

小视场星敏感器的三角形改进算法

陆涵, 林宝军, 张永合, 丁国鹏, 王新宇

引用本文

陆涵, 林宝军, 张永合, 丁国鹏, 王新宇. 小视场星敏感器的三角形改进算法[J]. 计算机科学, 2022, 49(11A): 211000223-5.

LU Han, LIN Bao-jun, ZHANG Yong-he, DING Guo-peng, WANG Xin-yu. Improved Triangular Algorithm for Small Field of View Star Sensor [J]. Computer Science, 2022, 49(11A): 211000223-5.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于机器学习的分布式星载RTs系统负载调度算法](#)

Load Scheduling Algorithm for Distributed On-board RTs System Based on Machine Learning
计算机科学, 2022, 49(2): 336-341. <https://doi.org/10.11896/jsjx.201200126>

[基于单目视觉的小目标行人检测与测距研究](#)

Study on Small Target Pedestrian Detection and Ranging Based on Monocular Vision
计算机科学, 2020, 47(11): 205-211. <https://doi.org/10.11896/jsjx.190900078>

[深度学习在光声成像中的应用现状](#)

Application of Deep Learning in Photoacoustic Imaging
计算机科学, 2020, 47(6A): 148-152. <https://doi.org/10.11896/JsJkx.190700046>

[长寿命星载NAND Flash自适应坏块管理策略](#)

Self-adaptive Management Strategy for Bad Blocks Based on Long Lifetime On-board NAND Flash
计算机科学, 2016, 43(10): 193-195. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2016.10.036>

[基于抗辐照龙芯的星载计算机容错启动研究](#)

Research of Fault-tolerant Booting for On-board Computer Based on Anti-radiation Loongson
计算机科学, 2016, 43(Z11): 532-535. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2016.11A.120>

小视场星敏感器的三角形改进算法

陆 涵^{1,2} 林宝军^{1,2,3,4,5} 张永合² 丁国鹏² 王新宇²

1 上海科技大学信息科学与技术学院 上海 201210

2 中国科学院微小卫星创新研究院 上海 201203

3 中国科学院大学 北京 100094

4 上海微小卫星工程中心 上海 201210

5 中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094

(luhan@shanghaitech.edu.cn)

摘要 在科学探测、卫星高精度定位等领域中,星敏感器需要快速获得姿态信息,为了提高精度,通常需提高角分辨率,降低视场,以更高的星等作为参考。星图识别算法是星敏感器快速获得姿态信息的关键,当传统的三角形算法面对星数较少、暗星占比更大的情况时,识别精度会迅速下降至70%~80%,识别精度有待提高。对现有星敏感器星图识别算法进行研究后,综合主流星图识别算法的优缺点,提出了一种基于三角形角距匹配的改进算法,结合星等区间差特征,在增加特征维数的同时引入第四颗星用于验证,以此减少冗余匹配。仿真实验结果表明,该方法在识别速度不低于经典三角形改进算法的同时,提高了识别率,达到了98.4%。在引入位置噪声和星等噪声的情况下,仍然保持93%以上的识别率,具有较强的鲁棒性。

关键词 星敏感器;星图识别;相似三角形;角距匹配;星等区间差

中图分类号 TP391

Improved Triangular Algorithm for Small Field of View Star Sensor

LU Han^{1,2}, LIN Bao-jun^{1,2,3,4,5}, ZHANG Yong-he², DING Guo-peng² and WANG Xin-yu²

1 School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

2 Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

4 Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201210, China

5 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract In the fields of scientific exploration and satellite high-precision positioning, star sensors need to obtain attitude information in a short time. In order to improve accuracy, it is necessary to increase the angular resolution, reduce the field of view and use a higher magnitude as a reference. The star pattern recognition algorithm is the key to quickly obtain the attitude information for star sensors. When the traditional triangle algorithm faces a situation where the number of stars is small and the proportion of dark stars is larger, the recognition accuracy will quickly drop to 70%~80%, which needs to be improved. Motivated by this, an efficient star pattern recognition algorithm based on triangle angular distance matching is proposed. The proposed method combines the feature of magnitude interval difference and introduces the fourth star verification, so as to reduce redundant matching. Simulation results show that the proposed method improves the recognition rate to 98.4% while the recognition speed is not lower than that of the classical improved triangle algorithm. In the case of introducing position noise and magnitude noise, it still maintains a recognition rate of more than 93%, which has strong robustness.

