

文章编号 1004-924X(2015)01-0295-07

融合全局-颜色信息的尺度不变特征变换

王 睿, 朱正丹*

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 由于尺度不变特征变换(SIFT)算法只针对图像的局部特征进行描述且忽略了图像的彩色信息, 当待匹配图像中存在大量形状相似区域时, 误匹配率很高。本文对 SIFT 图像匹配法进行了改进, 提出了 SCARF(Shape-color Alliance Robust Feature)图像匹配算法。为解决 SIFT 常出现的误匹配现象, 构造的 SCARF 算子利用 SIFT 检测子提取图像的特征点集, 通过建立同心圆坐标系, 在 SIFT 原有框架的基础上融入全局形状信息和颜色不变信息, 并采用欧氏距离作为匹配代价函数进行描述子匹配。对包括 SCARF 算法和 SIFT 算法在内的 5 种不同匹配算法通过 INRIA 数据库进行了实验验证, 实验结果表明: SCARF 算法在图像模糊、局部特征相似、JEPG 压缩和光照变化等复杂变换情况下, 匹配准确率优于 SIFT 等其他算法, 降低了误匹配的概率, 明显提高了匹配的稳定性和鲁棒性。

关键词: 尺度不变特征变换; 颜色描述子; 全局描述子; SCARF 算法

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152301.0295

SIFT matching with color invariant characteristics and global context

WANG Rui, ZHU Zheng-dan*

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering,
Beihang University, Beijing 100191, China)

* Corresponding author, E-mail: syl017133@aspe.buaa.edu.cn

Abstract: As Scale Invariant Feature Transform(SIFT)describes local characteristics of images only and ignores the color information of the images, it has higher match errors when a lot of similar regions in the images are matched. This paper improves the SIFT algorithm and proposes a novel method as an extension of the SIFT, called a Shape-color Alliance Robust Feature (SCARF) descriptor, to resolve the problems mentioned above. The proposed approach SCARF uses the SIFT descriptor to extract the feature point set of the images. Then, by building a concentric-ring model, it integrates a color invariant space and a shape context with the SIFT to construct the SCARF descriptor, and uses the Euclidean distance as cost function to match the descriptor. A comparative evaluation for different descriptors is carried out by the INRIA database, which verifies that the SCARF approach provides better results than other four state-of-the-art related methods in many cases, such as viewpoint change, zoom+rotation, image blur and illumination change. It concludes that the SCARF reduces the probability of mismatch and improves the stability and robustness of matching process greatly.

Key words: Scale Invariant Feature Transform (SIFT); color invariance; global information; Shape-color

收稿日期:2014-10-29;修订日期:2014-11-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60974108)

Alliance Robust Feature (SCARF)

1 引言

点匹配是指在同一场景中两个或两个以上的图像对应点的匹配,它在计算机视觉和模式识别领域都有重要应用,如目标识别和跟踪、三维重建、立体匹配、恢复摄像机运动、医疗诊断、图像检索、视觉导航和非接触测量等^[1-3]。

2004年,David Lowe提出的尺度不变特征变换(Scale Invariant Feature Transform, SIFT)算法是一种著名的点匹配算法^[4]。SIFT具有良好的匹配性能,多年来一直受到广泛研究。2004年,Yan Ke采用主成分分析方法(PCA)对图像的特征描述向量进行降维,提出了一种新的算法—PCA-SIFT算法,一定程度上降低了算法的复杂度,提高了算法效率。2005年,Mikolajczyk和Schmid将SIFT、形状上下文等几种经典匹配算法进行了实验验证和比较,证明了SIFT是其中性能最好的匹配算法,并在此基础上提出了梯度局部定向直方图^[5](Gradient Location Orientation Histogram, GLOH)算法。同年,Mortensen^[6]提出一种全新的改进算法,通过提取SIFT特征点,采用等价形状上下文描述SIFT点的局部曲率分布,并将其和SIFT描述子相结合。2006年,Bay提出利用Harr小波的局部响应,并采用近似Hessian矩阵运算的加速鲁棒特征(Speeded Up Robust Features, SURF)^[7-8]算法,使得SIFT匹配算法的运算速度得到有效提高。Abdel-Hakim和Farg于2006年提出了一种具有颜色特征不变量的CSIFT(Color-SIFT)^[9]算法,该算法在特征点中融入了颜色信息,故具有一定的颜色不变性。2009年纪华等人提出了一种结合全局信息的SIFT算法^[10],有效解决了图像中大量相似局部区域所造成的误匹配问题。2009年,Guoshen Yu等人针对SIFT的不完全仿射不变性,提出了具有全仿射尺度不变特征的ASIFT^[9](Affine SIFT)算法。2011年曾峦等人分别对SIFT特征提取和RANSAC方法进行了改进^[11],从而提高了匹配算法的准确率。2013年赵立荣等人提出一种多尺度改进的

