

激光与光电子学进展

一种星敏传感器导航星筛选算法

王海涌*, 徐皓

北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191

摘要 为了减小导航星库容量,提出了一种星敏传感器导航星筛选算法。将在全地球上生成的均匀分布的光轴随机矢量作为蒙特卡罗实施样本,将每个光轴矢量确定的外接圆视场内的亮星依次作为星子集,将星子集在建星库中没有的星增补进在建星库,并丢弃重复星,遍历所有实施样本后即得到导航星库。仿真条件如下:星敏传感器视场为 $15^\circ \times 15^\circ$,极限星等为 5.6 m,星间角距阈值为 1° ,星图匹配环节所需导航星数为 15。此算法构建的导航星库改善了导航星分布的均匀性,在适应星图匹配的充要性意义上,星库中的导航星数达到最少,进而减少了匹配模式库的条数,降低了内存需求,这对星敏传感器设计具有工程实用价值。

关键词 天文光学; 天文导航; 星敏传感器; 导航星库; 光轴随机矢量

中图分类号 P128.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0135001

Algorithm for Screening Navigation Stars on Star Sensors

Wang Haiyong*, Xu Hao

School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract In order to reduce the capacity of the navigation star database, an algorithm for screening navigation stars on star sensors is proposed. Uniformly distributed optical random vectors on the celestial sphere are generated and used for the Monte Carlo samples. The bright stars in the circumferential field of view (FOV) determined by each optical axis vector are in turn taken as the star subsets. The stars not found in the constructing star database are added to the constructing database in these star subsets and simultaneously the duplicate stars are discarded. After traversing all the implementation samples, one can finally obtain the navigation star database. The simulation condition is set as follows. The FOV of the star sensor is $15^\circ \times 15^\circ$, the limiting star magnitude is 5.6 m, the angular distance threshold between stars is 1° , and the number of navigation stars required for star map matching is 15. The navigation star database constructed by this algorithm improves the uniformity of the navigation star's distributions. In the necessary and sufficient sense of star map matching, the number of navigation stars in the star database reach the minimum. It thus reduces the number of matching pattern databases and reduces the memory requirements, which shows the engineering and practical value for the design of star sensors.

Key words astronomical optics; astronomical navigation; star sensor; navigation star database; optical random vector

OCIS codes 350.1260; 350.6090; 110.2990

收稿日期: 2020-04-16; 修回日期: 2020-04-29; 录用日期: 2020-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(61573113)

*E-mail: why@buaa.edu.cn

1 引言

天文导航以已知准确空间位置的自然天体为基准,利用天体测量仪器被动探测天体位置,通过解算确定载体的导航信息^[1]。星敏感器是天文导航系统中最重要也是精度最高的姿态传感器,已成为当前很多飞行器的标配。导航星库是星敏感器的必要组成部分,是匹配模式库构建的基础。在实际应用中,并非基本星表中的所有恒星都是导航星^[2],需要根据星敏感器需求在星库中进行筛选,稀释恒星高密度分布的天区,以便构建容量更小的充要的导航星库。

导航星筛选算法主要有星等阈值过滤法^[3]、星等加权法^[4]和正交网格法^[5]等。最常用的方法是星等阈值过滤法,该方法简捷,根据极限星等,直接在基本星表中截取星等小于极限星等的恒星并用其构成导航星库。然而,导航星库中导航星分布的均匀性很差,而且极限星等的设置非常关键。太大的极限星等会包括过多无用的暗星,导致冗余星数和匹配模式条目显著增加;如果极限星等过小,星图匹配环节则找不到导航参考星,这会导致匹配及定姿失败。文献[6]在星等阈值过滤法的基础上,增添了角距阈值过滤,进一步减少了导航星数,但未考虑导航星在全天球分布不均匀的天然问题。

自组织选择法通过多级缩减来减少导航星数量,能得到容量小且导航星分布均匀的导航星库,但该方法过于复杂且对应的特殊匹配算法不具备普遍性指导意义。星等加权法是根据星等对每颗恒星赋予不同的权值,对星等值低的恒星赋予较大的权值,以提高低星等恒星被选择的概率。权值的确定根据经验,缺乏理论依据。星等加权法还存在与特殊匹配算法适应的问题。正交网格法利用等面积映射将导航星从单位球面投影到成像平面的等分网格中,在每个成像平面网格中选择最亮恒星作为导航星。该方法容易实现,与发展潜力较大的网格匹配法有着紧密联系。

