

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.03.011

一种改进的快速全天星图识别算法

梁莹, 蔡善军, 张丽娜, 于杏

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要:针对三角形算法中模式识别率低、易造成误识别的问题,提出了一种改进的三角形算法。首先,该算法通过对全天区导航星进行筛选,缩小星库存储空间;同时,在识别过程中对找到的三边角距集合采用设置状态标识的方法,加快对探测星三角形的识别速度;在三角形匹配识别结果不唯一时,引入其他观测星进行验证,确定唯一的匹配对应;在识别结束后,应用投影验证检验识别结果。仿真结果表明,该算法能够有效地节省存储空间,缩短全天星图识别时间,与传统的三角形算法相比具有较大的优势。

关键词:星敏感器;星图识别;三角形算法;投影验证

中图分类号: P128.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2022)03-0087-05

An Improved Fast All-Sky Star Map Recognition Algorithm

LIANG Ying, CAI Shan-jun, ZHANG Li-na, YU Xing

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: Aiming at the problem of low pattern recognition and easy to cause misrecognition in triangle algorithm, this paper presents an improved triangle algorithm. Firstly, the algorithm screens navigation stars in the all-sky region in order to save storage space. Secondly, the method of setting the status mark of navigation stars is adopted to speed up the angular distance matching in the recognition process. When the triangle matching result is not unique, a fourth observation star is introduced for verification to determine the unique matching correspondence. Finally, at the end of identification, projection verification is applied to test recognition result. Simulation is carried out and the result shows that the algorithm can not only save storage space effectively, but also reduce the time in all-sky map recognition and has great advantages over the traditional triangle algorithm.

Key words: Star sensor; Star map identification; Triangle algorithm; Projection verification

0 引言

星敏感器是通过对恒星观测目标在探测器上的成像信息进行相应计算,从而实现测定其所在载体在天球惯性坐标系下三轴姿态的仪器,因精度高、无姿态误差累积及可独立自主导航等优点,被

广泛应用于各类载体中^[1]。星敏感器主要向着高精度、低功耗、小体积和高数据更新率的方向发展^[2],并随着载体使用需求的变化,全天时、近地面应用也成为了新的发展趋势^[3-4]。

星图识别是通过将拍摄星图中的恒星信息构造成与导航星库中存储数据模式相同的星模式,并

收稿日期: 2021-09-22; **修订日期:** 2021-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(62003051)

作者简介: 梁莹(1996-),女,硕士生,主要从事星惯组合导航方面的研究。

通信作者: 蔡善军(1977-),男,研究员,主要从事导航、制导与控制方面的研究。

进行对比完成成像恒星识别的过程。星图识别是星敏感器确定载体空间姿态的重要步骤,根据有无初始姿态可分为全天球识别和星跟踪识别。其中,全天球识别通过将拍摄星图构成的星模式信息与整个星库信息进行对比完成识别,此过程的实现不需要任何姿态先验信息,是星图识别过程的核心研究内容。

星图识别方法目前可分为三类:第一类方法主要根据恒星之间相互位置关系组成的特征进行识别,此类方法通常利用多颗星之间的星对角距进行特征匹配,主要实现方法有三角形算法、多边形角距算法和极点法^[5-6]等;第二类方法则根据邻域伴星信息构成的星模式进行识别,此类方法主要有栅格法和极坐标匹配法^[1];第三类方法是随着人工智能技术的发展而产生的机器学习型星图识别方法,此类方法需要大量的样本进行训练^[7]。

三角形算法是星图识别算法中应用最早的算法,在现在的星敏感器中也多有应用,其原理是将构成探测星三角形的三边角距作为特征向量,与星库中保存的特征向量进行匹配,当匹配唯一时,则识别成功。三角形算法原理简单,易于实现,但其特征维数少,易产生误匹配,而且直接存储所有可观测导航星三角形的特征向量会存在数据冗余的问题^[8]。

