

高分辨率遥感图像 SIFT 和 SURF 算法 匹配性能研究

齐冰洁, 刘金国*, 张博研, 左洋, 吕世良

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 遥感图像匹配是图像校正、拼接的基础。由于遥感图像特征相似度高, 重叠区域小, 遥感图像对匹配算法的要求更高。本文首先从特征检测、特征描述和特征匹配三个方面, 比较了 SIFT 算法和 SURF 算法在计算速度和准确度方面性能, 然后研究了算法对遥感图像重叠度、度量距离的要求, 并针对 SURF 算法对特征方向误差敏感的特点, 提出一种 oSURF 算法; 最后利用卫星 1A 级条带遥感图像分析各个算法优劣性。测试结果表明, 相比于 SIFT 算法, SURF 算法计算速度为 SIFT 的 3 倍, 需要的图像重叠宽度仅为 1.25 倍描述向量尺寸, 而在保证同样匹配率的情况下, SIFT 算法则需要图像重叠宽度为 1.5 倍描述向量尺寸。本文提出的 oSURF 算法在保证计算速度的同时, 准确度相对于 SURF 算法提升 5% ~ 10%, 因此, oSURF 算法更适合 1A 级条带遥感图像的拼接。

关键词: 遥感图像; 特征匹配; SIFT; SURF; 重叠度

中图分类号: TP391 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20171003.0331

Research on matching performance of SIFT and SURF algorithms for high resolution remote sensing image

QI Bing-jie, LIU Jin-guo*, ZHANG Bo-yan, ZUO Yang, LYU Shi-liang

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: liujg@ciomp.ac.cn

Abstract: Image matching is the basis of image rectification and mosaic. Because of higher features similarity and smaller overlapped area than ordinary images, the remote sensing images have higher requirements on matching algorithm in both performance and iteration speed. The performances in three aspects: feature detection, feature description and feature matching, are analyzed between the SIFT algorithm and the SURF algorithm in terms of speed and accuracy. The requirements of the degree of overlapping between remote sensing images and the matching distance of the genvector is discussed as well. In view of the characteristic that SURF algorithm is sensitive to the error in feature detection, oSURF algorithm is presented in this paper. Finally,

收稿日期: 2017-01-18; 修订日期: 2017-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61405191)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61405191)

the advantages and disadvantages of each algorithm are analyzed by using satellite remote sensing data of level 1A. The results show that iteration speed of SURF algorithm is three times faster than SIFT algorithm. Under the same matching rate, the width of overlapped area on image required in SURF algorithm is 1.25 times of the dimension of genvector but 1.5 times in SIFT, and the accuracy of oSURF algorithm is increased by 5% ~ 10% compared with SURF algorithm in the same computation speed, which indicate that oSURF is more suitable for remote sensing image stitching.

Key words: remote sensing image; feature matching; SIFT; SURF; degree of overlapping

1 引言

遥感图像匹配是对不同传感器、不同时相、不同视角的遥感图像在其重叠部分计算同名点 (Homologous Points) 的过程。由于遥感图像高分辨率和大视场的矛盾性,为了保证分辨率,卫星相机只推扫条带状影像数据,再通过图像拼接、融合等步骤实现大范围图像覆盖率,而这些处理都是以图像匹配为前提。图像特征匹配包括检测特征点、提取描述向量和向量匹配 3 个步骤。