本文基于全地球均匀样本遍历的循环选择法,构建了导航星库,该星库与三角形匹配算法及其衍生算法相适应,剔除了高密度恒星分布天区的暗星,改善了导航星分布的不均匀性。在适应星图匹配的充要性意义上,星库中的导航星数达到最少。

2 导航星筛选算法

2.1 筛选算法流程

本文提出的星敏感器导航星筛选算法主要包括三步:1)筛选极限星等;2)剔除小角距星对中的暗星;3)筛选圆视场亮星。其算法流程如图 1 所示,其中 FOV 为视场。

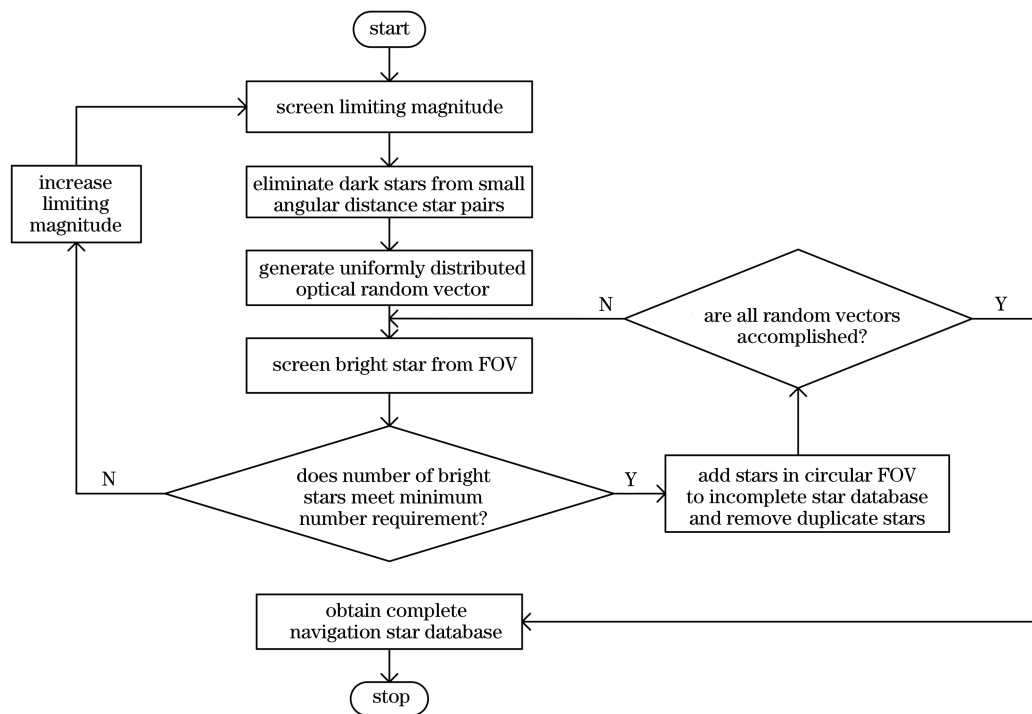


图 1 导航星筛选算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm for screening navigation stars

2.1.1 筛选极限星等

受到自身灵敏度、光积分时间和光学系统透过率等因素的影响,恒星暗到一定程度时,星敏传感器就无法探测,这决定了星敏传感器的极限星等,即在基本星表中必须选取星等小于极限星等的恒星作为导航星。由于星敏传感器在探测环节会受到多重干扰因素的影响,在工程应用中,导航星表中选取的最高星等往往略高于星敏传感器的极限星等。

2.1.2 剔除小角距星对中的暗星

这里星对是指两者角距小于设定的角距阈值的一对恒星。小角距星对在星敏传感器成像面上的两个小角距星像点容易出现连通域难以分割的现象,这会对星图匹配过程产生干扰,小角距星对还会影响到星图匹配算法对其他恒星的识别。通常采取的方法是在星库中剔除星对中较暗的恒星,保留较亮的恒星作为导航星,星敏传感器连通域算法中也是这样处理的。所剔除的暗星距离星对中的亮星非常近,对定姿精度的提高贡献不大。

