

文章编号:1002-2082(2018)03-0349-06

应用形状因子特征的高效星图识别

陆壮志,周 鑫,万志江,王安迪

(湖北航天技术研究院总体设计所,湖北 武汉 430040)

摘 要:针对传统的三角形星图识别算法存在冗余匹配多、抗噪声性能差的问题,提出了一种应用形状因子特征的高效星图识别算法。该算法在传统的三角形算法基础上,引入了形状因子特征参数和方向信息,并择优选择视场内 4 颗观测星,组成一对观测三角形,进行星点匹配识别。与传统的三角形算法相比,该算法增加了星图识别时图像的特征信息量,降低了匹配时的冗余度,具有导航特征库存储空间小、识别速度快等优点。实验表明,在星点位置噪声标准偏差为 2 个像素、星等噪声标准偏差为 0.7 星等的仿真条件下,该算法的识别率均在 99% 以上;通过地面实验的实物验证,在 300 MHz 的 FT-C6713 的 DSP 硬件平台上,全天自主识别的平均运行时间约为 47 ms,具有明显的优势。

关键词:星敏感器;星图识别;三角形算法;形状因子

中图分类号:TN201;P128.4;V448.22

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0302001

Efficient star identification algorithm based on shape factor features

Lu Zhuangzhi, Zhou Xin, Wan Zhijiang, Wang Andi

(The Overall Design Institute of Hubei Aerospace Technology Academy, Wuhan 430040, China)

Abstract: In response to the problems which exist in traditional triangle star identification algorithms including redundant matching and poor anti-noise performance, an efficient star identification algorithm based on shape factor feature was proposed. The algorithm presents the shape factor characteristic parameter of triangle and the direction information based on traditional triangle algorithm. Based on the traditional triangle algorithm, this algorithm introduces the feature parameters of shape factor and the direction information, and selects 4 observation stars in the field of view to form a pair of observation triangles, and then performs star point matching and recognition. Compared with the traditional triangle algorithm, the algorithm proposed increases the feature information amount of the star map when identifying star, reduces the redundancy when matching, and has the advantages of small storage space and high identification speed. The experimental results show that under the simulation conditions of standard deviation of 2 pixels and standard noise of 0.7 magnitude at the star position, the identification rate of the algorithm is more than 99%. Through the physical verification of the ground experiment, the average time of self-identification of star map is about 47 ms in the operation based on the FT-C6713 DSP hardware platform of 300 MHz, which has obvious advantages over traditional triangle star identification algorithm.

Key words: star sensor; star identification; triangle algorithm; shape factor

收稿日期:2017-12-14; 修回日期:2018-02-01

作者简介:陆壮志(1987—),男,安徽枞阳人,硕士,工程师,主要从事星敏感器技术方面的研究。

E-mail:luzhuangzhi692@163.com

引言

目前,姿态敏感器种类繁多,星敏感器的性能最为突出,具有功耗低、重量轻、自主性强、动态性能好、精度高等优点,已广泛应用于卫星、导弹等空间技术领域。星敏感器是一种以赤道惯性系为参考系、以恒星为导航信息源的高精度空间姿态测量装置,通过拍摄天球上不同位置恒星的图像,经过信号处理电路提取出星点的位置信息,采用星图识别算法在导航星库中寻找观测星,利用观测星的方向矢量来确定空间飞行器的姿态信息。其中,星敏感器的星图识别技术是完成航天器姿态测量任务的一项关键技术,直接影响到星敏感器能否全天自主导航工作的能力。

星图识别算法可以分为基于星座特征、字符模式和智能行为等3类星图识别算法^[1],如改进的三角形算法^[2]、特征图形匹配方法^[3]、改进的栅格算法^[4]、遗传算法^[5]等众多方法,但在实际工程应用中,仍以三角形算法及其改进的算法为主。三角形星图识别算法是通过选择视场内3颗恒星构成观测三角形,以三角形三条边的角距或边的夹角为特征量,在对应的导航特征库中进行匹配识别。该算法计算简单,但所需的导航特征库容量大,在匹配识别时存在冗余多、识别时间长,识别率低等问题。