本文选取计算机视觉领域中两种经典匹配算法: SIFT (Scale Invariant Feature Transform) 和 SURF (Speed Up Robust Features) 进行性能分析, SIFT 算法是由 David G. Lowe^[1-2] 在 1999 年提出,该算法对图像旋转、缩放、光照变化都具有很好的鲁棒性,但算法的计算速度较慢。SURF 算法由 Herbert Bay^[3-4] 在 2006 年提出,在保证算法鲁棒性的基础上对 SIFT 算法进行了加速改进。近几年, Luo Juan、索春宝等人^[5-9] 利用 Mikolajczyk 和 Schmid 数据集,分析了两种算法在普通图像上的鲁棒性。由于遥感图像数据量大,一般为 1G 左右,导致计算量很大。而且遥感图像特征相似度高,卫星条带图像重叠区域较小,易受到非重叠区域影响,这些特点导致遥感图像对匹配算法有很高要求。目前国内张云生、罗楠等人^[10-13] 针对遥感图像,对 SIFT 和 SURF 算法匹配性能做出了研究。南京理工大学的罗楠针对同一传感器不同时相遥感图像和不同传感器遥感图像分别分析两种算法的效率,并提出一种基于扩展 SURF 的描述符;葛盼盼在分析算法的匹配效率基础上,比较了峰值信噪比 (PSNR)、相似性度量 (SSIM) 和互信息量 (MI) 4 个方面的匹配效果。但目前针对

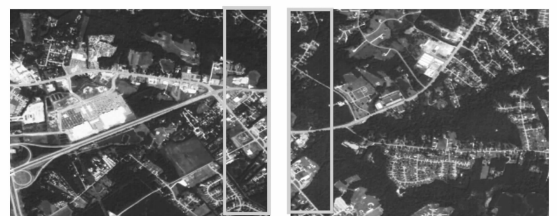
SIFT 和 SURF 算法在遥感图像边缘处特性分析很少,比如特征邻域尺寸和非重叠区域尺寸等影响,而且大部分实验数据均经过深度处理,并不能充分反映遥感图像特点。

根据卫星图像后期处理程度逐渐升高,可以分为 0 级、1A 级、1B 级、2 级、3 级和 4 级。1A 级图像是传感器采集的原始图像进行初步均衡化辐射校正后的数据产品,该级数据可以充分反映遥感图像特点。本文利用卫星 1A 级遥感数据,对 SIFT 和 SURF 算法在遥感图像匹配速度、准确度以及非重叠区域影响等性能进行对比分析。

2 实验测试与性能分析

本节在相同计算机配置下,从特征点检测、特征向量描述和特征点匹配三方面,比较了 SIFT 和 SURF 算法计算速度、准确度及重叠度等方面性能。

实验图像为美国某海岸 1A 级遥感数据,图 1 中 (a)、(b) 为两条边缘重叠的卫星条带图像,本文采用的图像重叠宽度为采集条带宽度的 1.23%。由于匹配前图像重叠宽度未知,因此根据卫星推扫特点,将特征检测宽度限定为 100 像



(a) 条带图像 1
(a) Strip image 1
(b) 条带图像 2
(b) Strip image 2

图 1 美国某海岸影像数据

Fig. 1 Image of an America's shore

素(图中框内为检测区域,为 $1\ 000 \times 100$ 像素)。

2.1 特征点检测

首先进行特征点检测,本节从检测时间和特征点数量两方面比较算法性能。为了便于比较和显示,本文对算法阈值进行设定以确保检测到特征点数量相当,SIFT 算法检测阈值设定为 0.071 2,SURF 算法检测阈值为 0.000 6,检测结果如图 2。



(a) SIFT 算法对条带图像 1 检测效果

(a) Detection results of SIFT algorithm on strip image 1



(b) SIFT 算法对条带图像 2 检测效果

(b) Detection results of SIFT algorithm on strip image 2



(c) SURF 算法对条带图像 1 检测效果

(c) Detection results of SURF algorithm on strip image 1



(d) SURF 算法对条带图像 2 检测效果

(d) Detection results of SURF algorithm on strip image 2

图 2 SIFT 和 SURF 算法特征点检测效果

Fig. 2 Detection result of SIFT and SURF algorithm

表 1 为不同算法检测性能比较,可以看出 SURF 算法检测特征点速度相对 SIFT 算法有明显提升,约是 SIFT 的 3 倍。

表 1 SIFT 和 SURF 算法特征检测结果

Tab. 1 Detection result of SIFT and SURF algorithm

图像	算法	特征点数/个	检测时间/s
条带图像 1	SIFT	438	5.013
	SURF	523	1.596
条带图像 2	SIFT	480	5.326
	SURF	573	1.869