2.1.3 筛选圆视场亮星

将在全地球上生成的均匀分布的光轴随机矢量作为蒙特卡罗实施样本。光轴随机矢量指向的赤纬值范围可分为三部分:1)天北极圈;2)天南极圈;3)中间赤纬环带。当光轴随机矢量落入天北极圈或天南极圈时,直接选取外接圆视场和对应极圈的并集中的亮星作为星子集;当光轴随机矢量落入中间赤纬环带时,选取外接圆视场中赤经跨度内亮星和赤纬跨度内亮星的交集作为星子集。将星子集在建星库中没有的恒星增补进在建星库,并丢弃重复星,遍历完所有实施样本后所构建的星库即为导航星库。

构建的导航星库需考察统计结果,若存在实施样本视场,视场中的星数低于要求的最少导航星数,则需提高极限星等参数,并再次运行程序,直到全地球指向的所有视场中的亮星数均不少于要求的最低星数。

2.2 导航星筛选关键算法

2.2.1 均匀分布随机矢量的构建方法

为构建在全地球均匀分布的随机矢量,采用文献[7]中的球面空间均匀分布随机矢量生成方法。球上任一点 P 的矢量 V_P 为

$$V_P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \delta \\ \sin \alpha \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix}, \alpha \in [0, 2\pi), \delta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right], \quad (1)$$

式中: α 和 δ 分别为矢量的赤经和赤纬; (x, y, z) 为矢量在直角坐标系下的坐标。球面上均匀分布的随机变量 α 和 δ 的表达式为

$$\begin{cases} \alpha \in U(0, 2\pi) \\ \delta = \arcsin \beta, \quad \beta \in U[-1, 1] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $U(\cdot)$ 表示在区间内均匀分布; β 为均匀分布的随机变量。通过(1)、(2)式即可得到全地球均匀分布的随机矢量,在全地球生成 10000 个随机矢量,结果如图 2 所示。

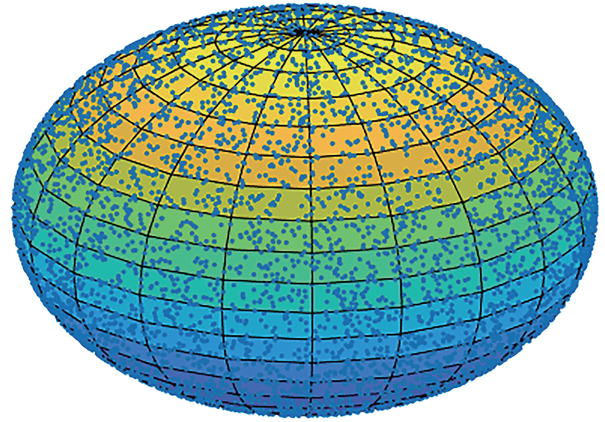


图 2 均匀分布随机矢量的天球分布效果

Fig. 2 Uniformly distributed random vector samples in celestial sphere

如图 2 所示,随机点在全地球呈现出均匀分布的特性。但球面的 2D 平面效果在人眼的视觉感受上不是均匀分布的,这是视觉误差所导致的。

2.2.2 外接圆视场赤经赤纬跨度的选取

可以想象,光轴随机矢量越接近两极,外接圆视场的赤经跨度就越宽,赤经跨度是赤纬值的函数。圆视场、左右相切经线与光轴赤纬值的关系如图 3 所示。

在图 3 中, Q 点为光轴随机矢量在天球上的投影点, α_0 为赤经, δ_0 为赤纬, P_N 为天北极, C 为圆视场边界与赤经圈的切点。在球面三角形 $P_N C Q$ 中, 夹角 C 为 90° , 角 A 为 $P_N C$ 与 $P_N Q$ 的夹角。利用球面直角三角形正弦定理可得

$$\sin A = \frac{\sin a}{\sin c} = \frac{\sin a}{\cos \delta_0}, \quad (3)$$

式中: $c = 90^\circ - \delta_0$; $a = F_{FOV}/2$, 其中 F_{FOV} 为视场。则星敏传感器外接圆视场的赤经边界为 $[\alpha_0 - A, \alpha_0 + A]$, 赤纬边界为 $[\delta_0 - R, \delta_0 + R]$, R 为圆视场半径。

