

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20180137

# 尺度与特征强度自适应的 SURF 特征点匹配算法

胡晓彤,任 辉,刘 楠 (天津科技大学计算机科学与信息工程学院,天津 300222)

摘 要:为解决 SURF (speeded-up robust features)图像匹配算法无法实现特征点定位精度和匹配成功率的同步提升问题,在深入研究 SURF 特征点的尺度、特征强度与匹配性能间关系的基础上,提出了一种特征点尺度与特征强度自适应的 SURF 特征点匹配算法.该算法通过不同尺度的特征点与不同的特征强度阈值相适应的特征点匹配机制,较好地保持了特征点定位精度与匹配成功率间的平衡,从而实现了高性能的 SURF 特征点匹配.实验结果表明:与传统的 SURF 算法相比,本算法能够获得更多高精度的匹配特征点对,对于基于特征点的图像配准与基于图像的三维坐标计算等图像处理算法的精度提升具有较大作用.

关键词:图像配准; SURF; 尺度; 特征强度

中图分类号: TP751 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2019)02-0070-05

## Adaptive SURF Feature Points Matching Algorithm Based on Scale and Feature Intensity

HU Xiaotong, REN Hui, LIU Nan

(College of Computer Science and Information Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: In order to solve the problem that SURF (speeded-up robust features) image matching algorithm now can not realize the synchronous promotion of feature point positioning accuracy and matching success, based on the study of the relationship between the scale and intensity of the SURF feature points and their matching performance, a SURF feature point matching algorithm is proposed, which is adaptive to the scale and intensity of feature points. The new algorithm adopts a feature point matching search mechanism that matches the feature points of different scales and different intensity thresholds. It is good for keeping the balance between the matching accuracy of feature points and the matching success rate, and thus the high performance precision of SURF feature point matching is realized. The experimental results show that,

compared with the traditional algorithm of SURF, this algorithm can obtain more accurate matching feature points pairs. It has greatly improved feature points based image registration and 3D calculation based images.

Key words: Image registration; SURF; scale; characteristic strength

基于特征点的图像配准算法首先在图像中提取 特征点,然后建立两幅图像之间特征点的配准关系, 其广泛应用于图像匹配、三维成像等领域. Bay 等提 出了 SURF(speeded-up robust features)算法<sup>[1]</sup>,它是 对 SIFT(scale invariant feature transform)算法的一种 改进,其性能超过了 SIFT 且能够获得更快的速度<sup>[2]</sup>. 文献[3]中的局部特征算法的性能比较实验表明: SURF 算法是性能最为鲁棒的局部特征算法<sup>[3]</sup>.在对 SURF 算法的改进研究方面,已经有许多的研究成 果.潘建平等<sup>[4]</sup>通过图像分块策略改善提取特征点的 均匀性,引用相对距离理论剔除异常匹配点,从而提 高了匹配点的可靠性;常俊林等<sup>[5]</sup>将 SVM 与 SURF

收稿日期: 2018-05-06; 修回日期: 2018-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61063035)

作者简介:胡晓彤(1971-),男,河北人,副教授,huxt@tust.edu.cn

相结合,所得到的特征点欧氏距离归一化后输入到 SVM中,通过线下学习,对每幅图像自主地选取合适 的阈值,实现了特征点之间的自适应匹配,使得匹配 精度有了一定程度的提高;贡超等<sup>[0]</sup>提出采用扩散距 离对 SURF 特征进行匹配,提高了匹配的正确率与鲁 棒性.在提高 SURF 匹配速度方面,胡旻涛等<sup>[7]</sup>提出 利用图像熵信息对特征点进行筛选,并利用快速近邻 搜索算法进行特征匹配,有效地改善了匹配效率.上 述改进算法对于提高 SURF 算法的性能进行了有益 的探索.但是,迄今为止尚无法实现 SURF 特征点的 匹配精度与匹配成功率间的平衡.

