

改进的 FAST 算子耦合投影约束法则的图像匹配算法

张宏涛¹, 陈长缨², 彭平¹

(1.广州工商学院 计算机科学与工程系, 广州 510850; 2.暨南大学 信息科学技术学院, 广州 510632)

摘要: **目的** 针对当前较多图像匹配算法主要通过对特征点的相似性进行度量来优化匹配特征点, 忽略了特征点之间的投影相关性, 导致算法的鲁棒性下降、匹配错误度较高的问题, 文中提出了基于改进 FAST 算子耦合投影约束法则的图像匹配算法。**方法** 首先, 利用 FAST 算子提取图像特征点, 并通过 Harris 算子去除 FAST 算子中的伪特征点, 充分获取稳定特征点。然后, 利用圆域内像素点的高斯曲率值, 对特征点进行描述。最后, 利用归一化互相关系数 (Normalized correlation coefficient, NCC) 对特征点进行匹配。并通过特征点之间的投影关系函数计算特征点的投影值, 并根据投影值建立投影约束法则, 以去除错误配点, 优化匹配精度。**结果** 实验数据显示, 与当前图像匹配技术相比, 所提算法具有更好地鲁棒性与匹配精度, 在多种几何攻击下, 所提算法的正确匹配率仍可维持在 90% 以上。**结论** 所提算法在各类几何变换下仍具有良好的匹配精度, 在图像处理、信息安全等领域具有良好的参考价值。

关键词: 图像匹配; FAST 算子; Harris 算子; 高斯曲率值; 归一化互相关系数; 投影约束法则

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)05-0250-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.05.035

Image Matching Algorithm Based on Improved FAST Operator Coupled Projection Constraint Rule

ZHANG Hong-tao¹, CHEN Chang-ying², PENG Ping¹

(1.Department of Computer Science and Engineering, Guangzhou College of Technology & Business, Guangzhou 510850, China; 2.School of Information Science and Technology, Ji'nan University, Guangdong 510632, China)

ABSTRACT: The work aims to propose an image matching algorithm based on improved FAST operator coupled projection constraint rule for the current problems that the projection correlation between feature points is ignored which results in reduction of algorithm robustness and more matching errors since the current image matching algorithms mainly optimizes the matching feature points by measuring the similarity of feature points. Firstly, FAST operator was used to extract feature points of image, and Harris operator was used to remove pseudo feature points from feature points to obtain stable feature points. Then, the Gaussian curvature value of pixels in the circle domain was adopted to describe the feature points. Finally, the normalized cross correlation coefficient was used to match the feature points. The projection value of the feature points was calculated by the projection relation function between the feature points, and the projection constraint rule was established according to the projection value to remove the mismatch points and obtain the matching results. From the experiment data, the proposed algorithm had better robustness and matching effect than the current image matching algorithm. Under multiple geometric attacks, the correct matching rate of proposed algorithm was kept above 90%. The proposed algorithm still has good matching accuracy under various geometric algorithms and has good refer-

收稿日期: 2018-10-19

基金项目: 2018 年教育部项目 (201801324001); 2018 年广东省教育厅项目 (PROJ994047199556014080)

作者简介: 张宏涛 (1981—), 女, 硕士, 广州工商学院讲师, 主要研究方向为计算机图形图像、信息处理、软件工程。

ence value in image processing, trademark retrieval and other fields.

KEY WORDS: Image matching; FAST operator; Harris operator; Gauss curvature value; normalized correlation coefficient; projection constraint rule

图像匹配是通过一定的方法,实现图像间相同或相似内容的匹配检测的一项技术。图像匹配技术已被广泛应用于人们生活中,例如:在包装商标检索领域中,利用图像匹配技术来获取商标的特征点,可提高商标的检索精度,目前,匹配技术已成为商标检索过程中重要的技术,对目标检索精度有较大影响^[1];医院通过图像匹配技术来实现医疗诊断;国防系统通过图像匹配技术来实现对象跟踪等。虽然图像匹配技术已得到了应用,但对其匹配错误度的降低与抗干扰性能的提升,依然是需要人们研究的难题^[2]。

