

大视场角相机星图快速识别方法

张潇鹤^{1,2}, 董明利^{1,2*}, 孙鹏^{1,2}, 刘其林^{2,3}¹北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100192;²北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100192;³长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 采用摄影测量方法对航天器天线面形进行在轨高精度测量,需对大视场角相机内外参数进行实时在轨标定。恒星可作为不变基准辅助在轨相机标定,但需对所拍星图中的星点进行识别得到其星点矢量信息。提出了一种针对大视场角相机所拍星图的快速识别方法:首先,结合标定结果的星图识别策略,提高匹配准确性;然后,基于四颗星星间角距的标签搜索匹配方法,将复杂度减小至线性,实现快速准确匹配;最后,基于反投误差分析的匹配检验方法,避免误识别。实测实验表明:对采集到的2000张星图进行识别,相比于传统三角形星图识别算法,所提方法兼顾了识别速度和识别率,识别率达到99.5%,识别时间减少75%,证明此方法合理有效,可节省存储空间,提高星图识别速度,提高星图识别率,具有很好的实用价值。

关键词 大视场角相机; 相机内外参数; 畸变校正; 快速星图识别; 在轨标定

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230542

Fast Star Map Recognition Method of Camera with Large Viewing Angle

Zhang Xiaohu^{1,2}, Dong Mingli^{1,2*}, Sun Peng^{1,2}, Liu Qilin^{2,3}¹School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;²Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science and Technology University, Beijing, 100192, China;³College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract It is necessary to calibrate the internal and external parameters of a camera with a large field of view in real time to measure the antenna profile of spacecraft with high accuracy in orbit via photogrammetry. In this paper, a fast recognition method for star map captured using a camera with a large viewing angle is presented. First, a star map recognition strategy combining calibration results is proposed to improve the matching accuracy. Next, a tag search and matching method based on the angular distance between four stars is proposed, which reduces the complexity to linearity and achieves fast and accurate matching. Finally, a matching test method based on back-casting error analysis is proposed to prevent false identification. The experimental results show that compared with the traditional algorithm, the method reflects both the recognition speed and recognition rate. The recognition rate reaches 99.5%, and the recognition time is reduced by 75%. This study demonstrates that the proposed method is reasonable and effective, can save storage space, improve the recognition speed and rate of star maps, and has a good practical value.

Key words large viewing angle camera; camera internal and external parameter; distortion correction; fast star map recognition; on-orbit calibration

1 引言

近年来中国航天事业蓬勃发展,针对航天器天线

面形在轨高精度测量问题国内外开展了一系列研究。摄影测量法在未来航天器大型天线在轨面形高精度动态测量中展现出极大潜能。由于航天器大型在轨展开

收稿日期: 2023-01-30; 修回日期: 2023-02-28; 录用日期: 2023-03-06; 网络首发日期: 2023-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(51475046)、北京市教委科技计划重点项目(KZ201711232029)、北京信息科技大学促进内涵发展科研水平提高项目(2020KYNH223)

通信作者: *dongml@bistu.edu.cn

后面积较大,拍摄距离受限,需采用大视场角相机进行拍摄。相机内外方位参数标定是保证摄影测量解算任务的关键,内外参数的精确与否直接影响着最终三维重建结果的精度。而由于目前航天器的设备搭载空间结构稳定性、载荷能力及在轨建造扩展能力有限,无法安装足够的人工参考物或带动相机运动构建多站位观测交汇网络来辅助相机完成在轨标定,传统的地面摄影测量标定方法不再适用。

恒星无穷远特性使其在天球坐标系下的星光矢量近乎不变,其作为参考基准标定在轨相机系统具备较大应用潜力,且不需依靠任何测量附件即可完成标定任务,具有较好的可行性^[1-7]。内参在轨标定根据星间角距正交不变原理,在不考虑畸变和噪声的条件下,任意两颗恒星在相机坐标系中的方向矢量夹角与对应的天球坐标中的方向矢量夹角相等,建立观测及参考星间角距误差方程来估计相机内方位参数。其中,对相机所拍星图进行星图识别进而得到星点在天球坐标系下的矢量信息是进行大视场角相机在轨标定的前提。

