

基于 SURF 和快速近似最近邻搜索的图像匹配算法^{*}

赵璐璐, 耿国华, 李 康, 何阿静
(西北大学 信息科学与技术学院, 西安 710127)

摘 要: 针对高维特征向量存在的最近邻匹配正确率低的问题, 提出了一种基于 SURF 和快速近似最近邻搜索的图像匹配算法。首先用 Fast-Hessian 检测子进行特征点检测, 并生成 SURF 特征描述向量; 然后通过快速近似最近邻搜索算法得到初匹配点对, 再对得出的单向匹配结果进行双向匹配; 最后采用鲁棒性较好的 PROSAC 算法进一步剔除误匹配点对。实验证明了该算法不仅提高了 SURF 算法匹配的正确率, 还保证了算法的实时性。

关键词: 图像匹配; 快速近似最近点搜索; 加速鲁棒特征; 改进的样本一致性; 双向匹配

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)03-0921-03

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2013.03.072

Images matching algorithm based on SURF and fast approximate nearest neighbor search

ZHAO Lu-lu, GENG Guo-hua, LI Kang, HE A-jing

(School of Information Science & Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: This paper proposed an images matching algorithm based on SURF and fast approximate nearest neighbor search for that nearest neighbor matching of high-dimensional feature vector was low. First, this algorithm used Fast-Hessian detection to find features, and generated feature vector of SURF descriptors. Then using bidirectional approximate nearest neighbor matching algorithm to match, finally adopted PROSAC algorithm to exclude mistake matching points. Experiments show that the algorithm not only improves the matching correct rate of SURF algorithm, and ensure the real-time nature.

Key words: images matching; FLANN; SURF(speeded up robust features); PROSAC; bidirectional matching

图像匹配在图像处理中一直是研究的重点和热点之一, 它用来匹配相互间具有偏移的两幅或多幅图像。在目标识别、三维重建、运动分析、图像拼接等领域都有着广泛的应用。目前, 广泛应用的图像匹配算法主要有两类: a) 基于区域的匹配方法, 该方法运算量大而且不能解决图像旋转和尺度缩放的问题; b) 基于特征的匹配方法, 近年来, 由于基于局部不变特征的匹配算法具有计算量小、良好的鲁棒性, 对图像偏移、旋转、灰度变化等都有较好的适应能力, 逐渐成为图像匹配算法研究的主流方向。

2004 年, Lowe^[1]完善总结了现有的特征检测方法, 并正式提出了 SIFT(scale invariant feature transform)算法, 该算法通过提取稳定的特征, 可以对发生平移、旋转、仿射变换、视角变换、光照变化情况的图像进行匹配; 但由于 SIFT 算法本身复杂度较高也存在着特征检测和匹配速度慢的缺点。随后, Bay 等人^[2]提出了 SURF 算法, 它是对 SIFT 算法的一种改进, 其性能超过了 SIFT 且能够获得更快的速度。SURF 算法在光照变化和视角变化不变性方面的性能接近 SIFT 算法, 尤其对图像严重模糊和旋转处理得非常好。文献[3]通过对几种具有代表性的局部特征算法进行了性能评估, 实验结论表明, SURF 算法是性能最为鲁棒的局部特征算法。SURF 算法通过计算积

分图像和 Fast-Hessian 矩阵大大提高了特征点检测的速度, 但特征匹配时采用的是全局最近邻搜索方法, 由于 SURF 特征向量是高维向量, 其计算量大、匹配正确率低。

针对上述算法的优点和存在的不足, 本文提出了一种基于 SURF 和快速近似最近邻搜索的立体匹配算法。

1 SURF 特征提取和描述

本文采用 SURF 算法作为图像匹配的特征提取算法。SURF 特征点检测的主要过程分为特征点提取和生成特征 SURF 描述向量。

1.1 SURF 特征点提取

SURF 算子的检测与 SIFT 算法都是基于尺度空间的, 采用 Hessian 矩阵来提取特征点。

尺度为 σ 的图像点 $I(x, y)$ 的 Hessian 矩阵定义为

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

其中: $L_{xx}(x, \sigma)$ 、 $L_{xy}(x, \sigma)$ 和 $L_{yy}(x, \sigma)$ 是 x 点处高斯函数二阶偏导数和图像的二维卷积。

为了提高高斯卷积的计算速度, SURF 算子采用方框滤波

收稿日期: 2012-07-29; **修回日期:** 2012-09-04 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61170203); 国家“973”计划前期研究专项基金资助项目(2011CB311802); 国家教育部博士点基金资助项目(200806970014); 陕西省自然科学基金资助项目(2011JQ8001, 2010JQ8011); 虚拟现实应用教育部工程研究中心开放基金资助项目(MEOBNUEVRA200903); 陕西省教育厅资助项目(09JK738, 12JK0730)

