

无人飞行器视觉 SLAM 特征检测和匹配算法研究

王 国 胜, 郭 峰, 刘 峰

(装甲兵工程学院 控制工程系, 北京 100072)

摘要: 近几年图像局部特征检测和描述在机器人视觉中得到了广泛的应用, 鲁棒的、快速且高精度的视觉特征检测和描述算法对飞行器进行实时的位姿估计和地图构建具有决定性意义; 针对四旋翼无人飞行器平台的 RGB-D 传感器同时定位与地图构建 (SLAM), 讨论 FAST、STAR、SIFT 和 SURF 等检测算法和 ORB、FREAK 和 SURF 等匹配描述符的性能, 对不同的特征算法进行对比评估出最合适的特征检测方法和匹配描述符; 最后, 基于 Eclipse 与 OpenCV 平台进行了实验, 实验结果表明 FAST 检测和 FREAK 描述符比其他方法更适用于四旋翼飞行器在板视觉 SLAM, 且能基本满足实时性。

关键词: 无人飞行器; SLAM; 特征检测; 特征匹配

Research on Feature Detection and Matching Algorithm of Unmanned Aerial Vehicles Visual SLAM

Wang Guosheng, Guo Feng, Liu Feng

(Department of Control Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Recently, image local feature detection and description has been widely used in robot vision, It is decisive significance of a robust, rapid and high accuracy of visual feature detection and description algorithm for unmanned aerial vehicles real-time pose estimation and mapping. In view of the unmanned aerial vehicles RGB-D sensor Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) characteristics, this paper discussed the performance of FAST, STAR, SIFT, SURF detection algorithm and the ORB, FREAK, SURF descriptor, and then compared different algorithm to find the most suitable feature detection method and the descriptor. Finally, the results of the experiment which is based on Eclipse and OpenCV platform, show that the FAST detection and FREAK descriptor is better than other methods suitable for unmanned aerial vehicles real-time visual SLAM.

Keywords: unmanned aerial vehicles; SLAM; feature detection; feature matching

0 引言

近年来, 无人平台在外星探测、矿难、地震救援、军事侦察等领域的应用越来越广泛, 旋翼型无人飞行器灵活机动且受到地面地形的约束较小。RGB-D 传感器^[1]可以同时获得环境色彩信息 (RGB) 和深度信息 (Depth), 十分适合在移动机器人自主导航和 SLAM 中应用。所以通过四旋翼无人飞行器^[2]搭载 RGB-D 传感器和机载主控计算机进行实时地 SLAM 是近年来一个研究热点, 近几年也涌现了很多基于无人飞行器平台的 RGB-D SLAM 方法。

稀疏的 RGB-D SLAM 方法首要的任务是从当前环境图像中提取合适的特征以描述四旋翼飞行器当前所在环境的典型局部特征, 而计算相对位姿、环路闭合检测、优化位姿图等过程都是以局部特征为基础, 所以特征提取部分的优劣影响着整个系统性能。N. Engelhard 等^[4]提出实时的三维视觉 SLAM 方法, 采用 SIFT、SURF 和 ORB 特征分别检测和匹配, 进行了对比分析, 但是从实验结果看精度和实时性上还不适用于对飞行器进行实时的位姿估计。纽约城市大学 Roberto 等^[3]的视觉里程计提出帧对模型方法采用了 SURF、ORB 和 Shi-To-masi 三种特征检测方法构建模型。王亚龙等^[5]的三维视觉里程计设计对比分析了 4 种不同的检测和描述组合, 在精度上

SURF 检测和 SURF 描述累积误差较小, 精度高, 但耗时长, 采用了 GPU 进行加速。所以其不适用于飞行器实时的在板运行。

本文主要对一个四旋翼无人飞行器搭载 RGB-D 传感器和在板主控计算机进行实时的 SLAM 系统进行研究, 采用稀疏的 RGB-D SLAM 方法, 考虑飞行器的负载、主控计算机的处理计算能力、室内环境的亮度变化和飞行器姿态变化较大等特点, 对图像旋转变换、尺度变换、亮度变换、高斯模糊、处理能力和时间等方面进行算法的评估。选择一种鲁棒的、快速的、低内存和低处理器需求且具有良好旋转、尺度、亮度等不变性的检测和匹配方法, 是一个无人飞行器 SLAM 系统实时和高精度的重要条件之一。

