



研究与开发

卫星视觉导航图像拼接方法研究

陈丽娟¹, 虞业烁¹, 刘晨龙¹, 陈焯海¹, 武子连¹, 卢小豹¹, 李亚卿²

(1. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201304;

2. 南阳市宛城鸭河口灌区事务中心, 河南 南阳 473004)

摘要: 在太空环境中, 视传感器捕获图片颜色单一、纹理弱、特征点少, 图像拼接难度大。构造 Hessian 矩阵以及尺度空间, 通过非极大值抑制得到了匹配点, 并使用 Harris 角点检测算法构建特征点描述子, 采用 RANSAC 算法对匹配结果进行筛选, 得到单应矩阵进而实现拼接。另外, 在实验部分使用卫星图片比较了 Harris 角点检测算法与其他算法处理情况。结果表明, Harris 角点检测算法图像拼接效果更好, 可基于 Harris 角点检测算法利用星载处理单元有限算力, 达到快速拼接卫星图像的目的。

关键词: Harris 角点检测; SURF 算法; RANSAC; 图像拼接

中图分类号: TP751

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024249

Research on stitching method of satellite visual navigation image

CHEN Lijuan¹, YU Yeluo¹, LIU Chenlong¹, CHEN Yehai¹, WU Zilian¹, LU Xiaobao¹, LI Yaqing²

1. Innovation Academy for Microsatellites of CAS, Shanghai 201304, China

2. Yahekou Irrigation District Affairs Center, Wancheng District, Nanyang 473004, China

Abstract: In the space environment, visual sensors capture images with single colors, weak textures, and few feature points, making image stitching difficult. The Hessian matrix and scale space were constructed to obtain matching points through non maximum suppression, using Harris corner detection algorithm to construct feature point descriptors. RANSAC algorithm was used to filter the matching results and obtain the homography matrix for concatenation. In addition, satellite images were used in the experimental section to compare the processing performance of Harris corner detection algorithm with other algorithms. The results show that the Harris corner detection algorithm has better image stitching performance, and can be used to quickly stitch satellite images using the limited computing power of onboard processing units based on the Harris corner detection algorithm.

Key words: Harris corner detection, SURF algorithm, RANSAC, image stitching

0 引言

卫星导航系统中嵌入式处理单元须拼接多路

周视传感器图像。由于太空环境周视传感器捕获图片颜色单一、纹理弱、特征点少, 图像拼接难度大^[1]。需找到一种卫星视觉导航图像拼接方

法,利用星载嵌入式处理单元有限算力,达到快速拼接卫星周视传感器图像遂行导航任务的目的。

图像拼接技术的核心是图像匹配和图像融合。和基于区域的图像匹配方法相比,基于特征的匹配方法往往效率更高^[2]。研究人员已经提出了多种基于特征点匹配的算法。1988年,基于Moravec算法,Harris等^[3]提出著名的Harris角点检测器,主要借助移动窗口对图像中的灰度变化值进行计算。Harris的数量和灵敏性与人为设定的阈值有直接关系,呈负相关。Shi和Tomasi等^[4]在1994年对Harris角点检测进行了改进,提出了Shi-Tomasi算子,这种基于仿射图像变化模型的跟踪算法使得提取的特征点准确度更高。Lowe等^[5-6]采用局部图像特征对物体进行识别,提出了尺度不变特征转换(scale-invariant feature transform, SIFT)算法。采用高斯金字塔来构造尺度空间进而得到DOG差分金字塔,并结合Hessian矩阵进行滤波。该算法对图像平移、缩放和旋转具有尺度不变性,对投影失真和光照变化不敏感。Bay等^[7-8]在2006年提出加速稳健特征(speeded up robust features, SURF)算法,该算法以尺度不变特征转换为基础,具有更高的计算速度。由于SIFT的特征描述子是128维向量,而SURF是64维向量,其在特征描述方面弱于SIFT。Rublee等^[9-10]在2011年提出了定向FAST与旋转BRIEF(oriented fast and rotated BRIEF, ORB)算法,该算法结合快速角点检测(features from accelerated segment test, FAST)算法和二进制鲁棒独立基本特征(binary robust independent elementary features, BRIEF)算法并对其进行改进,其计算速度明显提高,稳定性好,但不具备尺度不变性。曾国奇等^[11]利用SURF特征描述对连续图像进行匹配,并结合随机抽样一致性算法计算单应性变换矩阵。在此基础上,经过球形变换校正后利用单应性完成图像拼接。Zhu等^[12]提出了一种基于渐进变换矩阵的多图像拼接

