

基于交叠视场亮度优选算法的导航星库构建方法

叶宋杭^{1,2}, 孙朔冬^{1,2}, 叶志龙^{1,2}, 李金晶^{1,2}

(1. 上海市空间智能控制技术重点实验室, 上海 201109; 2. 上海航天控制技术研究, 上海 201109)

摘要:星敏感器导航星库直接影响星图识别效率和姿态解算精度。分析了参与姿态解算的星颗数和亮度对姿态精度影响,在此基础上,提出了一种基于交叠视场亮度优选算法的星敏感器导航星库构建方法。将精度较高的 Hipparcos 星表作为基础星表,分析了星等、双星、自行、变星等对姿态精度的影响,将星库筛选成一个备选星库,生成覆盖全天的交叠视场。每个拥有较多星的视场,都按照亮度优先原则从视场内的扇形区域中选择导航星,从而得到分布均匀的导航星库。结果表明:该方法能有效减小星敏感器导航星库规模,实现导航星在全天球和局部天区的均匀分布。

关键词:导航星库; 交叠视场; 星敏感器; 备选星库; 亮度优选; 均匀分布; 姿态精度; 基础星表

中图分类号: V448

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.05.011

Guide Star Database Creation for Star Sensor Based on Overlapping Field of View and Intensity Priority Selection Algorithm

YE Songhang^{1,2}, SUN Shudong^{1,2}, YE Zhilong^{1,2}, LI Jinjing^{1,2}

(1. Shanghai Key Laboratory of Aerospace Intelligent Control Technology, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Guide star database creation for the star sensor will have effects on star map identification time and attitude determination accuracy. Based on the analysis of the influence of star number of attitude determination and intensity on attitude accuracy, an algorithm of guide star database creation for the star sensor based on overlapping field of view (FOV) and intensity priority selection is proposed. Hipparcos which has high accuracy is selected as the basic table, the influence of star magnitude, double-star, proper motion and variable star on attitude accuracy has been analyzed, and then an alternative star database is screened out. In order to get an evenly distributed guide star database, overlapping FOVs covering all over the celestial sphere are generated to select the guide star in the fan section of the FOV which has many stars, according to the intensity priority selection principle. The experimental results show that the proposed method can not only effectively reduce the number of guide stars, but also realize uniform distribution of guide stars in the whole and partial celestial sphere.

Keywords: guide star database; overlapping field of view; star sensor; alternative star database; intensity priority selection; uniform distribution; attitude accuracy; basic table

0 引言

星光导航在卫星导航、深空探测等空间领域应用广泛。导航星库是星光导航不可缺少的组成部分,是天文导航系统实现导航功能的关键,是影响星敏感器星图识别效率和姿态解算精度的重要因

素^[1]。导航星库通过基础星表在地面制作完成,包含了一定规模的恒星信息。在实际应用中,基础星表中所有的恒星不适合都选为导航星。

导航星库构建方法^[2]一般需要优选导航星,以实现导航星均匀分布,降低导航星库的冗余度。主

收稿日期: 2017-04-15; 修回日期: 2018-08-08

基金项目: 中国航天科技集团公司钱学森青年创新基金(38)