星图识别算法的速度和识别率影响相机在轨标定性能。目前,星敏感器的星图识别算法主要分为模式识别和子图同构两大类^[8-12]。模式识别法的模式构建过程中需要旋转图像,计算复杂度较高,且该算法容易受到噪声的影响。子图同构法中,三角形算法是其典型算法,具有计算复杂度低、可移植性强、可靠性高等优点,在工程实践中被广泛使用。但在识别过程中利用导航星之间的星角距作为特征值,其特征维数较低、需要遍历星点、存在冗余匹配和误匹配,识别速度较慢。

针对三角形算法,虽国内外都在此基础上进行改进,但无法兼顾识别速度以及识别率。目前星图识别算法无法解决大视场角的图片畸变增大和星点数量增多时面临的问题,从而导致星图识别速度和识别率下降。

针对上述存在的问题,本文提出了一种针对大视场角相机所拍星图的快速识别方法。针对视场角过大所导致的图片畸变增大问题,提出了一种结合内参标定结果的星图识别方法来提高匹配准确性;针对星点数量增多所导致的星图识别速度和星图识别率下降的问题,提出了一种基于四颗星的星间角距标签搜索匹配方法,来提高星图识别速度和星图识别率。

2 星图处理及结合标定的识别新策略

大视场角相机相比常规相机的测量范围更大,但图像变形严重,需对大视场角相机所拍星图采用摄影测量大视场角畸变模型^[3]畸变校正后再进行星图识别,以提高匹配准确性。校正后星图中星点位置的准确程度取决于畸变校正过程中全部相机内参数的准确度。为提高相机内参数准确度从而提高大视场角星图识别率,提出了结合内参标定结果的星图识别新策略,

以星间角距为约束对大视场角相机全部内方位参数进行在轨标定^[4],用在轨优化后新的相机内参数替代原始地面标定的内参初值进行星图识别,重新得到星点信息并再次标定,循环更新内参,使内参解算精度、星图识别率不断提高。当相邻两次循环后识别到的星点个数不再发生变化,循环停止。内参更新如图 1 所示。

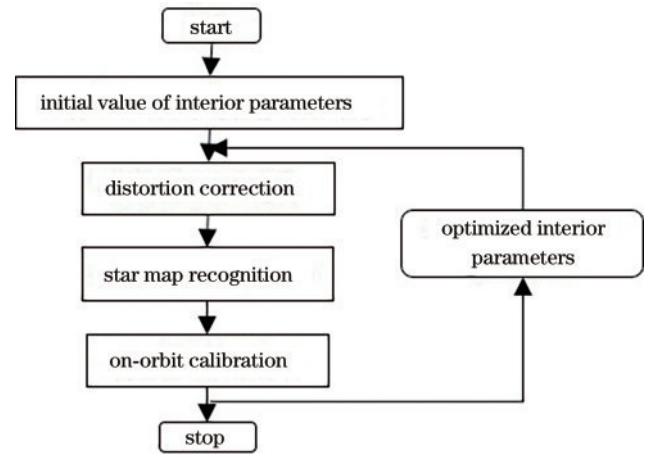


图 1 内参更新示图

Fig. 1 Internal reference update diagram

3 快速星图识别方法

对上述处理后的大视场角相机所拍星图进行快速星图识别。首先仅建立包含星间角距相关信息的导航特征库,接着根据新的策略进行观测三角形的选取,然后通过基于四颗星的星间角距标签搜索匹配法对已选好的观测三角形进行匹配识别,最后基于星点像面误差对星图识别结果进行验证。

3.1 星间角距导航特征库

用传统三角形星图识别算法构建导航特征库时,直接存储所有的导航三角形,这会导致存储容量增大、冗余匹配多等问题。对导航特征库的构建进行改进,导航特征库不直接存储导航三角形,而是计算并保存导航星表中所有星的星间角距。合理的存储星间角距可以加快后续三角形匹配算法的检索识别速度。

