

文章编号: 2095-4980(2023)02-0216-09

基于方差约束与几何不变特性的图像匹配算法

刘开茗^{1,2}, 张 进³

(1. 郑州铁路职业技术学院 人工智能学院, 河南 郑州 451460; 2. 河南省智慧与智能技术应用工程技术研究中心, 河南 郑州 451460;
3. 江苏大学 计算机学院, 江苏 镇江 212000)

摘要: 为解决较多图像匹配算法主要通过测量关键点之间的距离来实现特征匹配, 忽略了图像的结构信息, 使其存在较多的误匹配的问题, 本文设计了方差约束耦合几何不变特性的图像匹配算法。借助于 Forstner 算子计算像素点的兴趣值, 以检测图像的特征; 计算图像的梯度信息, 获取图像的方向值, 并切割图像特征的圆形邻域, 从而获取扇形子域; 以图像的方向值为基础, 通过计算扇形子域中的灰度不变矩, 输出对应的特征向量; 引入区域方差函数, 获取图像的结构信息, 将其加入至图像特征的匹配过程, 以约束欧式距离的测量结果, 实现图像特征匹配; 最后利用匹配点间的几何不变特性, 对匹配特征去伪求真, 优化匹配结果。测试数据表明: 相对于已有的匹配技术, 在对无变换图像、缩放图像以及旋转图像匹配时, 所提算法拥有更高的匹配准确度, 分别达到了 96.56%、95.38% 和 93.52%。

关键词: 图像匹配; Forstner 算子; 灰度不变矩; 结构信息; 方差约束; 几何不变特性

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020472

Image matching method based on variance constraint coupled geometric invariance

LIU Kaiming^{1,2}, ZHANG Jin³

(1.School of Artificial Intelligence, Zhengzhou Railway Vocational and Technical College, Zhengzhou Henan 451460, China;
2.Henan Intelligent and Intelligent Technology Application Engineering Center, Zhengzhou Henan 451460, China;
3.School of Computer Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212000, China)

Abstract: Currently a number of image matching algorithms focus on measuring the distance between key points while ignoring the structure information of the images, hence are prone to mismatches. This paper presents an image matching algorithm using the geometric invariance of variance constraint coupling. With the help of Forstner operator, the interest value of pixels is calculated to detect the characteristics of the image. The gradient information of the image is calculated to obtain the direction value of the image. The circular neighborhood of image features is cut to obtain the fan-shaped sub domains. Based on the direction value of the image, the feature vector of the image feature is obtained by calculating the gray invariant moment in the fan-shaped sub domains. The region variance function is introduced to obtain the structure information of the image, which is added to the image feature matching process to constrain the results of Euclidean distance measurement and realize the image feature matching. Based on the geometric invariance between matching points, the matching image features are processed to get accurate image matching results. Experimental results show that compared with the existing matching techniques, this algorithm has higher matching accuracy, which up to 96.56%, 95.38% and 93.52% for non-transformed images, zoomed images and rotated images, respectively.

Keywords: image matching; Forstner operator; gray invariant moment; structure information; variance constraint; geometric invariance

在科技全球化的今天，信息变得尤为重要。通过数字图像对信息进行传输，已成为生活中常用的方式^[1]。获取图像信息后，可通过多种处理方法，利用其完成生活中的各种事务，其中图像匹配就是一种常用的处理方法。利用图像匹配方法，可实现生活中的物体识别、目标追踪以及安防保卫等^[2-3]。

图像匹配技术为生活带来了便利，研究人员也对其进行了大量的研究，如SU等^[4]利用尺度不变特征变换(Scale Invariant Feature Transform, SIFT)算法获取图像特征及其描述子，然后对该描述子进行二值化和反向编码处理，使之成为镜像不变二值描述子，在此基础上再通过由粗到细的两种相似性度量方法完成图像匹配。虽然该方法的鲁棒性较好，但通过相似性度量方法对图像特征匹配的过程，没有考虑图像的结构信息，易使匹配结果出错。SUN等^[5]提出了一种基于增强图像梯度信息的尺度不变特征匹配算法。该方法考虑了图像的尺度不变特征，对缩放变换与噪声干扰具有较强的鲁棒性，但该方法通过欧式测量的方法匹配图像特征，易出现一对多的匹配现象。Cao等^[6]提出了一种改进的SIFT图像匹配算法。虽然该方法有效降低了图像特征描述子的维度，提高了匹配效率，但由于SIFT对几何变换的稳健性不高，易出现较多的误匹配。Yue等^[7]利用面向快速旋转的短信息特征对图像进行匹配，并引入随机样本一致性策略(Random Sample Consensus, RANSAC)技术去除错误的匹配对，提高了算法对旋转变换的匹配鲁棒性，但由于RANSAC方法的复杂度较高，严重限制了其匹配效率。黄源等^[8]通过差分高斯方法，约束了不同图像层次间灰度量级的差异性，精准地提取了图像特征，并且采用三角网规则优化匹配结果。但其只考虑了特征点之间的欧氏距离，忽略了图像的结构信息，而且三角网规则的复杂度较高，其匹配耗时较高。Ye等^[9]利用最小相位一致性矩阵能较为准确地检测图像关键点，可获取良好的匹配准确率，但其通过相位一致性的局部直方图形成的描述子，不能较好抵御旋转等变换，导致错误匹配较多。Mustafa等^[10]利用伽马函数方法获取其图像特征向量，在伽马函数测量距离的基础上，实现特征匹配。虽然伽马函数方法的计算复杂度较低，有利于提高匹配效率，但基于伽马函数的特征向量对旋转等变换的抵御性较差，且基于伽马函数测量距离的方法，未考虑图像的结构特征，使其存在较多的错误匹配。