Keywords Star sensor, Star pattern recognition, Similar triangle, Angular distance matching, Magnitude interval difference

1 引言

星敏感器是目前航天器上精度最高的姿态测量部件,因具有可靠性高、重量轻、功耗小、自主性强、工作方式多样等特点,成为了卫星、导弹、舰船等平台姿轨控系统不可缺少的姿态测量设备之一^[1]。星敏感器以宇宙空间中的恒星作为参考源,观测恒星并根据若干个恒星矢量进行航天器在轨飞行阶段

的高精度姿态解算^[2-3]。近十年来,星敏感器逐渐向大视场星敏感器和小视场星敏感器两大类型发展。第一类大视场、大相对孔径的星敏感器视场较大,阈值星等较低,因此可以减小导航星库大小,在星图识别流程中提升速率,从而加快姿态更新速率。但是大视场也会导致光学系统精度较低,且要求传感器的分辨率较高,因此这类星敏感器通常精度中等或较低。而在科学探测、卫星高精度定位等领域,为了提高精度,通常

基金项目:国家自然科学基金(42001408)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(42001408).

通信作者:林宝军(linbaojun@aoe.ac.cn)

需要提高角分辨率,降低视场,以更高的星等作为参考。在此条件下,第二类小视场星敏传感器更加适用。小视场星敏传感器牺牲了姿态更新的速度,主要追求高精度和高稳定性。它的误差校正更容易控制,其精度高于大视场星敏传感器^[4]。

星图识别算法作为星敏传感器的关键技术,实现一个可靠、快速的星图识别算法,一直都是其中重要的研究课题。星图识别算法通常包括跟踪识别、局部天区识别和全天区识别3类。其中跟踪识别和局部天区识别具有算法实现简单、计算速度快的特点。但通常需要将借助陀螺的姿态信息或者上一帧星图通过全天区识别得到的姿态结果作为补充信息来完成识别^[5]。而全天区识别则不需要任何额外的姿态信息就可以在全天星图上完成自主识别,但其识别速度、精度和稳定性也面临着更大的考验^[6-7]。

目前,主流的星图识别算法主要分为模式识别和子图同构两大类。前者在观测星图中选取观测星作为参考星,利用视场内的其他星与该参考星的位置关系构造匹配特征或者特征组,以此来确定观测星的模式。后者通常依靠选取的观测星和其一定范围内观测星组成的几何分布特征来构造匹配特征或匹配组。通过寻找与观测星最接近的匹配组来进行识别^[8]。栅格算法及其改进算法^[9-10]是模式识别类星图识别算法中最具有代表性的算法。栅格算法有较高的识别率,导航星数据库的容量也很小,但是对邻域内恒星的数量和伴星的选择有一定的要求,星点的选择将会直接影响到栅格算法的识别率^[11-12]。当星数量较少时,识别率较低,不适合应用在小视场星敏传感器上^[8]。子图同构类算法主要利用角距来进行匹配,由Gotlieb^[13]于20世纪70年代首先提出。随后在此基础上,Junkins等^[14]提出了以三角形为特征的识别算法,大大提高了匹配效率。Liebe^[15]在三角形算法的基础上依次选择中心星,与其他星构成三角形,该方法相比以往的算法进一步减小了导航星库的大小,但存在一定的冗余匹配,识别速度有待提高。Mortari等^[16]提出了金字塔算法,将三颗星推广到四颗星,从而构成四面体进行角距匹配,减少了冗余匹配的数量。Cheng等^[17]提出在三颗星出现冗余匹配时,再引入第四颗星,并利用K矢量法提高角距匹配的速度。

以上算法在识别率、数据库容量、匹配速度等方面都有一定程度的改善,但是应用在小视场星敏传感器上要面临视场小、星数少、星等等条件所导致的冗余匹配和精度问题。本文使用三角形角距作为基本特征,将星等区间差作为额外特征,根据角距和星等区间信息优化三角形的选择,并在此基础上引入第四颗星进行验证,进一步去除冗余匹配来提高算法的识别准确率以及对噪声的鲁棒性。

2 算法

2.1 主要思想

在星敏传感器获得的星等较低、星对角距测量精度较高的情况下,传统三角形算法具有很高的识别成功率。但当星等较高即星较暗时,质心测量精度往往不尽如人意,从而也使得星对角距的精度下降,而传统三角形法特征维数较低,导致大量冗余匹配的出现,使得识别率降低。此时就必须采用增加特征维数的方法来解决冗余匹配的问题。

