

全天自主星图识别网格算法问题分析与改进

唐武盛 杨建坤 衣文军 贾 辉 程攀攀

国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073

摘要 在观测星数量较少时, 匹配星数和边界距离的判定条件达不到网格法要求, 同时由于网格法算法本身的原理局限, 造成识别率明显下降。针对此问题提出一种改进的网格算法, 在保证稳健性的前提下, 有效提高星点识别率。实验结果表明, 采用该算法, 在星点数量少于10颗的条件下, 星点识别率从传统网格算法的95%提高到99%。同时, 针对星图中未识别和误识别的星点进行的分析, 能够为今后网格识别算法的进一步改进提供帮助。

关键词 测量; 星敏感器; 星图识别算法; 网格法改进; 稀疏星图; 判定阈值

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.021002

Analysis and Improvement of the Grid Algorithm for Autonomous Star Identification

Tang Wusheng Yang Jiankun Yi Wenjun Jia Hui Cheng Panpan

College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract When the number of observed stars is few, the matching number of stars and the decision conditions of boundary distance do not satisfy the requirement the grid algorithm. Meanwhile because of the principle limits of the grid algorithm, the identification rate decreases obviously. According to these problems, an improved grid algorithm is put forward, and the identification rate of observed star increases effectively in precondition of ensuring the robustness. Experimental results show that the improved grid algorithm urges the identification rate increased from 95% to 99% compared with the traditional grid algorithm, under the condition that the number of observed star is less than 10. At the same time, the non-recognition and false-recognition stars in the star chart have been carried on the analysis, it can help to promote grid algorithm for star identification further.

Key words measurement; star tracker; star pattern identification algorithm; grid algorithm improvement; less-star chart; decision threshold

OCIS codes 100.5010; 120.0280; 150.1135; 110.4155; 110.2960

1 引言

星敏感器体积小、精度高、自主性强, 具有绝对测量的优势^[1]。利用星敏感器进行飞行器自主姿态确定, 是当前飞行器常用的方法。星敏感器的定姿过程分为星图采集、星点坐标提取、星图识别、姿态解算等几个环节。而星图识别作为其中的一个重要环节, 对于飞行器姿态的确定有着重要作用^[2]。

目前星图识别算法中, 常用的算法包括三角形算法、匹配组算法和网格算法等^[3]。三角形算法维数较低, 具有较高的识别速度, 且占用资源较少, 但易导致冗余匹配及误匹配现象^[4]; 匹配组算法由于匹配矩阵运算复杂, 重复性和不确定性较大, 建立匹配矩阵后运算量甚繁^[5]; 相比之下, 网格法在算法思想上与子图同构策略不同, 对于位置不确定性及星等不确定性的识别环境稳健性较好, 而算法中二值化的模式库存储量大, 搜索匹配迅速, 具有更快的识别速率^[6]。

星敏感器实际采集星图过程中, 由于视场角较小等因素, 单幅星图中用于识别的恒星数量较少(小于10颗)。根据网格法中最大一致的思想, 使用网格法进行星图识别, 误识别率明显上升。此时传统网格识别算

收稿日期: 2015-05-23; 收到修改稿日期: 2015-06-24; 网络出版日期: 2016-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(61107005)

作者简介: 唐武盛(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事信息光学方面的研究。E-mail: 949780584@qq.com

导师简介: 杨建坤(1965—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事信息光学方面的研究。E-mail: jkyang@188.com

法难以满足较高的识别需求。

为此,本文通过多次仿真和实拍星图的实验计算,分析星图识别结果以及对后续处理的影响,结合提取星点特点,给出全新的改进算法。结果表明,识别率相对于传统网格算法有可观地提高。

2 原理介绍

传统网格识别算法的流程为:对观测星均建立特定网格,将其他星点位置对该网格进行二值化投影,产生的模式识别特征与导航星模式库匹配。同观测星模式最大一致的匹配导航星就是识别结果^[7]。其网格模式构建具体流程如图1所示^[8]。