星对生成过程如下:扫描已经过预处理的导航星表,如果存在两颗星的星间角距 $d(d_1 < d < d_2)$ (其中, d_1 为单个星点光斑的直径所对应的星间角距, d_2 为相机视场的对角距),记录这个星间角距及两颗星的序号,再将星间角距由小到大进行排序,得到所需的导航特征库。

3.2 观测三角形的构建

大视场角相机所拍星图星点数量过多,星图畸变从像面中心到像面边缘呈递增趋势,为了减小畸变对识别的影响,从像面中心开始选取像面观测三角形。对星图像面观测坐标距像面中心的距离从小到大进行

排序,按照顺序依次选择三星组成像面观测三角形。图 2 中:A、B、C 为按照上述像面观测三角形选取策略所选择的 3 颗星点,其构成的 $\triangle ABC$ 为所选取的观测三角形。D 为按照同样策略所选择的用于后面匹配识别的第 4 颗星点。

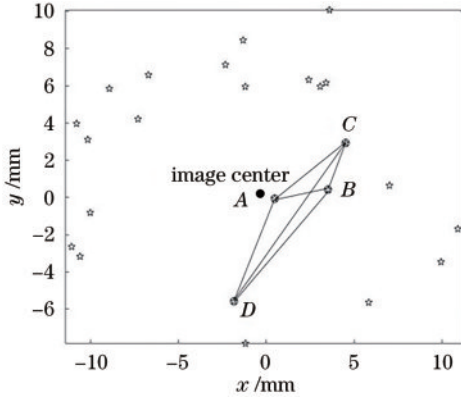


图 2 观测三角形选取与构建例图

Fig. 2 Selection of observation triangle and construction of illustration

3.3 基于 4 颗星的星间角距标签搜索匹配法

三角形匹配方法是根据边-边-边全等的筛选策略对观测三角形所对应的导航三角形进行匹配识别,其中边长即为星间角距。传统三角形匹配中,匹配特征仅有 3 颗星之间的 3 个星间角距,引入第 4 颗星,增加了第 4 颗星与原有 3 颗星之间的 3 个星间角距,特征值数量由 3 增加至 6,减少匹配时的冗余度,提高了识别速度。

设 d_{12}, d_{23}, d_{13} 为所选观测三角形的 3 个星间角距(边长), d_{14}, d_{24}, d_{34} 分别为第 4 颗星点与观测三角形 3 颗星点之间的星间角距。给 6 个星间角距一定的阈值,在上述的包含星间角距和星序号信息的导航特征库中分别寻找其匹配星对,其满足条件的匹配导航星对的集合分别为 $C(d_{12}), C(d_{23}), C(d_{13}), C(d_{14}), C(d_{24}), C(d_{34})$,其中包含的导航星星对数目分别为 $n(d_{12}), n(d_{23}), n(d_{13}), n(d_{14}), n(d_{24}), n(d_{34})$ 。匹配过程实际上是寻找 6 个星对,分别满足 $P_1 \in C(d_{12}), P_2 \in C(d_{23}), P_3 \in C(d_{13}), P_4 \in C(d_{14}), P_5 \in C(d_{24}), P_6 \in C(d_{34})$ 。其中, P_1, P_2, P_3 两两之间有且仅有一颗共同的星, P_4, P_5, P_6 三者之间有且仅有一颗共同的星。

其具体匹配方法如下:

- 1) 扫描 $C(d_{12})$,将导航特征库中包含 $C(d_{12})$ 的星对的两颗星贴标为 1,并记其对应的两颗星序号 i, j ;
- 2) 扫描 $C(d_{23})$,若导航特征库中某个导航星对其中一颗导航星已经贴标为 1,则将这个导航星对贴标为 2,并记录与之组成星对的另一颗导航星序号 k ;
- 3) 扫描 $C(d_{13})$,若 $(j, k) \in C(d_{13})$,则成功找到与观测三角形匹配的导航三角形,并将与 (j, k) 组成星对