作者简介: 赵璐璐(1989-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要研究方向为图形图像处理、可视化技术(381299609@qq.com); 耿国华(1955-), 女, 教授, 博导, 主要研究方向为图形图像、可视化技术、智能信息处理; 李康(1980-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为计算机可视化; 何阿静(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为图形图像处理、可视化技术。

器来近似二阶高斯滤波,构造了一种 Fast-Hessian 矩阵。 9×9 的方框滤波器如图 1 所示。在原图像上,通过扩大方框滤波器尺寸形成不同尺度的图像金字塔,并使用积分图像对图像卷积进行加速,进一步求解得到 Fast-Hessian 矩阵的行列表达式^[1]为

$$\Delta H = D_{xx}(x)D_{yy}(x) - (0.9D_{xy}(x))^2 \quad (2)$$

其中: Δ 为在点 $I(x,y)$ 周围区域的方框滤波器响应值,用 Δ 进行极值点的检测。方框滤波模板与图像进行卷积运算后的值分别为 D_{xx} 、 D_{xy} 、 D_{yy} 。通过矩阵的行列式和特征值来判别是否为极值点,若 Fast-Hessian 矩阵的行列式值为正,且两个特征值不同时为正或为负,则认定为极值点。

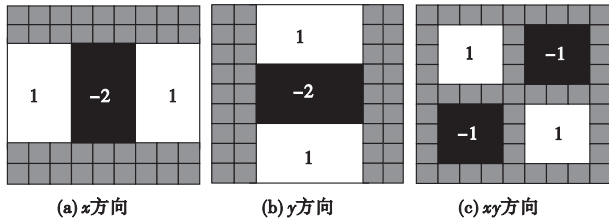


图1 9×9 方框滤波器模板

根据 Fast-Hessian 矩阵求出尺度图像在 (x,y,σ) 处的极值后,首先在极值点为 $3 \times 3 \times 3$ 的立体邻域内进行非极大值抑制 (non-maximum suppression, NMS)。只有比相邻上下尺度和本尺度周围的 26 个邻域值都大或者都小的极值点才能作为候选特征点。为了能够对候选特征点进行亚像素定位,可以在尺度空间和图像空间中进行插值,得到稳定的特征点位置及所在的尺度值。

1.2 SURF 特征描述

为使得描述子具有旋转不变性,首先得到特征点方向。构造以特征点为圆心、 $6s$ (s 为特征点的尺度) 为半径的邻域在 x 和 y 方向的 Harr 小波响应,并赋予这些响应值不同的高斯权重系数,使得越靠近特征点的响应贡献越大;然后将 60° 内的 x 和 y 方向 Harr 小波响应相加形成一个局部方向向量,遍历整个圆形区域;最后选择最长向量方向为该特征点主方向。

接着以特征点为中心构造长为 20 的正方形邻域,将该窗口邻域分为 4×4 的子区域,对于每个区域计算 5×5 个采样点的水平方向和垂直方向的 Harr 小波响应,分别记做 d_x 和 d_y ,并用高斯窗口函数对响应值赋予权重系数,得到一个四维的矢量: $V = (\sum d_x, \sum |d_x|, \sum d_y, \sum |d_y|)$,所以 SURF 的描述符维数是 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 。最后,为了保持对光照不变性,需要对向量进行归一化处理,得到特征描述符,如图 2 所示。

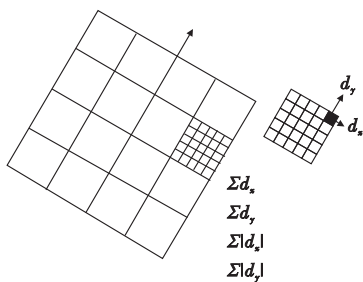


图2 特征描述符的构成

2 特征匹配

为提高匹配的正确率,首先采用双向 FLANN 算法找到具有最近距离的匹配点对,最近邻距离采用欧式距离,定义如式 (3) 所示。通过 PROSAC (progressive sample consensus)^[4] 剔除

误匹配。

$$D = \sqrt{(x_1 - x'_1)^2 + (x_2 - x'_2)^2 + \dots + (x_{64} - x'_{64})^2} \quad (3)$$

其中: $(x_1, x_2, \dots, x_{64})$, $(x'_1, x'_2, \dots, x'_{64})$ 为待匹配的两个特征点的 SURF 特征向量。