作者简介: 叶宋杭(1989—),男,硕士,主要研究方向为星敏感器算法。

要构建方法有星等阈值过滤^[6]、自组织导航星选择^[7]、星等加权^[8]、回归选取^[6]等。星等阈值过滤方法是直接设定星等阈值,提取基础星库中的星等小于该阈值的恒星构成导航星库。该方法简单方便,与探测星匹配性好,但恒星不均匀分布会产生一些不良影响。若某个天区恒星数量太多,则会降低星图识别的准确率,增加星图识别时间,导致星敏感器的性能受到影响;若恒星数量太少会造成空洞,导致星图识别失败,星敏感器无法测定姿态。自组织导航星选择方法通过多级缩减导航星数量,能得到导航星数量少且分布均匀的导航星库,但在实际应用中,由于该方法复杂度很高,一般只能做到二级缩减。恒星星等越低,被星敏感器捕获到的概率越高。星等加权方法基于该原理,根据恒星的星等赋予每颗恒星不同权值,对低星等的恒星赋予较大权值,对高星等的恒星赋予较小权值,当选择恒星作为导航星时,低星等被选择的概率大于高星等的概率。该方法类似于视星等阈值过滤方法,但仍没有解决与星等阈值过滤方法相同的问题。回归选取方法构建了新的动态星等阈值过滤选择模式,用动态星等阈值代替星等阈值过滤方法中的静态阈值。该方法为了求解高维非线性动态星等阈值分布函数,采用了统计学习理论的支持向量机的方法,所得导航星库中的导航星数量少,分布均匀性好。但由该方法求得的动态阈值与真实阈值之间存在误差,在恒星星数量较少的天区,会导致所选的导航星数量变得更少,因此该方法动态阈值自适应性

仍不够完善。

上述方法存在导航星库制作过程复杂、导航星分布不均等问题。为解决这些问题,综合考虑现有导航星库制作方法的优劣势,并满足制作导航星库的通用要求,本文提出一种基于交叠视场亮度优选算法的星敏感器导航星库构建方法。

1 星库预处理

星表记录了全天球中恒星的详细天文参数,包括位置、星等、光谱特性、变星标识、伴星标识等。常用的星表及其基本特性见表 1。表中 Hipparcos 星表较容易获得,且精度很高,为 $0.0008''$,因此本文选择该星表为基础星表。由于基础星表中星等过大的恒星很难被星敏感器探测到,本文取基础星表中星等小于等于 7.0 的恒星构成基础星库,包含 15 537 颗恒星,在全天球中的三维分布如图 1(a)所示。由图可知,基础星库中的恒星在全天球中的分布过于密集,不适合直接用于制作导航星库,而需要进行预处理。

基础星库的预处理流程如图 2 所示,具体处理思路如下:

1) 考虑到星敏感器的光谱特性、仪器星等与视星等存在差异,观测星不可能与导航星库中的导航星完全对应,本文采用星等阈值过滤方法来筛选导航星。为尽可能使观测星都包含在导航星库中,令星等阈值 M_{th} 略大于星敏感器灵敏度,删除基础星库中所有星等大于 M_{th} 的恒星。

表 1 常用星表系统基本特性

Tab. 1 Common star catalogue system and basic characteristics

星表名称	编者(出版年)	星表历元	总星数/颗	星表精度/($''$)	分布密度
FK5	Fricke(1988 年)	J2000.0	1 535	0.020 0	0.037
FK4Ext	Fricke(1991 年)	J2000.0	3 117	0.040 0	0.075
FK6	Wielen(2000 年)	J2000.0	4 150	0.000 4	0.100
SAO	SAO Staff(1995 年)	J2000.0	258 997	1.000 0	6.267
PPM(North)	Roeser(1988 年)	J2000.0	181 731	0.270 0	4.398
PPM(South)	Bastian(1993 年)	J2000.0	197 179	0.110 0	4.771
GSC2.2	STScI(2001 年)	J2000.0	455 851 237	0.300 0	11 031.060
Hipparcos	ESA(1997 年)	J2000.0	118 218	0.000 8	2.861
Tychø1	ESA(1997 年)	J2000.0	1 058 332	0.007 0	25.610
TRC	Hog(1998 年)	J2000.0	990 182	0.040 0	23.961
Tychø2	Hog(2000 年)	J2000.0	2 539 913	0.007 0	61.463