为此,本文在深入研究 SURF 特征点的尺度、特征强度与匹配性能间关系的基础上,提出了特征点尺度与特征强度自适应的 SURF 图像特征点匹配算法,从而获得更多高精度的匹配特征点对,实现了高性能的 SURF 特征点匹配.

#### 1 SURF 特征点检测

SURF 算法是一种基于尺度空间的特征点检测 与匹配算法,其不仅对图像旋转、平移、缩放和噪声 具有较好的鲁棒性,而且在光照变化、视角变化及图 像模糊等情况下也能得到较好的匹配结果<sup>[8]</sup>.

SURF 算法首先对图像进行高斯平滑处理,并建 立高斯尺度空间,然后通过计算 Hessian 矩阵行列式 的局部极值来确定特征点的位置.对于尺度为 $\sigma$ 的 空间中任一点  $\hat{x} = (x, y)$ 的 Hessian 矩阵定义为

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} L_{xx}(\hat{x}, \boldsymbol{\sigma}) & L_{xy}(\hat{x}, \boldsymbol{\sigma}) \\ L_{xy}(\hat{x}, \boldsymbol{\sigma}) & L_{yy}(\hat{x}, \boldsymbol{\sigma}) \end{bmatrix}$$
(1)

式中:  $L_{xx}$  是高斯二阶导  $\frac{\partial^2}{\partial x^2}g(\sigma)$  同 I = (x, y) 卷积的 结果,其中  $g(\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2}$ ;  $L_{xy} \setminus L_{yy}$ 与  $L_{xx}$ 具

有相似的含义.

#### 1.1 特征点的描述

为保持特征点的旋转不变性,在特征点位置确定 后,计算每一个特征点的主方向.为此,在以特征点 为中心,半径为 $6\sigma(\sigma)$ 为特征点的尺度)的圆形区域 内,对图像在x和y方向进行 Harr 小波响应运算, Harr 小波边长取 $4\sigma$ ,并使用尺度为 $2\sigma$ 的高斯加权 函数对 Harr 小波响应值进行高斯加权,使得越靠近 特征点的响应贡献越大;然后,用 $\pi/3$ 大小的扇形区 域范围遍历整个圆形区域,并将水平方向响应和垂直 方向响应的矢量和模的最大值的方向定义为特征点 的主方向.

以特征点为中心,构造一边垂直于主方向且边长为 20  $\sigma$  的正方形窗口区域,并将该窗口区域划分成 4×4 的子区域,如图 1 所示.在每一个子区域内,进行 5  $\sigma$ ×5  $\sigma$  个采样点的水平方向和垂直方向的 Harr 小波响应的计算,分别记作  $d_x$ 和  $d_y$ ,同样使用尺度为 2  $\sigma$  的高斯加权函数对 Harr 小波响应值进行高斯加权,以增加对几何变换的鲁棒性.然后将每个子区域的响应值和响应值的绝对值相加形成  $\sum d_x \ x \ \sum |d_y|$ .



图 1 SURF 特征点的描述 Fig. 1 SURF point features

由此,每个子区域就形成了一个四维特征描述向 量

$$\boldsymbol{V} = \left(\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{d}_{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{d}_{\boldsymbol{y}}, \boldsymbol{\Sigma} | \boldsymbol{d}_{\boldsymbol{x}} |, \boldsymbol{\Sigma} | \boldsymbol{d}_{\boldsymbol{y}} |\right) \tag{2}$$

对于每一个特征点,形成4×4×4=64 维的特征 向量.同时,为保证对光照不变性,对特征向量进行 归一化处理,得到最终的 SURF 描述符.

#### 1.2 特征点的匹配

特征点的匹配是实现图像配准的关键,特征点匹配的精度直接影响着后续处理的准确性<sup>[9]</sup>.根据 SURF 特征点描述符中包含的特征点邻域信息,采用 K最近邻法找出每个特征点潜在的两个最佳匹配点; 最终,通过匹配点的距离最佳值与次佳值比率优选出 最佳匹配点对.

#### 2 定位精度的影响因素

在基于 SURF 特征点的图像配准过程中,特征点的匹配精度影响图像间配准变换模型参数的估算.如何选取更多高精度匹配特征点对是提高图像 配准精度的关键.