SURF算法^[2],提高了特征点匹配的鲁棒性。

上述方法都是针对SIFT在某一方面进行改进,但尚不能满足目前的应用需求。

SIFT算法虽具有很好的平移、旋转、尺度等不变性,然而该算法只针对图像的局部特征进行描述且忽略了图像的彩色信息,当待匹配图像中存在大量形状相似区域时,误匹配率会很高。对此,本文在SIFT算法中融入了图像的全局形状信息和颜色不变信息,构建了新型的SCARF(Shape-Color Alliance Robust Feature)描述子,从而可以有效提高图像匹配的准确率,使算法的性能得到明显提升。

2 SCARF 算法框架

通过融合全局信息和颜色信息,构造一种全新的算法框架SCARF。具体流程如图1所示。

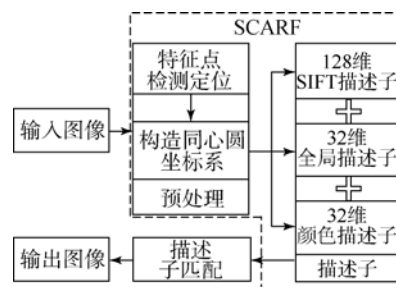


图1 SCARF流程图

Fig. 1 SCARF flow chart

2.1 全局信息描述子

SIFT是一种典型的局部特征算法^[12],其在处理有局部相似区域的图片时常发生匹配模糊,从而导致误匹配现象,如图2所示。



图2 SIFT算法处理相似区域图片的结果

Fig. 2 Results of SIFT algorithm on similar regions

考虑到图像的全局信息包含了可以区分局部相似区域的目标信息,若在匹配过程中能够将图像的全局信息与 SIFT 描述子相融合,则上述问题将得到有效解决。

本文通过建立同心圆坐标系,统计分布在坐标系中子圆环区域内特征点的主曲率信息来构造全局描述子。具体步骤如下:

(1)特征点提取。采用 SIFT 检测子提取图像特征点集,所提取的特征点集有很好的尺度和平移不变性。

(2)构造同心圆坐标系。对提取的所有特征点,分别构造相应的同心圆坐标系。以第 n 个特征点为例,以该点为圆心, $k \times \sigma_n$ 为半径,即可建立同心圆坐标系。其中, σ_n 是特征点 n 所对应的尺度,为保证同心圆的半径不超过图像尺寸,可通过调整实验参数 k 来实现。同心圆取 32 个,圆的半径以 $k \times \sigma_n / 32$ 等量递增。

(3)计算特征点的主曲率。采用 2×2 的 hessian 矩阵计算特征点的主曲率信息:

$$\mathbf{H}(x, y) = \begin{pmatrix} L_{xx} & L_{xy} \\ L_{xy} & L_{yy} \end{pmatrix} = I(x, y) * \begin{pmatrix} g_{xx} & g_{xy} \\ g_{xy} & g_{yy} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: L_{xx} 、 L_{yy} 和 L_{xy} 是图像和高斯函数二阶偏导数 g_{xx} 、 g_{yy} 和 g_{xy} 卷积得到的。通过求解上述矩阵,得到矩阵的两个特征值,将矩阵 $\mathbf{H}(x, y)$ 特征值中绝对值较大的那个 $|e(x, y)|$ 定义为特征点的主曲率:

$$c(x, y) = |e(x, y)|. \quad (2)$$

(4)构造全局描述子。以第 n 个特征点为例,统计同心圆中 32 个子圆环区域内其他特征点的分布,依次对每个子区域内特征点的主曲率值进行累加,并利用公式(3)对特征点进行反向的高斯距离加权,得到此特征点的全局信息描述子:

$$\omega(x, y) = 1 - e^{-((x-x_k)^2 + (y-y_k)^2) / 2\sigma_k}, \quad (3)$$

其中: (x_k, y_k) 是特征点的坐标; σ_k 是相对应的尺度值。对每个特征点,相对应的圆环 i 中构造 32 维的描述子 $\mathbf{G} = [G_1, G_2, \dots, G_i, \dots, G_{32}]$ 中的第 i 维 G_i 。

设在第 i 个圆环中包含 J_i 个特征点,则 G_i 定义为如下所示:

$$G_i = \sum_{j=1}^{J_i} c(x_{ij}, y_{ij}) \omega(x_{ij}, y_{ij}), \quad (4)$$

其中: (x_{ij}, y_{ij}) 是圆环 i 中第 j 个特征点, $c(x_{ij}, y_{ij})$ 是它的主曲率。

2.2 颜色信息描述子

颜色是图像的固有特征之一,它能够在特征点描述和匹配过程中提供区分信息。若忽略颜色信息,会使得匹配算法在处理彩色图像时受到影响,导致发生误匹配。

本文根据 Kubelka-Munk 理论对图像的颜色信息进行处理,求出颜色不变量,从而构造颜色描述子。具体步骤如下:

(1)特征点提取与构造同心圆坐标系。为简化算法流程,提高算法效率,采用了 2.1 节中的特征点集与坐标系。

(2)根据 Kubelka-Munk 理论计算颜色特征不变量。它是物体的光谱辐射特性的一种表达:

$$E(\lambda, \tilde{x}) = e(\lambda, \tilde{x}) [1 - \rho_f(\tilde{x})]^2 R_\infty(\lambda, \tilde{x}) + e(\lambda, \tilde{x}) \rho_f(\tilde{x}), \quad (5)$$

其中: λ 是光的波长; \tilde{x} 表示观测位置; $e(\lambda, \tilde{x})$ 为光的光谱强度; $\rho_f(\tilde{x})$ 代表 \tilde{x} 处的菲涅耳反射系数; $R_\infty(\lambda, \tilde{x})$ 表示材料的反射率; $E(\lambda, \tilde{x})$ 为观测处的反射谱。一般情况下, $e(\lambda, \tilde{x})$ 仅与位置有关,改写 $e(\lambda, \tilde{x})$, 则式(5)变为:

$$E(\lambda, \tilde{x}) = i(\tilde{x}) \{ [1 - \rho_f(\tilde{x})]^2 R_\infty(\lambda, \tilde{x}) + \rho_f(\tilde{x}) \}. \quad (6)$$

对 λ 分别求一阶导数和二阶导数,然后相除得:

$$K = \frac{E_\lambda}{E_{\lambda\lambda}} = \frac{\partial E / \partial \lambda}{\partial^2 E / \partial^2 \lambda} = \frac{\partial R_\infty(\lambda, \tilde{x}) / \partial \lambda}{\partial^2 R_\infty(\lambda, \tilde{x}) / \partial \lambda^2} = f[R_\infty(\lambda, \tilde{x})]. \quad (7)$$

K 为颜色不变量的一种表述,其仅与材料的反射率相关。在符合人眼视觉系统和 CIE-1964-XYZ 标准的条件下,彩色图像的 RGB 分量和 $(E, E_\lambda, E_{\lambda\lambda})$ 的关系近似为:

$$\begin{pmatrix} E \\ E_\lambda \\ E_{\lambda\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.06 & 0.63 & 0.27 \\ 0.30 & 0.04 & -0.35 \\ 0.34 & -0.60 & 0.17 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}. \quad (8)$$