SIFT 算法是通过不同尺寸的高斯模板进行滤波和降采样形成尺度空间,再将相邻层相减得

到高斯差分 DOG 尺度空间^[14],通过非极大值抑制法寻找特征点。SURF 算法尺度空间的建立不改变图像的大小,而是改变滤波模板尺寸,通过 Hessian 矩阵行列式值来判断特征点。SIFT 和 SURF 算法通过建立尺度空间来实现尺度不变性,而两种算法的检测时间差也主要在尺度空间形成过程中产生,原因有两个方面:

(1)SURF 算法通过框状滤波器代替高斯二阶偏导,结合 Paul Viola 在 2001 年提出的积分图像(Integral Image)^[15]的概念形成一种近似卷积模板,将 SIFT 算法中高斯滤波卷积运算简化成框状滤波器 4 个顶点积分值加减法运算。这种近似卷积模板的计算量独立于模板尺寸,使得 SURF 算法运算量大大降低。

(2)SIFT 尺度空间通过降采样改变图像大小形成,需要层层递推,而 SURF 尺度空间是改变盒子滤波尺寸,图像的大小始终不变,因此不同尺度层可以同时建立。另一方面,由于图像大小不变,SURF 算法只需一个积分图像,在滤波同时可以直接建立尺度空间,而不需要对图像进行降采样处理,实现了计算量的优化。

综上所述,由于 SURF 算法采用了积分图像,在检测特征点相同的情况下,SURF 算法的检测速度比 SIFT 算法快 3 倍。

2.2 特征向量描述

检测特征点之后,需要对特征点进行局部信息描述,分为确定主方向和提取描述向量两步。本节从构建向量速度、特征向量数目、描述邻域尺寸三方面进行比较和分析。本文中 SURF 算法特征向量采取 64 维和 128 维,由于 SIFT 算法受特征邻域划分规则所限,特征向量维度只有 32 和 128,而 32 维度独特性较差,故本文 SIFT 算法向量维度只选取 128。表 2 是对 SIFT 和 SURF 算法检测的特征点进行描述的结果。

2.2.1 算法构建向量速度分析

从表 2 可知,SIFT 算法描述特征时间相对 SURF 算法更长。由于 SIFT 算法需要通过计算特征点邻域梯度信息构建邻域梯度直方图来实现,而 SURF 算法直接利用积分图结合 haar 小波滤波器生成的 x,y 方向上响应实现,从而优化了时间复杂度。另外,SURF 算法的 64 维和 128 维向量

虽然维度增加 1 倍,但是特征向量生成时间相差不大。

2.2.2.2 SIFT 特征向量数目增加分析

由表 2 可知 SIFT 算法特征向量数目相对于检测特征点数明显增加,是由于 SIFT 算法不同于只有一个主方向的 SURF 算法,SIFT 算法选取梯度方向直方图中所有大于主方向 0.8 倍的方向作为特征方向,每一个特征方向作为一个特征点,因此向量数大大增加。这些辅助方向的存在有利于提高 SIFT 匹配稳定性。

表 2 不同算法特征向量描述结果

Tab. 2 Feature description result of different algorithms

算法	图像	特征向量	特征点变化	描述时间	10 个向量描述时间
SIFT	条带图像 1	1 119	+681	12.962	0.116
	条带图像 2	1 451	+971	13.863	0.096
SURF64	条带图像 1	464	-59	3.015	0.065
	条带图像 2	520	-53	3.368	0.065
SURF128	条带图像 1	464	-59	3.213	0.069
	条带图像 2	520	-53	3.473	0.067

图 3 为 SIFT 和 SURF 两种算法检测范围变化时检测到特征点数量。由于构建向量的邻域比提取主方向邻域大,因此以构建向量邻域作为主要影响参数。为了保证尺度不变性,特征描述是在检测到特征点的尺度层上进行的。无论是 SIFT 还是 SURF 算法特征邻域大小都与金字塔层