综上所述，当前图像算法主要依据图像特征距离信息来完成图像特征的匹配，虽然依据图像特征距离信息的方法较为简单，但对于不同的特征匹配对，其图像特征的距离信息可能会出现相等的情况，从而导致“一对多”的匹配现象。而图像的结构信息只与图像内容相关，具有较好的唯一性，不会出现“一对多”的匹配现象。因此，为改善几何变换条件下的匹配准确率，本文联合经典的Forstner算子与灰度不变矩，考虑图像的结构信息，设计了一种鲁棒性较强的图像匹配方法。多组图像匹配结果显示，本文算法对多种变换的抵御性能强。

1 本文图像匹配算法

图1为本文图像匹配算法的过程，整个过程可分为图像特征提取、特征向量计算、图像特征匹配、匹配特征优化4个步骤。

1) 图像特征提取：引用经典的Forstner算子，从图像的Robert梯度值出发，通过计算图像的兴趣值，从而准确地提取出图像的特征。

2) 特征向量计算：借助传统的加速稳健特征(Speeded Up Robust Features, SURF)描述符，通过图像的梯度特征，获取图像特征的方向信息。并将灰度不变矩引入至特征向量的计算过程，从图像特征的圆形邻域中获取分块的扇形区域。以图像特征的方向信息为参考，通过求取扇形区域中的灰度不变矩信息，进而计算出图像特征的特征向量。

3) 图像特征匹配：借助区域方差函数，提取图像的结构信息。通过欧氏距离函数，测量图像特征的距离。并将该结构信息和距离信息进行联合，构造了新的匹配模型，用以计算出图像特征的匹配结果。

4) 匹配特征优化：通过旋转和缩放图像，设计了图像匹配特征的优化方法，利用匹配点之间的几何不变特性，判别匹配点的正确与否，求取匹配特征的净化结果，准确地实现图像的匹配。

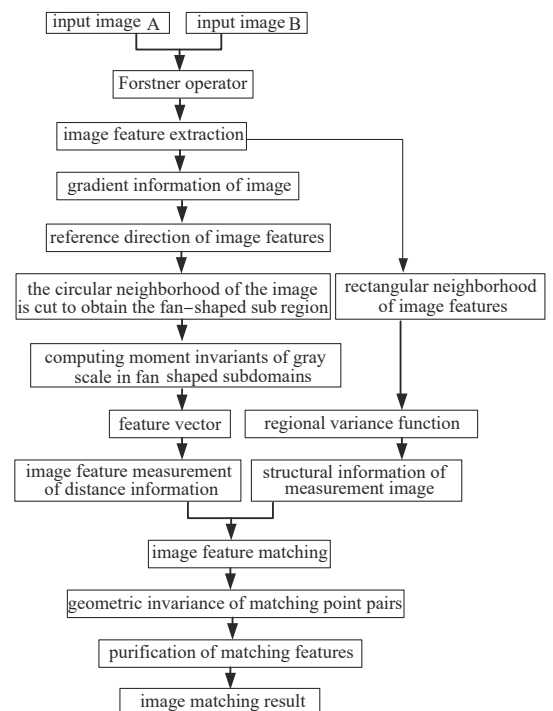


Fig.1 Process of image matching algorithm in this paper

图1 本文图像匹配算法的过程

1.1 图像特征的提取

图像特征提取的准确度,对图像匹配的结果有重要影响。Forstner算子是一种提取准确度较高的图像特征检测方法,其在计算图像Robetr梯度值的基础上,获取像素点的兴趣值,进而准确地提取出图像特征。

令 E_x, E_y 分别为 x, y 方向上的Robetr梯度值。 E_x, E_y 的计算过程为^[1]:

$$E_x = \frac{\partial E}{\partial x} = E_{i+1, j+1} - E_{i, j} \quad (1)$$

$$E_y = \frac{\partial E}{\partial y} = E_{i, j+1} - E_{i+1, j} \quad (2)$$

式中 $E_{i, j}$ 为像素点 E 的灰度值。

利用 E_x, E_y 可求取 E 的灰度矩阵 R :

$$R = U^{-1} = \begin{bmatrix} \sum E_x^2 & \sum E_x E_y \\ \sum E_x E_y & \sum E_y^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (3)$$