经过专家学者的深入研究,当下出现了多种图像匹配算法。如 Lakshmi^[3]等通过对 SIFT 算法进行分析,利用 Hessian 方法进行特征点检测后,再通过求取直方图能量的方法获取特征描述符,最后利用特征点间的欧氏距离进行特征匹配,并通过对特征点的相似性度量获取匹配结果。通过实验表明,该方法具有一定匹配效果,但由于 Hessian 方法检测的特征点中存在伪特征点,而且相似性度量过程没有考虑图像的仿射变换,使得匹配效果与鲁棒性不理想。Luo^[4]等将图像的一致性用于图像匹配,通过对图像进行分割获取区域图像,再将区域图像通过聚类的方法形成一致性图,最后通过种子生长法对特征点邻域进行相似性度量实现匹配。这种方法能够对图像进行匹配,但这种特征点邻域相似度度量的方法,没有考虑图像的全局特性,使得其匹配效果与鲁棒性能较差。解冰^[5]等将小波变换与粒子群方法相结合,用于图像匹配,对图像进行灰度直方图计算,再将图像经过小波变换分解后,通过粒子群算法进行分类,并对图像的相似性进行度量,选取出相似度较大的图像进行精匹配,获取匹配结果。通过实验表明,该方法能够较快地实现图像匹配。小波变换的方向性有限,导致分解所得图像的细节信息有所丢失,使得匹配结果存在错误,而且利用相似性度量实现精匹配的过程,忽略了相似度较小图像的处理,使得匹配结果中存在较多漏匹配。Yang^[6]等将自适应矢量场用于图像匹配,利用基于空间和曲率特征的滤波器对图像进行滤波处理,在通过曲线长度场构成的自适应矢量场进一步获取匹配结果。通过实验表明,该方法具有一定的鲁棒性能,但是匹配结果没有进行优化,使得匹配正确度有所降低。

虽然上述匹配方案在各类攻击下可以获取良好

的匹配准确度,但这些技术均没有考虑特征点之间的投影相关性,使得匹配精度有待进一步提升。为了改善几何变换下的图像匹配准确度,文中考虑特征点之间的投影相关性,设计基于改进 FAST 算子耦合投影约束法则的图像匹配算法。利用 FAST 联合 Harris 的方法获取图像特征。通过计算 Haar 小波与高斯曲率值,对特征点进行描述。通过求取特征点的归一化互相关系数实现特征点的匹配。通过特征点的投影关系建立投影约束法则,优化匹配结果。最后对所提算法进行实验验证。

1 所提图像匹配算法设计

基于改进 FAST 算子耦合投影约束法则的图像匹配算法过程见图 1。从图 1 可见,文中算法通过 FAST 算子检测图像的特征点后,再利用 Harris 算子对检测结果进行优化,以提高特征点的纯度。通过对提纯后特征点的 Haar 小波与高斯曲率值进行计算,获取特征描述子。利用特征点间的归一化互相关系数,对特征点的匹配度进行衡量,完成特征匹配。根据特征点的投影关系建立投影约束法则,去除错误匹配点,进一步提高了匹配结果的正确性。

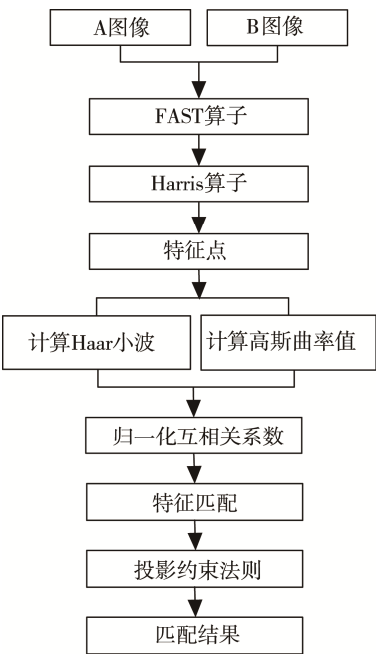


图 1 文中算法的匹配过程
Fig.1 The matching process of the algorithm in this paper

1.1 特征检测

在 Hessian 算子、Forstner 算子以及 Moravec 算子等多种特征检测算子中, FAST 算子为常用的特征检测算子之一, 其具有良好的仿射不变性。

FAST 算子检测特征点的过程中, 通过以任意像素点 v 为中心, 构建一个如图 2 所示的 Bresenham 圆形区域。通过求取像素点 v 及其邻域点的灰度差值, 判别其相似相^[7-8]。

$$S(v, x) = \sum_{x \in \text{circle}(p)} |D(v) - D(x)| \quad (1)$$

式中: $D(v)$ 与 $D(x)$ 分别为像素点 v 及其邻域像素点 x 的灰度值。

若圆形区域中具有大于或等于 12 个像素点为像素点 v 的非相似点, 则像素点 v 即被检测为特征点。

虽然 FAST 算子检测特征点的过程较为简洁, 但其检测结果中存在非极大值点等伪特征点。对此, 文中利用 Harris 算子, 对 FAST 算子的检测结果进行优化。

Harris 算子通过图像的梯度特征, 构建关联矩阵 M 。再通过 M 的行列式 D_{et} 与迹 T_r 来构建优化模型 W , 对特征点进行优化^[9-10]。

$$M = \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$W = \frac{D_{\text{et}} M}{T_r M + \alpha} \quad (3)$$