的另一颗导航星贴标为 3;否则,重新选取观测三角形进行匹配;

4) 扫描 $C(d_{14})$,若导航特征库中某个导航星对其中一颗导航星已经贴标为 1,则将该导航星对贴标为 4,并记录与之组成星对的另一颗导航星序号 q_1 ;

5) 扫描 $C(d_{24})$,若导航特征库中某个导航星对其中一颗导航星已经贴标为 2,则将该导航星对贴标为 5,并记录与之组成星对的另一颗导航星序号 q_2 ;

6) 扫描 $C(d_{34})$,若导航特征库中某个导航星对其中一颗导航星已经贴标为 3,则将该导航星对贴标为 6,并记录与之组成星对的另一颗导航星序号 q_3 ;

7) 寻找第 4 颗星 q ,其中, $q = q_1 \cap q_2 \cap q_3$ 。

最终 (i, j, k) 就是与观测三角形所匹配的导航三角形, q 为引入的第 4 颗星点。

在传统的三角形匹配识别策略中,采用遍历的方法进行三角形的匹配搜索,对所采用的 4 星搜索匹配需要 $n(d_{12}) \times n(d_{23}) \times n(d_{13}) \times n(d_{14}) \times n(d_{24}) \times n(d_{34})$ 次的比较运算。其中,对已经选好第 1 颗星的情况下,选取第 2 颗星、第 3 颗星和第 4 颗星时又重新匹配查找所有星,这样的搜索方式消耗大量时间。为避免这种情况,所采用的星间角距标签搜索匹配法,对满足条件的星对贴上其专属标签进行搜索匹配,这样在已找到第 1 颗星的前提下,寻找第 2~4 颗星时,仅对贴了标签的星对进行匹配识别,避免了重复查找所有星,减少匹配识别的时间,如图 3 所示。

采用此种方法的搜索次数大大降低,仅为 $n(d_{12}) + n(d_{23}) + n(d_{13}) + n(d_{14}) + n(d_{24}) + n(d_{34})$,加快匹配速度,也降低匹配识别过程中错误匹配和冗余匹配的概率。

3.4 基于星点像面误差的星图识别结果验证

以上的匹配识别过程,引入第 4 颗星增加了特征维数,但观测三角形所能匹配的导航三角形仍可能并不唯一。这时,需引入验证识别环节,采用最优四元数估计(ESOQ)算法^[13],通过与观测三角形匹配成功的导航三星矢量计算相机姿态,根据这个姿态可反投影生成一幅理论参考星图。理论上,此理论参考星图和原始的观测星图一致,从而可对所拍星图的全部星点进行识别。

设理论参考星图中某个星点坐标为 (x_s, y_s) ,原始的观测星图中星点坐标为 (x_r, y_r) ,则该星点像面误差 e 可表示为

$$e = \sqrt{(x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2} \quad (1)$$