式中 U 为 R 的逆矩阵。

通过 U 的迹 $\text{Tr}(U)$ 和行列式 $\text{Det}(U)$ 计算 E 的兴趣值 J 和 L ^[3]:

$$J = \frac{\text{Det}(U)}{\text{Tr}(U)} \quad (4)$$

$$L = \frac{4\text{Det}(U)}{(\text{Tr}(U))^2} \quad (5)$$

随后,利用 J 和 L 分别与阈值 T_J 和 T_L 作比较,若 J 和 L 分别大于 T_J 和 T_L ,则判定 E 为图像待选特征点。阈值 T_J 和 T_L 的计算方法为^[11]:

$$T_L = 0.5 \sim 0.75 \quad (6)$$

$$T_J = \begin{cases} \xi V (\xi = 0.5 \sim 1.5) \\ \alpha H_\alpha (\alpha = 5) \end{cases} \quad (7)$$

式中: V 为权的平均值; H_α 为权的中值。

在 $M \times M$ 的窗口中,选取最大 J 值的待选特征点为最终特征点。

Forstner算子提取图像特征的结果如图2所示。通过观察图2(a)和图2(b)可以发现,Forstner算子提取的图像特征准确度较高。

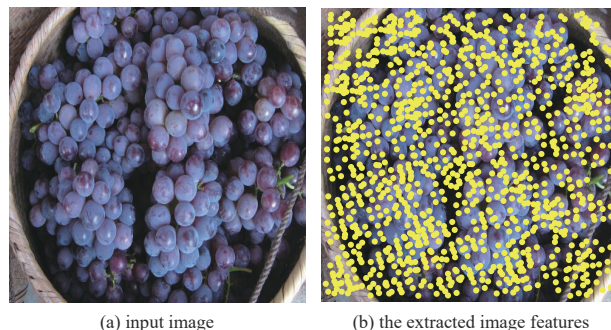


Fig.2 The result of image feature extraction
图2 图像特征的提取结果

1.2 特征向量的计算

提取出图像特征后,求取其特征向量。本文利用图像梯度信息求取参考方向,并通过计算图像特征邻域圆的扇形子域中的灰度不变矩,来获取特征向量。

特征点 $p(x, y)$ 的梯度模值 Q 和方向 θ 为^[12]:

$$Q = \left((p(x+1, y, \beta) - p(x-1, y, \beta))^2 + (p(x, y+1, \beta) - p(x, y-1, \beta))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{p(x, y+1, \beta) - p(x, y-1, \beta)}{p(x+1, y, \beta) - p(x-1, y, \beta)} \right) \quad (9)$$

式中 β 为 $p(x, y)$ 的尺度因子。

通过 Q 和 θ 计算出 $p(x, y)$ 邻域的梯度直方图。将该直方图在 $[0^\circ, 360^\circ]$ 范围内均分为36份子直方图,比较各子直方图的大小,选取最大子直方图的方向作为参考方向 ϕ ^[13]。

对直径为9像素点的 $p(x, y)$ 邻域圆按图3所示方法进行切割,以获取扇形子

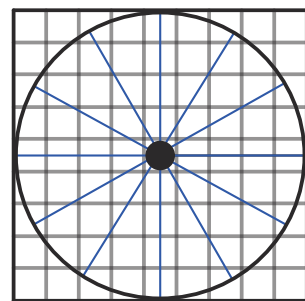


Fig.3 The process of obtaining fan-shaped subdomains
图3 获取扇形子域的过程

域。接着以 ϕ 为依据，求取各扇形子域中的灰度不变矩，获取特征向量。

令 m, n 分别为任一扇形子域中像素点 $f(x, y)$ 和 $q(\bar{x}, \bar{y})$ 的灰度级。通过计算 $f(x, y)$ 和 $q(\bar{x}, \bar{y})$ 在 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 方向以及距离 d 上出现的概率，便可得到灰度不变矩 \mathbf{B} 。以 ϕ 为参考方向，求取 \mathbf{B} 中各分量的过程为^[14-15]：

$$b(m, n|d, 0^\circ) = W \{x - \bar{x} = 0, |y - \bar{y}| = d\} \quad (10)$$

$$b(m, n|d, 45^\circ) = W \{x - \bar{x} = d, y - \bar{y} = -d\} \quad (11)$$

$$b(m, n|d, 90^\circ) = W \{|x - \bar{x}| = d, y - \bar{y} = 0\} \quad (12)$$

$$b(m, n|d, 135^\circ) = W \{x - \bar{x} = -d, y - \bar{y} = -d\} \quad (13)$$

式中 $W\{\}$ 为统计集合中参数个数的操作。

通过式(10)~式(13)，便可求得任一扇形子域的灰度不变矩 \mathbf{B} ：

$$\mathbf{B} = [b(m, n|d, 0^\circ), b(m, n|d, 45^\circ), b(m, n|d, 90^\circ), b(m, n|d, 135^\circ)] \quad (14)$$

综合各扇形子域中的灰度不变矩 \mathbf{B} ，将其归一化计算后，可得含 48 个元素的特征向量 \mathbf{Z} ，见图 4。

1.3 图像特征的匹配

当前较多图像匹配算法主要利用欧氏距离函数测量特征点间的距离信息来匹配图像特征。由于该方法易出现一对多的匹配现象，且忽略了图像的结构信息，因此降低了图像特征匹配的正确性。对此，本文引入区域方差函数获取图像的结构信息，并将其融入至图像特征匹配的过程中，改善特征匹配的正确性。