彩色图像颜色不变量 K 可由上述公式综合求得。

(3)构造颜色描述子。对每个特征点,在其所创建的同轴圆坐标系中,分别统计 32 个圆环区域内分布的特征点的颜色不变量 K ,利用公式(3)对特征点进行反向高斯距离加权,形成 32 维的颜色描述子: $C=[C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_{32}]$ 。其中,在相对应的圆环 i 中构造 C_i 。因此 C_i 可以被定义为如下形式:

$$C_i = \sum_{j=1}^{J_i} K(x_{ij}, y_{ij}) \omega(x_{ij}, y_{ij}), \quad (9)$$

其中: $K(x_{ij}, y_{ij})$ 是第 i 个圆环内第 j 个特征点的颜色不变量。最后得到了 32 维颜色描述向量,对其进行归一化处理,保持对光照的不变性。

2.3 SCARF 描述子框架和匹配策略

根据 2.1 和 2.2 两节的分析,结合 SIFT 算法中原有 128 维特征描述子的定义,改进的 SCARF 描述子框架定义如下:

$$\text{SCARF} = \begin{bmatrix} \alpha S \\ \beta G \\ (1-\alpha-\beta)C \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中: S 是 128 维 SIFT 描述子; G 是 32 维全局信息描述子; C 是 32 维颜色信息描述子; α 和 β 是相对应的权重参数。组合上述 3 种描述子一共可以得到 192 维特征描述子。

根据上述框架,SCARF 算法的匹配代价函数定义如下:

$$d = \alpha d_s + \beta d_G + (1-\alpha-\beta) d_C, \quad (11)$$

其中: d_s 、 d_G 和 d_C 分别是 SIFT,全局描述子 G 和颜色描述子 C 的匹配代价函数; α 和 β 为公式(10)中的权重参数。

d_s 可采用特征描述子的欧式距离进行计算,具体公式如下:

$$d_s = |S_i - S_j| = \sqrt{\sum_{k=1}^{128} [S_i(k) - S_j(k)]^2}. \quad (12)$$

全局描述子 G 和颜色描述子 C 是在统一的

坐标系下构造的,因此它们的匹配代价函数与 d_s 相似,也采用欧式距离进行计算:

$$d_G = |G_i - G_j| = \sqrt{\sum_{k=1}^{32} [G_i(k) - G_j(k)]^2}. \quad (13)$$

$$d_C = |C_i - C_j| = \sqrt{\sum_{k=1}^{32} [C_i(k) - C_j(k)]^2}. \quad (14)$$

采用简单的最近邻策略进行匹配,通过设置合适阈值 T 来剔除误匹配。

3 实验部分

3.1 匹配评价准则与标准数据集

查全率(recall)和错误率(1-precision)是图像匹配算法中一种常用的评价指标。查全率为匹配成功的特征点数与总匹配特征点数的比值:

$$\text{recall} = \frac{\# \text{ correct } \cdot \text{ matches}}{\# \text{ correspondences}}. \quad (15)$$

错误率为错误的匹配点与总的匹配点数的比值:

$$1 - \text{precision} = \frac{\# \text{ false matches}}{\# \text{ total matches}}. \quad (16)$$

通过改变阈值 T ,来画出查全率和错误率的曲线图。一般曲线位置越高代表匹配效果越好。

实验采用的测试图像来源于 Mikolajczyk 05 标准数据集,包含了 8 组图像序列(图 3),5 种不同的图像变化:视场角变化,图像模糊,JPEG 压缩,光照变化和尺度旋转变化。每组图像序列有 6 张相同场景的图片,其中 Wall 序列和 Graffiti 序列代表了视场角变化(图 3(a)和图 3(b)),Boat 序列和 Bark 序列代表了尺度旋转变化(图 3(c)和图 3(d)),图像模糊则由 Bikes 序列和 Tree 序列来进行实验(图 3(e)和图 3(f)),Leuven 序列代表了光照变化,Ubc 序列是代表了 JPEG 压缩。

