが類似していることから、正しい探索結果が

(a)Image1 (Temp1)

(b)Image2 (Temp2)

Fig.9 Searched target image areas

(a)Image1

(b)Image2

Fig.10 Gradation area vectors of searched target image areas

Table1 Recognition rates (%)		
Image \ Contrast	Normal	Changed
Image1(Temp1)	99.1	99.1
Image2(Temp2)	100	100

得られたと考えられる。

表 1 は、 3° 単位で回転および移動させた 120 枚の対象画像について探索を行った結果の認識率を示す。探索結果は目視によって判定し、 x または y 方向に ± 3 画素程度以上の位置誤差が発生している場合は、探索に失敗したと見なした。(a)Temp1 では 99.1%, (b)Temp2 では 100% となり、ともに高い認識率が得られた。以上の結果から、提案した階調領域ベクトルによる照合手法によって、回転した部分画像の探索が可能であったといえる。

Fig.11 Searched target image areas in contrast changed images

Fig.12 Gradation area vectors of searched target image area in contrast changed images

4.3 濃度変動時の照合結果

次に、撮影に用いたレンズの絞りを変化させて撮影した対象画像について、同様に探索実験を行った。対象画像数は、(a)Image1 と (b)Image2 の各々について、 3° 単位で回転および移動させた 120 枚である。図 11 は、濃度変化が発生した対象画像の例を示す。認識率は、表 1 に示すように、(a)Temp1 では 99.1%、(b)Temp2 では 100% となり、濃度変化による劣化は見られなかった。図 12(a)および(b)は、図 11(a)および(b)に示した各々の対象画像内から探索された部分画像領域について得られた階調領域ベクトルを示す。図 8 に示したテンプレート画像から生成した階調領域ベクトルと比較すると、多くのベクトルについて相対的な関係が類似していることがわかる。以上の結果から、提案手法は、対象画像の濃度変化に対して大きな影響を受けないといえる。但し、画像の暗部が

Table2 Processing time (second)

Method	Image	
	Image1	Image2
360-directions matching	1050	1284
Proposed method	8.9	10.7

ぶれたり、逆に明部が飽和するほどの著しい濃度変化が生じた場合は、濃度分布に関する線形性が崩れるため、正しい探索が行われない危険性が生じる。提案手法を利用するには、撮像系の濃度ダイナミックレンジ内に画素の濃度が収まるように照明やレンズの絞りを設定することが重要となる。

4.4 処理時間

表 2 は、対象画像内から部分画像領域を探索するために要した処理時間を示す。比較のため、提案手法と同様に濃淡情報を用いる代表的な手法として、 1° 刻みに回転させた 360 種類のテンプレート画像を用いた濃度正規化相関法による探索実験も行った。提案手法は、10 秒程度で探索が完了し、 360° 方向の濃度正規化相関法と比較して 100 倍以上高速であった。

提案手法の処理時間の内訳を調査したところ、円形領域内において、最大濃度と最小濃度を求める処理に最も計算コストを要していた。これは、対象画像内において、各画素を中心とする円形領域を設定する度に、その領域内の全画素をアクセスしているためである。円形領域の位置を横方向に 1 画素だけ移動させた場合、大部分の画素が重複領域内に含まれることを利用すれば、計算コストの大幅な削減が可能と考えられるが、更なる高速化については今後の検討課題である。

5. 結 論

テンプレート画像と対象となる部分画像領域内の濃度階調を等分に削減し、各々の階調領域の重心位置を表す階調領域ベクトルの相対的な関係に基づいて、目的とする部分画像領域を探索する手法を提案した。提案手法は、移動だけでなく、任意に回転した部分画像領域も探索可能であることが特長である。実験を通し、回転した部分画像領域を安定に探索できることを示した。また、対象画像の濃度変化の影響も受けにくい結果が得られた。探索に要する処理時間は 10 秒程度であった。今後は、対象画像内の走査時における重複領域の利用による高速化、および、より安定な階調領域ベクトルを得るために、円形領域内に含まれる画素数を等分割する方法等について検討する予定である。

参 考 文 献

- 1) D.I.Barnea, and H.F.Silverman: A class of algorithms for fast digital image registration, IEEE Trans. Comput., C-21, (1972), 179.
- 2) 水谷栄二: グレースケールパターンマッチングを用いた F A 用画像処理装置とその応用例, O plus E, 141, (1991), 141.
- 3) W.M.Silver: Normalized correlation search in alignment, gauging, and inspection, SPIE, 755, (1987), 23.
- 4) 大原秀一, 田中弘一, 片淵典史, 奥平雅士: 高精度かつロバストなマッチング手法を用いた外観検査技術, 第 9 回外観検査の自動化ワークショップ講演論文集, (1997), 82.
- 5) 伊藤豪俊, 平田達也, 石井直宏: フーリエ記述子を用いた部品の形状認識と処理, 電子情報通信学会論文誌(D), J71-D, 6, (1988), 1065.
- 6) D.H.Ballard: Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes, Pattern Recognition, 13, 2, (1981), 111.
- 7) 大橋靖弘, 大和淳二, 石井郁夫, 牧野秀夫: 曲率を用いる相似図形抽出アルゴリズム, 電子情報通信学会技術報告, PRU-89-72, (1989), 33.
- 8) 東海林健二: 部分形状認識の一手法, 電気学会論文誌(C), 115-C, 3, (1995), 423.