1 图像特征检测与匹配

一般来说, 飞行器的导航和自主飞行需要传感器提供运动估计, 其方法主要是对传感器获取的图像进行特征检测和匹配, 寻找当前帧与参考帧的关键点对应关系, 通过关键点位置的变化计算飞行器位姿。图像特征检测和匹配包括关键点检测、构建特征描述符和描述符匹配三部分。

1.1 关键点检测

找到图像中的点特征, 并确定其位置就是关键点检测, 目前几种检测算法在 SLAM 中得到了应用。如 FAST, STAR, SIFT, SURF。

FAST^[6]是由 E. Rosten 和 T. Drummond 在 2006 年提出的一种简单快速的角点算法, FAST 角点定义为在像素点的某一

收稿日期: 2015-04-07; 修回日期: 2015-05-22。

作者简介: 王国胜(1975-), 男, 河北唐山人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事控制理论与控制工程方向的研究。

邻域内，有足够多的像素点的灰度值与该像素点灰度值的绝对差值较大。一个像素点是否为角点可以通过计算圆周上满足 $I(x) - I(p) > \epsilon_d$ 点的个数 N 来判断， N 即为角点响应函数，其表达式如下：

$$N = \sum_{x \in \text{circle}(p)} |I(x) - I(p)| > \epsilon_d \quad (1)$$

其中： $I(p)$ 表示中心像素点的灰度值， $I(x)$ 表示圆形模板的圆周上任意一点的图像灰度值， ϵ_d 为一给定的阈值常数。

1.2 构建特征描述符

特征描述符是将检测到的关键点领域灰度值进行信息提取，形成不同长度的特征向量。常用的描述符有基于梯度直方图的 SIFT、SURF 和近几年迅速发展的基于二进制位串的 BRIEF、ORB、FREAK、BRISK 等。

ORB^[8] 是一种高效的二进制局部特征描述符，他是以 FAST 关键点检测和改进的 BRIEF 为基础，对于 BRIEF 不具备旋转不变性和对噪声敏感的问题都进行了有效的解决。关键点采用 oFAST，即 orientation 的 FAST，计算了关键点的角点方向。其中特征点的主方向是通过矩计算而来，公式如下：Moments：

$$M_{pq} = \sum_{x,y} x^p y^q I(x,y) \quad (2)$$

角点方向：

$$C = \left(\frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}} \right) \quad (3)$$

$$\theta = \text{atan2}(m_{01}, m_{10}) \quad (4)$$

描述符为有向的 BRIEF，将角点的方向作为 BRIEF 方向。即 rBRIEF。ORB 特征就是 oFAST 和 rBRIEF 的组合。

FREAK^[9] 是一个快速的视网膜算法，与 ORB 类似也是一种二进制局部特征，所不同的是其选取的点对的斑块大小类似于人眼视网膜细胞的分布，中间密集，四周稀疏，在图像中构建很多的圆形区域，越靠近中心的区域采样更密集，四周区域采样稀疏。

FREAK 构建二进制描述符的策略为：

$$T(P_a) = \begin{cases} 1, & \text{if } (I(P_a^{r1}) - I(P_a^{r2})) > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

其中： $I(P_a^{r1})$ 是点对 P_a 的区域平滑强度。

随机对比各区域的像素得到一组二值特征，FREAK 算法也具有尺度不变性。

SURF^[7] 描述符与 SIFT 相似，全称为 Speed-up Robust Features。构建 SURF 描述符第一步是确定特征点的主方向，以特征点为中心，计算半径为 $6S$ (S 为特征点所在的尺度值) 的领域内，统计 60 度扇形内所有点在 x 和 y 方向的 haar 小波响应总和，并给这些响应赋值高斯权重系数，然后将响应相加形成矢量，最终选择最长矢量的方向为主方向。然后在每 4×4 的小块上计算 8 个方向的梯度直方图，绘制每个梯度方向的累加值。