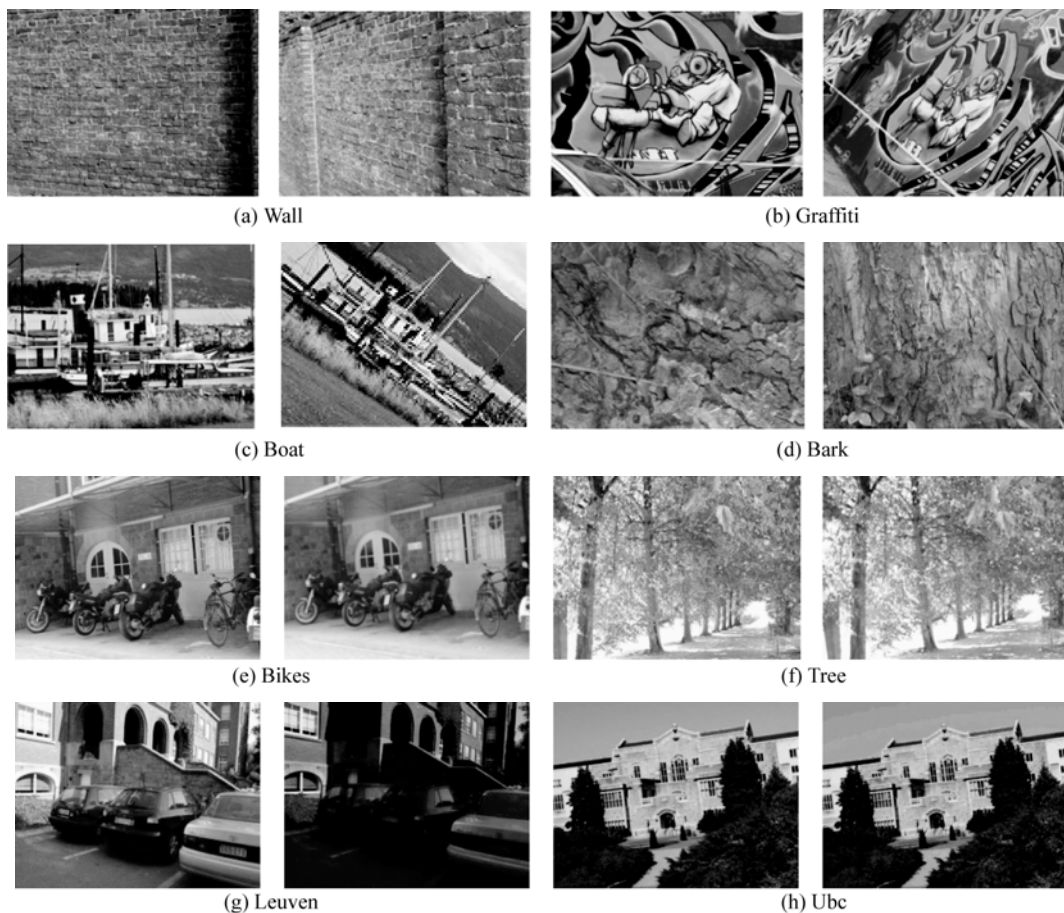


图 3 INRIA 图像序列样图

Fig. 3 Sample images of INRIA datasets

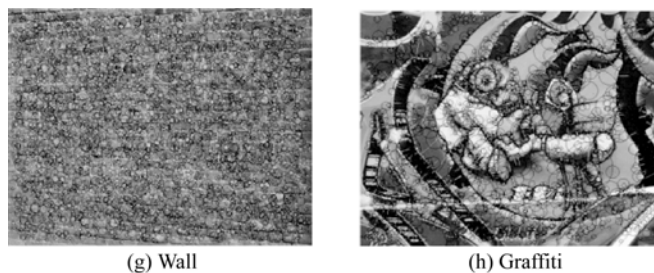


图 4 SCARF 描述子样图

Fig. 4 Sample images of SCARF descriptor

3.2 实验结果分析

在实验中,将 SCARF 描述子与下列 4 种 SIFT 相关的描述子进行比较:(1)标准 SIFT 描述子;(2)Abdel-Hakim 和 Farag 在 2006 年提出

的 CSIFT 算子;(3)Yan Ke 于 2004 年提出的 PCA-SIFT 算子;(4)Mortensen 等人 2005 年提出的 SIFT+GC 描述子。用查全率和错误率的曲线图来描述实验结果,如下图所示。