文中提出了一种应用形状因子特征的高效星图识别算法,能够降低对导航特征库存储空间的要求,在匹配识别过程中,可以根据观测三角形的特征量快速找到“唯一”的导航三角形,解决了三角形星图识别算法在匹配时存在导航三角形冗余多的难题,具有匹配识别时间短、识别成功率高、鲁棒性好等优点。

1 导航星数据库的构建

导航星数据库通常包括导航星表和导航特征库。其中,导航星表由基本星表(如SAO Star Catalog J2000星表、依巴谷星表)中不大于极限探测星等的恒星组成,主要包括导航星的序号、星等、赤经、赤纬、自行等信息,为了保证星图识别的成功率和速度,需要对基本星表中的导航星进行筛选,确保导航星表的完备性、均匀性和冗余性^[6];导航特征库是指从导航星表中选取导航星,按照设计的构建方法组成所需的特征信息的集合,它为星图匹配过程提供必需的特征库。

如何选取一组高效的特征量信息,直接关系到星图识别算法的整体性能。

1.1 导航三角形特征量的选取

假设 $\triangle ABC$ 的三条边设定为 $BC=a$ 、 $AC=b$ 、 $AB=c$ ($a \geq b \geq c$),周长的大小为 $2p$,面积的大小为 S_{\triangle} ,其中 a 为最长边的边长,则有

三角形的内切圆半径为

$$R_{\text{内}} = \frac{S_{\triangle}}{p} \quad (1)$$

三角形的外接圆半径为

$$R_{\text{外}} = \frac{abc}{4S_{\triangle}} \quad (2)$$

在这里,引入三角形的形状因子^[7] h (无量纲),定义为三角形内切圆半径与外接圆半径之比,即:

$$h = \frac{R_{\text{内}}}{R_{\text{外}}} = \frac{4S_{\triangle}^2}{pabc} \quad (3)$$

根据海伦公式,三角形的面积大小为

$$S_{\triangle} = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)} \quad (4)$$

将(4)式带入(3)式中,得:

$$h = \frac{4(p-a)(p-b)(p-c)}{abc} \quad (5)$$

为了方便计算,将(5)式简化为

$$h = \frac{(p-a)(p-b)(p-c)}{abc} \quad (6)$$

为了进一步区分每一个三角形形状的差异性,降低星图匹配识别时的冗余度,这里,引入方向标志^[8] dir ,如图1所示。

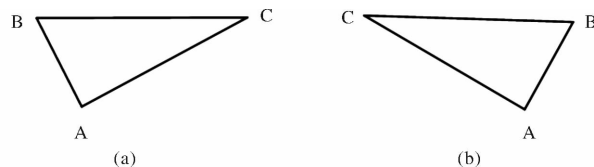


图1 三角形方向标志的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of triangle direction sign

在图1(a)中,三角形的边长 a 、 b 、 c 按从大到小排列呈顺时针方向,则 $\text{dir} = -1$;在图1(b)中,三角形的边长 a 、 b 、 c 按从大到小排列呈逆时针方向,则 $\text{dir} = 1$ 。因此,(6)式应修改为

$$h = \text{dir} \times \frac{(p-a)(p-b)(p-c)}{abc} \quad (7)$$

1.2 导航特征库的构建与存储

在构建导航特征库时,需要根据星敏感器光学镜头的性能参数来定制,假设星敏感器的视场大小为 $7.5^\circ \times 7.5^\circ$,敏感极限星等的大小为6.5星等。因此,导航星表选用SAO Star Catalog J2000星表中不大于6.5星等的恒星,且需要筛去变星、

双星及高自行恒星,最后得到由 9 040 颗导航星组成的导航星表,导航特征库的具体构建步骤如下:

1) 以导航星表中每颗导航星为星敏感器的光轴中心,生成 $7.5^\circ \times 7.5^\circ$ 大小的导航星图;