#### 2.1 特征点尺度

根据 SURF 特征点的检测与描述方法可知,特征 点的尺度是特征点具有的重要特征,同时也反映了用 于描述该特征点的图像区域的大小.图 2 中的圆形 区域即为计算圆心所代表的特征点的特征向量所使 用的图像区域,而该圆的半径则被定义为该特征点的 尺度.

由于用于描述小尺度特征点的图像区域较小,能 够更加准确地描述该点的特征,从而使得小尺度特征 点间的匹配具有更高的定位精度<sup>[10]</sup>.不过,小尺度特 征点只占图像中所有特征点的一部分,使不同尺度的 特征点均能获得较高的定位精度是实现高性能 SURF 特征点匹配的关键.



图 2 SURF 特征点的尺度描述 Fig. 2 SURF point scale

目前,尚未见定量分析 SURF 特征点的尺度与定 位精度间关系的研究.为此,需要定量分析 SURF 特 征点的尺度对定位精度的影响程度,并在此基础上, 探索受特征点尺度影响较小的匹配机制,为高性能的 SURF 特征点匹配提供保障.

#### 2.2 特征强度

SURF 特征点匹配算法采用 K 最近邻法搜索出 每个特征点潜在的两个最佳匹配点,并定义相似度最 高的待匹配特征点的特征向量的欧氏距离 d<sub>1</sub>与相似 度次高的待匹配特征点的特征向量的欧氏距离 d<sub>2</sub>的 比值 d<sub>1</sub>/d<sub>2</sub> 为该特征点的特征强度.同时,设定特征 强度阈值,只有当待匹配特征点的特征强度值小于该 阈值时,才将该特征点对作为匹配成功点对.

由于相似度越高的特征点的特征强度值越小的 可能性越高,故较小的特征强度阈值能够保证相似度 较高的特征点对才被保留下来,从而提高配准的定位 精度.然而,如果将特征强度阈值设置较小,即只保 留特征强度较高的特征点,则可能导致匹配成功率降 低,使最终获得的匹配点对数量不足,无法实现高性 能的特征点匹配.因此,只有深度研究 SURF 特征点 的特征强度阈值与匹配性能间的关系,才能够保持定 位精度和匹配成功率的平衡,从而有望实现高性能的 特征点匹配.

#### 2.3 尺度、特征强度与定位精度的关系

虽然小尺度、高特征强度的特征点能够获得较高的定位精度,但可能造成匹配成功的特征点对数量不

够多,无法实现高性能的特征点匹配的问题.

同时,传统的 SURF 特征点匹配算法采用统一的 特征强度阈值,当该阈值被设置得较小时,可能会造 成部分定位精度较高的小尺度特征点未能匹配成功; 而当该阈值被设置得较大时,可能会造成部分定位精 度较低的大尺度特征点被保留下来.故采用统一的 特征强度阈值,可能影响整体的定位精度,或使匹配 成功的特征点对的数量减少,无法达到定位精度与匹 配成功的特征点对数量间的平衡.

为此,需要深入研究 SURF 特征点的尺度、特征 强度与定位精度、匹配成功率间的关系,探索高性能 的 SURF 特征点匹配.

#### 3 实验分析

#### 3.1 尺度与定位精度的关系

在已知图像旋转角度(实验中取 5°)的条件下, 将图 2 所示与旋转后的图像进行特征点匹配;随后, 基于原图上特征点的坐标与旋转角度计算旋转后匹 配点的理论坐标值;最后,计算旋转图像上相匹配的 特征点的真实坐标值与理论坐标值间的差作为定位 误差进行分析. 图 3 所示为特征点定位误差的绝对 值. 从图 3 可以看出:在特征强度一定的情况下,小 尺度特征点(尺度<20)的定位误差相对于大尺度特 征点(尺度≥40)普遍较小,说明小尺度特征点具有较 高的定位精度.