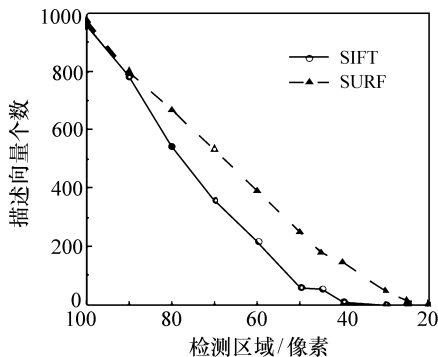


图 3 检测区域宽度不同时描述向量个数变化

Fig. 3 Vector number change with the detection area

对应 σ 值成正比, σ 越大邻域越大,式(1)和式(2)分别为本文 SIFT 和 SURF 算法特征向量邻域大小,根据公式可知,SIFT 和 SURF 算法最小

2.2.3 描述邻域尺寸影响分析

由表 2 可知,特征描述后 SURF 算法特征数降低了,事实上 SIFT 算法特征点也有所降低,由于辅助方向的存在而没有表现出来。因为 SIFT 和 SURF 算法都属于局部特征检测算法^[16-18],即描述特征方向和构建特征向量时需要特征点一定邻域内灰度信息。而遥感图像重叠区域都集中在边界,而且相对较小。因此,当特征点与边缘的距离小于邻域半径时,该特征点无法被描述。

特征向量邻域分别为 40 和 20 个像素。由图 3 可知,两种算法均在超过最小邻域范围后才开始出现特征向量。图 4 为重叠尺寸不同时同名向量占

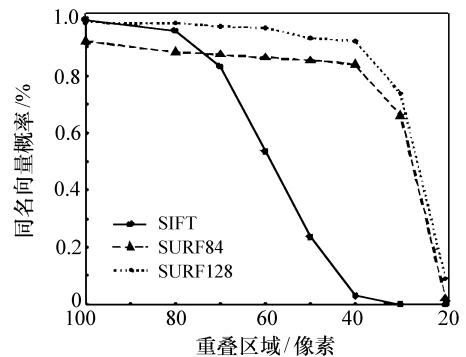


图 4 重叠区域不同时同名点概率变化

Fig. 4 Probability change of Homologous Points with the overlap region

向量总数的概率变化情况。图像重叠 100 个像素时同名点概率都在 90% 以上,但随着重叠区域尺寸下降,SIFT 算法由于特征向量邻域较大,同名点概率下降更快。为了保证后续的匹配质量,同名点的概率至少要 50% 以上,因此 SIFT 算法重

叠区域保证在最小特征邻域的 1.5 倍以上, SURF 算法重叠区域至少为最小邻域的 1.25 倍。

$$W_{\text{sift}} = 25.192 \times 2^{(s_{\text{sift}}/3)}, \quad (1)$$

$$W_{\text{surf}} = 20s_{\text{surf}}, \quad (2)$$

其中, $s_{\text{surf}0} = 2, s_{\text{surf}1} = 1.2$ 。

针对描述向量邻域影响,部分算法采取在边界处降低检测邻域大小,但遥感图像特征相似度高,降低特征邻域意味着降低算子独特性,会引起误配率上升,此种方法并不可取。还有一些算法采取插值法增加边界像素点,但这样会增加 1 倍的计算量。

综上所述,在计算速度方面, SURF 算法无论是 64 维还是 128 维其特征向量构建速度都远远大于 SIFT 算法。在特征向量数方面,由于特征检测邻域尺寸的影响,部分边缘检测点无法被描述,为了保证后续的匹配质量, SIFT 算法要求重叠区域在最小特征邻域的 1.5 倍以上,而 SURF 算法重叠区域至少为最小邻域的 1.25 倍。