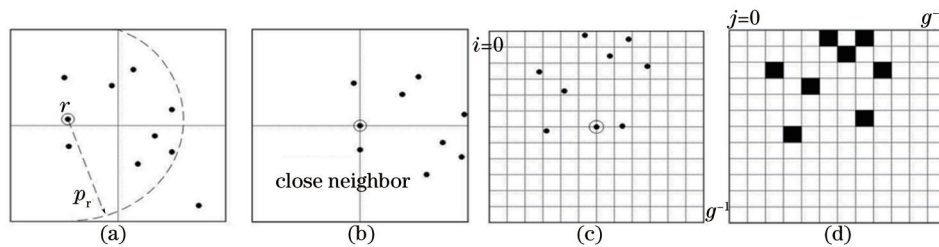


图1 网格构建示意图

Fig.1 Grid construction diagram

- 1) 在全星库中选取满足一定条件的星点(如星等高于6等)作为导航星库 $Rstar$;
- 2) 任取一颗导航星 r 作为中心,以相机半视场 p_r 为半径画圆选取星图,裁剪多余部分,如图1(a)所示;
- 3) 选取导航星 r 判定距离 b_r 外最近的一颗导航星 n 作为邻近星,旋转星图,如图1(b)所示;
- 4) 以 r 作为原点生成 $g \times g$ 的网格,记为 $cell(i, j)$ 。网格平行主导航星和邻近星的连线,星点投影在网格上,有星点的网格赋值元素1,无星点的网格赋值元素0。则 $cell$ 组中1、0的排序成为标志导航星 r 的投影二值化向量,其中1为有效投影元素。

对 $Rstar$ 中所有导航星按照上述过程建立导航星模式向量,构成模式星库 $LookupTable$ 。在星图识别时,将待测星生成的向量和模式星库中所有向量均作逻辑与运算,对运算生成的向量各元素求和,根据和值大小判定是否识别成功^[9]。

3 仿真分析

利用 Matlab 软件对星图进行识别的仿真实验,并分析实验结果。

3.1 仿真过程及结果

从 SAO 星表中选取星等小于6的1563颗恒星作为导航星,构成导航星库 $Rstar$ 。记录导航星赤经 RA, 赤纬 DE, 星等 Mag 等三维信息。采用视场像素为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的电荷耦合器件(CCD)面阵相机作为成像器件,视场为 $10^\circ \times 10^\circ$, 星点位置标准差设定为 0.1 pixel , 划分网格数量为传统的 40×40 。按照标准步骤,建立含1563个导航星模式向量的模式星库 $LookupTable$ 。用星敏感器随机光轴指向,从导航星库 $Rstar$ 中产生100幅星图作为识别对象,使用传统网格法对该100幅星图进行仿真识别,结果如图2所示。

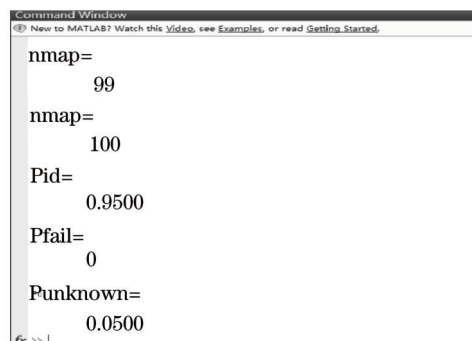


图2 仿真结果统计

Fig.2 Statistical results of simulation

100幅星图中($nmap$ 为星图序号),正确识别的星图数量为95,未识别的星图数量为5,识别率为95%,未识别率为5%,达到网格法识别星图的一般要求。

具体统计结果如图3所示,第一列是每幅星图包含的已识别星点的信息,第二列是星数统计,分别为星图总星数、识别星数、误识别星数和未识别星数,第三列是因不满足距离边界条件而无法识别的星点编号。由此找到未识别星图和未识别星点。