当光轴随机矢量落在天球中间赤纬范围内时,利用极限星等裁减基本星表,这被称为第一次筛

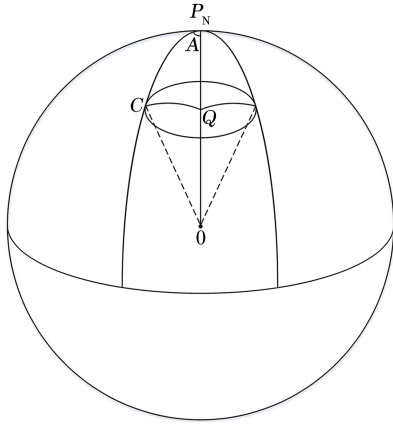


图 3 圆视场、相切经线与光轴赤纬值的关系

Fig. 3 Relationship among circular FOV, tangent longitude and optic declination

星;依据(3)式解算得到左右赤经,在该左右赤经所构成的“梭形”范围内的裁减被称为第二次筛星;基于赤纬上下界的裁减被称为第三次筛星,得到图 4 所示的 EFGH 球面范围。

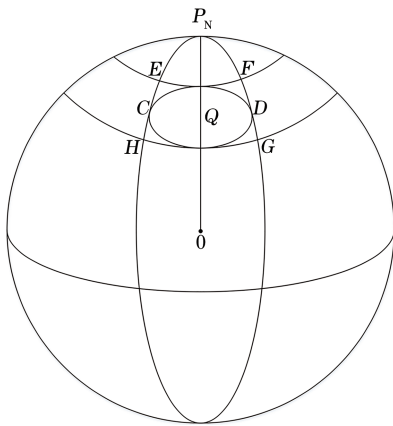


图 4 光轴附近的球面范围

Fig. 4 Spherical area near optical axis

当光轴随机矢量落入南北两极小圆球冠的范围内时,情况过于复杂,可以取外接圆视场和相应球冠两个范围的并集作为待映射的区域,通过执行程序循环模块,考察映射入圆视场内的有效恒星。需要说明的是,遍历更大容量的并集会消耗更多的时间,好在它并不是实时过程。

2.2.3 圆视场范围内的星的检索鉴别方式

光轴方向 (α_0, δ_0) 的方向向量表达式 V_0 为

$$V_0 = \begin{bmatrix} \cos \alpha_0 \cos \delta_0 \\ \sin \alpha_0 \cos \delta_0 \\ \sin \delta_0 \end{bmatrix}, \alpha_0 \in [0, 2\pi), \delta_0 \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}] \quad (4)$$

任意星 i 坐标 (α_i, δ_i) 的方向向量表示式 V_i 为

$$V_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \delta_i \end{bmatrix}, \alpha_i \in [0, 2\pi), \delta_i \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}] \quad (5)$$

则光轴方向 (α_0, δ_0) 与任意星 i 的投影点 (α_i, δ_i) 间的角距 $d(i)$ 为

$$d(i) = \arccos \left(\frac{V_0 \cdot V_i}{|V_0| \times |V_i|} \right) \quad (6)$$

检索图 4 所示 EFGH 球面范围或并集范围内的所有恒星,凡是与光轴的角距值小于圆视场半径的星,则认为是圆视场范围内的星,之后根据星图匹配要求提取既定数量的亮星。

2.2.4 亮星筛选

亮星筛选的流程图如图 5 所示。在圆视场内根据星等依次选取亮星,判断该亮星是否已存在于在建星库,若该亮星已存在于在建星库中,则丢弃该亮星并选取下一颗亮星继续判断;若在建星库中没有该亮星,则在在建星库中增补该亮星。圆视场内应当选取的亮星数 N_b 由设计者根据星敏感器具体型号设定,若当前圆视场内出现的星数多于 N_b ,则取 N_b 颗亮星,星数少于 N_b 则全取。针对当前圆视场循环上述过程直至亮星处理完毕。

2.2.5 敏感器外接圆视场半径求取方法

敏感器外接圆视场半径求取方法如图 6 所示,其中 N_x 和 N_y 分别为星敏感器成像面长和宽方向上的像素数目。

根据图 6 可得星敏感器外接圆视场半径计算公式为

$$\tan^2 \eta = \frac{c'^2}{f^2} = \frac{a'^2 + b'^2}{f^2} = \tan^2 \left(\frac{F_x}{2} \right) + \tan^2 \left(\frac{F_y}{2} \right) \quad (7)$$

式中: η 为外接圆视场半径; f 为星敏感器焦距; F_x 和 F_y 分别为星敏感器长方形视场的长和宽; a' 、 b' 、 c' 分别为直角三角形 OSR 的三边边长。根据(7)式可求得

$$\eta = \arctan \sqrt{\tan^2 \left(\frac{F_x}{2} \right) + \tan^2 \left(\frac{F_y}{2} \right)} \quad (8)$$