理论参考星图和实际观测星图的像面误差 E 可表示为

$$E = \frac{e_1 + e_2 + \dots + e_n}{N} \quad (2)$$

式中: N 为理论参考星图和实际观测星图中对应的星

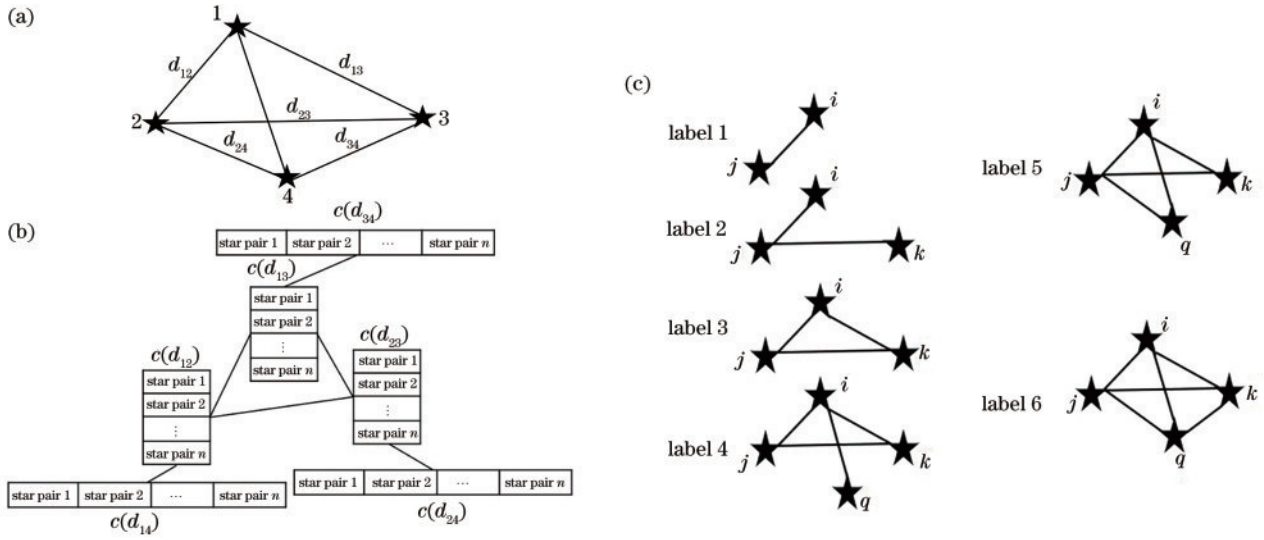


图 3 星间角距标签搜索匹配过程。(a)观测三角形与第 4 颗星点；(b)星间角距匹配；(c)标签搜索

Fig. 3 Search and matching process of inter-satellite angular distance tag. (a) Observe the triangle and the fourth star point; (b) inter-satellite angular distance matching; (c) tag search

点数目。整体匹配过程流程图如图 4 所示, E_0 和 N_0 为像面误差和星点数量的阈值, 根据实际拍星像面误差大小进行选取, E_0 等于 $1/6$ pixel, 从而保证能同时提高识别结果的准确度以及算法的鲁棒性; N_0 等于所拍星

图中可观测星点数量的 95%, 从而保证能够覆盖大视场角相机星图中大部分可观测星点。

4 实验结果与分析

实验所采用的相机为尼康 D810 相机, 镜头为蔡司 Distagon T*25 mm f/2.8 ZF. 2 定焦镜头, 其相机及镜头参数如表 1 所示。所用计算机的处理器为 Intel i5-8265U 1.80 GHz, 内存为 8.00 GB。

表 1 相机及镜头参数
Table 1 Camera and lens parameters

Object	Parameter	Value
Nikon D810	Resolution / (pixel × pixel)	7360 × 4912
	Pixel size / (μm × μm)	4.878 × 4.878
	Sensor size / (mm × mm)	35.9 × 24.0
Distagon T* 25 mm f/2.8 ZF. 2	Focal length / mm	25
	Field of view / (°)	81.6

评价指标为识别时间和识别率。星图识别时间从读入星图开始, 通过全部识别过程得到星图中星点信息为止; 星图识别率为对所拍星图进行星图识别后, 找到正确天区 (理论参考星图和原始的观测星图一致) 的概率。

4.1 仿真实验结果与分析

对所提的大视场角相机星图快速识别算法进行仿真验证。以 Tycho-2 星表作为基本星表, 在预处理过程中剔除掉星等高于 6 等的恒星组成新的星表、双星合并、星表均匀化, 最终处理后的导航星表星点个数为 4000。仿真生成不同天区的 1000 组星图并对该星图识别方法的性能进行验证与评价。为了考察星图识别方法对星点位置噪声的抗干扰能力, 采用不同的位置噪声全面考察星图识别方法的鲁棒性。