图 3 不同尺度特征点的定位误差 Fig. 3 Positioning errors at different scale feature points

为了定量分析特征点尺度与定位精度间的关系, 将图 2 所示图像与测试用图像进行特征点匹配,对匹 配成功的特征点计算其定位误差,从而分析不同尺度 的特征点的定位精度.分析时,采用待匹配图像中匹 配成功的特征点坐标与原图中相应的特征点经旋转 后坐标间的差值作为特征点的定位误差,结果见 表 1.

of

#### 表1 不同尺度特征点的平均定位误差

 Tab. 1 Average positioning errors of feature points of different scales

尺度	匹配点对数量	平均定位误差/像素
<20	124	0.437 3
20~<40	127	0.583 4
≥40	65	1.167 7

从表 1 可以看出:随着特征点尺度的增大,其平 均定位误差呈上升趋势,如尺度≥40 的特征点的平 均定位误差接近尺度<20 的特征点的定位误差的 3 倍.

#### 3.2 特征强度与定位精度的关系

为了深入研究特征强度阈值与特征点定位精度 间的关系,分别设置不同的特征强度阈值,分析高、 中、低特征强度阈值下的特征点定位误差,结果见 图 4.



Fig. 4 Positioning errors of feature points of different intensity

从图 4 可以看出,随着特征强度阈值的增大,定 位误差呈逐步增大的趋势,表明特征强度阈值的设置 对于特征点的定位精度确有影响.

为了进一步定量分析特征强度阈值与定位精度间的关系,在尺度相同的情况下(实验中取尺度小于40),分析不同特征强度阈值下匹配成功的特征点的数量与定位误差,结果见表 2.

表 2 不同强度特征点的平均定位误差 Tab. 2 Average positioning errors of feature points of different strength

特征强度	匹配点对数量	平均定位误差/像素
< 0.2	78	0.335 9
0.2 ~ <0.5	176	0.610 7
0.5 ~ <0.8	58	1.096 8

从表 2 可以看出:随着特征强度阈值的提高,平 均定位误差呈上升趋势.同时,不同特征强度的特征 点间的定位误差差异也较大,如特征强度在 0.5 与 0.8 之间的特征点的平均定位误差接近特征强度小于 0.2 的特征点的定位误差的 3 倍.

#### 3.3 尺度、特征强度与定位精度的关系

上述实验结果表明:采用小尺度特征点或者降低 特征强度阈值均能有效提高匹配成功的特征点对的 定位精度,但可能造成匹配成功率的下降.为了进一 步研究尺度、特征强度与定位精度间的关系,针对不 同尺度的特征点,分别设置不同的特征强度阈值,进 行特征点匹配实验,结果见表 3.

表 3	不同尺度和特征强度下特征点的平均定位	误差
Гаb. З	Average positioning errors of feature	points

different scales and characteristic intensities

尺度	特征强度	匹配点对数量	平均定位误差/像素
	< 0.2	71	0.267 9
20	0.2~<0.5	176	0.524 5
	$0.5 \sim < 0.8$	66	0.826 3
20~<40	< 0.2	52	0.418 3
	0.2 ~ <0.5	129	0.902 3
	0.5~<0.8	40	1.316 6
	< 0.2	27	0.958 9
≥40	0.2 ~ <0.5	40	1.473 9
	$0.5 \sim < 0.8$	12	1.954 5

从表 3 可以看出:特征点尺度越小,同时特征强 度值越小的情况下,匹配点对间的平均定位误差越 小,也即定位精度更高.同时,对于小尺度特征点来 说,即便特征强度值稍大,也能够获得较高的定位精 度.而对于大尺度特征点,只有当特征强度值较小 时,才能获得高精度的匹配点对.

#### 4 改进算法

前文分析表明,采用统一的特征强度阈值无法实 现定位精度与匹配成功率间的平衡.因此,本文提出 一种特征点尺度与特征强度自适应的 SURF 特征点 匹配算法.

#### 4.1 算法原理

对定位精度较高的小尺度特征点,采用较大的特征强度阈值,以保留更多的小尺度特征点;对定位精 度不高的大尺度特征点,采用较小的特征强度阈值, 以剔除定位精度较低的大尺度特征点.