式中: I_x 与 I_y 分别为图像 I 在 x, y 轴上的梯度。 α 为一个任意小值, 其作用为避免分母为 0。

特征点通常为极大值点, 其对应的 Harris 响应值也较大, 因此, 可通过对较为集中的特征点对应的 Harris 响应值进行判断, 来辨别伪特征点。通过式(3)计算各特征点的 Harris 响应值, 然后设定阈值 R_T , 通过对比各特征点的 Harris 响应值与阈值 R_T 的大小, 来辨别伪特征点。若某一特征点的 Harris 响应值小于阈值 R_T , 则判定该特征点为伪特征点, 给予去除。

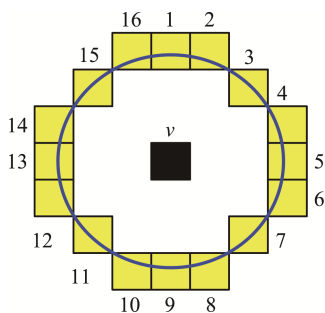


图 2 FAST 算子的示意
Fig.2 Schematic diagram of FAST operator

1.2 特征描述

特征点的描述可通过其主方向与特征向量来确

定。文中通过对特征点的 Haar 小波与高斯曲率值进行计算, 分别获取特征点的主方向以及特征向量, 从而实现特征描述。

在以特征点 v 为中心, 6θ (θ 为尺度) 为半径的圆 U 内, 采用尺度为 4θ 的 Haar 小波, 计算该圆沿着 x, y 轴方向的 Haar 小波响应值。并在该圆内采用扇角为 60° 的同心扇形旋转 1 周, 以求取旋转过程中获得的 Haar 小波响应最大值^[11-12]。该最大值对应的方向即为特征点的主方向。

高斯曲率是一种曲面的内在几何不变量, 可以较好地对像素点间的变化特征进行描述^[13], 圆域内像素点的高斯曲率值能够增加特征点的辨识度, 对特征点进行较好的描述^[14]。首先, 将圆 U 均分为 3 个同心圆域 $P_i (x, y) (i=1, 2, 3)$; 并求取每个圆域内像素点的高斯曲率值 F ^[13-14]:

$$F = \frac{P_y^2 L - 2P_x P_y M + P_x^2 N}{P_x^2 P_y^2 - (P_x P_y)^2} \quad (4)$$

其中 L, M, N 的表达式分别为:

$$L = \frac{(P_x, P_y, P_x^2)}{|P_x \times P_y|} \quad (5)$$

$$M = \frac{(P_x, P_y, P_x P_y)}{|P_x \times P_y|} \quad (6)$$

$$N = \frac{(P_x, P_y, P_y^2)}{|P_x \times P_y|} \quad (7)$$

获取到圆域内像素点的高斯曲率值后, 再从每个圆域内筛选出 10 个最大的高斯曲率值, 用于构成特征向量。由此可得, 特征点的特征向量 J 为一个 30 维的特征向量:

$$J = \{q_1, q_2, q_3 \cdots q_{30}\} \quad (8)$$

将 J 进行归一化计算, 以适应光照度的变换。

1.3 特征匹配

归一化互相关系数能够对光照度以及灰度等变化具有较好的鲁棒性, 因此, 文中利用特征点间的归一化互相关系数, 对特征点的匹配度进行衡量, 完成特征匹配, 以提高算法的匹配精准性以及鲁棒性。

对于图像 A 中大小为 $M \times N$ 的区域 E , 以及图像 B 中大小为 $M \times N$ 的区域 R , 令其平均像素值分别为 $\bar{E}$ 与 $\bar{R}$ 。归一化互相关系数为^[15-16]:

$$N_C = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (E_{ij} - \bar{E})(R_{ij} - \bar{R})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (E_{ij} - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (R_{ij} - \bar{R})^2}} \quad (9)$$

通过式(9)求取图像 A 中任意特征点 t , 与图像 B 中所有的特征点对应的归一化互相关系数, 并选取最大归一化互相关系数值对应的特征点作为特征

点 t 的匹配特征点。

1.4 基于投影关系的特征匹配优化

为了提高匹配准确度, 需要将匹配特征点中的错配点进行去除。正确匹配点具有仿射不变性, 能够很好地适应旋转、缩放等变换, 而错配点难以适应仿射变换^[17-18]。文中利用特征点的旋转、缩放以及平移变换构建投影关系函数, 建立投影约束法则, 去除错配点, 实现匹配优化。