针对上述问题,本文对三角形星图识别算法进行了改进:首先,对星库的构建进行研究与实现,采用存储星对角距信息代替存储三角形的三边星对角距信息,并通过筛选可用的导航星缩减导航星库;其次,基于现有的三角形算法,在识别过程中引入状态标识以加快匹配速度;同时,在三角形匹配结果不唯一时进行四星检验,以提高识别率;最后,根据计算出的星敏感器姿态进行导航星投影验证,避免发生误识别。

1 改进三角形识别算法

由于三角形识别算法特征维数少,在进行全天球识别时,易存在冗余匹配,使得识别成功率降低,因此考虑增加第四颗星,进行四星检验。本文在三角形算法结合四星检验方法的基础上,加入导航星投影验证,对探测星识别结果及解算的姿态进行检验,提出了一种改进的全天星图识别算法。

算法的具体实现过程为:

1)生成并保存此星图识别算法所需的导航星

库(由导航星信息表和导航星对角距表组成)。

2)将所有探测星按照能量由大到小的顺序排列。

3)按照设定的选星方式对探测星进行筛选,之后按照能量从大到小的顺序选取筛选后的探测星,构成三角形进行识别。

4)若三角形识别结果唯一,进行投影验证,若投影验证成功,则识别成功,否则重新选择三角形进行识别;若三角形识别结果不唯一,选取另一颗探测星,进行四星检验,若检验成功,则识别成功,否则重新选取其他探测星进行四星检验,若四星检验全部失败,重新选星构成三角形进行识别;若没有识别到对应的导航星三角形,则重新选星构成三角形进行识别。

5)遍历识别星数阈值内所有的探测星后,计算星敏感器在天球系下的姿态。

6)根据计算的姿态进行投影验证^[9]。

四星检验过程如下,示意图如图1所示。

对探测星三角形 ABC 进行识别,当三角形 ABC 识别结果不唯一时,引入第四颗导航星,即图1中的 D 星,通过识别三角形 ABD ,并结合三角形 ABC 的识别结果,可确定探测星 A 、 B 和 C 的真实星号^[10-11]。

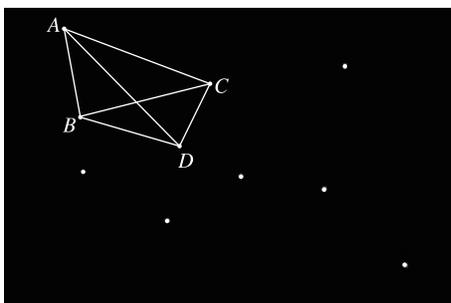


图1 四星检验示意图^[1]

Fig. 1 Sketch map for the fourth star test

投影验证过程如下:

1)根据计算的姿态将视场范围内的导航星投影到探测器面内。

2)计算像面上导航星投影与探测星点的距离,对此距离进行判断,统计小于等于距离阈值的数目。

3)若此数目大于等于设定的投影数目阈值,则投影验证成功,结束识别;否则,投影验证失败,重新选择三角形进行识别。

综上所述,本文提出的三角形星图识别算法的

流程图如图 2 所示。

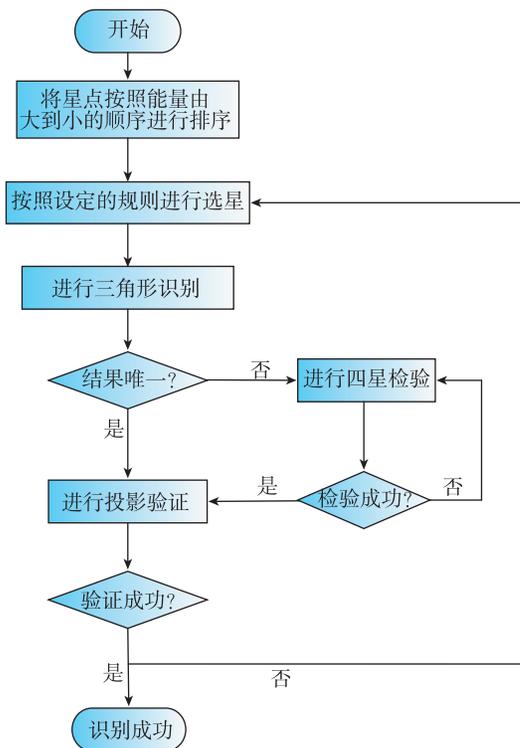


图 2 改进的三角形算法流程图

Fig. 2 Flow chart of improved triangle algorithm

2 星对角距的生成与存储

相较于存储导航星三角形三边角距数据,直接存储导航星对可有效地减少重复数据,故本文存储两两恒星之间的星对角距以实现改进的三角形匹配算法。星对角距是 2 个导航星矢量相对于地心的夹角^[12],这里以弧度为单位。计算公式如下