2) 根据导航星图中导航星的数量,择优选择其中的 4 颗导航星,若视场内导航星的数量 $3 < p \leq 5$,则从所有的导航星中选 4 颗进行组合排列;若视场内导航星的数量 $5 < p \leq 10$,则从最亮的 6 颗导航星中选 4 颗进行组合排列;若视场内导航星的数量 $p > 10$,则先找出距离星敏感器的光轴中心最近的 10 颗导航星,再从 10 颗导航星中挑选出最亮的 6 颗导航星,最后从最亮的 6 颗导航星中选 4 颗进行组合排列;

3) 将 4 颗导航星两两之间的最长边作为公共

边,共组成 2 个导航三角形;

4) 根据(7)式,计算 2 个导航三角形的形状因子,并按照从小到大的方式进行排序,将 2 个导航三角形的形状因子、导航三角形公共边的角距值和导航三角形公共边对应的 2 颗导航星的序号作为一组特征量的数据,保存至导航特征库中。其中,导航星的序号是指在导航星表中每颗导航星的排列序号。

通过上述的构建方法,共得到由 41 627 组特征量数据组成的导航特征库。对导航特征库中第 1 列的值(即每组数据中第 1 个导航三角形的形状因子)按照从小到大进行排序,在导航特征库中采用区间分块存储方式,具体的导航特征库的存储结构格式见表 1 所示。

表 1 导航特征库的存储结构格式

Table 1 Storage structure format of guidance characteristic catalogue

第 1 个导航三角形的形状因子	第 2 个导航三角形的形状因子	公共边的角距值 /rad	公共边对应的第 1 颗导航星序号	公共边对应的第 2 颗导航星序号
-0.125 0	-0.113 0	0.077 3	1 949	1 942
-0.125 0	-0.065 1	0.077 3	1 949	1 942
-0.125 0	-0.065 2	0.083 7	5 129	5 123
-0.125 0	0.050 9	0.089 3	427	431
-0.125 0	0.000 1	0.102 6	8 774	8 782
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0.118 1	0.124 9	0.107 1	1 196	1 740
0.118 5	0.123 9	0.072 2	2 337	2 331
0.119 8	0.122 4	0.077 1	5 646	5 655
0.121 0	0.124 1	0.084 2	4 787	4 788
0.121 3	0.123 9	0.110 8	6 170	6 871

而传统的三角形星图识别算法,常采用存储导航三角形的方法构建导航特征库,如果任意选取导航星表中的 3 颗导航星组成导航三角形,则有 $C_{9\,040}^3 = 123\,086\,352\,880$ 个三角形,即使加上视场约束条件,得到的导航三角形数量也是庞大的,导致匹配识别时导航三角形冗余多,无法进行快速识别,从而降低了算法在工程上的应用价值。

为了避免在星图识别过程中,遍历搜索整个导航特征库的导航三角形的特征量,减少数据的查找范围,文中采用一种散列函数的数据查找方式^[9],即将导航特征库中各个子块 $N(h)$ 和第 1 个导航三角形的形状因子 h 建立一种映射函数的方式,具体的映射函数见(8)式,共分成 308 个子块。

$$N(h) = \text{fix} \left(\frac{h + 0.125\,0}{0.000\,8} + 1 \right) \quad (8)$$

2 星图识别

文中采用 2 个观测三角形的形状因子和观测三角形公共边的角距值等 3 个特征量进行匹配识别。为了降低因观测星个数较少出现误识别的情况,要求视场内观测星的个数大于或等于 4 颗,具体星图识别的流程如下:

1) 参考 1.2 中导航特征库的选星方法,择优选择视场中 4 颗观测星,组成 2 个观测三角形;