算法(improved multi-objective particle swarm optimization algorithm, ISGTA)改进的多目标粒子群优化算法以消除匹配过程中的形变扭曲。Lu等^[13]提出了一种双向内容的迁移模块,通过循环神经网络对中间区域的特征表示进行条件预测,除了保证融合过程中的空间和语义一致性外,还采用上下文注意力机制和对抗学习机制来提高融合图像的视觉质量。廖超等^[14]提出了一种航拍视频的多向条带拼接方法,针对航拍视频运动方向多变的特点,选取场景运动方向的最佳条带,控制条带扫描与运动方向之间的夹角,减少信息丢失,提升了拼接效果。易盟和郭宝龙^[15]提出了基于不变特征和映射抑制的航拍视频图像配准方法,利用角点特征点建立特征窗,然后使用映射抑制的方法识别出背景特征点,根据背景特征点实现航拍图像的配准。图像配准(as-projective-as-possible image stitching, APAP)算法^[16]、三角面变换(triangular facet transformation, TFT)算法^[17]等局部变换方法提高了图像拼接质量。

对于这种太空环境而言,通常只能得到物体的部分图像,当获得的局部图像间存在一定的内容重叠时,本文针对卫星场景,首次利用基于Harris角点检测的图像拼接方法,检测兴趣点并构造局部描述符,将它们“缝合”在一起,得到全景图并对拼接结果进行评估。同时,考虑处理合并产生的一些光度缺陷,使生成的全景图更加生动逼真。

1 基于Harris角点检测的图像拼接

对某一场景而言,当得到具有相同部分的多张图像时,可以通过图像拼接技术得到一张大的全景图。图像拼接技术已广泛应用于工业、航空、汽车等领域,因此该技术的现实有着重要的现实意义。目前可以通过多种算法实现图像拼接,本文通过基于局部特征的Harris角点检测图像匹配方法来匹配采集到的图像,然后将它们拼



接在一起。在该方法中,图像拼接的输入是两幅有重叠部分的图像,输出是这两张图像的并集,图像拼接流程如图1所示。

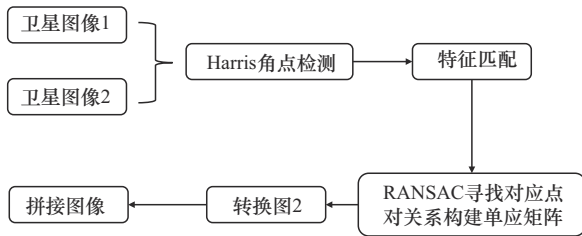


图1 图像拼接流程

1.1 Harris角点检测

Harris角点检测用于在图像中检测出角点特征。角点通常被定义为两条边的交点,或者说,角点的局部邻域应该具有两个不同区域不同方向的边界。通过计算图像中每个像素点的响应函数来判断其是否为角点。该响应函数基于图像的灰度变化和局部窗口的协方差矩阵,通过计算特征值来确定角点位置。当特征值较大时,表示该像素点处存在角点。

Harris角点检测原理如式(1)所示。

$$E(U, V) = \sum_{x,y} w(x,y) [I(x+u, y+v) - I(x,y)]^2 \quad (1)$$

其中, $w(x,y)$ 为窗口函数, $I(x,y)$ 为原始图像, $I(x+u, y+v)$ 为移动 (u, v) 个像素后的图像。

定义矩阵 M 为:

$$M = \sum_{x,y} w(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, I_x 和 I_y 是 I 的偏微分,在图像中就是在 x 和 y 方向的梯度图。

使用矩阵 M 的特征值来判断一个点是边缘点、平面点还是角点,可以计算一个Harris角点响应值 R 来判断一个点是否是角点,而无须计算具体的矩阵特征值。 R 的计算式如下。

$$R = \det M - \alpha(\text{trace} M)^2 \quad (3)$$

1.2 特征点匹配

根据前文得到的特征向量,特征点的匹配度通过欧氏距离来判定,二者呈负相关。原图和目

标图像特征点集分别记为 $A_i = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 和 $B_i = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, 则 A_i 和 B_i 的欧氏距离计算式如下:

$$d_i = \sqrt{(a_j - b_j)^2} \quad (j \in \{1, 2, \dots, n\}, i \in \{1, 2, \dots, n\}) \quad (4)$$

以特征点描述符 A_i 为基准,分别计算其与最近 B_j 和次邻近特征点描述符 C_i 的欧氏距离,将得到的两组欧氏距离相除。若结果小于设定阈值,则特征匹配成功,即 (A_i, B_j) 视为一对匹配点。为提高匹配正确性,本文进一步借助RANSAC随机抽样一致算法来筛除误匹配点。