$$D_{ij} = a \cos(x_i x_j + y_i y_j + z_i z_j) \quad (1)$$

式中, (x_i, y_i, z_i) 是 i 号星在惯性系下的三维坐标; (x_j, y_j, z_j) 是 j 号星在惯性系下的三维坐标; D_{ij} 是两星之间的星对角距。

直接存储所有满足敏感星等的导航星对会存在一部分角距满足视场条件,但因构成角距的恒星能量低,在识别过程中可能存在不会被使用的问题。所以,直接存储所有符合星等要求的星对角距存在浪费存储空间、冗余星对多的问题。因此,在构建星对角距表时,需进行相应的处理,以减小星库的容量和加快星图识别的速度,本文提出了一种星对角距筛选方法。

此方法过程如下:首先,设置星敏感器可遍历全天区的光轴指向顺序;然后,星敏光轴按照顺序转动,根据指向的赤经、赤纬信息和星敏圆视场角

确定视场范围内的导航星;之后,将获得的导航星按照星等从小到大的顺序排列,选取前 N 颗导航星,两两构成星对;最后,对构成的星对进行判断,若星对角距表中不存在此星对,则计算此星对的角距值,并存入星对角距表中,若星对角距表中已存在此星对,则判断下一个星对。遍历全天区范围后,可得到压缩后的导航星对角距表。

星对角距表中包含组成该星对的两颗星在导航星信息表中的星号,和满足视场要求的两星之间的星对角距。星对角距表按照星对角距升序排列,第一列与第二列是星号,第三列是两星之间的角距^[13](单位:弧度),存储格式如表 1 所示。

表 1 星对角距排列方式

Tab. 1 The arrangement of star pair angle distance

星号 1	星号 2	角距/rad
950	1122	0.110063
1346	1598	0.110065
2374	2502	0.110068
511	685	0.110071
3	4	0.110075
3170	3217	0.110077

3 匹配识别

由于星敏感器的探测器、镜头等部件会产生各种误差,根据像面上星点坐标计算的两星角距数值与相应导航星之间的星对角距数值相比存在误差。通常设定合理的误差阈值,根据观测角距查找满足误差阈值内的星对进行匹配识别^[14-15]。

为快速确定星对角距在导航星对角距表中的位置,本文对整个星对角距表按照角距数值进行分块,并记录每一小块在星对角距表中的位置。通过将计算出的探测星对角距数值与保存的分块位置对应的角距进行匹配对比,可确定此星对位于第几小块,在此基础上可快速获得此角距值对应的星对集合。

在三角形识别中,设 d_{12} 、 d_{23} 、 d_{13} 为探测星三角形的三边角距; C_{12} 、 C_{23} 、 C_{13} 为角距值对应匹配星对的集合;匹配识别是指在匹配集合中找到 3 个星对 $p_{12} \in C_{12}$ 、 $p_{23} \in C_{23}$ 、 $p_{13} \in C_{13}$,此 3 个星对中的星号可按照组成三角形的要求(两两星对中有一个相同星号,找出的 3 个星号之间互不相同)构成探测星三角形^[6]。

由于每个星对集合可能包含几十个或上百个星对,在3个集合中找到满足要求的 (p_{12}, p_{23}, p_{13}) 需要消耗较多的运行资源与时间。为解决这个问题,这里采用一种快速的搜索方法,具体步骤如下(示意图如图3所示):

1)将集合 C_{12} 中包含的所有导航星号记录下来,每一个星号记录一个条目,每条记录中的根星号记为 j ,包含根星号的星对中的另一个星号记为 i ;