本文首先采取引入第四颗星的方法,即相对于三角形

模式,通过增加一颗观测星组成空间四面体,获得3个具有相同顶点的角距。此方法在不需要改变星对角距的前提下,一定程度上降低了冗余匹配的概率。

本文选择的星等范围最大达到了8星等,而面对星等较高的情况,很难达到理想的匹配精度。为了继续减少冗余匹配,引入了观测星亮度这一特征。观测星亮度的测量存在较大的误差,因此本文将星等分为了4个区间,估算所有观测星的星等后,将每颗星划分至对应的4个区间中。最后将每两颗星之间的星等区间差的绝对值作为额外的特征。这样既增加了特征的维度,又尽可能地减少了测量误差。

导航星库的容量会因为额外引入的特征而变大,但是同时也可以利用新引入的星等区间差的绝对值来给导航星库分类。在此基础上进行三角形星图识别,针对性地在对应分类的导航星库进行匹配,不需要遍历完整的导航星库,大大减少了冗余匹配,提高了星图识别的效率。

2.2 引入四星验证的三角形法

基于角距匹配的三角形识别算法主要由通过构建导航星星表角距表来得到导航星角距,以及查找角距星表两部分组成。

如图1所示,根据导航星的天文坐标 (α_i, β_i) 和 (α_j, β_j) ,可以得到两颗导航星 i, j 的角距 $d(i, j)$ 。

$$d(i, j) = \arccos \left(\frac{S_i S_j}{|S_i| |S_j|} \right) \quad (1)$$

$$\text{其中, } S_i = \begin{pmatrix} \cos \alpha_i \cos \beta_i \\ \sin \alpha_i \cos \beta_i \\ \sin \beta_i \end{pmatrix}, S_j = \begin{pmatrix} \cos \alpha_j \cos \beta_j \\ \sin \alpha_j \cos \beta_j \\ \sin \beta_j \end{pmatrix}.$$

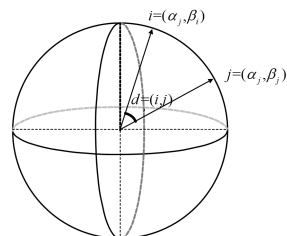


图1 星对角距

Fig. 1 Angular distance of star

传统三角形法根据上述方法得到导航星对角距,结合导航星编号生成了导航星星表角距表。而对CCD相机拍摄的星图进行处理后,得到星敏传感器坐标系下的星点坐标 (X_i, Y_i) 和 (X_j, Y_j) ,从而得到两颗观测星的角距为:

$$d'(i, j) = \arccos \left(\frac{k_i k_j}{|k_i| |k_j|} \right) \quad (2)$$

$$\text{其中, } k_i = \frac{1}{\sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + f^2}} \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ -f \end{pmatrix}, k_j = \frac{1}{\sqrt{X_j^2 + Y_j^2 + f^2}} \begin{pmatrix} X_j \\ Y_j \\ -f \end{pmatrix},$$

f 为拍摄仪器的焦距。通过查找导航星角距表,最后获得满足式(3)的导航星对集合 $Tri1$ 。

$$|d_n(i, j) - d'_n(i, j)| \leq \delta, n = 1, 2, 3 \quad (3)$$

其中, δ 为匹配精度阈值,与视场角 A 、像元数 N_{pixell} 和质心精度 σ_{centroid} 都有关系,具体数值如式(4)所示:

$$\delta = \frac{A}{N_{\text{pixell}}} \sigma_{\text{centroid}} \quad (4)$$

随后判断三角形匹配当前的识别结果,若匹配结果唯一,

则根据识别结果计算当前姿态。若匹配结果不唯一,引入第四颗验证星解决冗余匹配,与前面的三颗观测星组成空间四面体。在像平面中,第四颗验证星如图 2 所示。

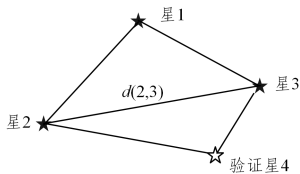


图 2 第四颗验证星示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the fourth verification star

根据星 2,3,4 组成的三角形再次进行匹配,计算得到新的导航星对集合 Tri_2 ,对比 Tri_1 ,从中找到重复出现的导航星 2,3 的编号,以确定正确的解。