令 $A(x, y)$ 与 $B(x', y')$ 为一对匹配点。以旋转角度 ϕ , 缩放量 $(G_x, G_y)^T$ 以及平移量 $(L_x, L_y)^T$, 构造 (x, y) 与 (x', y') 的投影关系函数。

$$Q = \sum_{i=1}^{30} \left\| A_{q_i} - \left(B_{q_i} \begin{pmatrix} \sin \phi & \cos \phi \\ \cos \phi & \sin \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_x \\ G_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_x \\ L_y \end{pmatrix} \right) \right\| \quad (10)$$

式中: A_{q_i} 与 B_{q_i} 分别为特征点 $A(x, y)$ 与 $B(x', y')$ 的特征向量。

通过式 (10) 可求取特征点间的仿射变换值, 以此建立如下投影约束法则。

首先, 通过式 (10) 求取每对匹配点的仿射变换值。从所有的值中, 筛选出最大仿射变换值 $Q_{\max}$ 与最小仿射变换值 $Q_{\min}$ 。

然后, 通过 $Q_{\max}$ 与 $Q_{\min}$ 构造如下约束阈值 Y_F 。

$$Y_F = \frac{Q_{\max} + Q_{\min}}{2} \quad (11)$$

由于投影关系函数反应了匹配点对经过仿射变换后的差异度, 通过投影关系函数式 (10) 求取的 Q 值越大, 表示经过仿射变换后匹配点对的差异度就越大, 此时说明匹配点对为错误匹配点对的可能性也就越大, 因此, 将所有匹配点的仿射变换值 Q 与 Y_F 进行比较。若某一匹配点对的仿射变换值 Q 满足 $Q > Y_F$, 则表示此匹配点对经过仿射变换后差异度过大, 认定该 Q 对应的匹配点为一对错配点, 给予去除, 从而实现匹配精度的优化。

2 实验结果与分析

为了对所提算法的匹配精准度以及鲁棒性进行验证, 文中选取文献[19]以及文献[20]中算法作为对照组, 以直观分析所提算法的匹配性能。文献[19]以及文献[20]中算法与文中算法一样, 都是基于像素匹配的方法。其中文献[19]通过 Harris 算子联合 Forsnter 算子的方法检测特征点, 并且通过 SIFT 方法获取描述子, 且对描述子进行了降维处理, 采用改进的最近邻方法实现匹配, 其采用的 Harris 算子与 Forsnter 算子均为匹配技术中较为常用的介质, 其具有一定的代表性与新颖性。文献[20]算法采用 SUR 算子获取特征点以及描述符, 利用欧几里得距离法完成特征匹配, 通过联合几何约束方法与 Delaunay 三角剖分方法实

现匹配优化, SUR 算子是匹配方法中的经典技术, 且该技术采用了几何约束方法与 Delaunay 三角剖分方法来优化匹配精度, 具有较好的新颖性与代表性, 因此, 文中将二者视为对照组。在 AMD 双核处理器、4 Gb 内存以及 Windows 7 系统的计算机上, 采用 Matlab 软件进行实验。通过多次试验, 将阈值 R_T 的较优值设置为 0.6。该实验的过程如下所述。

1) 采用 FAST 算子检测待匹配图像的特征点, 并通过 Harris 算子删除伪特征点。

2) 计算每幅图像特征点的 Haar 小波与高斯曲率值, 以获取相应的主方向与特征向量, 对各自的特征点进行描述。

3) 利用 2 幅图像特征点间的归一化互相关系数, 对特征点的匹配度进行衡量, 实现特征点的匹配。

4) 根据特征点的投影关系建立投影约束法则, 对匹配结果进行优化, 完成匹配。

通过将匹配结果与预设结果进行对比, 统计出正确匹配与错误匹配数量。不同算法对光照度变换、缩放变换以及旋转变换图像的匹配效果见图 3—5。由图 3—5 发现, 文中算法的匹配效果, 比图 3c 以及图 3d 中具有更多的匹配点。通过对图 4 中不同算法对缩放变换的匹配效果进行观察可见, 图 4e 比图 4c 以及图 4d 所示的匹配效果更好, 其正确匹配点最多。通过比较图 5 所示结果发现, 相对于 2 个对照组而言, 所提方法具有更多的匹配点以及更少的错配点, 见图 5e。这说明文中算法的匹配精准性较好, 鲁棒性较强。对多种仿射变换图像的匹配效果都较好, 因为, 文中采用 Harris 算子对 FAST 算子检测的特征点进行去伪存真, 使得特征点的纯度更高。同时文中还采用了对光照度以及灰度等变化具有鲁棒性的归一化相关系数来实现特征匹配, 从而提高其的匹配精准性。