利用特征点 p 和 q 的特征向量 \mathbf{Z}_p 和 \mathbf{Z}_q 来计算其距离信息的过程为^[16]：

$$DIS(p, q) = \sqrt{\sum_{i=1}^{48} |z_{pi} - z_{qi}|^2} \quad (15)$$

式中 Z_p 和 Z_q 分别表示 \mathbf{Z}_p 和 \mathbf{Z}_q 中的第 i 个元素。

特征点 $e(x, y)$ 的 $w \times w$ 大小的区域 Y 中，区域方差函数为^[17]：

$$C = \frac{1}{w \times w} \sum_{i=-(w-1)/2}^{(w-1)/2} \sum_{j=-(w-1)/2}^{(w-1)/2} [e(x+i, y+j) - K]^2 \quad (16)$$

式中 K 为 Y 的均值。

通过式(16)可求取特征点 p 和 q 的结构信息 C_p 和 C_q 。将其融入至图像特征匹配的过程中，形成匹配函数：

$$q = \arg [\min(DIS(p, q)) \& \min(|C_p - C_q|)] \quad (17)$$

由式(17)可知，当特征点 p 和 q 的距离信息与结构信息都最小时，才能判定 p 和 q 为匹配图像特征。

利用式(17)对 2 幅图像进行特征匹配，结果如图 5 所示。图 5 显示，通过式(17)完成的图像特征匹配结果具有较高的正确性，但仍然存在 17 对错误匹配点，见表 1。

表 1 图 5 和图 6 对应的测试数据

Table 1 Test data corresponding to Fig.5 and Fig.6

name	Fig.5	Fig.6
total feature points	370	370
correct match points	351	351
wrong match points	17	4

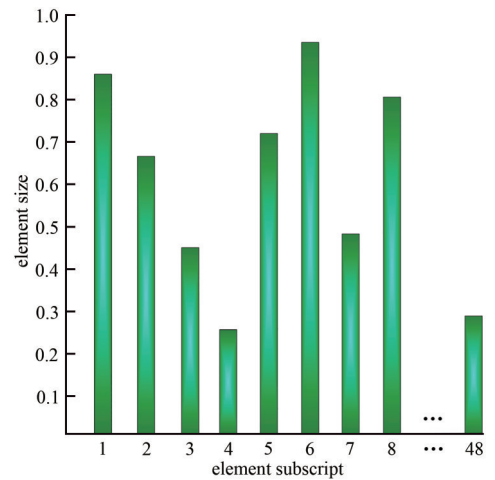


Fig.4 Sketch of feature vector
图 4 特征向量的示意图



Fig.5 Feature matching results
图 5 特征匹配结果

1.4 匹配特征的优化

正确的匹配点间具有良好的几何不变性。当 2 幅输入图像进行相同尺度和角度的几何变换后，正确的匹配点间也应该具有相同的几何变换^[18-19]。因此，本文利用匹配点间的几何不变性来优化图像特征的匹配结果。

令输入图像 A 和 B 中的匹配点组成的集合分别为 $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ 及 $Q = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_n\}$ ，其中 p_i 和 q_i 表示为匹配点对。将 A 和 B 分别按角度 θ_A 和 θ_B 旋转，按尺度 φ_A 和 φ_B 缩放。按照正确的匹配点间的几何不变性，此时 p_i 和 q_i 产生的旋转 θ_{p_i} 和 θ_{q_i} ，以及产生的缩放尺度 φ_{p_i} 和 φ_{q_i} 应该满足：

$$|\theta_{p_i} - \theta_{q_i}| = |\theta_A - \theta_B| \quad (18)$$

$$\frac{\varphi_{p_i}}{\varphi_{q_i}} = \frac{\varphi_A}{\varphi_B} \quad (19)$$

对此，可设定几何阈值 JH ，利用其对匹配特征点 p_i 和 $q_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 进行优化：

$$\left(|\theta_{p_i} - \theta_{q_i}| - |\theta_A - \theta_B| \right) < JH \quad (20)$$

$$\left| \frac{\varphi_{p_i}}{\varphi_{q_i}} - \frac{\varphi_A}{\varphi_B} \right| < JH \quad (21)$$



Fig.6 Optimization results of feature matching
图 6 特征匹配的优化结果

从式(20)和(21)可见，只有当匹配点对的几何变化与对应图像的几何变化误差小于 JH 时，才认可该匹配点对为正确的，否则被认为是误配点。图 6 为优化匹配点后的结果。可见，优化后的匹配结果错误匹配点更少，只有 4 对错误匹配点。

2 实验结果与分析

通过 Matlab R2014a 对本文算法进行匹配效果测试，同时将文献[20-21]中算法作为对比组，对比本算法匹配效果的优越性。实验在

Intel i3 CPU、4 GB 内存的计算机上进行。实验中几何阈值 $JH=0.07$ 。

各算法对无变换图像的匹配结果如图 7 所示，对应的匹配数据如表 2 所示。对比图 7 中各算法的匹配效果可见，图 7(c) 的正确匹配点数最少，图 7(d) 中误匹配较多，图 7(e) 中正确匹配点数最多，误匹配最少。由表 2 可见，本文算法的正确匹配点数为 367，高于对比组方法，但本文算法的匹配耗时为 2.115 s，高于文献[21]算法。