2.1 双向 FLANN 算法

由于 SURF 特征向量是高维向量,以往算法采用基于最近邻距离的匹配算法,其匹配过程相当于高维空间中的最近邻搜索问题,计算量太大。文献[5]对一些相关的算法进行了比较,发现对于高维空间中的最近邻搜索问题,采用分层 K-均值树和多重随机 KD 树具有较好的性能,并且实现了根据用户输入的准确度和高维数据自动化选择的近似快速最近邻搜索算法 FLANN,搜索速率得到了显著提高,因而本文采用 FLANN 算法。

图 3 为图 I_1 到图 I_2 的 FLANN 匹配效果图,匹配对数为 124;图 4 为图 I_2 到图 I_1 的匹配效果图,匹配对数为 136。可以明显看出,同样是两幅图,通过不同方向匹配得到的匹配对数不同,都存在不同程度的误匹配现象。



图3 图 I_1 到图 I_2 的FLANN匹配效果图

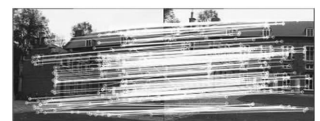


图4 图 I_2 到图 I_1 的FLANN匹配效果图

通过 FLANN 算法搜索,可以得到图像 I_1 特征点 m 在 I_2 图像中具有最小距离的匹配点对 (m, m') ,但此类匹配方法只是从一个侧面描述左右图像角点邻域之间的灰度相似性,易受噪声、光线的明暗差异等外部因素的影响,因而存在错误匹配,鲁棒性有待加强。为了得到可靠准确的匹配点,本文采用双向 FLANN 算法。由于 FLANN 特征匹配算法速度快,双向 FLANN 特征匹配算法通过牺牲少量时间提高了匹配的正确率。

具体流程如下:

a) 通过 FLANN 算法找到图像 I_1 某特征点 m_1 在图像 I_2 中具有最小距离 dist 的初始匹配点对 (m_1, m_2) ,然后根据所有匹配点对的 dist 计算出最小距离 $\min$,设置阈值 $T = \mu \times \min$ (本文通常取 $5 \sim 7$)。如果该匹配点对的最小距离 $\text{dist} < T$,则将 m_2 作为 m_1 的候选匹配点;否则,进行图像 I_1 的下一个特征点的匹配,并剔除点 m_1 ,得到图 I_1 到图 I_2 的 FLANN 匹配点对。

b) 对于 I_2 图像中特征点作同样处理,得到图 I_2 到图 I_1 的 FLANN 匹配点对。对在图像 I_2 中与 m_2 匹配的候选点 m_3 进行判断。如果 $m_1 = m_3$,则 m_1 和 m_2 匹配成功;否则剔除。匹配角点被认为是同时存在于两个匹配强度序列中,且具有最大匹配强度的匹配点,从而得到一个初始匹配集。

2.2 PROSAC 匹配

PROSAC 算法是 RANSAC 算法的改进,比 RANSAC 算法能更快得到最佳模型参数。与 RANSAC 算法采用随机抽取样本不同,这种方法根据特征匹配点对的相似程度先对个体进行排序,认为在相似度高的样本更可能是正确模型的内点,根据内点数据确定模型参数。内点数目越大,则表明模型参数越好。经过若干次的假设与验证,将得到的最好的模型参数作为问题的解。

若 m, m' 是左右图像中的一对正确匹配点对,则点 m 和点 m' 所对应的齐次坐标有如下关系:

$$m^T F m = 0 \quad (4)$$

其中: F 为 3×3 的矩阵,也就是基础矩阵。

由于匹配结果中不可避免地含有一些误匹配点对,为提高匹配效率,本文采用 PROSAC 算法从匹配结果的点集中抽样来获得与原始数据一致的基本子集,然后利用获得的基本子集估算出基础矩阵,最后使用基础矩阵剔除误差较大的匹配点对。

PROSAC 算法的具体步骤如下:

- 根据匹配点对的 SURF 特征描述距离 dist 进行排序。
- 根据取样次数 t 确定假设生成集的大小 n (即认为内点在前 n 中)。
- 从前 n 中抽取 7 个数据和第 n 个数据组成一个样本,利用 8 点法计算基础矩阵。
- 对每个基础矩阵,计算每对匹配点到各自极线距离的平方和,记为 d_i 。将符合 $d_i < T$ 的匹配点对作为内点,统计内点的个数 inliners ,其中 T 为事先设定的阈值。
- 重复步骤 b) ~ d),若满足以下终止条件,则结束程序,根据所对应的基础矩阵剔除误差较大的匹配点对。
终止条件为:
 - 当最大内点比例超过设置的阈值时,程序终止。
 - K 次采样一验证后所有抽样得到的内点数目并没有增加,或者内点数目相同的情况下,误差和没有变小。