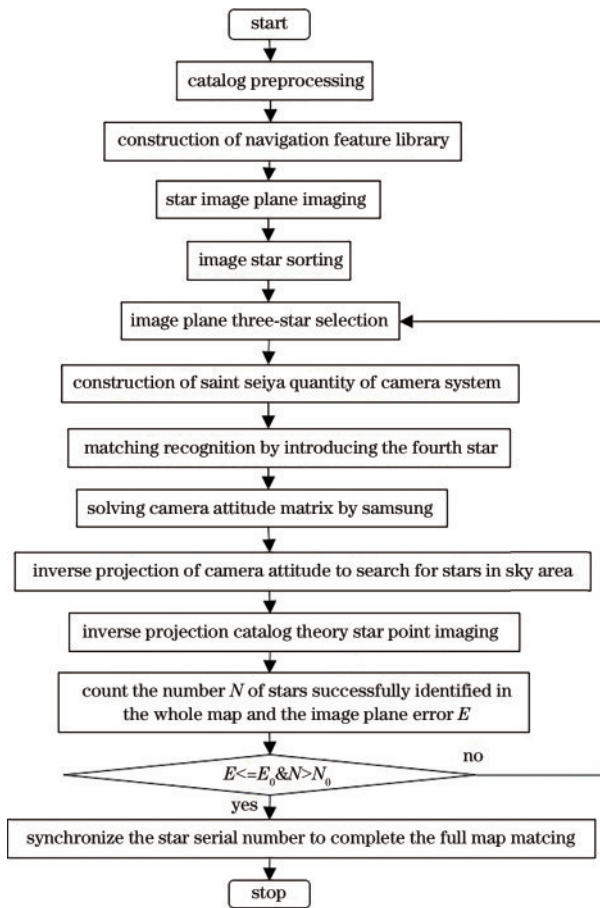


图 4 大视场角相机下星图快速识别流程图

Fig. 4 Flow chart of rapid star map recognition under large field-of-view camera

仿真实验中,在星间角距阈值确定和最后像面误差阈值不变的情况下,对不同天区下仿真生成的星图加入均值为 0、标准差为 δ 的位置噪声(单位为 pixel), $\delta \in [0, 2.0]$,分别记录传统三角形星图识别和所提的四星快速星图识别方法的识别率和识别时间,实验结果如图 5、图 6 所示。

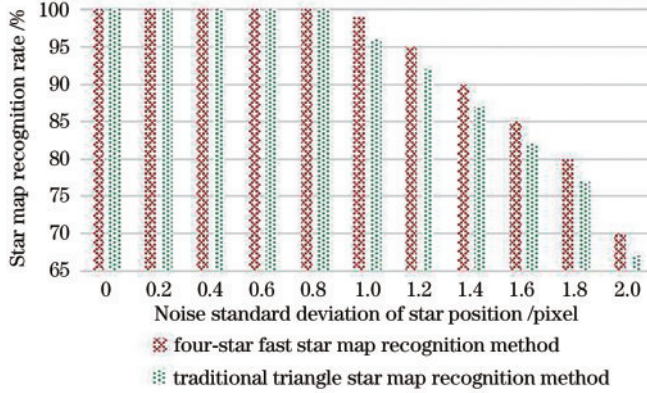


图 5 星点不同位置噪声星图识别率
Fig. 5 Recognition rate of noise star map in different positions of stars

由图 5 可知,当星点位置噪声标准差 ≤ 0.8 pixel 时,两种算法的星图识别率均能达到 100%;在星点位置噪声标准差在 1.0 pixel 以内时,两种算法均能达到 99% 以上的星图识别率;随着星点位置噪声的进一步增加,两种算法的星图识别率均同步降低。由图 6 可知,在加入不同星点位置噪声情况下,所提的四星图快速星图识别方法的星图识别时间总是小于传统三角形星图识别方法,且随着星点位置噪声的增加,所