1.3 基于RANSAC算法的单应矩阵估计和图像拼接

图像配准旨将不同图像中的数据变换为一个坐标系,根据得到的单应矩阵,可以对图像进行配准和拼接。此外,为使拼接更自然,需要考虑两幅图像不同的光照条件。

Fischler等^[18]提出随机抽样一致(random sample consensus, RANSAC)算法,能有效地使局部特征检测器提取特征时的分类错误和测量误差数据集更加平滑。该算法是一个基于概率的数学模型拟合方法。运用迭代方法对模型中的参数进行估计,所得结果的准确性和迭代次数成正比。为增强匹配精度,本文通过RANSAC算法筛除误匹配点并求解单应矩阵,进而实现图像拼接。首先,从已求得的配准点对中抽取几对配准点,计算变换矩阵,并将这几对点记录为“内点”。继续寻找配准点对中的非内点,若这些配准点对符合矩阵,则将其添加到内点。当内点中的点对数大于设定阈值时,则判定此矩阵为精确的变换矩阵。依照以上方法,随机采样 N 次,选取内点数最大集合,筛除非内点等误配点对。

基于得到的匹配特征点集,设图像2为参考图像,则存在一个单应矩阵 H 可将图像1转化到图像2的坐标系中,从而实现图像配准。变换关系如式(5),其中 (x_1, y_1) 为待拼接图像1中的点, (x_2, y_2) 为参考图像2中的点。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ I \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ I \end{bmatrix} \quad (5)$$

则转换后的坐标计算如下：

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{h_{11}x_2 + h_{12}y_2 + h_{13}}{h_{31}x_2 + h_{32}y_2 + I} \\ y_1 &= \frac{h_{21}x_2 + h_{22}y_2 + h_{23}}{h_{31}x_2 + h_{32}y_2 + I} \end{aligned} \quad (6)$$

算法主要步骤如下。

(1) 随机在图像 1 和图像 2 特征点匹配对中挑选不小于 4 个的匹配点对，对式 (4) 进而求解，得到单应矩阵，并设定阈值。

(2) 依据单应矩阵 \mathbf{H} ，将其余匹配点坐标进行转换，并计算其与实际点坐标的距离。当所得距离小于设定阈值时，则该点为内点，并统计内点数。

(3) 继续抽取匹配点对，重复上述步骤直到内点数最大，将得到的单应矩阵 \mathbf{H} 用于实现图像配准。

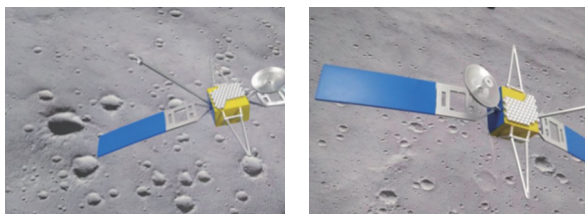
(4) 根据 RANSAC 得到的单应矩阵，对图像 1 进行转换，然后将图像 1 和图像 2 进行拼接并输出。

2 实验结果及分析

2.1 实验环境及数据

本文硬件环境为 Intel® Core™ i7-6700 CPU 和 16 GB RAM，运行环境为 Windows7+MATLAB 2016a。

针对太空环境卫星图像拼接任务，本文构建了太空环境的数据集，利用该数据集进行图像拼接算法的验证。待拼接图像原始场景如图 2 所示。



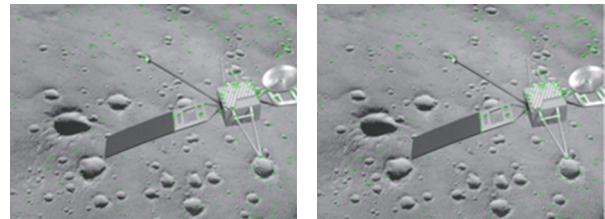
(a) 待拼接图像 2-1 (b) 待拼接图像 2-2

图 2 待拼接图像原始场景

2.2 实验验证

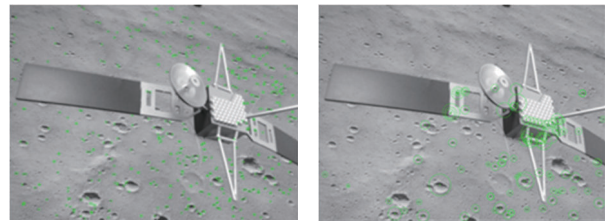
2.2.1 数据处理

将待拼接图像转换为灰度图后，分别利用 Harris 角点检测和 SURF 特征点检测，图像 2-1 特征点检测结果如图 3 所示，图像 2-2 特征点检测结果如图 4 所示。