1	2	3	4	5	6	7
1 <12st double>	[19, 12, 0, 7]	[4, 5, 13]				
2 <8st double>	[14, 9, 0, 5]	[1]				
3 <4st double>	[10, 7, 0, 3]	[1]				
4 <10st double>	[13, 10, 0, 3]	[1]				
5 <12st double>	[22, 15, 0, 7]	[1]				
6 <4st double>	[9, 4, 0, 4]	[1]				
7 [1]	[1]	[1]				
8 <8st double>	[14, 9, 0, 5]	[10, 12]				
9 <2st double>	[5, 2, 0, 3]	[1]				
10 <2st double>	[8, 8, 0, 2]	[1]				
11 <8st double>	[7, 4, 0, 3]	[1]				
12 <8st double>	[10, 8, 0, 3]	[1]				
13 <8st double>	[14, 8, 0, 8]	[1]				
14 <10st double>	[12, 9, 1, 2]	[1]				
15 <8st double>	[8, 5, 0, 3]	[1]				
16 <7st double>	[10, 7, 0, 3]	[4]				
17 <8st double>	[12, 9, 0, 4]	[1]				
18 [1]	[1]	[1]				
19 <10st double>	[13, 10, 0, 3]	[1]				
20 <8st double>	[10, 8, 0, 4]	[1]				
21 <10st double>	[12, 10, 0, 2]	[1]				
22 <15st double>	[18, 15, 0, 3]	[2, 18]				
23 <8st double>	[13, 8, 2, 5]	[5]				
24 <8st double>	[12, 9, 0, 4]	[5]				

图3 识别星数统计

Fig.3 Statistics of identification star numbers

3.2 结果分析

为找出传统网格法不能识别某些星图的原因,对未识别的第7、18、25、40、55幅进行分析,图4(a)为第7幅星图。

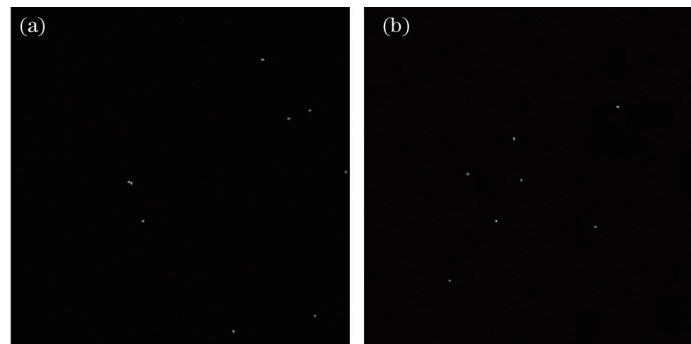


图4 稀疏星图星点分布。(a)第7幅星图;(b)第92幅星图

Fig.4 Distribution of stars in sparse star chart. (a) 7th star map; (b) 92nd star map

表1为未识别五幅星图中星点的数目,由表1可知,未识别星图中观测星的数量均很少,这样的星图定义为稀疏星图。图4(b)为被识别的第92幅星图,也仅有7颗恒星被提取用于识别,但能够得到正确识别结果。其原因为:第92幅星图中,7颗观测星均位于星图中央位置,更容易满足匹配星数判定和边界距离判定阈值条件。而多颗星位于图像边缘位置,所能利用的星点信息较少,则出现无法识别的现象。稀疏星图中星点数目本来较少,更容易因为星点位置问题导致识别信息不够。

表1 未识别星图中观测星数目

Table 1 Number of observed star in the unrecognized chart

Chart No.	Number of observing stars
No.07	9
No.18	7
No.25	6
No.40	3
No.55	7

从原理出发,稀疏星图识别困难的原因在于传统网格法中,一般会设置两个阈值条件:1)匹配星数判定阈值,即根据总星数设置的最少正确识别星点数目,称为单星识别最小匹配星数,如对于星点数为9的星图,单星识别最小匹配数为5,但稀疏星图中正确识别的星点数目达不到该数值。如图5所示,第7幅星图中含