对不同算法的匹配结果进行了量化统计, 见表 1—3。从表 1 可见, 文中算法的正确匹配率最高, 为 93.68%。从表 2 可见, 文中算法不仅正确匹配特征点个数最多, 为 182 个, 而且正确匹配率也最高, 为 91%。从表 3 可见, 文中算法不仅正确匹配率最高, 为 90.67%, 而且错误匹配特征点个数也最少, 为 15 个。

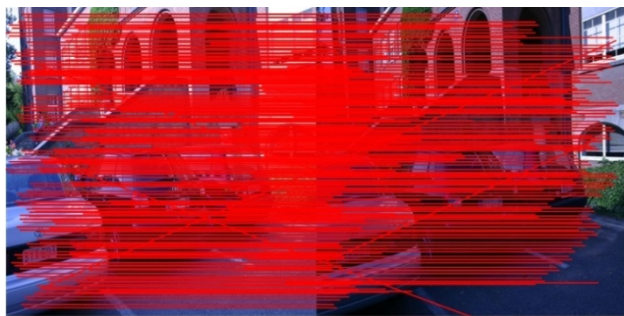
Mikolajczyk 数据集为图像匹配测试使用较多的一种数据集, 该数据集中包含了具有光照度变换、旋转变换等多种仿射变换在内的多组子集, 每个子集中又包含了 6 幅图像^[21]。从该数据集中的 Graf 子集中选取一组图像作为匹配对象, 并将其中一幅图像进行多尺度缩放变换。利用不同算法对缩放变换后的图像进行匹配, 并记录不同算法的匹配精准率与平均耗时。

不同算法的匹配精准率测试结果见图 6。通过分析图 6 可知, 缩放尺度越大, 各算法的匹配精准率就越小。与对照组算法相比, 文中算法的匹配精准率一

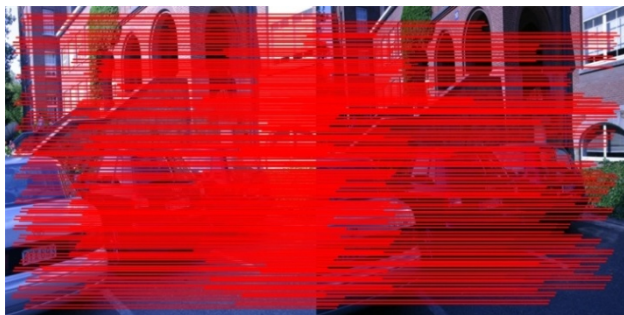


a A 图像

b B 图像



c 文献[19]匹配效果



d 文献[20]匹配效果

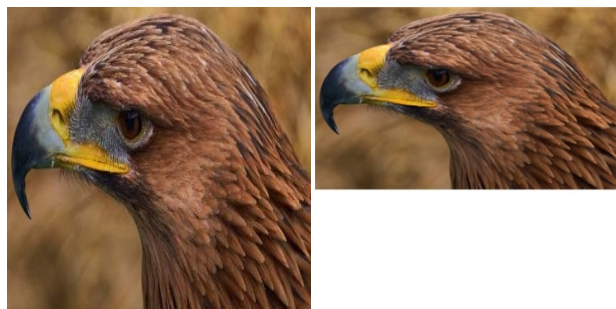


e 文中算法匹配效果

图 3 不同算法对光照度变换的匹配结果

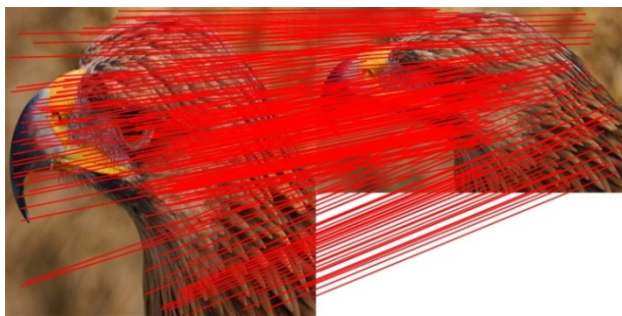
Fig.3 Matching results of different algorithms for illumination conversion

直最大。在缩放尺度为 30% 时, 文中算法的匹配精准率为 92.49%, 文献[19]算法的匹配精准率为 87.53%, 文献[20]算法的匹配精准率为 83.62%。不同算法的平均耗时见表 4, 通过观察表 4 可见, 文中算法的匹配速度最快, 文中算法的平均耗时为 3.25 s, 文献[19]算法的平均耗时为 4.69 s, 文献[20]算法的平均耗时为 3.87 s。说明了文中算法不仅具有较好的匹配精准率, 而且还具有较高的匹配效率。因为文中算法通过对特征点的 Haar 小波与高斯曲率值进行计算, 获取