2)对 C_{23} 中所有星对的星号进行查找,确定是否含有与集合 C_{12} 相同星号的星对,当存在此星对时,将 C_{12} 中与 C_{23} 具有相同星号的条目标记为状态1,将 C_{23} 中含有相同星号的星对中的另一个导航星号记为 k ,并写入此条目中;

3)遍历 C_{12} 中所有记为状态1的条目,查看 C_{13} 中是否包含 i 和 k 构成的星对,如包含,则找到一个匹配三角形 (i, j, k) 。

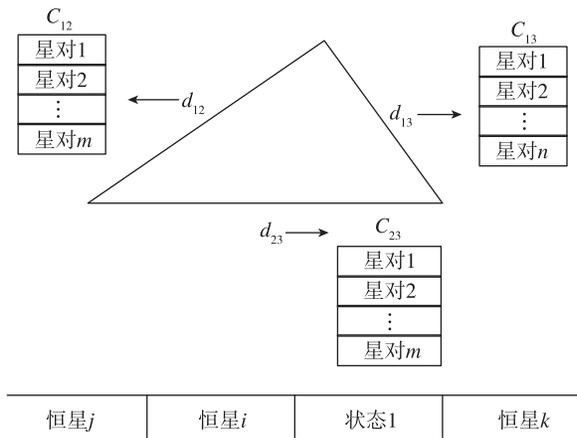


图3 匹配识别示意图

Fig. 3 Matching recognition diagram

4 仿真结果与分析

为验证算法的有效性,本文进行了数学仿真实验。

仿真条件如下:

- 1)星传感器的焦距 $F = 50\text{mm}$;
- 2)星传感器的视场为 $19^\circ \times 13^\circ$;
- 3)识别星数阈值 $N = 10$;
- 4)投影验证中角距匹配个数阈值 $N_1 = 5$;
- 5)匹配识别时角距误差阈值 $40''$;
- 6)观测星等设为6.0等星;
- 7)星库中存储导航星数2308颗,存储星对角距

个数69791对。

对实测的1000幅星图的星点信息进行算法验证,在3GHz处理器主频的PC机上,识别每幅星图的时间如图4所示。

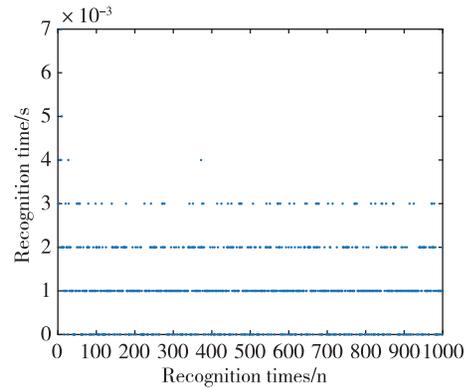


图4 星图识别时间

Fig. 4 Star map recognition time

本文匹配识别算法的测试结果如表2所示。

表2 仿真测试结果

Tab. 2 Simulation test results

算法	改进的三角形算法
误识别次数	0
每幅星图最大识别时间/s	0.009
平均识别时间/s	0.001535
总识别时间/s	1.54299
星对角距个数	69791
占用空间/MB	0.59

仿真结果表明,利用本文提出的算法对1000幅实测星图进行识别,误识别次数为0,平均识别时间由2.4ms降为目前的1.5ms左右。虽然本算法增加了投影验证的功能,但识别时间增加量较小,且利用本文第2节的角距筛选方法生成的星对角距占用存储空间约0.59MB,相较于以前的三角形星图识别算法所需接近1MB的存储空间有所降低。