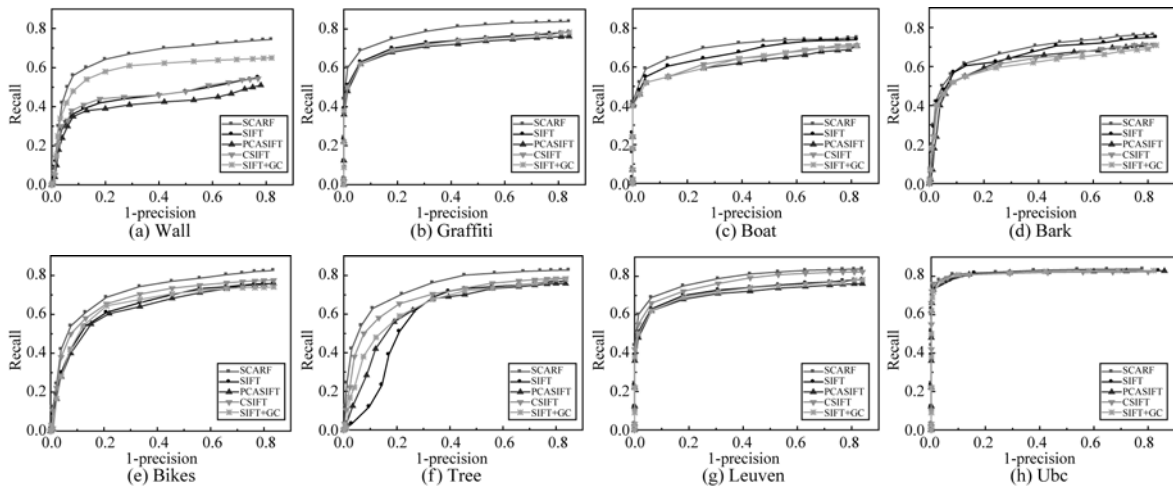


图 5 几种方法对不同目标的实验结果曲线图

Fig. 5 Recall vs. 1-precision curves of several methods on different scenes

首先对 Wall 和 Graffiti 序列进行匹配,来评价 5 种描述子的性能。图 5(a)描述了 Wall 序列的实验结果。由于该序列的纹理结构有很强的局部相似性,故仅仅描述局部信息易导致很高的误匹配率。从图可以看出,相对于其他 3 种算子,SCARF 和 SIFT+GC 有更好的曲线,即在处理有局部相似纹理结构的图片时,SCARF 和 SIFT+GC 的效果更为出色。图 5(b)绘制了 Graffiti 序列的实验曲线,可以看出 SCARF 的曲线稍稍高于另外 4 种算子。这是因为该算法融合了 3 种相对独立的描述子,因此具有更好的独特性。

采用 Boat 和 Bark 序列进行尺度和旋转变化的实验,Bikes 和 Boat 序列进行图像模糊实验。实验结果分别如图 5(c)(d)(e)(f)所示。上述 5 种描述子都是基于 SIFT 检测子进行点特征的提取,因此都具有很好的尺度和旋转不变性。由图可见,由于在构造 SCARF 的过程中考虑了尺度和旋转变化的,采用同心圆建立特征描述区域这一过程并没有降低 SCARF 的尺度和旋转不变性。另外,SCARF 提供了更多的可区分信息,因此算法的性能反而稍稍优于另外 4 种算子,从图 5(c)(d)中可以看出,SCARF 曲线与另外 4 种算子比较相似,只是稍稍高出一一点。由于 5 种算子的抗噪声和抗模糊性能也都是基于 SIFT 所提取的特征点,因此在 Bikes 和 Boat 实验中,几种算法的性能基本类似,从图 5(e)、5(f)也可以看出。

最后对 Leuven 和 Ubc 序列分别进行实验

证,实验结果如图 5(g)、5(h)所示。由于 5 种算子都是基于 SIFT 演变而来的,都对描述向量做了归一化处理,因此对光照变化都有不错的适应性。从图 5(g)还可以看出,SCARF 描述子曲线要高于另外 4 种算子,即 SCARF 性能要优于另外 4 种算子。这是因为它补充了 32 维颜色描述向量,对图像的大量光照变化具有更好的稳定性和鲁棒性,因此对光照变化具有更好的不变性。在处理 ubc 序列中,5 种算子的曲线图都很相似,说明在处理 JPEG 压缩时 5 种描述子基本性能相似。