2.3 特征点匹配

特征点检测和描述后,根据描述向量间距离进行特征点匹配,本节从匹配速度、准确度、非重叠区域影响以及匹配距离四方面对两种算法进行了比较和分析。本文采用欧式距离作为衡量标准,结合最近邻比次近邻的方法匹配特征点,阈值选取 0.7。本文选取 Mikolajczyk 和 Schmid 提出的匹配准确度^[19]作为判定标准。

$$\text{准确度} = \frac{\text{总特征点数} - \text{误配点数}}{\text{总特征点数}}, \quad (3)$$

其中,误配点数通过 RANSAC (Random Sample Consensus)^[20]对极几何约束模型算法计算,迭代次数设定为 100,总特征点数为去除误配前的匹配点数。

2.3.1 算法匹配速度分析

从表 3 中可以看出, SIFT 算法匹配时间为 SURF 算法的 3 倍左右,主要由于 SIFT 算法特征向量较多,单位向量的匹配时间相差并不大。而且 SURF 算法的不同维度特征向量匹配时间相差很小。从总时间来看, SIFT 算法计算时间约为 SURF 算法的 3 倍,主要时间差集中在检测和描述上,尤其是特征描述步骤。



(a) SIFT 算法匹配效果

(a) Matching result of SIFT algorithm



(b) SURF64 算法匹配效果

(b) Matching result of SURF64 algorithm



(c) SURF128 算法匹配效果

(c) Matching result of SURF128 algorithm

图 5 不同算法匹配效果图

Fig. 5 Matching result of different algorithms

表 3 不同算法特征匹配结果比较

Tab. 3 Matching result of different algorithms

算法	匹配点	正确率	匹配时间	总时间
SIFT	286	0.979	1.152	38.521
SURF64	84	0.896	0.310	11.514
SURF128	120	0.9467	0.425	12.581

2.3.2 算法匹配精度分析

从匹配准确性来看, SIFT 算法的匹配准确度最好,其次是 SURF128 维算法, SURF64 维算法最差。由于遥感图像拍摄距离远,图像包含大量相似结构,由于特征描述符仅利用特征点局部邻域信息,对散落在这些相似结构中的点极易发生误匹配现象,进而放大了匹配准确度方面的差异。

2.3.3 受非重叠区域影响分析

测试图像重叠区域为 50 个像素,图 6 中为匹配准确度随重叠区域占检测区域比率变化的情况,非重叠区域的影响反映了算法的独特性。由图 6 可知不存在非重叠区域时 3 种算法准确度都

在 95% 以上,随着非重叠区域比率的增加算法准确度都有所下降。当重叠区域占检测区域比率为 20% 时,3 种算法受到非重叠区域的影响加大,准确度开始急速下降。相比较而言,SIFT 算法和 SURF128 算法受到非重叠区域的影响相对更小。

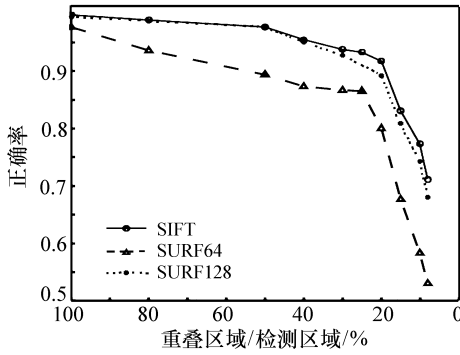


图 6 非重叠区域的影响

Fig. 6 Influence of non-overlapping domain

2.3.4 特征向量匹配距离分析

从图 7 中可以看出,SIFT 算法和 SURF64 算法采用余弦距离匹配准确度高于欧式距离,而 SURF128 算法无法通过余弦距离进行匹配。原因是余弦距离表示向量间夹角,当 SURF 算法向量由 64 维增加到 128 维,将每个种子点的向量参数 $\sum dx$ 、 $\sum |dx|$ 分成了 $dy > 0$, $dy < 0$ 两种情况, $\sum dy$ 、 $\sum |dy|$ 同理。由于增加的信息不直接反映方向信息,因此采用余弦距离计算无法匹配。