表 2 图 7 对应的测试数据

Table 2 The test data corresponding to Fig.7

name	reference [20] algorithm	reference [21] algorithm	this algorithm
total feature points	380	380	380
correct match points	348	354	367
wrong match points	19	13	5
matching accuracy/%	91.58	93.16	96.56
time consuming/s	2.905	1.829	2.115

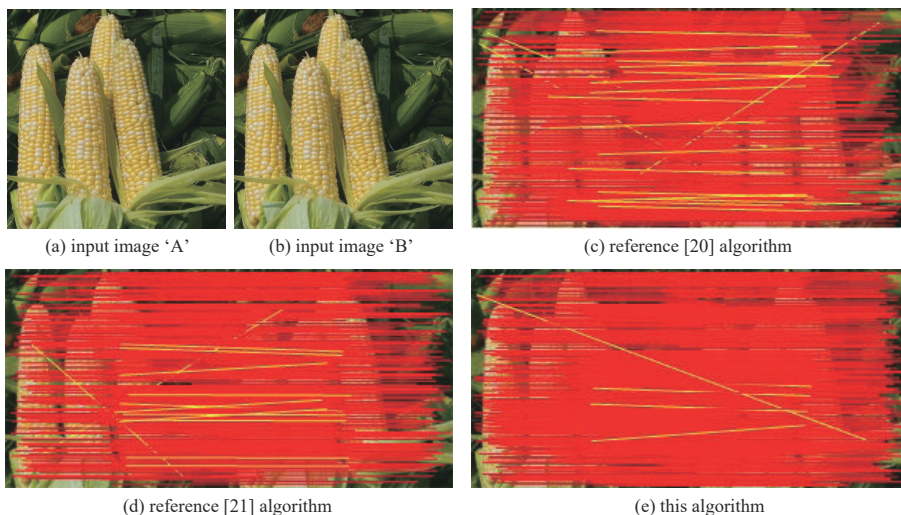


Fig.7 The matching effect of each algorithm to the image without transformation

图 7 各算法对无变换图像的匹配效果

各算法对缩放变换的 2 幅输入图像的匹配结果如图 8 所示，对应的数据如表 3 所示。对比图 8(c)、图 8(d)以及图 8(e)中的匹配效果可见，图 8(e)的匹配误差最小，匹配效果较好。从表 3 数据可见，本文算法的匹配准确度为 95.38%，而文献[20]和文献[21]算法的匹配准确度分别为 90.22%和 92.66%。从匹配耗时来看，所提算法的效率仍介于文献[20]和文献[21]之间。

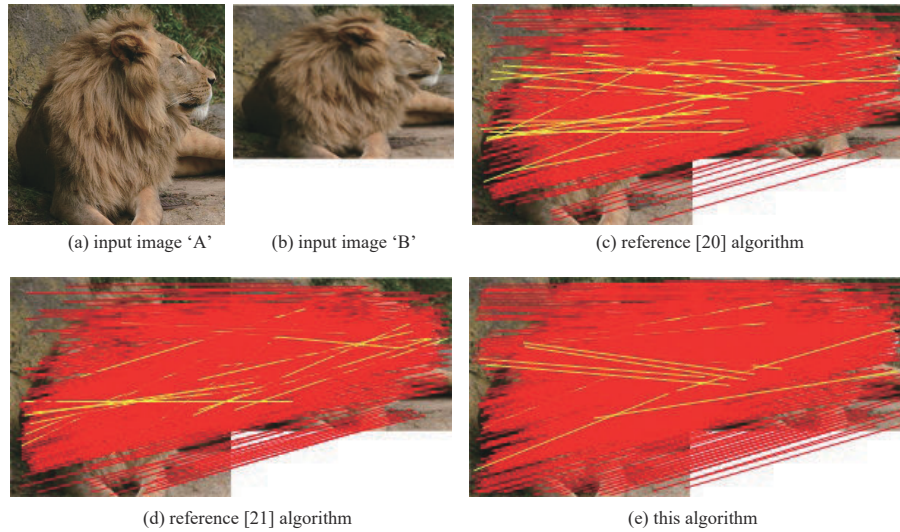


Fig.8 Matching test of the zoomed image with three methods

图 8 三种方法对缩放图像的匹配测试

表 3 图 8 对应的测试数据

Table 3 The test data corresponding to Fig.8

name	reference [20] algorithm	reference [21] algorithm	this algorithm
total feature points	368	368	368
correct match points	332	341	351
wrong match points	21	15	11
matching accuracy/%	90.22	92.66	95.38
time consuming/s	2.798	1.796	1.913