2) 按照(7)式计算 2 个观测三角形的形状因子,并与导航特征库中导航三角形信息进行匹配,

具体的匹配条件见(9)式,其中: h 为观测三角形的形状因子; a 为观测三角形公共边的角距值(单位:rad); h_T 为导航三角形的形状因子; a_T 为导航三角形公共边的角距值(单位:rad);

$$\begin{cases} |h-h_T| \leq 0.0008 \\ |a-a_T| \leq 0.002 \end{cases} \quad (9)$$

3) 从待验证的导航三角形集合中选取一组导航星信息,利用双矢量定姿的方法^[10]计算出当前星敏感器的姿态值,根据该姿态信息生成一幅局部天区的参考星图,并将其与观测星图进行星点匹配;

4) 若大部分观测星都可以找到与之相匹配的导航星,则星点匹配成功,完成星图识别任务,流程结束;否则,返回步骤3)中,继续验证下一组导航三角形信息,直到导航三角形集合中的导航三角形全部验证完为止;

5) 若所有待验证的导航三角形均被处理过,则返回步骤1)中,重新挑选下一组观测星进行识别,直至星点匹配成功;

6) 否则,视场内择优选择的观测星均被处理过,全天星图识别失败,结束流程。

图2为文中算法的具体流程图。

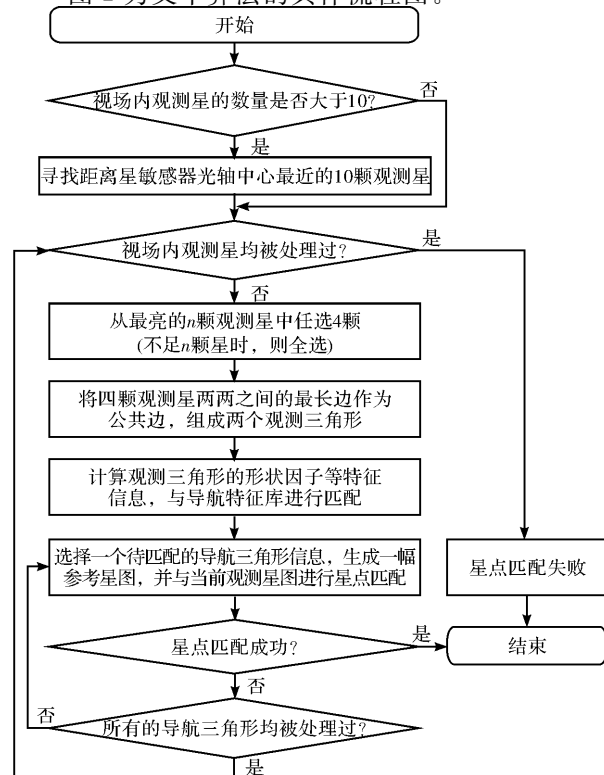


图2 文中算法的流程图

Fig. 2 Flow chart of proposed algorithm

3 实验与结果分析

3.1 仿真实验

仿真条件:设定星敏感器的视场大小为 $7.5^\circ \times 7.5^\circ$ 、焦距50 mm、像素分辨率 1024×1024 像素、主点像素坐标为(512,512)、像元尺寸 $6.45 \mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$ 、极限敏感星等大小为6.5等,导航星表选用SAO Star Catalog J2000基本星表中不大于6.5等的9040颗导航星。

下面从星点位置噪声、星等噪声和导航特征库的存储空间等3个方面对文中算法与传统的三角形星图识别算法中改进的三角形算法^[2]进行对比验证。

1) 星点位置噪声

采用蒙特卡罗方法随机生成模拟星图,对星点位置加入均值为0,标准差 σ 从0到2像素变化的高斯噪声,识别结果如图3所示。当星点位置噪声等于2个像素时,改进的三角形算法识别率低于97.5%;而文中算法识别率直接接近100%。