有9颗观测星,跟踪程序可知,最终正确匹配的观测星只有2颗(图中S星),小于5颗的要求,该星图判定识别失败。

2) 边界距离判定阈值,即临近星与观测星的距离和观测星距离图像边界的距离,当观测星距离临近星较近或靠近图像边界时,识别成功率降低。如图6所示,S4和S5坐标分别为 $(-75.5, -7.5)$, $(-73.5, -9.5)$,相距2.8 pixel,S3距离视场右边界8.5 pixel,均小于判定距离 $b_r(10 \text{ pixel})$,导致星点均不能正确识别。

另外,星点数目较少导致投影元素网格位置易发生重叠,而返回多颗导航星识别结果,无法判断正确的导航星。如图7所示,识别观测星S时,S2参与网格建立,只有S1和S3提供了有效投影元素1,投影元素过少。



图5 正确识别的观测星

Fig.5 True-recognition stars

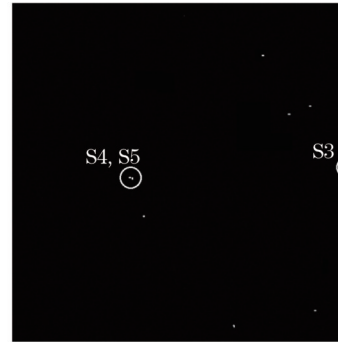


图6 不满足边界距离判定阈值的观测星

Fig.6 Stars of dissatisfied the condition on boundary distance

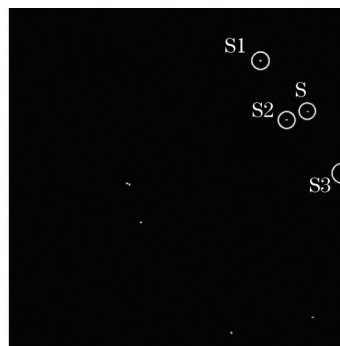


图7 参与投影的观测星

Fig.7 Stars that participate in projection

以上问题在其余未识别的稀疏星图中均有存在。总结来看,造成星图不能识别的原因为:

- 1) 全局性的匹配星数判定阈值不适用于稀疏星图,正确识别星数达不到单星识别最小匹配数;
- 2) 边界距离判定阈值不符合稀疏星图特点,邻近星不易被选出,导致观测星识别失败;
- 3) 误匹配在稀疏星图中出现的概率较大,投影元素网格位置重叠,无法用传统网格法进行正确识别。

4 改进算法

为解决上述问题,提出一种改进算法,在稀疏星图条件下,充分发挥网格法的算法优势,提高星图识别率。改进思路不仅包括对先决条件的优化,还从原理出发提出新方法。再次进行多次实验,得出较传统网格法更高的识别率。

4.1 动态调整先决条件

根据网格法最大一致的思想,一幅星图的正确识别需要一定数目的匹配星。传统的网格算法中,一般提前设定单星识别最小匹配数,改进的算法思路是提前判断星图中的星点数量,根据星点数量的多少,对匹配星数判定阈值进行动态调整。

边界距离判定是建立网格的先决条件,对稀疏星图特点的充分研究表明,星点之间的距离较远(一般大于1.5倍缓冲半径 $b_r^{[10]}$),对于不符合边界判定的观测星,邻近星在视场外的概率会大大降低。因此做出如下改进:针对观测星点位置,动态调整稀疏星图中观测星的距离边界判定阈值(去除位于角落的特殊情况^[11]),

使原先未识别的观测星重新参与识别。

4.2 一种解决星点误识别的新方法

网格法对于星图的正确识别,取决于观测星模式向量的成功匹配^[11]。模式向量中如果有效投影元素1过少,相同网格处其他观测星向量的投影元素1会与之重叠,造成误识别。如图8所示,3颗导航星简历网格投影后,3个二值化向量在第5、7网格处都存在有效投影元素1,若模式向量为第一个,则经过与运算,3个向量均会达到要求,从而返回3颗导航星,没有唯一正确的结果。