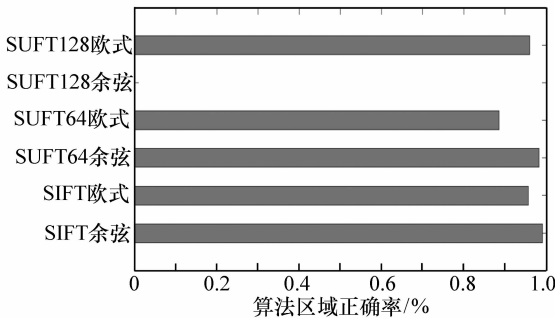


图 7 不同算法计算距离不同时正确率的变化情况

Fig. 7 Matching ratio change with the calculated distance

综上所述,从匹配时间和匹配准确度两方面综合来看,SURF128 算法的匹配性能最好。同时 SURF128 算法受非重叠区域影响相对较小,但进

行特征匹配时只能采用欧式距离。

3 oSURF 算法

通过第二节分析可知,相对于 SIFT 算法和 SURF64 算法,SURF128 算法综合性能最好,但在特征描述和匹配过程中,SURF 算法过分依赖局部区域提取的特征方向,特征方向上小的偏差会造成匹配准确度上较大误差。因此,本节在 SURF128 算法基础上,对特征方向做出改进,提出一种 oSURF 算法。

3.1 算法改进原理

在以兴趣点为中心, $6s$ (s 为兴趣点对应尺度) 为半径的邻域内,用尺寸为 $4s$ 的 haar 小波滤波器对圆形邻域内所有点求 x 、 y 方向小波响应,再以兴趣点为中心对响应进行高斯加权。将圆形邻域分成若干个 60 度扇形,每个扇形间隔 15 度,分别计算每个扇形中所有 x 、 y 方向 haar 响应和,再构成的矢量。



图 8 Haar 小波滤波器

Fig. 8 Haar wavelet filters

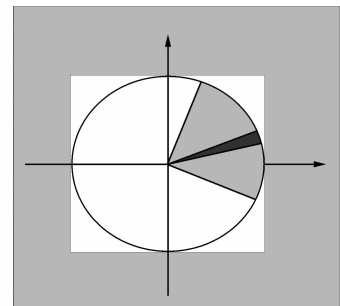


图 9 扇形窗口

Fig. 9 Sector window

将所有扇形窗口对应矢量按照大小排序,最

大矢量的方向即为该特征点主方向。同时,当存在另一个矢量大小超过最大矢量的 80% 时,则将这个矢量的方向作为该特征点辅助方向,存储为新的特征点。虽然辅助方向会导致特征向量数目增加,但多个特征方向可以弥补由于特征方向失准引起的匹配准确率下降问题。

3.2 算法性能分析

对 oSURF 算法进行测试,采用与第 2 节相同的实验数据和条件,匹配结果如下:



图 10 oSURF 算法匹配效果图

Fig. 10 Matching result of oSURF algorithm

表 4 oSURF 算法特征匹配结果比较

Tab. 4 Matching result of oSURF algorithm

算法	条带 1 描述向量	条带 2 描述向量	匹配点数	准确度	总时间
oSURF	814	963	289	0.965 4	12.926

3.2.1 oSURF 算法速度分析

由表 2、表 3 和表 4 对比可知,由于 oSURF 算法增加了辅助方向,特征描述向量相对 SURF128 增加了 1 倍,但总计算时间仅增加了 0.345 s。综上所述,oSURF 算法保留了 SURF 算法计算速度快的优点。

3.2.2 oSURF 算法匹配准确度分析

本节对 oSURF 算法与 SIFT、SURF64、SURF128 算法进行匹配准确度比较,实验图像为 10 组卫星条带图像,非重叠度在 75% ~ 85% 之间,检测宽度为 200 个像素点。图 11 为不同算法匹配准确度比较结果。