若星敏感器的视场为正方形视场,正方形视场的边长为 F ,则(8)式可化简为

$$\eta = \arctan \sqrt{2 \tan^2 \left(\frac{F}{2} \right)} \quad (9)$$

以上就是星敏感器导航星筛选算法的基本原理,下面将对算法进行实验验证及分析。

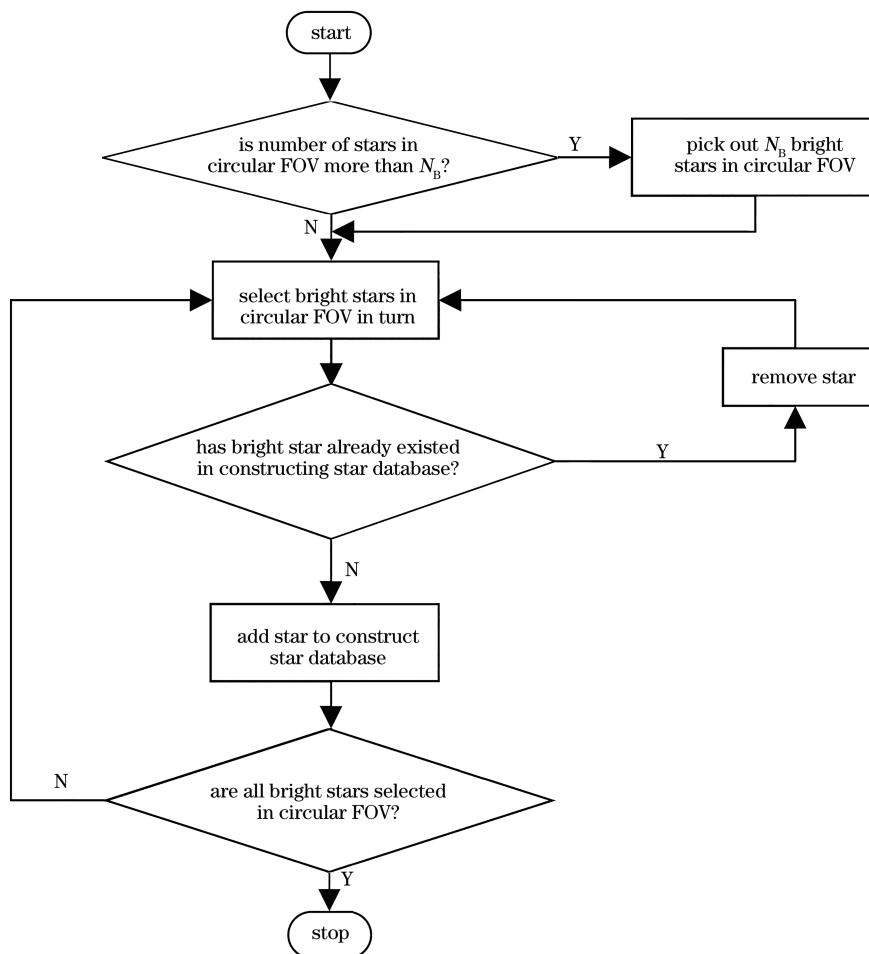


图 5 亮星筛选流程图

Fig. 5 Flow chart for screening bright stars

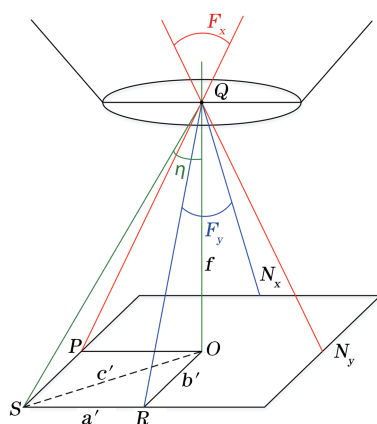


图 6 传感器外接圆视场半径示意图

Fig. 6 Schematic of FOV radius of peripheral circle of sensor

3 实验验证及分析

3.1 实验验证

3.1.1 实验验证方法

为了验证本文提出的星传感器导航星筛选算

法能有效减少导航星库的容量,对算法进行了仿真验证。仿真条件如下:星传感器视场为 $15^\circ \times 15^\circ$,极限星等为 5.6 m,星间角距阈值为 1° ,星图匹配环节设定的亮星数 N_b 为 15。根据(9)式可得外接圆视场半径为 10.5468° 。