各算法对旋转变换的 2 幅输入图像的匹配效果如图 9 所示。从图 9(c)可见，其存在较多误匹配，如图中的黄色线条所示。从图 9(d)中的黄色线条可见，也存在较多错误匹配。从图 9(e)可见，其误匹配和漏匹配较图 9(c)和图 9(d)最少。同时表 4 数据也显示出本文算法的正确匹配点数最多，错误匹配点数最少，分别为 332 和 14。但文献 [21]的匹配效率最高，耗时仅为 1.526 s。

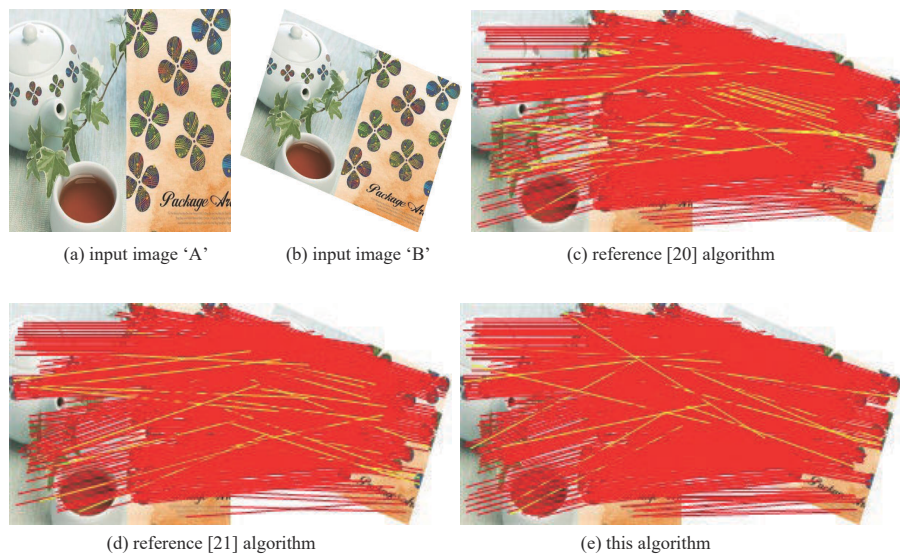


Fig.9 The matching results of each algorithm for the rotated image

图 9 各算法对旋转图像的匹配结果

表4 图9对应的测试数据

Table 4 The test data corresponding to Fig.9

name	reference [20] algorithm	reference [21] algorithm	this algorithm
total feature points	355	355	355
correct match points	312	318	332
wrong match points	24	21	14
matching accuracy/%	87.89	89.58	93.52
time consuming/s	2.349	1.526	1.774

由此可见,从匹配精确度与效率两方面综合考虑,本文所提算法的匹配性能最优。因为该算法借助了Forstner算子,对输入图像的图像特征进行了精确的检测。同时本文算法还通过鲁棒性较强的灰度不变矩,得到了一个48维的特征向量,有效降低了复杂度,提高了匹配效率。且本文算法还利用图像的结构和距离信息,构造了匹配函数,准确匹配了图像特征,最后,以匹配的图像特征的几何不变特性为依据,筛选出错误的匹配点对,使其具有更好的匹配准确率。文献[20]算法采用SURF获取图像特征和描述子,再通过测量欧式距离来完成图像特征的匹配,并借助采用局部二值模式(Local Binary Pattern, LBP)滤波器来优化匹配结果。由于SURF描述符只考虑了特征点周围的3/8的信息量,对图像特征点的描述能力不足,导致对几何变换的鲁棒性不理想,而且LBP滤波器没有考虑特征点之间的几何关系,其优化能力不足,导致最终的匹配精确度较低。另外,SURF获取的描述符产生一个128维的特征向量,复杂度较高,降低了匹配效率。文献[21]采用Harris算子获取图像特征,并通过归一化互相关方法匹配图像,利用改进的基本矩阵估计方法优化匹配点,获取匹配结果。虽然Harris算子和归一化互相关方法的计算复杂度较低,可以改善其匹配效率,使匹配耗时最低,但归一化互相关方法忽略了图像的结构信息,且Harris算子的检测结果中存在伪特征点,限制了其准确性。

在图9(a)所示输入图像的基础上,获取多角度旋转的另一幅图像,利用各算法对输入图像与旋转图像进行匹配实验。将各算法匹配的正确度进行比较,以观察各算法的匹配特性。

各算法匹配图像的正确度如图10所示。通过比较图10中各算法匹配图像的正确度可以知道,本文算法匹配效果最好。以100°角度为例,本文算法与文献[20]、文献[21]算法的匹配正确度各为90.29%、82.41%、85.44%。可见,本文算法的匹配特性较好,能适应多角度旋转图像的匹配。因为本文算法通过引入区域方差函数得到了图像的结构信息,通过其与图像的距离信息,对图像特征进行了准确的匹配,且本文算法还利用了图像特征的几何不变特性,有效提高了所提算法对旋转变换的稳健性,尤其是在大角度旋转情况下,优化了图像特征的匹配结果,剔除了错误匹配点,从而使其在任意角度变换的情况下呈现出理想的匹配准确率。文献[20]的SURF方法对图像中的鲁棒特征点的描述能力不足,无法准确检测出抗旋转变换的特征点,而且其LBP滤波器也不能较好地适应几何变换,限制了其删除误匹配点的能力,导致其对旋转变换的匹配准确率不高。文献[21]算法中依靠改进的基本矩阵估计方法来优化匹配结果。但基本矩阵估计方法没有考虑特征点之间的几何不变性,限制了其在旋转变换下的匹配优化性能。