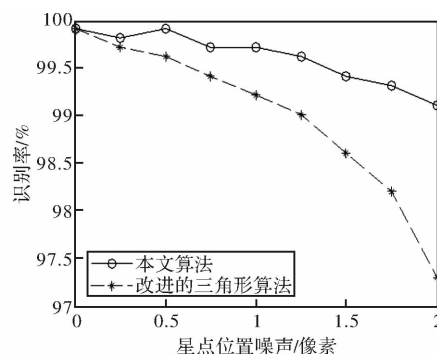


图3 星点位置噪声对识别率的影响

Fig. 3 Impact of noise in star position on identification rate

2) 星等噪声

采用蒙特卡罗方法随机生成模拟星图,对星点加入均值为0,标准差 σ 从0到1星等变化的高斯噪声,识别结果如图4所示。当星等噪声等于1个星等时,改进的三角形算法识别率为93.2%;而文中算法识别率超过98%。

3) 导航特征库的存储空间

使用文中的导航星表,分别对两种算法生成导航特征库,对导航特征库的存储空间进行了统计,文中算法的存储空间大小为650.42 kB,改进的三角形算法的存储空间大小为1.35 MB。

综上所述,文中算法在抗星点位置噪声、抗星等噪声、存储空间上均优于改进的三角形算法,且

对文中算法在识别过程中待匹配的导航三角形个数进行了统计,识别率 75.6% 以上是“唯一”的,小于等于 3 个待匹配的导航三角形占 97.4%,大大降低了匹配时的冗余度。

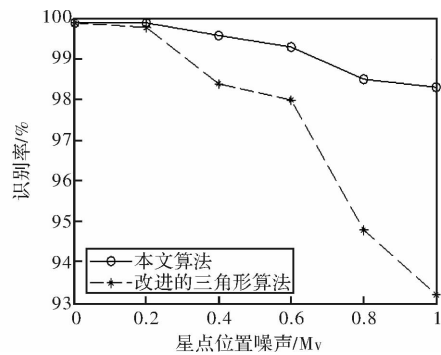


图 4 星等噪声对识别率的影响

Fig. 4 Impact of star magnitude noise on identification rate

3.2 观星实验

为了进一步验证文中算法的性能,进行了野外观星实验,观星地点选在天津北辰区某酒店天台上,观星实验选用的星敏传感器实物如图 5 所示。具体的星敏传感器的性能参数为:视场大小为 $7.5^{\circ}\times7.5^{\circ}$ 、焦距 50.18 mm、像素分辨率 $1\,024\times1\,024$ 像素、主点像素坐标为 (514, 590)、像元尺寸 $6.45\,\mu\text{m}\times6.45\,\mu\text{m}$ 、极限敏感星等大小为 6.5 等,数据更新率 5 Hz。

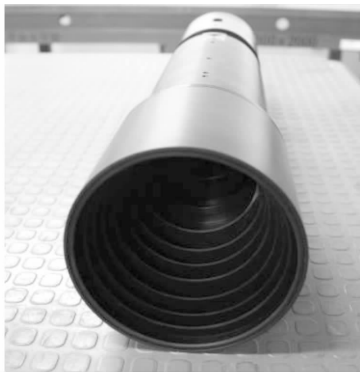


图 5 观星实验选用的星敏传感器

Fig. 5 Selected star sensor used in star observation experiment

将星传感器的光轴垂直指向天顶区域附近,连续拍摄 1 000 幅星图,采用文中算法进行匹配识别,经统计,识别成功率为 99.9%,平均星图识别时间为 47 ms,满足实际的使用需求(数据更新率: 5 Hz)。图 6 为随机拍摄的一幅星图,该星图的识别结果见表 2 所示,其中光轴指向信息为 J2000 平赤道地心坐标系下的值。