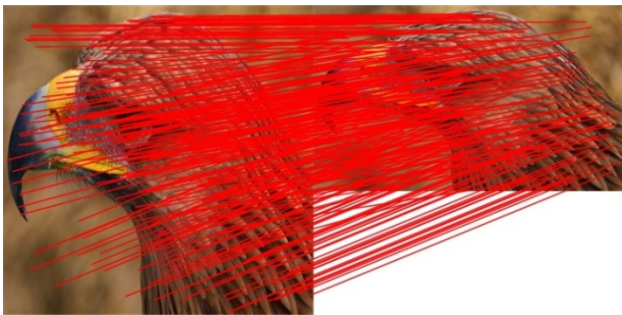


a A 图像

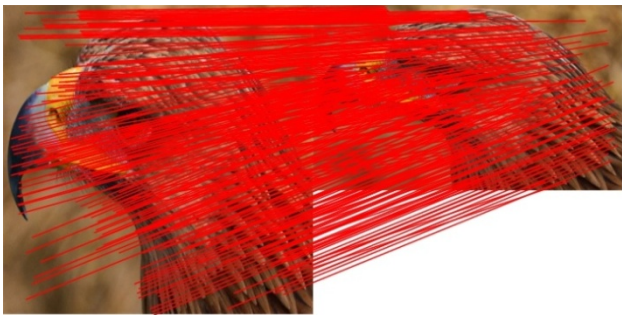
b B 图像



c 文献[19]算法匹配效果



d 文献[20]算法匹配效果



e 文中算法匹配效果

图 4 不同算法对缩放变换匹配结果

Fig.4 Matching results of scaling algorithms with different algorithms

较低维度的特征向量, 对特征点进行描述。同时文中还利用匹配点的投影关系, 建立投影约束法则, 将错配点去除, 对匹配结果进行优化, 从而提高了算法的匹配精准率以及匹配效率。文献[19]方法将 Harris 算子与 Forstner 算子相结合, 以用于检测特征点, 并对 SIFT 描述子进行降维处理后, 通过改进最近邻匹配方法获取匹配结果。由于采用 Harris 算子与 Forstner 算子相结合的方法进行特征检测时, 计算复杂度较高, 而且该方法没有对匹配点进行优化, 导致算法的

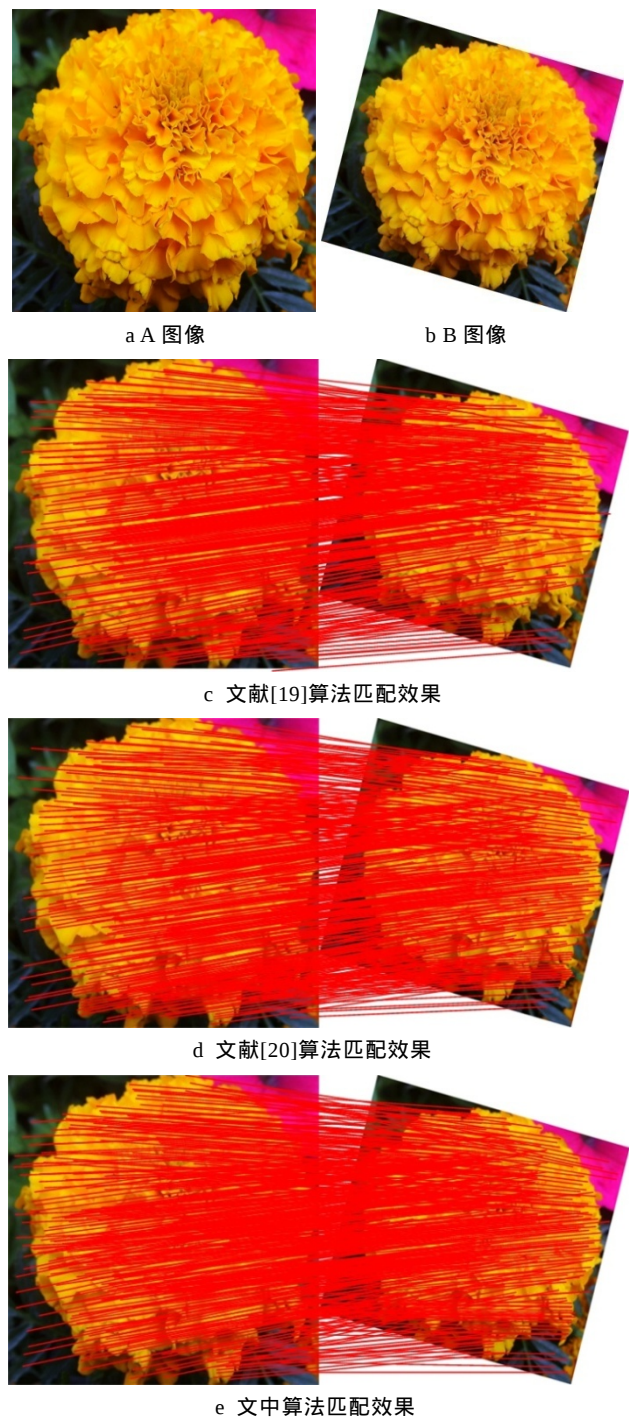


图 5 不同算法对旋转变换匹配结果
Fig.5 Matching results of different algorithms for rotation transformation