3 结论

为改善各种几何变换条件下的匹配准确率,本文设计了一种新的特征匹配算法。首先,构建了图像特征圆域的扇形子域,在该子域中以参考方向为依据,计算图像的灰度不变矩信息,获取了抗几何变换能力较强的特征向量。并利用该特征向量计算出图像特征的距离信息,将其与通过区域方差函数计算出的图像结构信息相结合,以此设计了新的匹配模型。考虑匹配点之间的几何不变特性,建立了图像匹配特征点的匹配优化方法,提高了匹配结果的准确度。从实验结果看,与对比组算法相比,具有如下优势:

- 1) 在匹配无变换图像时,所提算法的匹配准确度分别提高了4.98%和3.4%;
- 2) 面对缩放图像时,所提算法的匹配准确度分别提高了5.16%和2.72%;
- 3) 对旋转变换图像进行匹配时,所提算法的匹配准确度分别提高了5.63%和3.94%。

由此可见,所提算法拥有理想的匹配准确度,对多种几何变换的抵御性较强。但所提算法的匹配效率不太

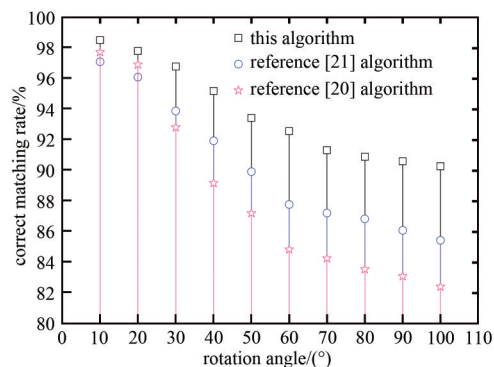


Fig.10 The accuracy of matching results of each algorithm
图10 各算法匹配结果对应的准确率

理想，在后续研究计划中，将重点对图像特征向量的生成过程进行深入研究，以探索出一种新的特征向量生成方法，进一步降低本文算法的匹配耗时，从而增强其匹配性能。

参考文献：

- [1] 郭丙轩,罗光光,肖雄武. Forstner 特征点分类和精确定位方法探讨[J]. 科学技术与工程, 2016,16(16):73-78. (GUO Bingxuan, LUO Guangguang,XIAO Xiongwu. Forstner feature point classification and precise location method[J]. Science Technology and Engineering, 2016,16(16):73-78.)
- [2] XI Wenfei,SHI Zhengtao,LI Dongsheng. Comparisons of feature extraction algorithm based on unmanned aerial vehicle image[J]. Open Physics, 2017,15(1):472-478. doi:10.1515/phys-2017-0053.
- [3] 李浩,秦姣华,向旭宇. 结合自适应阈值与 Forstner 的 Harris 角点匹配优化算法[J]. 电讯技术, 2018,58(9):1079-1085. (LI Hao, QIN Jiaohua, XIANG Xuyu. A Harris corner matching optimization algorithm combing adaptive threshold and Forstner[J]. Telecommunication Engineering, 2018,58(9):1079-1085.) doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2018.09.15.
- [4] SU Mingzhe,MA Yan,ZHANG Xiangfen. MBR-SIFT:a mirror reflected invariant feature descriptor using a binary representation for image matching[J]. PLoS ONE, 2017,12(5):1-16. doi:10.1371/journal.pone.0178090.
- [5] 孙健钧,赵岩,王世刚. 基于图像梯度信息强化的 SIFT 特征匹配算法改进[J]. 吉林大学学报(理学版), 2018,56(1):82-88. (SUN Jianjun,ZHAO Yan,WANG Shigang. Improvement of SIFT feature matching algorithm based on image gradient information enhancement[J]. Journal of Jilin University(Science Edition), 2018,56(1):82-88.) doi:10.13413/j.cnki.jdxblxb.2018.01.14.
- [6] CAO Yu,PANG Bo,LIU Xin. An improved Harris-SIFT algorithm for image matching[J]. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, 2018,219(1): 56-64. doi: 10.1007/978-3-319-73317-3_8.
- [7] YUE Linwei,LI Hongjie,ZHENG Xianwei. Distorted building image matching with automatic viewpoint rectification and fusion[J]. Sensors, 2019,23(19):5205. doi:10.3390/s19235205.
- [8] 黄源,张福泉. 基于差分约束耦合三角网约束的图像匹配算法[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2018,35(4):437-444. (HUANG Yuan,ZHANG Fuquan. An image matching algorithm based on differential constraint model coupling triangulation constraint[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition), 2018,35(4):437-444.) doi:10.13568/j.cnki.651094.2018.04.008.
- [9] YE Yuanxin,SHAN Jie,HAO Shiyuan. A local phase based invariant feature for remote sensing image matching[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018,142(1):205-221. doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.06.010.
- [10] MUSTAFA A A Y. Probabilistic binary similarity distance for quick binary image matching[J]. IET Image Processing, 2018,12(10):1844-1856. doi:10.1049/iet-ipr.2017.1333.
- [11] WU Kaiyan,ZHANG Xianzhou,WU Zhangguang. Analysis of several kinds of feature points extraction based on tunnel close-range photogrammetry[J]. Journal of Geomatics, 2018,43(5):14-17. doi:10.14188/j.2095-6045.2016278.
- [12] HE Yi,DENG Guohua,WANG Yuanyuan. Optimization of SIFT algorithm for fast-image feature extraction in line-scanning ophthalmoscope[J]. Optik, 2018,152(1):21-28. doi:10.1016/j.ijleo.2017.09.075.
- [13] 孙锐,方蔚,黄启恒. 基于支持样本间接式的行人再识别[J]. 电子与信息学报, 2017,39(12):2953-2961. (SUN Rui,FANG Wei, HUANG Qiheng. Indirect person re-identification based on support samples[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017,39(12):2953-2961.) doi:10.11999/JEIT170215.
- [14] 李叶妮,林晓佳,陈吉鹏. 基于灰度共生矩和 SVM 的碳化竹条瑕疵识别[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2017,22(3):49-54. (LI Yeni,LIN Xiaojia,CHEN Jipeng. Defects identification for carbonization bamboos based on GLCM and SVM[J]. Journal of Jimei University(Natural Science), 2017,22(3):49-54.) doi:10.19715/j.jmuzr.2017.03.007.
- [15] XIAO Li,GUINDANI M,NG C S. Spatial Bayesian modeling of GLCM with application to malignant lesion characterization[J]. Journal of Applied Statistics, 2019,46(1):230-246. doi:10.1080/02664763.2018.1473348.
- [16] SANTOS C A N,MARTINS D L N,MASCARENHAS N D A. Ultrasound image despeckling using stochastic distance-based BM3D[J]. IEEE Transactions on Image Processing:A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2017,26(6):2632-2643. doi:10.1109/TIP.2017.2685339.
- [17] GUREVICH I B,YASHINA V V,ABLAMEYKO S V. Development and experimental investigation of mathematical methods for automating the diagnostics and analysis of ophthalmological images[J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2018,28(4): 612-636. doi:10.1134/S1054661818040120.
- [18] GOLABI S,HELFRUSH M S,DANYALI H. Non-unit mapped radial moments platform for robust, geometric invariant image watermarking and reversible data hiding[J]. Information Sciences, 2018,447(1):104-116. doi:10.1016/j.ins.2018.02.073.