3.1.2 仿真结果

仿真结果如下:极限星等筛选后的星库容量为 3209 颗;星对剔除暗星后的星库容量减少到 2732 颗,导航星数减少了 14.86%;圆视场亮星筛选后的星库容量减少到 2455 颗,导航星数进一步减少了 10.14%,比极限星等筛选后的星库容量减少了 23.50%。

3.2 对比分析

对于每步筛选得到的星库,从导航星分布均匀性和视场内导航星密度两个方面进行对比分析。

3.2.1 导航星分布均匀性

分别统计每步筛选后的星库视场内导航星数目的分布概率和视场内星数分布,结果分别如图 7 和表 1 所示,其中 W 为视场内星数少于 31 的概率。

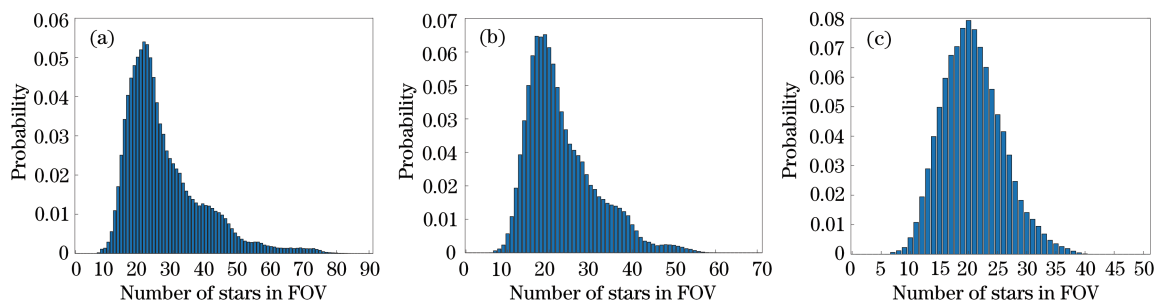


图 7 视场内星数概率分布。(a) 筛选极限星等后；(b) 剔除小角距星对中的暗星后；(c) 筛选圆视场亮星后

Fig.7 Probability distribution of number of stars in FOV. (a) After screening limiting star magnitudes; (b) after eliminating dark stars from small angular distance star pairs; (c) after screening bright stars from circular FOV

表 1 视场内星数分布

Table 1 Distribution of number of stars in FOV

Procedure	Number of stars in FOV		W
	Range	With maximum probability	
After screening limiting star magnitudes	7—84	21	71.08%
After eliminating dark stars from small angular distance star pairs	6—61	19	82.09%
After screening bright stars from circular FOV	6—41	20	95.72%

可以看出,剔除小角距星对中的暗星后,视场内的最多星数由 84 减少到 61,减少了 25.61%;视场内星数少于 31 的概率显著增加,概率从 71.08% 增长到 82.09%,增长了 11.01%。对比剔除暗星之前的星库,剔除小角距星对中的暗星后星库中导航星分布的均匀性得到改善,对比图 7(a)、(b)也可以直观地得出此结论。

圆视场亮星筛选后,视场内最多星数减少到 41 颗,进一步减少了 32.79%;视场内星数少于 31 颗的机

会显著增加,概率从 82.09% 增长到 95.72%,进一步增长了 13.63%。对比筛选之前的星库,在进行圆视场亮星筛选后,星库中导航星分布的均匀性得到明显改善。对比图 7(b)、(c),也可以直观地得出此结论。

3.2.2 视场内导航星密度

选取星库中导航星数目较多的一个光轴样本(123.4°, -41.9°),得到三步筛选后的星库在此光轴样本附近的星分布,如图 8 所示,视场内星数情况如表 2 所示。