具体算法流程如下:

(1)提取模板图像 SURF 特征点;

(2)根据尺度大小将 SURF 特征点分为 3 类:尺度<20、20≤尺度<40、尺度≥40;</li>

(3)提取待测图像 SURF 特征点,分别在 0.2、

0.5、0.8 的特征强度阈值下与步骤(2)所得的 3 类特 征点进行匹配,得到匹配结果.

#### 4.2 算法的比较

为了验证算法的有效性,使用传统 SURF 算法以 及基于 SVM 的改进 SURF 算法与本文提出的自适 应算法对多幅图像对进行了特征点匹配实验.常俊 林等<sup>[5]</sup>所提出的 SVM 与 SURF 相结合的算法采用 SVM 选取合适的匹配阈值,提高了匹配精度,与本文 所提出的算法具有较高的可对比性,因此选取此改进 算法进行对比.

在传统的 SURF 匹配算法中,将特征强度阈值设 置为被普遍采用的 0.66. 本文提出的自适应算法的 参数设置为尺度小于 20 的特征点的特征强度阈值为 0.8;尺度在[20,40]区间的特征点的特征强度阈值为 0.5; 尺度大于 40 的特征点的特征强度阈值为 0.2, 为 不同尺度的特征点设置为不同的匹配规则. 所选测 试用图见图 5,实验结果见表 4.



(a) 1 号

(b) 2 号

(c) 3 号

图 5 测试用图 Fig. 5 Test images

表 4	算法匹配	性能比较	

Tab. 4	Matching	performance	of different algorithms	5
--------	----------	-------------	-------------------------	---

团佈护旦	匹配点对数量		平均定位误差/像素			
图 涿 姍 与	本文算法	传统 SURF	改进 SURF	本文算法	传统 SURF	改进 SURF
1	354	343	314	0.638 0	0.701 5	0.653 6
2	553	541	372	0.554 2	0.645 2	0.567 3
3	646	627	487	0.648 5	0.734 4	0.634 6

从表 4 可以看出:传统算法平均定位误差较大, 而基于 SVM 的 SURF 改进算法针对整幅图像选取 一个适宜的特征强度阈值,故其平均定位误差要小于 传统的 SURF 算法,但匹配点对数量下降较明显;与 传统的 SURF 算法相比,本算法在获得相近数量的匹 配点对的情况下,平均定位误差降低了 10%~15%; 与基于 SVM 的 SURF 改进算法相比,本算法在定位 误差基本相同的情况下,匹配成功的特征点数增加了 11%~48%. 上述结果表明,本算法较好地实现了特征 点的平均定位误差与匹配成功率间的平衡.

#### 语 5 结

本文在深入研究 SURF 特征点的尺度、特征强度 与定位精度间关系的基础上发现:随着特征点尺度的 减小,特征点的定位误差呈下降趋势;另外,随着特 征强度阈值的降低,特征点的定位误差也呈下降趋 势,但同时都伴随着匹配成功特征点对数量的下 降.为此,本文提出了一种尺度和特征强度的自适应 SURF 特征点配准算法,通过特征强度阈值与尺度间 的相互适应,使保持特征点的定位精度与匹配成功率 间的平衡成为可能. 实验结果表明:本算法在有效地 提高了特征点的定位精度的同时,获得了数量更多的 匹配特征点对.

#### 参考文献:

- [1] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 404–417.
- [2] Juan L, Gwun O. A comparison of SIFT, PCA-SIF and SURF[J]. International Journal of Image Processing, 2009, 3(4): 143–152.
- [3] Mikolajczyk K, Schmid C. A performance evaluation of local descriptors[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27 (10): 1615-1630.
- [4] 潘建平,郝建明,赵继萍. 基于 SURF 的图像配准改进 算法[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(1): 110-115. (下转第80页)

· 80 ·

tance[J]. Journal of Uncertain Systems, 2012, 6(4): 256–262.