(a) Harris 角点检测结果 (b) SURF 特征点检测结果

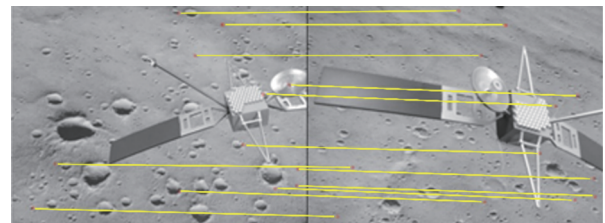
图 3 图像 2-1 特征点检测结果



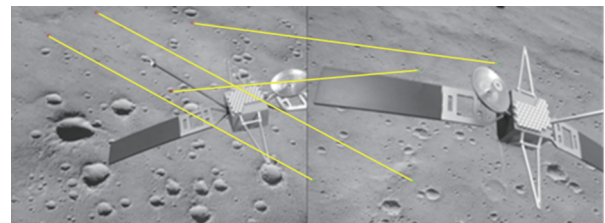
(a) Harris 角点检测结果 (b) SURF 特征点检测结果

图 4 图像 2-2 特征点检测结果

利用欧氏距离进行特征点匹配，并用 RANSAC 算法剔除误匹配点，Harris 角点检测和 SURF 特征点检测的场景特征点匹配结果如图 5 所示。



(a) Harris 角点匹配结果



(b) SURF 特征点匹配结果

图 5 场景特征点匹配结果



2.2.2 实验结果

通过 RANSAC 算法对点对关系估计单应矩阵，利用估计的单应矩阵转换图像 2，将转换后的图像 2 与图像 1 拼接，场景的拼接结果对比如图 6 所示。

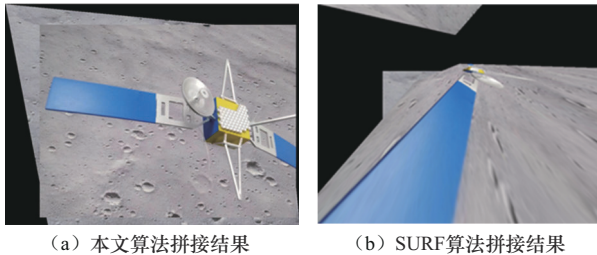


图6 场景的拼接结果对比

通过对比实验结果可以看出，本文算法在精度上相对于 SURF 算法有明显提升，能够实现图像的完整拼接。

本文使用卫星数据集对算法进行实验验证，数据集共包含 100 张卫星仿真图像。计算拼接结果的自然图像质量评估 (NIQE) 指标^[19]和结构相似性 (SSIM) 指标^[20]来定量评价所提算法与对比算法的图像拼接精度。其中，NIQE 指标越小表面自然图像质量越高，SSMI 指标客观地描述基准图像与变换后的待拼接图像的重叠区域的相似程度，指标越高表面拼接效果越好。

各算法在卫星数据集上性能对比见表 1，本文提出的方法在拼接质量上达到了优秀图像拼接算法的水准，关于图像质量的客观性能指标，本文算法 NIQE 指标最小，SSIM 指标最高，性能最好。SURF 算法和 APAP 算法非常依赖于特征点对。若图像高频信息较少，如卫星图中，特征点对过少，配准将失效，并且对大尺度图像进行配准，其效果也不是很好，一切都决定于特征点对的数量。TFT 算法和本文所提算法在精度方面差距不大，但 TFT 算法需要根据输入数据调整参数，鲁棒性较差。因此，精度评定也证明了本文算法的有效性和合理性。

表 1 各算法在卫星数据集上性能对比

算法	NIQE	SSIM
SURF	7.223	0.306
APAP	6.452	0.615
TFT	4.763	0.682
本文算法	4.296	0.691

3 结束语

本文基于 Harris 角点检测算法原理实现了图像拼接。通过 Harris 角点检测算法提取特征点并构建 Harris 角点，通过欧氏距离对特征点进行粗匹配，为了实现增强匹配精度的目的，通过 RANSAC 算法对错误匹配点进行了剔除，得到了单应矩阵，最后实现了图像变换并完成了拼接。此外，本文对 Harris 算法和 SURF 算法实现图像拼接进行了对比，两组图像拼接结果表明 Harris 算法的拼接效果远优于 SURF 算法。未来工作将研究卫星的三维点云配准。