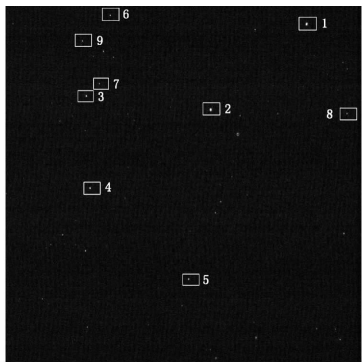


图 6 文中算法的识别结果

Fig. 6 Identification result of proposed algorithm

表 2 文中算法的识别结果

Table 2 Identification result of proposed algorithm

No	图像坐标/像素		识别结果		
	X	Y	星序号	星等	光轴指向 /(°)
1	52.0107 99	156.782 593	1 220	3.5	
2	298.083 008	432.092 194	1 224	3.3	
3	258.664 490	789.338 684	1 230	4.9	
4	523.210 510	778.832 214	1 792	4.8	赤经:76.265
5	784.764 893	495.235 107	1 785	5.0	赤纬:39.561
6	26.989 300	720.661 377	1 233	5.1	旋角:239.547
7	223.048 294	751.911 316	1 229	6.3	
8	309.032 715	40.590 099	1 218	5.6	
9	100.653 801	800.067 322	1 234	5.6	

4 结论

文中提出了一种应用形状因子特征的高效星图识别算法,它充分利用星图的特征信息量,并结合三角形形状的特点,构造出一组三角形的形状因子和公共边的角距值为特征量进行匹配识别,具有匹配时冗余少、识别速度快、抗噪声性能强的优点,且通过了野外观星实验的验证,成功地实现全天自主星图识别的任务,进一步证明了该算法具有很好的鲁棒性。

参考文献:

[1] LIANG Bin, ZHU Hailong, ZHANG Tao, et al. Research status and development tendency of star tracker technique[J]. Chinese Optics, 2016, 9(1): 16-29.
梁斌, 朱海龙, 张涛, 等. 星敏传感器技术研究现状与发展趋势[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 16-29.
[2] ZHANG Guangjun, WEI Xinguo, JIANG Jie. Star map identification based on a modified triangle algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1150-1154.

- 张广军,魏新国,江洁. 一种改进的三角形星图识别方法[J]. 航空学报,2006,27(6):1150-1154.
- [3] LI Chaobing, YUAN Yanyan, WANG Danye. An efficient stellar map identification method based on characterized graphics matching method [J]. Chinese Space Science and Technology, 2016, 36(4): 9-16.
- 李超兵,袁艳艳,王丹晔. 基于特征图形匹配法的高效星图识别方法[J]. 中国空间科学技术, 2016, 36(4): 9-16.
- [4] QIAN Huaming, LANG Xikai, LI Meng. A modified grid algorithm for star map identification[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(6): 150-153.
- 钱华明,郎希开,李猛. 一种改进的栅格星图识别算法[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(6): 150-153.
- [5] MCCLINTOCK S, LUNNEY T, HASHIM A. A genetic algorithm environment for star pattern recognition[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 1998, 6(1): 3-16.
- [6] ZHAO Yuejiao, YIN Dayi, XU Chun, et al. Construction and evaluation of 16 mv fine guide star catalog[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(3): 385-391.
- 赵玥皎,尹达一,许春,等. 16mv 精细导星星库构建与评价[J]. 应用光学, 2017, 38(3): 385-391.
- [7] WU Jicang, CONRAD Tang, CHEN Yongqi. Effects of triangle shape factor on precision of crustal deformation calculated[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003, 23(3): 26-30.
- 伍吉仓,邓康伟,陈永奇. 三角形形状因子对地壳形变计算精度的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(3): 26-30.
- [8] FAN Qiaoyun, LU Zhuangzhi, WEI Xinguo, et al. Triangle star identification algorithm based on inertia ratio[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2838-2843.
- 樊巧云,陆壮志,魏新国,等. 基于惯性比特征的三角形星图识别算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2838-2843.
- [9] ZHANG Tongshuang, GUO Jingming, BAI Yang, et al. Star identification algorithm based on the maximum interior angle in triangle[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(1): 208-216.
- 张同双,郭敬明,柏杨,等. 基于最大内角的三角形星图识别算法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 208-216.
- [10] SHUSTER M D, OH S D. Three-axis attitude determination from vector observations [J]. Journal of Guidance and Control, 1981, 4(1): 70-77.