2.3 构造星等区间差

面对星等较高的情况时,星敏感器不能达到理想的匹配精度导致匹配失败,而减少匹配精度阈值 δ ,会降低算法的鲁棒性。为了进一步减少冗余匹配,引入观测星亮度这一特征。观测星亮度的测量相对来说存在较大的误差,大概在 $0.2M_v$ 左右^[6]。因此并没有采用星等的精确数值作为特征,而是将星等分为了 4 个区间 $C=0,1,2,3$,并且估算所有观测星的星等后,将每颗星分在对应的 4 个区间中。最后将每两颗星之间的星等区间差的绝对值作为额外的特征,如式(5)所示:

$$C_{i,j} = |C_{pred_i} - C_{pred_j}| \quad (5)$$

其中, C_{pred_i} 代表第 i 颗观测星的估计星等所在的区间。根据“星等每降低一等,亮度增加为前一星等的 2.51 倍”^[18] 这一关系,在质心范围内找到灰度最大值,并且构建灰度 g 到星等 m 的变换表达式,如式(6)所示:

$$m = \left(\log_{2.51} \frac{255}{g} \right) + m_{\max} \quad (6)$$

其中, m_{\max} 为饱和星等。根据统计,SAO J2000 星表中不高于 $8.0M_v$ 的恒星中星等大于 $5M_v$ 的恒星占比超过 95%,因此选取饱和星等 $m_{\max} = 5$ 。最终得到估计星等的近似解,并将观测星的估计星等划分在 4 个区间。

2.4 构造导航星库

首先从 SAO J2000 星表中,提取星等不大于 8.0 的恒星作为导航星,得到 46 127 颗导航星。

导航星库主要由 3 部分组成,分别是两星的角距、星编号和星等区间差,如表 1 所列。其中,角距由式(1)结合原始星表中的赤经、赤纬计算得到,星等区间差由式(4)结合原始星表中的星等计算得到。

表 1 导航星库示例

Table 1 Example of navigation star database

Star ID	Angular distance	Star1	Star2	Magnitude interval difference
1	0.2151	15502	15504	0
2	0.2152	41465	41467	0
3	0.2153	7685	7686	0
—	—	—	—	—
449351	0.2012	12015	12019	1
449352	0.2014	39942	39945	1
449353	0.2017	12941	12943	1
—	—	—	—	—

根据 46 127 颗导航星,结合视场角为 $3^\circ \times 3^\circ$,对导航星

角距进行筛选,选择角距大于 0.2 并且小于视场对角的角距,最终得到 1 696 839 条导航信息。同时,为了加快查找速度,将导航星库中的所有数据按照星等区间差分类,并根据角距大小进行排序。

2.5 星图识别流程

首先进行质心提取,在实际星敏感器得到的星图中,像点的成像模型近似于二维高斯分布。本文使用基于高斯规律的亚像素质心定位算法^[19],包括像素粗定位和偏差精定位的两个步骤计算出星点质心,为了避免小视场情况下角距过小带来的误差,因此先计算图中所有星点间的角距,选取角距较大的星组成三角形进行三角形匹配。如果匹配结果不唯一,则引入第四颗星去除冗余匹配。如果匹配结果仍旧是多解,则引入星等区间差作为额外特征。在角距较大的星中,选择星等区间差较大的星组成三角形重新进行匹配和四星验证,以此增加特征维度。如果在算法过程中出现匹配失败,即出现无解的情况,则考虑存在伪星的情况。若星图中星数充足,则剔除这一次匹配所选择的三角形,依据以上流程重新进行匹配。具体识别流程如图 3 所示。