1.3 描述符匹配

描述符的匹配是通过计算描述符特征向量间的距离判定描述符之间的相似性，实现特征的匹配。针对二进制局部特征描述符，通常采用汉明距离来进行相似度计算。

$$\text{sim}(m_1, m_2) = 1 - \sum_{k=1}^n (x_k \oplus y_k) / n \quad (6)$$

其中： x_k, y_k 分别代表描述符 m_1, m_2 的第 k 位值， \oplus 是模 2

加运算。

梯度直方图 SIFT 和 SURF 描述符则采用特征向量的欧式距离来作为相似性判定度量。如果两个描述符次近距离除以最近距离小于某个阈值，则判定为一对匹配点对。

$$D = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{1k} - x_{2k})^2} \quad (7)$$

式中， x_{1k} 和 x_{2k} 为两个特征向量。

2 实验结果及评估

针对上文中提到的几种应用于 SLAM 的特征检测算法和描述符，本节主要对其性能进行实验对比，算法评估的实验平台为 eclipse 和 opencv，计算机为 Intel 酷睿 i7 双核 3537U 处理器，采用 Ubuntu 操作系统。

2.1 关键点检测评估

对于特征检测算法的实验评估采用 Mikolajczyk 提供的数据集 graffiti 的六幅图像，依次进行了不同的仿射变换。首先主要从两个性能对检测子进行评估，六幅图检测的平均关键点数量和平均检测时间。对数据集中未经仿射变换的第一幅图像采用 FAST 检测结果如图 1 所示，检测算法的平均关键点数量和检测时间如表 1 所示。



图 1 graffiti 数据集第一幅图像 FAST 检测结果

表 1 4 种检测算法平均关键点数量和检测时间

检测算法	平均关键点数量	平均检测时间/ms
FAST	3389	18.8
STAR	1308	131.1
SURF	1355	353.9
SIFT	1535	576.9

从表 1 中可以看出 FAST 算法平均检测出了 3 389 个特征点，远大于其他 3 个方法。在平均检测时间方面，SIFT 和 SURF 在 4 个检测方法中是最慢的，其中速度最快的为 FAST 检测，在 800×640 的图像中进行检测平均仅用了 18.8 ms。所以 FAST 作为一种简单快速的特征检测算法，在关键点数量和检测时间上具有较好的性能。同时可以通过改变检测阈值对检测的关键点数量进行操作。

为了评估检测算法对匹配性能的影响，文章对检测算法还选取了匹配率作为评估准则。主要对图像进行了旋转和亮度变换，再分别与 FREAK 描述符结合进行匹配实验，对比了 FAST、STAR、SURF、SIFT 四个检测算法的匹配率，其中匹配率 = 匹配的点对数 / 两幅图像中较少的特征点数。实验结