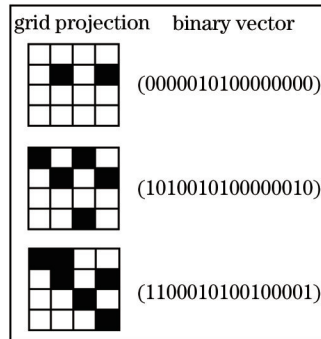


图8 多颗导航星投影元素网格位置重叠图

Fig.8 Grid position of projection element overlap among multiple reference stars

为解决这一问题,对传统网格识别算法进行改进:对星库中所有导航星按星等大小排序并编号,将投影元素网格位置重叠的多颗导航星编号同时投影到网格中,并统计导航星编号出现的次数,通过网格算法,找到出现次数最少的导航星编号就是正确的观测星结果。

对于稀疏星图,该方法能够解决由于星图中恒星数量较少,而造成的与其余导航星投影元素网格位置重叠问题,同时也更容易满足次数最少的条件,从而符合网格法中最大一致性的原则,提高星图识别率。

4.3 改进算法后的结果与分析

在与传统网格法相同的仿真条件下,使用改进后的算法识别上述100幅星图,识别正确的星图数量为99,未识别的星图数量为1,识别率为99%,较传统网格法的识别率95%有极大的提升。第40幅星图星点含量为3颗,不能构成网格,因此无法识别。被识别的星图分别为第7、18、25、55幅。

第55幅星图包含总星数为7颗,单星识别最小匹配数为4颗。按传统网格法识别,裁剪旋转星图后仅有2颗观测星正确识别,达不到单星识别最小匹配数,结果认定星图识别失败。将全局性的匹配星数判定阈值根据旋转裁剪后所剩星点数目进行动态调整,则该星图被正确识别。

第25幅星图包含总星数为6颗,其中有4颗处于星图边界,不满足传统网格法中的边界距离判定条件,导致邻近星无法选出。如图9所示,在星点众多的星图中,观测星S的邻近星是视场外视场的S2,如果没有判定条件,程序将选择视场内的S1。

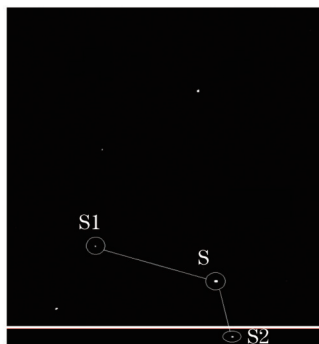


图9 邻近星选择错误示意图

Fig.9 Schematic of choosing the wrong closest neighboring star

但识别对象为稀疏星图,动态调整边界距离判定阈值后,4颗观测星选出视窗内的邻近星,重新参与星图识别。后续匹配过程排除一颗选错邻近星的观测星,正确识别的星点数目达到单星识别最小匹配数,则该星图被正确识别。

第7幅和第18幅星图因运用新方法而正确识别。以第7幅星图为例进行分析:识别800号导航星时,依据边界条件选取1410号导航星为邻近星,裁剪旋转后剩下4颗星,导航星编号为:165,800,1270和1410号,其中800号和1410号参与网格坐标轴的建立,无法投影。只有165号和1270号导航星提供两个有效投影元素1。如图10所示。

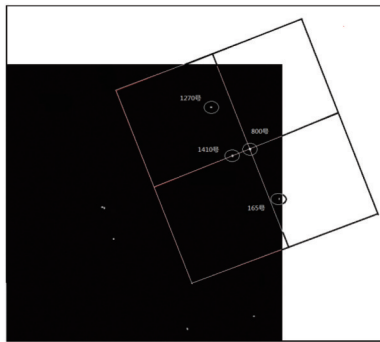


图10 800号导航星网格建立坐标轴示意图

Fig.10 Coordinates schematic of the grid of No.800 reference star

165号和1270号分别投影到第455个和第1142个网格中,这样在(-5,8)和(2,-8)位置上有投影元素1的导航星模式向量均会与之匹配。跟踪结果,除800号导航星与之匹配外,741号、255号也作为匹配结果返回。回到模式库,对这三颗导航星同时进行元素和导航星编号投影。如图11所示,800号只出现了2次,而741号和255号还在其他网格中出现。