- [19] 杨宏伟,齐永锋,杜刚. 拉普拉斯特征耦合方差度量的图像匹配算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(4):672-677. (YANG Hongwei, QI Yongfeng, DU Gang. Image matching method based on Laplacian feature coupling variance measure[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(4):672-677.) doi:10.11805/TKYDA2019355.
- [20] ZHANG Chenfei, WU Yaozu, LIU Ning. Enhanced SURF-based image matching using pre- and post-processing[J]. Digital TV and Wireless Multimedia Communication, 2017,685(1):83-92. doi:10.1007/978-981-10-4211-9_9.
- [21] 马庭田,叶文华,叶华欣. 面向图像匹配的基础矩阵估计改进算法[J]. 计算机集成制造系统, 2018,24(9):2133-2139. (MA Tingtian, YE Wenhua, YE Huaxin. Improved algorithm of fundamental matrix estimation for image matching[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS, 2018,24(9):2133-2139.) doi:10.13196/j.cims.2018.09.001.

作者简介:

刘开茗(1979-), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为图像处理、信息安全、多媒体信息处理. email: LiuKming1979@sohu.com.

张进(1991-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为计算机图像、信息安全、计算机应用.

(上接第215页)

- [17] 黄有为,金伟其,王霞,等. 凝视型水下激光成像后向散射光理论模型研究[J]. 光学学报, 2007,27(7):1191-1197. (HUANG Youwei, JIN Weiqi, WANG Xia, et al. Theoretical optical backscattering model for staring underwater laser imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2007,27(7):1191-1197.)
- [18] 姜伟,申德新,马宁,等. 航空相机光学系统的耐蚀性消光涂装方法[J]. 电镀与涂饰, 2008,27(11):55-57. (JIANG Wei, SHEN Dexin, MA Ning, et al. Anti-corrosive extinction coating process for optical system of aerial camera[J]. Electroplating and Finishing, 2008,27(11):55-57.)
- [19] 路大举,万敏,杨锐,等. 空间目标表面材料反射率的测量[J]. 强激光与粒子束, 2008,20(8):1383-1386. (LU Daju, WAN Min, YANG Rui, et al. Reflectivity of measurement of spatial target's surface material[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(8):1383-1386.)

作者简介:

钟昆(1989-), 男, 在读博士研究生, 主要从事研究方向为水下激光探测和计算成像. email:zkwd314@163.com.

彭波(1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为水下目标声光探测.

苏伟(1964-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为微机电系统.

黄莎玲(1988-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为电路系统设计.

刘松林(1993-), 男, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为电路系统设计.