4 结 论

本文在 SIFT 算法基础上提出了一种改进的图像匹配算法——SCARF 算法。该算法根据形状上下文算法,简化了极坐标;通过直接建立环形区域,并根据 SIFT 提取的特征点得到了 32 维全局形状描述向量。对于颜色不变信息,根据 Kubelka—Munk 的理论求得颜色不变量 K ,并利用所建立的环形区域得到了 32 维颜色不变描述向量。实验证实:SCARF 算法在图像模糊、局部特征相似、JPEG 压缩和光照变化等情况下均具有更好的鉴别性和鲁棒性,匹配效果优于其他算法。该算法可以提高图像匹配的适用范围。但仍然存在一定的局限性,在描述子维数和实时性方面,仍有一定的不足,未来将着重从这两个方面对算法进行改进。

参考文献:

- [1] 刘志文,刘定生,刘鹏.应用尺度不变特征变换的多源遥感影像特征点匹配[J].光学精密工程,2013,21(8):2146-2153.
LIU ZH W, LIU D SH, LIU P. SIFT feature matching algorithm of multi-source remote image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(8):2146-2153. (in Chinese)
- [2] 赵立荣,朱玮,曹永刚,等.改进的加速鲁棒特征算法在特征匹配中的应用[J].光学精密工程,2013,21(12):3263-3271.
ZHAO L R, ZHU W, CAO Y G, et al.. Application of improved SURF algorithm to feature matching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (12): 3263-3271. (in Chinese)
- [3] 韩冬松,何昕,魏仲慧,等.采用区域特征匹配的三维弹痕自动配准[J].液晶与显示,2014,29(5):761-767.
HAN D S, HE X, WEI ZH H, et al.. Automatic registration of 3-D bullet marks by matching regional features [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*,2014,29(5):761-767. (in Chinese)
- [4] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [5] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. A performance evaluation of local descriptors [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(10): 1615-1630.
- [6] MORTENSEN E N, DENG H, SHAPIRO L. A SIFT descriptor with global context [C]. 2005 IEEE Computer Society Conference on CVPR, 2005: 184-190.
- [7] BAY H, TUYTELAARS T, VAN GOOL L. Surf: Speeded up Robust Features [M]. Computer Vision-ECCV 2006, Springer, 2006: 404-417.
- [8] 苏可心,韩广良,孙海江.基于SURF的抗视角变换图像匹配算法[J].液晶与显示,2013,28(4):626-632.
SU K X, HAN G L, SUN H J. Anti-view point changing image matching algorithm based on SURF [J]. *Chinese journal of Liquid Crystals and Displays*,2013,28(4):626-632. (in Chinese)
- [9] ABDEL-HAKIM A E, FARAG A A. CSIFT: A SIFT descriptor with color invariant characteristics [C]. 2006 IEEE Computer Society Conference on Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2006: 1978-1983.
- [10] 纪华,吴元昊,孙宏海,等.结合全局信息的SIFT特征匹配算法[J].光学精密工程,2009,17(2):439-444.
JI H, WU Y H, SUN H H, et al.. SIFT feature matching algorithm with global information [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 439-444. (in Chinese)
- [11] 曾峦,王元钦,谭久彬.改进的SIFT特征提取和匹配算法[J].光学精密工程,2011,19(6):1391-1397.
ZENG L, WANG Y Q, TAN J B. Improved algorithm for SIFT feature extraction and matching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1391-1397. (in Chinese)
- [12] 王灿进,孙涛,陈娟.局部不变特征匹配的并行加速技术研究[J].液晶与显示,2014,29(2):266-274.
WANG C J, SUN T, CHEN J. Speeding up local invariant feature matching using parallel technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(2): 266-274. (in Chinese)

作者简介:



王睿(1965—),女,北京人,博士,副教授,主要研究工作是计算机视觉,数字光电信号处理,光电成像与模式识别。E-mail: wangr@buaa.edu.cn



朱正丹(1990—),男,安徽合肥人,硕士研究生,2010年于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事机器视觉等方面的研究。E-mail: syl017133@aspe.buaa.edu.cn