198 741 0 255	741 699 0	168 95 0 255	0
navigation star			
0	800 741 1 255	0	800 741 1 255
0	0	0	0
0	0	0	0 ←
projection element			

图11 在网格中同时记录导航星号示意图

Fig.11 Schematic of recording number of navigation star meanwhile in the grid

经过统计,800号出现2次,741号出现5次,255号出现7次,根据新方法中次数最少的条件,可以确定该观测星为800号导航星。至此,165号导航星因调整边界距离条件被正确识别,800号导航星也因新方法的引入被正确识别,第7幅星图被正确识别。

经过对传统网格法的上述改进,稀疏星图中正确识别星点数量增加,从而保证星图的正确识别,提高星图识别率。

5 结 论

从传统的网格法星图识别原理出发,对多幅星图进行识别,虽然可以得到95%的识别率,但在识别稀疏星图时存在困难。对识别星图的过程进行认真分析后,得出造成星图不能被识别的三点原因:1) 正确识别星点数量达不到全局性的匹配星数判定阈值;2) 星点位置不满足边界距离判定条件导致单星识别失败;3) 投影元素网格位置重叠导致返回多颗导航星识别结果。针对这些原因进行改进:1) 根据稀疏星图的特点,从先决条件出发,对匹配星数判定和边界距离判定的阈值条件进行动态调整;2) 在所有网格中同时投影误识别的多颗导航星编号,统计编号在网格出现的次数,找到正确的导航星。由结论可知,通过综合上述改进,将星图识别率从95%提升至99%。

参 考 文 献

- 1 Li Jing, Yang Baoxi, Hu Zhonghua, *et al.*. Development and performance testing of optical system for star sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522005.
李 璟, 杨宝喜, 胡中华, 等. 星敏感器光学系统的研制与性能测试[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0522005.
- 2 Shi Hang, Zhu Zhigang. Image processing of the star sensor[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2014, 12(6): 58-60.
施 航, 朱志刚. 星敏感器星图处理研究[J]. *光学与光电技术*, 2014, 12(6): 58-60.
- 3 Silani E, Lovera M. Star identification algorithms: Novel approach and comparison study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(4): 1275-1288.
- 4 Ran Xiaoqiang, Wen Desheng, Qiu Yuehong, *et al.*. A novel multi-triangle star pattern recognition algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(7): 1867-1871.
冉晓强, 汶德胜, 邱跃洪, 等. 一种新的多三角形星图识别算法[J]. *光子学报*, 2009, 38(7): 1867-1871.
- 5 Van Bezooijen R W H. True-sky demonstration of an autonomous star tracker[C]. *Proc SPIE*, 1994, 2221: 156-168.
- 6 Na M, Jia P F. A survey of all-sky autonomous star identification algorithms[C]. *ISSCA*, 2006: 896-901.
- 7 Na M, Zheng D N, Jia P F. Modified grid algorithm for noisy all-sky autonomous star identification[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 516-522.
- 8 Padgett C, Kreutz-Delgado K. A grid algorithm for autonomous star identification[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(1): 202-213.
- 9 Jiang Ming, Yu Mingyan, Wang Jinxiang, *et al.*. A novel all-sky autonomous star pattern recognition algorithm[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(4): 1020-1024.
蒋 明, 喻明艳, 王进祥, 等. 一种新的全天自主星图识别算法[J]. *宇航学报*, 2007, 28(4): 1020-1024.
- 10 Li Lihong, Xu Hongze, Zhang Fuen. A kind of improved grid algorithm for all-sky autonomous star field identification[J]. *Optical Technique*, 2000, 26(3): 204-210.
李立宏, 徐洪泽, 张福恩. 一种改进全天自主栅格星图识别算法[J]. *光学技术*, 2000, 26(3): 204-210.
- 11 Qian Huaming, Sun Long, Cai Jianan, *et al.*. An extended grid algorithm in star identification field[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(2): 110-116.
钱华明, 孙 龙, 蔡佳楠, 等. 星图识别的一种扩充栅格算法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(2): 110-116.

栏目编辑: 苏 岑