- [20] Liu B D. Theory and Practice of Uncertain Programming[M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- [21] Chen X W, Liu Y H, Ralescu D A. Uncertain stock model with periodic dividends[J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2013, 12(1):111–123.

(上接第 59 页)

and detoxicification of a Congo red dye solution by means of ozone treatment for a possible water reuse[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161 (2) : 974–981.

- He Z Q, Lin L L, Song S, et al. Mineralization of C. I. Reactive Blue 19 by ozonation combined with sonolysis: Performance optimization and degradation mechanism[J]. Separation and Purification Technology, 2008, 62 (2) : 376–381.
- [9] Zhang H, LÜ Y J, Liu F, et al. Degradation of C. I. Acid Orange 7 by ultrasound enhanced ozonation in a rectangular air-lift reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 138(1):231–238.
- [10] 吴耀国,赵大为,焦剑,等. 臭氧化的负载型非均相催 化剂制备及其作用机理[J]. 材料导报,2005,19(10): 8-11.
- [11]洪浩峰,潘湛昌,徐阁,等.活性炭负载催化剂臭氧催 化氧化处理印染废水研究[J].工业用水与废水, 2010,41(3):29-33.
- [12] 袁森卉. 粉煤灰基催化剂催化臭氧氧化深度处理印染 废水的研究[D]. 苏州:苏州科技学院,2012.
- [13] Patnaik P. Handbook of Inorganic Chemicals[M]. New

#### 天津科技大学学报 第34卷 第2期

- [ 22 ] Zhu Y G. Uncertain optimal control with application to a portfolio selection model[J]. Cybernetics and Systems, 2010, 41 (7): 535–547.
- [23] Liu B D. Uncertainty Theory: A Branch of Mathematics for Modeling Human Uncertainty [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2010.

责任编辑:常涛,周建军

York: McGraw-Hill, 2003.

- [14] He K, Dong Y, Yin L, et al. A facile hydrothermal method to synthesize nanosized Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub> and study of its catalytic characteristic in catalytic ozonation of phenol[J]. Catalysis Letters, 2009, 133 (1/2) : 209.
- [15] Qi F, Xu B, Chen Z, et al. Catalytic ozonation of 2isopropyl-3-methoxypyrazine in water by *γ*-AlOOH and *γ*-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Comparison of removal efficiency and mechanism[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 219: 527– 536.
- [16] 张冉. 非均相催化臭氧氧化深度处理煤化工废水[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [17] Li W W, Qiang Z M, Zhang T, et al. Kinetics and mechanism of pyruvic acid degradation by ozone in the presence of PdO/CeO<sub>2</sub>[J]. Applied Catalysis B : Environmental, 2012, 113: 290–295.
- [18] Qi F, Xu B, Zhao L, et al. Comparison of the efficiency and mechanism of catalytic ozonation of 2, 4, 6trichloroanisole by iron and manganese modified bauxite[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2012, 121: 171–181.

#### 责任编辑:周建军

### (上接第74页)

- [5] 常俊林,魏巍,梁君燕. 基于支持向量机的 SURF 改进 算法[C]// 第三十届中国控制会议论文集 C卷. 北京: 中国自动化学会控制理论专业委员会,2011:3083-3087.
- [6] 贡超,蒋建国,齐美彬. 基于扩散距离的 SURF 特征图 像匹配算法[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2015,38(4):474-478.
- [7] 胡旻涛,彭勇,徐赟. 基于改进 SURF 的快速图像配准

算法[J]. 传感器与微系统,2017,36(11):151-153.

- [8] 张锐娟,张建奇,杨翠. 基于 SURF 的图像配准方法研 究[J]. 红外与激光工程,2009,38(1):160-165.
- [9] 尧思远, 王晓明, 左帅. 基于 SURF 的特征点快速匹配 算法[J]. 激光与红外, 2014, 44(3): 347-350.
- [10] 何周灿,王庆,杨恒. 一种面向快速图像匹配的扩展 LSH 算法[J]. 四川大学学报:自然科学版,2010, 47(2):269-274.

责任编辑:常涛,周建军