参考文献：

- [1] 胡涛, 贺亮, 夏永江. 基于改进 ORB 的月面着陆视觉导航的配准方法[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(2): 45-51.
HU T, HE L, XIA Y J. Lunar surface landing visual navigation registration based on improved ORB algorithm[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(2): 45-51.
- [2] MA J Y, JIANG X Y, FAN A X, et al. Image matching from handcrafted to deep features: a survey[J]. International Journal of Computer Vision, 2021, 129(1): 23-79.
- [3] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C]//Proceedings of the Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988. Alvey Vision Club, 1988: 10-5244.
- [4] SHI J. Good features to track[C]//Proceedings of the 1994 Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 1994: 593-600.
- [5] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2002:

- 1150-1157.
- [6] YAN S, MA M. Image stitching based on an improved SIFT algorithm[C]//Proceedings of the IEEE 7th International Conference on Electronic Technology and Information Science. Piscataway: IEEE Press 2022: 1-5.
- [7] BAY H, TUYTELAARS T, VAN GOOL L. SURF: speeded up robust features[C]//Proceedings of the Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006: 404-417.
- [8] LIU Y F, GENG S Z, YU Y N. Image feature matching based on improved AKAZE and I-SURF algorithm[C]//Proceedings of the 2022 7th International Conference on Multimedia and Image Processing. New York: ACM, 2022: 66-71.
- [9] RUBLEE E, RABAU D V, KONOLIGE K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF[C]//Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2011: 2564-2571.
- [10] JI X, YANG H M, HAN C. Research on image stitching method based on improved ORB and stitching line calculation [J]. Journal of Electronic Imaging, 2022, 31: 051404.
- [11] 曾国奇, 牛子凡, 郑丽丽, 等. 基于球形变换的无人机视频图像实时拼接方法[J]. 航空学报, 2023, 44(24): 135-144.
- ZENG G Q, NIU Z F, ZHENG L L, et al. A real time video image stitching method for UAV based on spherical transformation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(24): 135-144.
- [12] ZHU S D, ZHANG Y Z, ZHANG J, et al. ISGTA: an effective approach for multi-image stitching based on gradual transformation matrix[J]. Signal, Image and Video Processing, 2023, 17(7): 3811-3820.
- [13] LU C N, CHANG Y C, CHIU W C. Bridging the visual gap: wide-range image blending[C]//Proceedings of the 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE Press, 2021: 843-851.
- [14] 廖超, 王贵锦, 沈永玲, 等. 航拍视频的多向条带拼接算法[J]. 航空学报, 2012, 33(11): 2065-2073.
- LIAO C, WANG G J, SHEN Y L, et al. Aerial video stitching via multi-direction strips[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(11): 2065-2073.
- [15] 易盟, 郭宝龙. 基于不变特征和映射抑制的航拍视频图像配准[J]. 航空学报, 2012, 33(10): 1872-1880.
- YI M, GUO B L. Aerial video image registration method based on invariant features and mapping restraint[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(10): 1872-1880.
- [16] ZARAGOZA J, CHIN T J, BROWN M S, et al. As-projective-as-possible image stitching with moving DLT[C]//Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2013: 2339-2346.
- [17] LI J, DENG B S, TANG R F, et al. Local-adaptive image alignment based on triangular facet approximation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 29: 2356-2369.
- [18] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[C]//Proceedings of the Readings in Computer Vision. Amsterdam: Elsevier, 1987: 726-740.
- [19] MITTAL A, SOUNDARARAJAN R, BOVIK A C. Making a “completely blind” image quality analyzer[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(3): 209-212.
- [20] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.

[作者简介]



陈丽娟 (1974-), 女, 中国科学院微小卫星创新研究院工程师, 主要研究方向为航天器综合测试和技术、卫星数字仿真技术等。



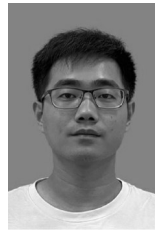
虞业冻 (1989-), 男, 博士, 中国科学院微小卫星创新研究院高级工程师, 主要研究方向为卫星领域相关的数字化仿真、体系化仿真、大数据、在轨运控、综合自动化测试、健康管理等。



刘晨龙 (1989-), 男, 中国科学院微小卫星创新研究院高级工程师, 主要研究方向为卫星综合测试、卫星产线数字化系统、卫星数字仿真技术等。



陈焯海（1982-），男，中国科学院微小卫星创新研究院副研究员，主要研究方向为卫星供电、综合测试、测控等。



卢小豹（1992-），男，中国科学院微小卫星创新研究院工程师，主要研究方向为航天器综合测试及大批量航天器测试技术等。



武子连（1990-），男，中国科学院微小卫星创新研究院工程师，主要研究方向为航天器测试、航天器地面综合测试设备等。



李亚卿（1972-），男，南阳市宛城鸭河口灌区事务中心高级工程师，主要研究方向为水利地理信息系统（GIS）等。