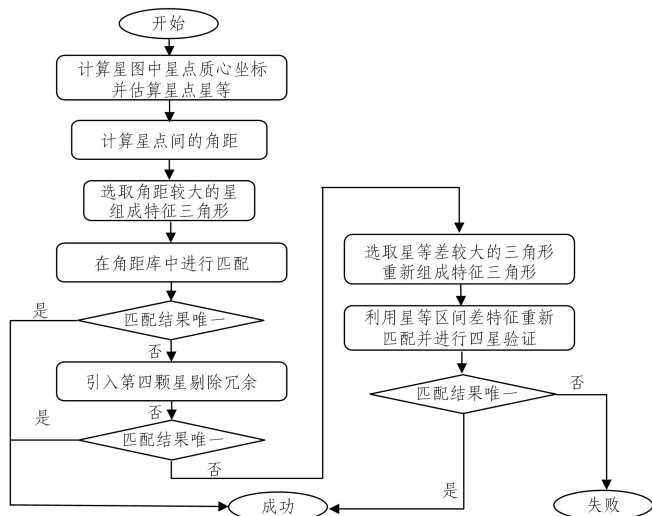


图 3 星图识别算法的流程图

Fig. 3 Flow chart of star pattern recognition algorithm

3 实验分析

3.1 仿真条件

为了验证算法的性能,本次实验从 SAO J2000 星表选取星等不高于 $8.0M_v$ 的恒星共计 46 127 颗,利用 MATLAB 2016 生成星敏感器视场角为 $3^\circ \times 3^\circ$ 的小视场模拟星图开展实验验证。生成过程中,每幅星图在赤经范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,赤纬范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 中随机选取方向。其中,图像分辨率为 1024×1024 ,像元尺寸 $3\mu\text{m}$,去除恒星数小于 4 颗的极端情况后,最终得到 1 000 幅模拟星图,平均每张图 9.9 颗恒星。

3.2 仿真结果

本次实验分别采用传统三角形算法^[15]、改进的三角形算法^[17]和本文方法进行对照实验。统计 1 000 幅星图的识别准确率和识别时间,每幅星图若得到唯一解,则视作识别成功。3 种方法的识别准确率和识别时间如表 2 所列。从表中可以看出,本文算法的识别准确率达到 98.4%,远高于传统三角

形算法。由于恒星数量多,生成的导航星库有 1 696 839 条信息,并且增加了第四星验证,因此在识别速率上要略低于传统的三角形法。而本文算法能够更好地去除冗余匹配,因此识别准确率高于改进的三角形法,并且不需要多次剔除星点,重新选择三角形。

表 2 不同算法的性能对比

Table 2 Performance comparison of different algorithms

Algorithms	Identification accuracy/%	Average time/ms
Traditional triangle algorithm	73.2	20.53
Improved triangle algorithm	95.6	38.94
Our algorithm	98.4	36.13

对本文算法识别失败的样本进行统计,其中有 6 幅星图仍然存在冗余匹配,10 幅星图识别失败。识别失败的星图中,5 幅星图在首次三角形匹配时无解,8 幅星图在第四星验证时无解。重新选择三角形进行匹配后,仍存在 10 幅星图无解。分析这 10 份失败样本发现,其中 3 张星图星点数量小于 7,不宜重新选择三角形匹配;3 张星图存在星点在图像边缘的情况,导致质心识别有误;余下 4 张星图存在星点距离过近,同样导致质心误差。

利用星敏传感器拍摄时,可能受到卫星运动或振动等外界干扰,尽管本次实验采用的是 $3^\circ \times 3^\circ$ 的小视场星敏传感器,镜头畸变较小,但仍然存在一定的误差。为了模拟这种情况,在星图中加入了方差在 $0 \sim 1$ 像素范围内的随机噪声。如图 4 所示,实验结果表明,3 种算法在为 $0 \sim 1$ 方差范围内,识别率都会随着位置噪声方差范围的变大而降低。本文算法保持着 93% 以上的准确率,而改进的三角形法和传统三角形法的最低识别率仅为 74.5% 和 42.7%,因此本文算法比起另外两种算法有着更好的鲁棒性。

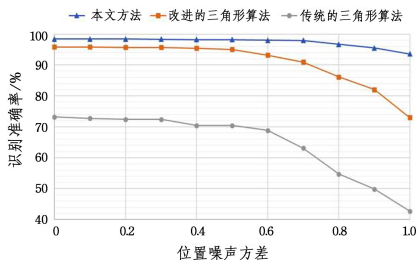


图 4 各算法在随机位置噪声下的表现

Fig. 4 Performance of each algorithm under random positional deviation

在星敏传感器成像过程中,星等误差是不可避免的,受星敏传感器光谱范围的限制及空间环境干扰影响,星等测试精度一般不高于 $0.2M_v^{[5]}$ 。本文算法引入了星等区间作为额外特征,因此对星等误差的模拟是必需的。图 5 给出了 3 种算法在星等误差为 $0 \sim 0.5M_v$ 范围内的识别率。实验结果表明,另外两种算法对星等误差并不敏感。通过查看具体的失败案例,发现导致识别率略有下降的主要原因是星等误差导致的星图中星数个数过少。本文算法借助了星等信息,在星等误差逐渐增大的情况下,识别率会逐渐接近改进的三角形法,但仍然保持着 95.4% 以上,对星等噪声有着较强的鲁棒性。