5 结论

本文对角距类星图识别算法进行了深入研究,针对传统三角形识别算法的缺点与不足,在缩小星库、加快匹配识别、确定唯一对应三角形、避免误识别几个方面做了相应改进。

通过对实际星图进行仿真获得的结果表明:本文算法有效地解决了三角形算法误识别率较高的

问题,且识别时间较少,所需存储空间较小。本文算法并未直接使用恒星等数据进行辅助识别,有效避免了因恒星在探测器成像星等不准确带来的误识别,具有较强的工程应用价值。

参考文献

- [1] 张广军,魏新国,江洁. 一种改进的三角形星图识别算法[J]. 航空学报, 2006, 27(6): 18-25.
Zhang Guangjun, Wei Xinguo, Jiang Jie. A modified triangle star pattern recognition algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 18-25(in Chinese).
- [2] 何家维. 高精度全天时星敏传感器关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2013.
He Jiawei. Research on key technology of high precision all-sky star sensor[D]. Changchun: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2013(in Chinese).
- [3] 程会艳, 钟红军, 王龙, 等. 一种快速全天星图识别算法[J]. 空间控制技术与应用, 2017, 43(4): 73-78.
Cheng Huiyan, Zhong Hongjun, Wang Long, et al. A fast all-sky star map recognition algorithm[J]. Space Control Technology and Application, 2017, 43(4): 73-78(in Chinese).
- [4] 孙大开, 张春明, 朱建峰, 等. 应用于天文导航的白昼恒星探测技术[J]. 空间控制技术与应用, 2017, 43(4): 42-46.
Sun Dakai, Zhang Chunming, Zhu Jianfeng, et al. A technical analysis of daytime star detection applied to celestial navigation[J]. Aerospace Control and Application, 2017, 43(4): 42-46(in Chinese).
- [5] 张晨, 陈朝阳, 沈绪榜. 基于角距分布的星表快速查找算法[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(9): 16-18
Zhang Chen, Chen Zhaoyang, Shen Xubang. Angular distance distribution-based search-less algorithm for star list[J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(9): 16-18(in Chinese).
- [6] Hoard D W, Wachter S, Sturch L K, et al. Cool companions to white dwarf stars from the two micron all sky survey data release[J]. Astronomical Journal, 2007, 134(1): 26-42.
- [7] 梁斌, 朱海龙, 张涛, 等. 星敏传感器技术研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 16-29.
Liang Bin, Zhu Hailong, Zhang Tao, et al. Research status and development trend of star sensor technology[J]. China Optical, 2016, 9(1): 16-29(in Chinese).
- [8] 陈元枝, 郝志航, 王国辉, 等. 适于星敏感器的导航星星库制定[J]. 光学精密工程, 2000, 8(4): 331-334.
Chen Yuanzhi, Hao Zhihang, Wang Guohui, et al. Design of guide star catalog for star sensor[J]. Optic Precision Engineering, 2000, 8(4): 331-334(in Chinese).
- [9] 郭磊, 李保权, 曹阳, 等. 基于三角形匹配的星图识别算法及优化[J]. 电子设计工程, 2018, 26(5): 137-140+145.
Guo Lei, Li Baoquan, Cao Yang, et al. Star map recognition algorithm based on triangle matching[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(5): 137-140+145(in Chinese).
- [10] Wang W J, Wei X G, Li J, et al. Noise suppression algorithm of short-wave infrared star image for all-day star sensor[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 85: 382-394.
- [11] Wang W J, Wei X G, Li J, et al. Guide star catalog generation for short-wave infrared (SWIR) all-time star sensor[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(7): 075003.
- [12] 董雅潇. 基于小视场星敏感器的星点提取与星图识别算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
Dong Yaxiao. Research on star point extraction and star map recognition algorithm based on small field star sensor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018(in Chinese).
- [13] 赵启迪. 星敏传感器快速星图识别算法研究[D]. 北京: 中国航天科技集团有限公司第一研究院, 2016.
Zhao Qidi. Fast star map recognition algorithm based on star sensor[D]. Beijing: The First Academic of China Aerospace Science and Technology Corporation, 2016(in Chinese).
- [14] 时圣革, 雷肖剑, 于长海. 星图识别三角形算法综述[J]. 光电技术应用, 2014, 29(5): 1-6.
Shi Shengge, Lei Xiaojian, Yu Changhai. A review of star map recognition triangle algorithms[J]. Application of Photoelectric Technology, 2014, 29(5): 1-6(in Chinese).
- [15] Xu Q, Zhao C H, Li X. Stellar radiation modeling and image simulation for airborne daytime star sensor [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Signal & Image Processing, 2017.