匹配耗时增加，精准率不佳。文献[20]方法中通过 SURF 算法获取特征点以及描述符，并通过计算欧几里得距离完成匹配，将几何约束方法与 Delaunay 三角剖分方法相结合，对匹配点进行优化。由于 SURF 描述符维度较高，而且几何约束方法与 Delaunay 三角剖分方法相结合的匹配点优化过程，没有考虑特征点之间的投影相关性，导致算法的匹配耗时有所增加，而且匹配精准率有所下降。

表 1 图 3 中不同算法的匹配统计结果
Tab.1 Matching statistics results of different algorithms in Fig.3

算法名称	特征点总数	正确匹配特征点个数	错误匹配特征点个数	正确匹配率/%
文献[19]中算法	380	338	18	88.95
文献[20]中算法	380	347	12	91.32
文中算法	380	356	8	93.68

表 2 图 4 中不同算法的匹配统计结果
Tab.2 Matching statistics results of different algorithms in Fig.4

算法名称	特征点总数	正确匹配特征点个数	错误匹配特征点个数	正确匹配率/%
文献[19]中算法	200	158	23	79.00
文献[20]中算法	200	168	16	84.00
文中算法	200	182	12	91.00

表 3 图 5 中不同算法的匹配统计结果
Tab.3 Matching statistics results of different algorithms in Fig.5

算法名称	特征点总数	正确匹配特征点个数	错误匹配特征点个数	正确匹配率/%
文献[19]中算法	300	243	26	81.00
文献[20]中算法	300	257	21	85.67
文中算法	300	272	15	90.67

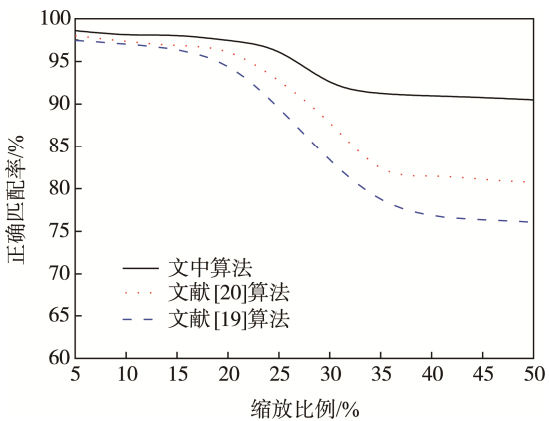


图 6 尺度缩放变换下的匹配精准率测试结果
Fig.6 Matching accuracy test results under scale scaling transformation

表 4 不同算法的平均耗时测试
Tab.4 Average time-consuming test for different algorithms

所用算法	平均耗时/s
文献[19]	4.69
文献[20]	3.87
文中	3.25

3 结语

文中在 Harris 算子与 FAST 算子的基础上,设计了投影约束法则下的图像匹配算法。利用 Harris 方法对 FAST 算子检测的特征点进行优化,去除伪特征点,提高匹配精准率。计算特征点的 Haar 小波与高斯曲率值,实现特征描述。采用对光照度以及灰度等变化适应性较强的归一化互相关系数方法完成特征匹配,提高算法的鲁棒性。利用特征点的旋转、缩放以及平移变换构建投影关系函数,建立投影约束法则,去除错配点,进一步提高算法的匹配精准率。通过实验结果对所提算法的匹配效果以及匹配效率进行了验证。结果显示所提算法在多种几何变换下具有较高的匹配正确率与较低的匹配耗时。所提算法具有良好的匹配精度与鲁棒性,在目标追踪、图像检索以及知识产权保护等领域具有较好的参考价值。

参考文献:

- [1] 黄友文, 黄雅兰. 一种基于 Harris 与 SIFT 算子结合的商标搜索方法[J]. 电视技术, 2014, 38(3): 35—39.
HUANG You-wen, HUANG Ya-lan. A Trademark Search Method Based on Combination of Harris and SIFT Operator[J]. Television Technology, 2014, 38(3): 35—39.
- [2] 张昊. 基于圆域梯度信息耦合角度相似法则的图像匹配算法[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 50—56.
ZHANG Hao. Image Matching Algorithm Based on Angle Similarity Rule Coupling Circular Gradient Information[J]. Journal of Jinggangshan University (Natural Science Edition), 2018, 39(5): 50—56.
- [3] LAKSHMI D K, VAITHIYANATHAN V. Image Registration Techniques Based on the Scale Invariant Feature Transform[J]. IETE Technical Review, 2017, 34(1): 22—29.
- [4] LUO Sheng, ZHOU Hong-ming, XU Jing-hua. Matching Images Based on Consistency Graph and Region Adjacency Gaphs[J]. Signal, Image and Video Processing, 2017, 11(3): 501—508.
- [5] 解冰, 李海娟. 基于小波变换和改进的粒子群的新型图像匹配算法的研究[J]. 电脑知识与技术, 2018,

14(11): 175—178.

- XIE Bing, LI Hai-juan. A New Image Matching Algorithm Based on Wavelet Transform and Improved Particle Swarm Optimization[J]. Computer Knowledge and Technology, 2018, 14(11): 175—178.
- [6] YANG Jin-feng, SHI Yi-hua, JIA Gui-min. Finger-vein Image Matching Based on Adaptive Curve Transformation[J]. Pattern Recognition, 2017, 66(1): 34—43.
- [7] 赵小强, 徐铸业. 基于改进的 FAST 和 FREAK 的图像匹配算法[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(3): 83—87.
ZHAO Xiao-qiang, XU Zhu-ye. Image Matching Algorithm Based on Improved FAST and FREAK[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(3): 83—87.
- [8] JIA Di, CAO Jun, SONG Wei-dong. Colour FAST (CFAST) Match: Fast Affine Template Matching for Color Images[J]. Electronics Letters, 2016, 52(14): 1220—1221.
- [9] WANG Le, FEI Min-rui, YANG Tai-cheng. Circular Mask and Harris Corner Detection on Rotated Images[J]. Life System Modeling and Simulation, 2017, 761(1): 524—535.
- [10] XU Bing, CHEN Jian-hui. Research on Extraction, Matching and Application Based on Feature Points of Image[J]. Agro Food Industry Hi-Technology, 2017, 28(3): 1606—1610.
- [11] WEI Y H. A Hybrid Approach for Brain Image Registration With Local Constraints[J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2017, 24(1): 73—85.
- [12] 兰红, 王秋丽. 基于聚类 and 马氏距离的 SURF 昆虫图像匹配算法[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(4): 202—207.
LAN Hong, WANG Qiu-li. SURF Insect Image Matching Algorithm Based on Clustering and Mahalanobis Distance[J]. Computer Applications and Software, 2016, 33(4): 202—207.
- [13] TORU K, ATSUNORI K, SOUSHI K. Satellite Attitude Determination and Map Projection Based on Robust Image Matching[J]. Remote Sensing, 2017, 9(1): 1—20.
- [14] LI Gun, LI Cui-hua, ZHU Ying-pan. An Improved Speckle-Reduction Algorithm for SAR Images Based on Anisotropic Diffusion[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(17): 17615—17632.
- [15] VINH Q D, CUONG C P, JAE W J. Robust Adaptive Normalized Cross-Correlation for Stereo Matching Cost Computation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2017, 27(7): 1421—1434.
- [16] ISMAILI E M, ELHAJ E. A New Method for Fingerprint Matching Using Phase-Only Auto and Cross-Bispectrum[J]. Signal, Image and Video Processing, 2016, 10(7): 1327—1333.
- [17] LUKAS R, ANDREAS K, HELMUT M. Wide-Base-

- line Image Matching with Projective View Synthesis and Calibrated Geometric Verification[J]. PFG-Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geo-information Science, 2017, 85(2): 85—95.
- [18] LI Jia-yuan, HU Qing-wu, AI Ming-yao. Robust Feature Matching for Geospatial Images Via An Affine-invariant Coordinate System[J]. The Photogrammetric Record, 2017, 32(159): 317—331.
- [19] 李兰, 谢勤岚. 一种改进 Harris-SIFT 算子的图像匹配算法[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(4): 32—34.
LI Lan, XIE Qin-lan. An Improved Image Matching Algorithm Based on Harris-SIFT[J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(4): 32—34.
- [20] DOU Jian-fang, QIN Qin, TU Zi-mei. Robust Image Matching With Cascaded Outliers Removal[J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2017, 27(3): 480—493.
- [21] WAN Xue, LIU Jian-guo, YAN Hong-shi. Illumination-Invariant Image Matching for Autonomous UAV Localization Based on Optical Sensing[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 119(2): 198—213.