果如图 2 和图 3。

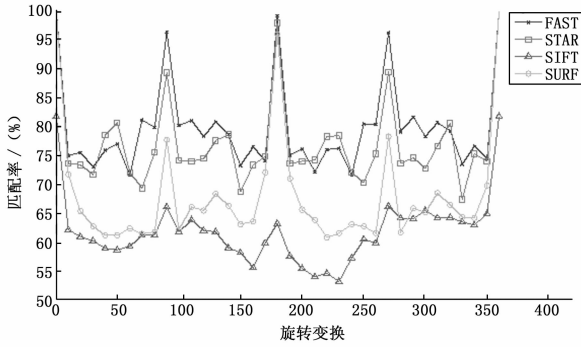


图 2 不同检测算法与 FREAK 描述符结合后图像旋转变换匹配率

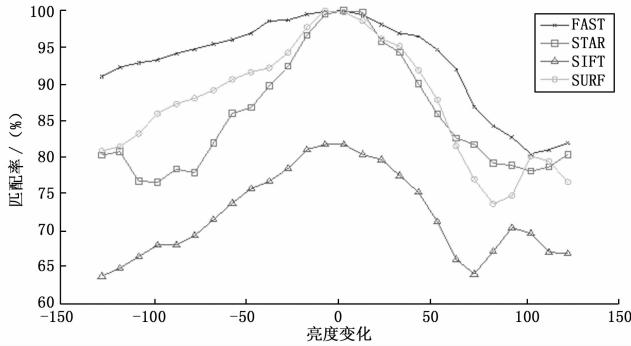


图 3 不同检测算法与 FREAK 描述符结合图像亮度变换匹配率

由图 2 和图 3 可知, 在与 FREAK 描述符结合的情况下, FAST 检测算法在旋转和亮度变化下匹配率都优于其他 3 个方法。所以 FAST 对包括旋转和亮度变化的整体匹配性能较好。综合两个实验的对比, FAST 是一个较好的检测方法, 比其他算法更适用于一个实时高精度 SLAM 系统中。

2.2 特征描述符评估

在特征描述符的评估中, 选取一幅室内环境的图像。将图像分别进行旋转、尺度、亮度和高斯模糊变换, 再与源图像进行匹配。检测均采用上文中评估出的性能较好的 FAST 算法。选取的性能指标为: 正确匹配率。使用随机采样一致 (RANSAC) 算法计算初始匹配中包含的正确匹配数, 它与初始匹配数的比值即为正确匹配率。

图 4 为图像从 0~360 度进行了不同的旋转变换后的正确匹配率, 结果表明 FREAK、ORB、SURF 均具有良好的旋转不变性, 但是 FREAK 在图像旋转变换过程中保持了更高的正确匹配率。图 5 为图像从 0.25 到 1.95 进行不同的尺度变换后

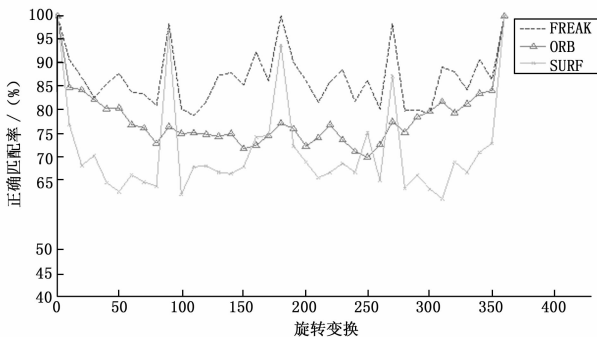


图 4 不同旋转变换后的正确匹配率

的正确匹配率, 结果表明 FREAK、ORB、SURF 均具有良好的尺度不变性, 但是 ORB 在尺度变化大的情况下匹配性能更佳, SURF 对尺度比较敏感, 在较小的尺度变化下, FREAK 的正确匹配率更高。图 6 为图像从 -127 到 127 进行不同的亮度变换后的正确匹配率, 结果显示 ORB 和 SURF 在亮度变化大时, 正确匹配率急剧下降, 而 FREAK 对亮度的不变性较好, 且正确匹配率都在 80% 以上。图 7 为图像从 1 到 9 进行不同的高斯模糊后的正确匹配率, 结果显示 ORB 具有良好的不变性, FREAK 和 SURF 在正确匹配率上均低于 ORB。所以 ORB 的性能优于 FREAK 和 SURF。