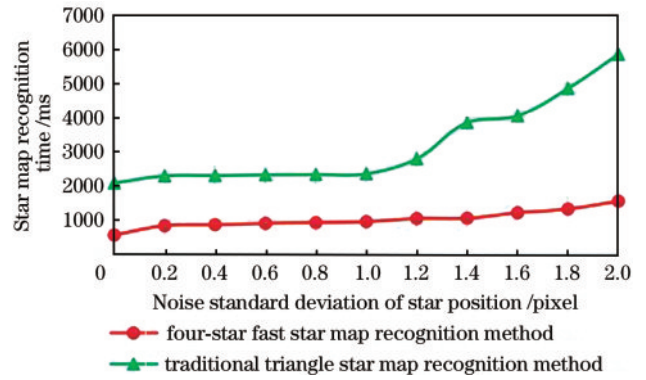


图 6 星点不同位置噪声星图识别时间
Fig. 6 Identification time of noise star map at different positions of stars

提方法的识别时间的增长是一种较为平滑的增长趋势,两种算法的识别时间差距越来越大。

结合上述仿真实验结果,实际大视场角相机所拍星图的星点位置噪声标准差在 1.0 pixel 之内,因此该方法具有较好的鲁棒性,其识别率和识别速度均得到提高。

4.2 实测实验结果与分析

为了验证该星图识别方法对实际大视场角相机所拍星图进行识别的鲁棒性实验,通过 10 个不同站位,每个站位下绕光轴旋转 10 个不同角度,每个角度连续拍摄 20 张,得到 100 个不同天区共 2000 张星图集。

采用所提的内参更新策略进行星图识别,内参优化 5 次后,循环停止。其星图识别的内参更新前后相机内参及星点像面误差统计结果,如表 2 所示。

表 2 内参更新前后内参及星点像面误差结果

Table 2 Error results of internal parameters and star image plane before and after updating internal parameters

Method	Focal length f /mm	Principal point x /mm	Principal point y /mm	Identify the number of stars	Mean error /mm	Standard deviation /mm
Before optimization	26.1225	0.2523	0.0031	70	0.0050	0.0019
Optimize once	25.7342	0.1342	0.0231	75	0.0042	0.0017
Optimize for 3 times	25.5623	0.0834	0.0342	76	0.0034	0.0012
Optimize for 5 times	24.8912	0.0501	0.0410	78	0.0028	0.0010

所提的内参更新策略降低了星图中星点像面误差,大大降低了匹配过程中由于过大像面误差导致的错误匹配概率。与传统三角形星图识别法相比,采用所提的四星星间角距标签搜索匹配法匹配识别过程中的冗余匹配概率大大降低,冗余匹配降低约 75%。

使用传统三角形星图识别算法进行识别其识别率为 98.5%,识别时间为 2000~2500 ms;采用所提的星图识别方法对采集到的标准数据集中的 2000 张星图进行星图识别,所提方法的识别率提升至 99.5%,识别时间为 500~1000 ms,如图 7 所示。

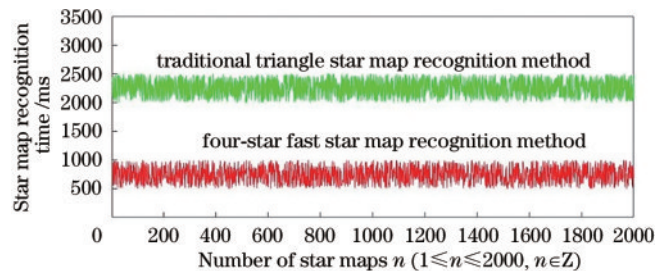


图 7 两种星图识别方法识别时间对比
Fig. 7 Comparison of recognition time between two star map recognition methods

5 结 论

针对大视场角相机所拍星图提出一种快速星图识别方法。该方法鲁棒性较好,对星点位置噪声有较强的抗干扰能力,且其识别速度和识别率较传统三角形星图识别方法有显著提高,显著优势有:

1) 利用更新优化后内参进行星图处理,减小像面误差,降低误匹配概率;