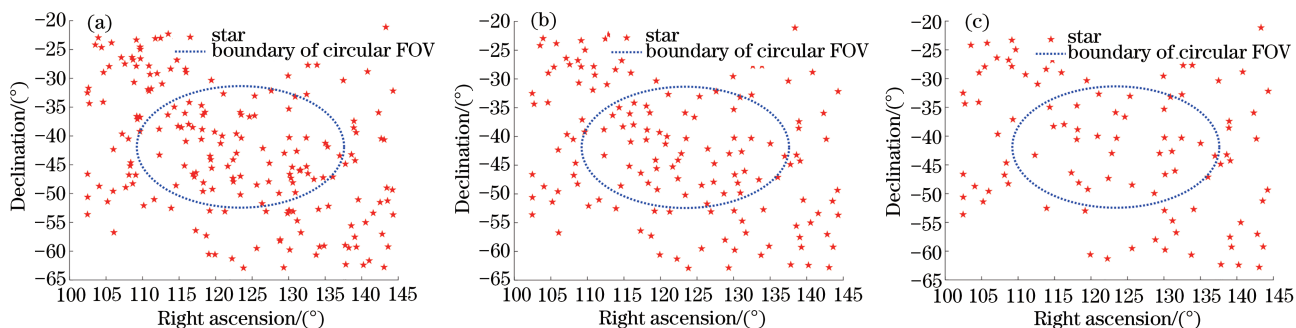


图 8 光轴附近的星分布。(a) 筛选极限星等后；(b) 剔除小角距星对中的暗星后；(c) 筛选圆视场亮星后

Fig.8 Distribution of stars near optical axis. (a) After screening limiting star magnitudes; (b) after eliminating dark stars from small angular distance star pairs; (c) after screening bright stars from circular FOV

表 2 视场内的星数情况

Table 2 Number of stars in FOV

Procedure	Number of stars in FOV
After screening limiting star magnitudes	74
After eliminating dark stars from small angular distance star pairs	54
After screening bright stars from circular FOV	31

可以看出,极限星等筛选后,圆视场内的导航星数为 74;剔除小角距星对中的暗星后,圆视场内的导航星数减少到 54,减少了 27.03%;圆视场亮星筛选后,圆视场内的导航星数减少到 31,减少了 58.11%。由于均采用 15°×15°的星敏感器视场,因此剔除小角距星对中的暗星后,圆视场内的导航星密度减小了 27.03%;圆视场亮星筛选后,圆视场内

的导航星密度减小了 58.11%。这说明本文提出的星敏传感器导航星筛选算法可以有效减小圆视场内的导航星数和导航星密度。对比图 8(a)、(b)、(c), 也可以直观地得出此结论。

4 结 论

提出了一种新的星敏传感器导航星筛选算法, 通过筛选极限星等、剔除小角距星对中的暗星和约束圆视场亮星的数目, 有效减小了导航星库容量, 降低了星库的冗余度, 减少了视场内的导航星数。通过对比分析, 充分证实了所提出的星敏传感器导航星筛选算法在满足星图匹配所需导航星数的基础上, 能够改善导航星分布的均匀性, 降低视场内的导航星密度, 使星库中的导航星数达到最少, 进而减少匹配模式库的条数, 降低星敏传感器的内存需求, 并提高星图匹配的速度。研究结果对星敏传感器的设计具有工程实用价值。

参 考 文 献

- [1] Fang J C, Ning X L. Theory and application of celestial navigation[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2006: 233-235. 房建成, 宁晓琳. 天文导航原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 233-235.
- [2] Ye S H, Sun S D, Ye Z L, et al. Guide star database creation for star sensor based on overlapping field of view and intensity priority selection algorithm [J]. Aerospace Shanghai, 2018, 35(5): 75-81. 叶宋杭, 孙朔冬, 叶志龙, 等. 基于交叠视场亮度优选算法的导航星库构建方法[J]. 上海航天, 2018, 35(5): 75-81.
- [3] Zhang T S, Guo J M, Bai Y, 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.
- [4] Li L H, Lin T. Improved all-sky autonomous triangle star field identification algorithm[J]. Optical Technique, 2000, 26(4): 372-374. 李立宏, 林涛. 一种改进的全天自主三角形星图识别算法[J]. 光学技术, 2000, 26(4): 372-374.
- [5] Lin Tao. A general method of the automatical selection of guide star[C]// 1998 Fourth International Conference Signal Processing, October 12-16, 1998, Beijing, China. New York: IEEE, 1998: 6364650.
- [6] Wang H Y, Fei Z H, Zhang C. An improved star pattern identification algorithm based on main star [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(1): 220-224. 王海涌, 费峥红, 张超. 改进的基于主星的星图识别算法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 220-224.
- [7] Wang H Y, Li Z, Li Z F. Spherical space uniformly-distributed random vector generation method: CN103927444A[P]. 2014-07-16. 王海涌, 李镇, 李志峰. 一种球面空间均匀分布随机矢量生成方法: CN103927444A[P]. 2014-07-16.