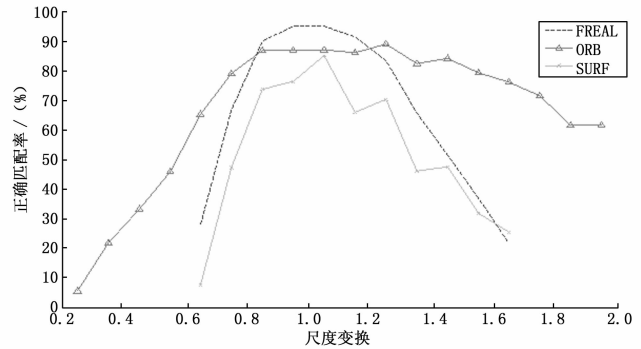


图 5 不同尺度变换后的正确匹配率

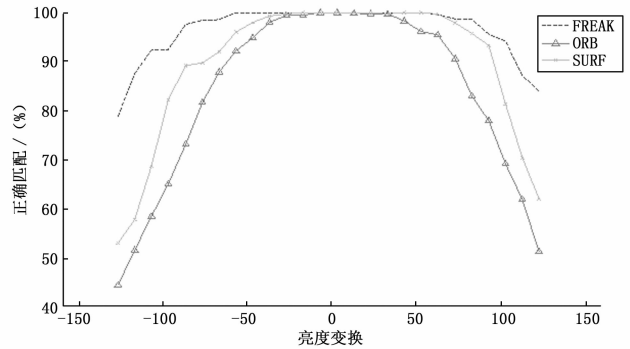


图 6 不同亮度变换后的正确匹配率

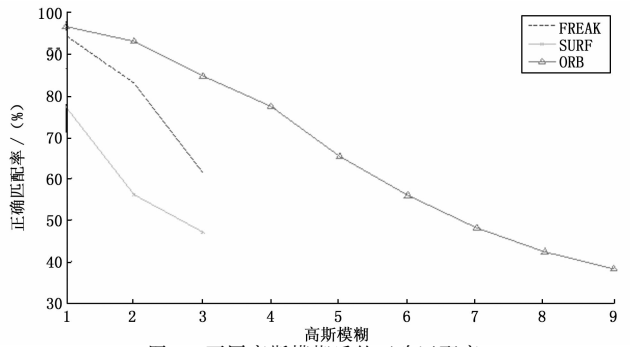


图 7 不同高斯模糊后的正确匹配率

表 2 3 种描述符的匹配时间

描述符	提取描述符 时间/ms	匹配 时间/ms
ORB	30.6	68.4
SURF	251.5	164.6
FREAK	109.8	93.1

表 2 时间复杂度比较

关联算法	计算时间	计算强度
对比算法	31.23	11.76
本文比算法	27.08	10.16

5 结束语

针对传统数据关联算法存在的不足，在分析无被动传感器数据关联模型的基础上，提出一种位置估计不确定性的被动传感器数据关联算法。实验结果表明，相对于当前经典的数据关联算法，本文提高了数据关联的正确率，具有更高的实际应用价值。

参考文献：

- [1] 潘 泉, 梁 彦, 杨 峰, 等. 现代目标跟踪与信息融合 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [2] Sathyan T, Sinha A, Kirubarajan T, McDonald M, Lang T. MDA-based data association with prior track information for passive multi-target tracking [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47 (1): 539-556.
- [3] 袁德平, 史浩山, 郑娟毅. 用于多目标数据关联的群智能混合算法 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2012, 40 (9): 97-99.
- [4] 朱晓钢, 杨 兵, 许华杰. 支持无线传感器网络多目标跟踪的最邻近数据关联算法研究 [J]. 计算机科学, 2011, 38 (5): 67-70.

(上接第 2455 页)

综合上面的 5 个测试可知, FREAK 描述符对旋转变换、小尺度变化, 亮度变化均具有良好的性能, 比 ORB 和 SURF 更能保持较高的匹配正确率。从速度方面来看, 在提取了 $1\ 302 \pm 132$ 个特征点的相同条件下, 构造描述符时 ORB 的速度是最快的, 仅花费 30.6 ms, 在匹配时间的对比上, ORB 所用时间也是最短的, 而 FREAK 构建描述符及匹配共消耗 212.9 ms, 加上 FAST 检测和计算位姿估计时间, 在 SLAM 中对一帧图像的处理能保持在 0.25 s 以内。图 8 为 FAST+FREAK 在图像旋转 30 度时的匹配结果。