的匹配准确度。由图 11 可知,在 10 组条带图像匹配实验中,oSURF 算法相对于 SURF128 算法匹配准确度提升了 5% ~ 10%,和 SIFT 算法匹配准确度相当,恰恰弥补了 SURF 算法采用框状滤波器近似带来的准确度损失。

通过速度和匹配准确度分析可知,相对 SURF 算法,oSURF 算法在保证匹配速度的前提下,使得匹配准确度提高 5% ~ 10%。

4 结论

本文针对遥感图像数据,首先,从特征检测、描述和匹配三个方面,对 SIFT 算法和 SURF 算法在重叠率和匹配准确度方面进行了比较;其次,分析了算法对遥感图像重叠度、匹配度量距离的要求;最后,通过对 SURF128 算法特征方向的改进,提出了 oSURF 算法,并与 SIFT、SURF64、SURF128 算法进行了匹配准确度比较。实验结果表明,相对于 SIFT 算法,SURF 算法计算速度为 SIFT 的 3 倍,受非重叠区域影响更小,为保证 50% 以上同名点概率,SIFT 算法要求图像重叠区域不低于其描述向量邻域大小的 1.5 倍,SURF 算法仅要求为 1.25 倍;相对于 SURF 算法,在保证匹配速度前提下,oSURF 算法准确度提高了 5% ~ 10%。因此,oSURF 算法更适合遥感图像拼接。

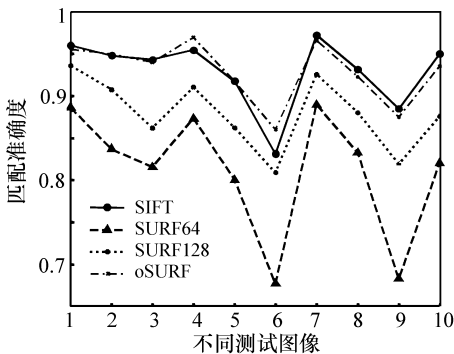


图 11 不同算法匹配结果

Fig. 11 Matching result of different algorithms

通过 2.3 节实验分析可知,SURF 算法虽然比 SIFT 算法计算速度提升了 3 倍,但牺牲了一定

参考文献:

- [1] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]. International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Greece:ICCV,1999:1150-1157.
- [2] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International J. Compute Vision*,2004,60(60):91-110.
- [3] BAY H,TUYTELAARS T,GOOL L. SURF:speeded up robust features[J]. *Computer Vision & Image Understanding*,2006,110(3):404-417.
- [4] BAY H,ESS A,TUYTELAARS T,*et al.*. Speeded-Up Robust Features(SURF)[J]. *Computer Vision & Image Understanding*,2008,110(3):346-359.
- [5] LUO J,GWUN O. A Comparison of SIFT, PCA-SIFT and SURF[J]. *J. Business Education*,2009,3(4):143-152.
- [6] 索春宝,杨东清,刘云鹏. 多种角度比较 SIFT、SURF、BRISK、ORB、FREAK 算法[J]. 北京测绘,2014,(4):23-26.
- SUO CH B,YANG D Q,LIU Y P. Comparison of SIFT, SURF, BRISK, ORB and FREAK algorithms in various aspects [J]. *Beijing Surveying and Mapping*,2014,(4):23-26. (in Chinese)
- [7] 安维胜,余让明,伍玉铃. 基于 FAST 和 SURF 的图像配准算法[J]. 计算机工程,2015,41(10):232-235.
- AN W SH,YU R M,WU Y L. Image registration algorithm based on FAST and SURF [J]. *Computer Engineering*,2015,41(10):232-235. (in Chinese)
- [8] 王新华,黄玮,欧阳继红. 多探测器拼接成像系统实时图像配准[J]. 中国光学,2015,8(2):211-219.
- WANG X H,HUANG W,OUYANG J H. Real-time image registration of the multi-detectors mosaic imaging system[J]. *Chinese Optics*,2015,8(2):211-219. (in Chinese)
- [9] 许佳佳. 结合 Harris 与 SIFT 算子的图像快速配准算法[J]. 中国光学,2015,8(4):574-581.
- XU J J. Fast image registration method based on Harris and SIFT algorithm[J]. *Chinese Optics*,2015,8(4):574-581. (in Chinese)
- [10] 张云生,邹嵘嵘. 基于改进 ORB 算法的遥感图像自动配准方法[J]. 国土资源遥感,2013,25(3):20-24.
- ZAHNG Y SH,ZOU ZH R. Automatic registration method for remote sensing images based on improved ORB algorithm [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*,2013,25(3):20-24. (in Chinese)
- [11] 罗楠,孙权森,耿蕾蕾,等. 一种扩展 SURF 描述符及其在遥感图像配准中的应用[J]. 测绘学报,2013,42(3):383-388.
- LUO N,SUN Q S,GENG L L,*et al.*. An extended SURF descriptor and its application in remote sensing images registration[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,2013,42(3):383-388. (in Chinese)
- [12] 闫利,陈林. 一种改进的 SURF 及其在遥感影像匹配中的应用[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2013,38(7):770-773.
- YAN L,CHEN L. A modified SURF descriptor and its application in remote sensing images matching[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2013,38(7):770-773. (in Chinese)
- [13] 葛盼盼,陈强. 基于 SURF 特征提取的遥感图像自动配准[J]. 计算机系统应用,2014,23(3):16-24.
- GE P P,CHEN Q. Remote sensing image automatic registration based on SURF feature extraction[J]. *Computer Systems & Applications*,2014,23(3):16-24. (in Chinese)
- [14] LINDBERG T. Scale-space theory:a basic tool for analyzing structures at different scales[J]. *J. Applied Statistics*,1994,21(1):225-270.
- [15] VIOLA P,JONES M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features[C]. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,Kauai,HI,USA,2001:511-518
- [16] 翟优,曾峦,熊伟. 不同局部邻域划分加速鲁棒特征描述符的性能分析[J]. 光学精密工程,2013,21(9):2395-2404.
- ZHAI Y,ZENG L,XIONG W. Performance analysis of SURF descriptor with different local region partitions[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,21(9):2395-2404. (in Chinese)
- [17] 孙浩,王程,王润生. 局部不变特征综述[J]. 中国图象图形学报,2011,16(2):141-151.
- SUN H,WANG CH,WANG R SH. A review of local invariant features[J]. *J. Image and Graphics*,2011,16(2):141-

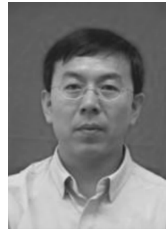
151. (in Chinese)

- [18] 聂海涛,龙科慧,马军,等. 采用改进尺度不变特征变换在多变背景下实现快速目标识别[J]. 光学精密工程, 2015,23(8):2349-2356.
NIE H T, LONG K H, MA J, *et al.*. Fast object recognition under multiple varying background using improved SIFT method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(8):2349-2356. (in Chinese)
- [19] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. A performance evaluation of local descriptors[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005,27(10):1615-1630.
- [20] FISCHLER M, BOLLES R. *Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography*[M]. Burlington: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1987.

作者简介:



齐冰洁(1991—),女,辽宁开原人,硕士研究生,主要从事遥感图像处理方面的研究。E-mail: doudouqbj@126.com



刘金国(1968—),男,吉林蛟河人,硕士,研究员,硕士生导师,主要从事空间遥感与图像处理方面的研究。E-mail: liujg@ciomp.ac.cn

《光学精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国出版政府奖期刊提名奖
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊
- * 中国最具国际影响力学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路 3888 号

电话:0431-86176855

电邮:gxjmgc@sina.com

定价:100.00 元/册

邮编:130033

传真:0431-84613409

网址:http://www.eope.net