2) 建立仅包含星对信息的导航特征库,利用基于四颗星的星间角距标签搜索匹配方法进行匹配识别,减少存储空间并提高识别速度;

3) 引入基于像面误差的星图识别结果验证环节,剔除误匹配并得到星图中全部星点信息。

仿真实验结果表明,星点位置噪声标准差在 1.0 pixel 之内时,所提的四星快速星图识别方法星图识别率达到 99%,识别时间远小于传统三角形星图识别方法;实验结果表明,与传统三角形星图识别方法相比,所提的四星快速星图识别方法识别率从 98.5% 提升至 99.5%,识别时间从 2000~2500 ms 缩短至 500~1000 ms。综合仿真和实测结果,所提的针对大视场角相机所拍星图的星图识别方法识别速度快、识别率高,具有更好的可靠性和实用性。

参 考 文 献

- [1] 刘海波,王文学,陈圣义,等.利用星角距不变性标定星敏传感器内部参数[J].国防科技大学学报,2014,36(6):48-52.
Liu H B, Wang W X, Chen S Y, et al. Star tracker ground calibration based on the invariant of interstar angles[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(6): 48-52.
- [2] 兀颖,葛亮,卢晓猛,等.基于GPU的小行星光学观测图像实时处理[J].光学精密工程,2020,28(11):2527-2534.
Wu Y, Ge L, Lu X M, et al. A method of real-time data reduction of asteroid optical observation image based on GPU[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(11): 2527-2534.
- [3] 孙鹏.大尺寸动态摄影测量关键技术研究[D].北京:北京邮电大学,2019.
Sun P. Research on key techniques of large scale dynamic photogrammetry[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [4] 许倩.基于温度变化的星敏传感器在轨标定研究[D].长春:长春工业大学,2021.
Xu Q. Research on on-orbit calibration of star sensor based on temperature variation[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2021.
- [5] Yao Z, Wang H L, Lu J H, et al. Calibration method of optical errors for star sensor based on particle swarm optimization algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(10): 1017002.
- [6] 胡浩,魏斌,梁晋,等.大视场远距离视觉测量系统的分步标定[J].光学精密工程,2022,30(4):478-488.
Hu H, Wei B, Liang J, et al. Two-step calibration for vision measurement system with large field of view and high depth[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(4): 478-488.
- [7] 杨需,殷玉龙,卢荣胜,等.基于方向性靶标和多约束优化的双目相机标定[J].光学学报,2022,42(8):0815002.
Yang P, Yin Y L, Lu R S, et al. Binocular camera calibration based on directional target and multi-constraint optimization[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0815002.
- [8] Zhou F Q, Ye T, Chai X H, et al. Novel autonomous on-orbit calibration method for star sensors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 67: 135-144.
- [9] 孙兴哲,张锐,师晨光,等.基于动态夹角匹配的星图识别算法[J].光学学报,2021,41(16):1610001.
Sun X Z, Zhang R, Shi C G, et al. Star identification algorithm based on dynamic angle matching[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1610001.
- [10] Wei X, Wen D S, Song Z X, et al. A star identification algorithm based on radial and dynamic cyclic features of star pattern[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(7): 2245-2259.
- [11] Nabi A, Ahmed-Foiti Z, Cheriet M E A. Improved triangular-based star pattern recognition algorithm for low-cost star trackers[J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2021, 33(3): 258-267.
- [12] 闫旭亮,徐望,杨功流,等.基于改进对数极坐标变换的星图识别算法[J].光学学报,2021,41(10):1010001.
Yan X L, Xu W, Yang G L, et al. Star map recognition algorithm based on improved log-polar transformation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1010001.
- [13] 程会艳,郑然,武延鹏,等.一种提高多探头星敏传感器姿态测量精度的方法[J].空间控制技术与应用,2022,48(4):78-85.
Cheng H Y, Zheng R, Wu Y P, et al. A method to improve attitude measurement accuracy with multi-FOV star sensor[J]. Aerospace Control and Application, 2022, 48(4): 78-85.