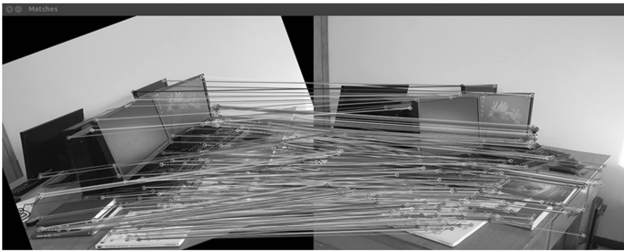


图 8 FAST+FREAK 旋转变换匹配结果

3 结论

本文根据无人飞行器搭载 RGB-D 传感器进行同时定位与地图构建的特点, 对几种流行的特征检测和描述算法性能进行了对比评估。主要从检测关键点数量、检测时间以及匹配率 3 个方面对检测算法进行了分析, 从尺度、亮度、旋转、高斯模糊和匹配速度的角度对描述符的性能进行了评估讨论。实验结果表明, FAST 作为一种简单快速的检测算法, 提供了最好的关键点数量和检测速度, 并具有较高的匹配率。二进制位串的特征描述符 FREAK 在旋转、尺度、亮度变化中均具有良好的性能, 匹配正确率高, 具有较快速的提取时间和较低内存需求

- [5] 耿 峰, 祝小平. 一种改进的多传感器多目标跟踪联合概率数据关联算法研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19 (20): 4671-467570.
- [6] Sathyan T, Sinha A. A two-stage assignment-based algorithm for asynchronous multisensor bearings-only tracking [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47 (3): 2153-2168.
- [7] 彤 丽, 谌昌强. 基于人工蜂群算法的多目标跟踪数据关联研究 [J]. 计算机科学, 2013, 38 (9): 86-74.
- [8] 鹿传国, 冯新喜, 孔云波, 等. 基于 Kullback-Leibler 散度的无源传感器数据关联 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2013, 43 (6): 1696-1701.
- [9] 鹿传国, 冯新喜, 孔云波, 等. 被动传感器去相关数据关联算法 [J]. 自动化学报, 2014, 40 (3): 497-505.
- [10] 侯 翔. 基于 PSO-SA 的多目标跟踪数据关联算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (2): 480-482.
- [11] Ouyang C, Ji H. Modified cost function for passive sensor data association [J]. Electronics Letters, 2011, 47 (6): 383-385.
- [12] Ouyang C, Ji H B, Tian Y. Improved relaxation algorithm for passive sensor data association [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2012, 6 (4): 241-250.
- [13] 张晓辉, 邸瑞华, 李维铭. 基于 Renyi 熵的链接数据属性权重计算 [J]. 北京工业大学学报, 2014 (1): 54-60.
- [14] 周 莉, 高 倩, 柳婵娟, 等. 改进的多传感器多目标量测数据关联算法 [J]. 北京邮电大学学报, 2013, 38 (9): 86-74.

的特点。所以 FAST 检测和 FREAK 描述符比其他方法更适用于的无人飞行器在板视觉 SLAM, 且能基本满足实时性的要求。

参考文献：

- [1] Smisek J, Jancosek M, Pajdla T. 3D with Kinect [M]. Consumer Depth Cameras for Computer Vision. Springer London, 2013: 3-25.
- [2] 白洪瑞. 四旋翼飞行器控制系统设计 [D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2012.
- [3] Valenti R G, Dryanovski I, Jaramillo C, et al. Autonomous quadrotor flight using onboard RGB-D visual odometry [A]. Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on. IEEE [C]. 2014: 5233-5238.
- [4] Engelhard N, Endres F, Hess J, et al. Real-time 3D visual SLAM with a hand-held RGB-D camera [A]. Proc. of the RGB-D Workshop on 3D Perception in Robotics at the European Robotics Forum [C]. Vasteras, 2011, 180.
- [5] 王亚龙, 张奇志, 周亚丽. 基于 Kinect 的三维视觉里程计的设计 [J]. 计算机应用, 2014, 34 (8): 2371-2374.
- [6] Rosten E, Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection [A]. In European Conference on Computer Vision [C]. 2006.
- [7] Bay H, Tuytelaars T, Van Gool L. Surf: Speeded up robust features [M]. Computer Vision - ECCV 2006. Springer Berlin Heidelberg, 2006: 404-417.
- [8] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF [A]. Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on. IEEE [C]. 2011: 2564-2571.
- [9] Alahi A, Ortiz R, Vanderghyest P. FREAK: Fast retina keypoint [A]. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on. IEEE [C]. 2012: 510-517.