3 实验结果及其分析

为验证算法性能,在 VS2005 环境下采用 C++ 语言实现了本文的算法,通过对多幅不同类型的图像对(房屋、轮船、书本)进行匹配实验,发现本文提出的立体匹配算法精度较高。图 5 是房屋建筑测试图像,大小为 384×288 ,该图像对存在一定的视角变换。图 6 是 SURF 特征点提取效果图,房屋图 1 特征点个数为 986 个,房屋图 2 特征点个数为 914 个。

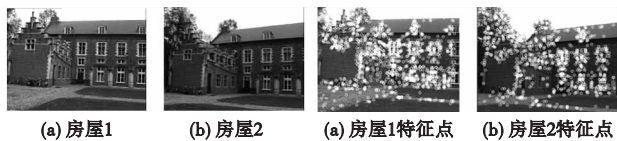


图5 房屋原图

图6 房屋SURF特征点效果图

图 7 是本文算法结果效果图,匹配点对数为 183,匹配正确率 95%。图 8 是 SURF 特征点匹配效果图,匹配点对数为 224,匹配正确率 87%。

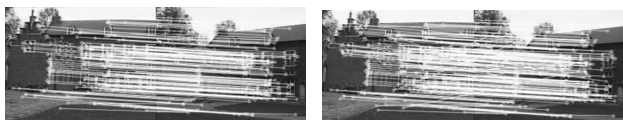


图7 本文算法房屋匹配效果图

图8 SURF特征匹配效果图

由表 1 可以看出,本文算法与 SURF 算法相比,由于采用了双向 FLANN 匹配算法,匹配的点对数有所减少,去除了一些伪匹配;在剔除误匹配方法上采用 PROSAC 算法,弥补了之前损失的一定时间效率。其匹配正确率得到了提高,同时提高了算法的稳定性,且保证了算法的实时性。

表1 本文算法和 SURF 算法匹配效率比较

算法	匹配点对	匹配正确率/%	匹配时间/ms
本文算法	183	95	987
SURF	224	87	1 215

图 9 是轮船测试图,该图像存在一定的旋转和缩放变化,

匹配点对数为 27。图 11 是汽车图,具有一定的光照变化,匹配点对数为 201。从以上实验的匹配效果图图 10、12 可以看出,本文算法对旋转、缩放、视角、光照变化都具有一定的不变性,匹配正确率均在 90% 以上。



图9 轮船原图

图10 本文算法轮船匹配效果图



图11 汽车原图

图12 本文算法汽车匹配效果图

4 结束语

本文研究了基于 SURF 特征和快速近似最近邻搜索的图像匹配算法。首先采用 Fast-Hessian 快速检测特征点,然后通过双向 FLANN 匹配算法得到匹配点对,提高了匹配精度但是增加了处理时间;最后采用 PROSAC 算法剔除误匹配,有效地减少了一些计算时间。通过针对不同视角、旋转、光照、缩放变换进行的实验证明,本文算法在牺牲少量时间的基础上,大大提高了 SURF 算法的稳定性,且保证了算法的实时性。下一步工作将在匹配的自适应阈值方面以及匹配效率上进行改进,并将其应用于快速的自动图像匹配中。

参考文献:

- LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60 (2): 91-110.
- BAY H, TUYTELAARS T, Van GOOL L. SURF: speeded up robust features [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110 (3): 346-359.
- MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. A performance evaluation of local descriptors [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27 (10): 1615-1630.
- BRANDT S. Maximum likelihood robust regression with known and unknown residual models [C]//Proc of Statistical Methods in Video Proc Workshop. 2002: 97-102.
- MUJA M, LOWE D G. Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration [C]//Proc of the VISAPP International Conference on Computer Vision Theory and Applications. 2009: 331-340.
- 马颂得, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 78-80.
- 汪善义, 马煜, 汪源源. 基于 SIFT 特征和近似最近邻算法的医学 CT 图像检索 [J]. *生物医学工程学报*, 2011, 32 (3): 123-129.
- 戚世贵, 戚素娟. 基于特征点的最近邻配准算法 [J]. *许昌学院学报*, 2008, 27 (2): 67-71.
- MIKOLAJCZYK K, TUYTELAARS T, SCHMID C, et al. A comparison of affine region detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2005, 65 (1/2): 43-72.
- 彭辉, 文友先, 翟瑞芳, 等. 结合 SURF 算子和极线约束的柑橘立体图像对匹配 [J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47 (8): 157-160.