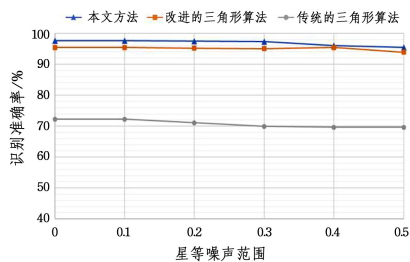


图 5 各算法在星等噪声下的表现

Fig. 5 Performance of each algorithm under magnitude noise

结束语 本文提出了一种适用于小视场星敏传感器的星图识别算法。该算法使用三角形角距作为基本特征,将星等区间差作为额外特征,根据角距和星等区间信息优化三角形的选择,并在此基础上引入第四颗星进行验证,进一步去除冗余匹配来提高算法的识别准确率以及对噪声的鲁棒性。

根据仿真实验结果:该算法的识别率为 98.4%,平均识别时间在 36.13ms,较传统三角形法在识别率上有很大的提升。对像面位置噪声相比其他算法有着较强的鲁棒性,保持着 93% 以上的识别率。引入星等噪声时,算法识别率无明显下降,达到了 95% 以上。下一步将优化双星和边缘星问题,来提高算法的识别效率和鲁棒性。

参考文献

- [1] ZHANG H, ZHOU X D, WANG X M, et al. Survey of technology status and development of all-time star sensors in near-earth space[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(8): 19-31.
- [2] ZHANG G J, WEI X G, JIANG J. Star map identification based on a modified triangle algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1150-1154.
- [3] RIJLAARSDAM D, YOUS H, BYRNE J, et al. A Survey of Lost-in-Space Star Identification Algorithms Since 2009 [J]. Sensors, 2020, 20(9): 2579.
- [4] WANG C R. Research on star centroid algorithm of star sensor [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [5] ZONG H, WANG B, ZHOU Z Q, et al. An Autonomous Star Identification Algorithm Based on Patterns Matching[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(10): 1032-1037.
- [6] ZONG H, LIU Y, GAO X Y, et al. All-sky triangle algorithm for star pattern identification aided by star coordinates[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(9): 3220-3224.
- [7] SU D Z, WANG Y L, WU S Y, et al. Star identification algorithm based on similar triangle principle[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(11): 2467-2473.
- [8] FAN J W. Design and Implementation of Fast Star Identification Algorithm [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017.
- [9] PADGETT, CURTIS, KREUTZ-DELGADO, et al. A grid algorithm for autonomous star[J/OL]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1997. <https://ieeexplore.ieee.org/document/570743>.
- [10] CLOUSE D S, PADGETT C W. Small field-of-view star identification using Bayesian decision theory[J]. IEEE Trans. Aero-

space and Electronic Systems,2000,36(3-1):773-783.

- [11] LIU X Y,ZHOU Z F,ZHANG Z L,et al. Fast star identification based on coordinate transformation assisted by bright stars[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2020,41(8):82-89.
- [12] LIU X Y,ZHANG Z L,ZHOU Z F,et al. Modified algorithm of triangle star identification based on radial feature[J]. Journal of National University of Defense Technology,2020,42(6):42-46.
- [13] GOTTLIEB D M. Star identification techniques[C]//Spacecraft Attitude Determination and Control. 1978:259-266.
- [14] JUNKINS J L,WHITE C,TURNER J. Star pattern recognition for real-time attitude determination[J]. Journal of the Astronautical Sciences,1977,25(3):251-270.
- [15] LIEBE C C. Star trackers for attitude determination[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1995,10(6): 10-16.
- [16] MORTARI D,SAMAAN M A,BRUCCOLERI C,et al. The pyramid star identification technique [J]. Navigation, 2004, 51(3):171-184.
- [17] CHENG H Y,ZHONG H J,WANG L,et al. A Fast Algorithm of All-Sky Star Map Automated Identification[J]. Aerospace

Control and Application,2017,43(4):73-78.

- [18] OU Y H. Research on Star Image Simulation and Star Extraction Method for CCD's Star Tracker[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2005.
- [19] WANG H Y,FEI Z H,WANG X L. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution [J]. Optics and Precision Engineering,2009,17(7):1672-1677.



LU Han, born in 1997, postgraduate. His main research interests include star identification, image processing and so on.



LIN Bao-jun, born in 1963, Ph.D, professor, Ph.D supervisor. His main research interests include computer control technology and satellite overall.