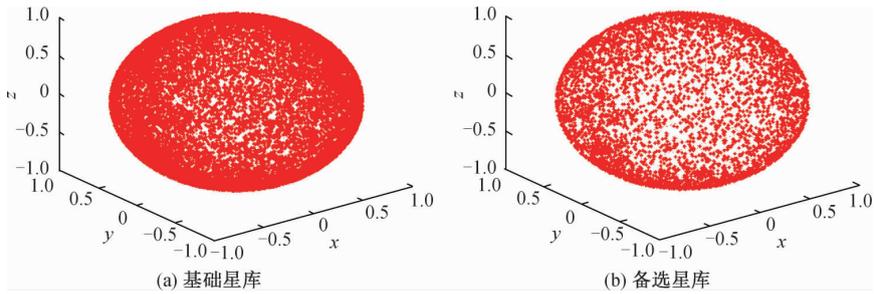


图 1 基础星库和备选星库三维图

Fig. 1 Three-dimensional diagrams of basic and alternative star databases

2) 为提高恒星质心位置计算的精度^[10],目前处理“双星”的方法有两种:一是删除“双星”,合并成单星^[9];二是直接删除“双星”^[6]。本文采用第二种方法,删除星库中所有恒星之间角距小于 θ_{th} 的“双星”。

3) 考虑到周年光行差^[12]较大的恒星留在星库中,将影响星图识别的准确性。根据星敏感器的精度,设定恒星周年光行差阈值 d_g ,删除周年光行差大于 d_g 的恒星。

4) 现有方法都是无条件剔除变星,但由于变星分等级,删除所有等级的变星会丢失大量信息。因此,将星等变化大于 0.6 的不稳定星,以及星等大于 $(M_{th} - 0.6)$ 的次稳定星(星等变化=0.06~0.60)全部删去,以避免这部分变星的星等变化超出星敏感器的敏感极限。

5) 星敏感器的存储空间有限,为减小存储空间,缩短星图识别时间,本文将星库中星等大于星敏感器敏感极限的恒星删除,得到含有 5 046 颗星的备选星库。备选星库在全天球中的三维分布如图 1 (b)所示。由图可知,备选星库的密度相比基础星库大幅减小,但恒星分布不均匀,因此将利用交叠视场亮度优选算法进一步筛选备选星库。

星图识别必不可少。根据星敏感器的工作原理,其仿真评价使用的姿态精度公式^[12]为

$$\begin{cases} \sigma_{\text{cross-boresight}} = \frac{F \times \sigma_{\text{centroid}}}{N_{\text{pixel}} \times \sqrt{N_{\text{star}}}} \\ \sigma_{\text{roll}} = \frac{\sqrt{2} \times \sigma_{\text{centroid}} \tan(F/2)}{\sqrt{N_{\text{star}} - 1} \times N_{\text{pixel}} \times \theta_{\text{sep}}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{\text{cross-boresight}}$ 为探测器平面与视轴正交轴的测量精度; σ_{roll} 为绕视轴滚动的精度; F 为星敏感器视场; σ_{centroid} 为质心定位精度; N_{pixel} 为芯片的像元数目; N_{star} 为参与姿态解算的星颗数; θ_{sep} 为参与姿态解算的平均角距。

影响精度指标的因素有很多,其中首要因素为参与姿态解算的星颗数。由某国产星敏感器的分析结果可见:在 σ_{centroid} 、 N_{pixel} 、 F 值固定的情况下,当精度要求优于 $3''$ 时,参与姿态解算的星颗数为 15~20 颗;当精度要求优于 $5''$ 时,星颗数为 8~15 颗;为不丢失跟踪目标,视场内至少需要 5 颗星。影响精度指标的次要因素为参与姿态解算的平均角距,其值表示视场中导航星分布的均匀程度。在不改变其他影响精度指标时,可适当增加参与姿态解算的星颗数,以提高视场内导航星分布均匀程度和星敏感器姿态精度。

根据星敏感器的精度要求,确定参与姿态解算的星颗数为 N_{star} 颗。由于实际拍摄的星图中亮度较高的观测星通常不是干扰星,且容易获得更高的质心提取精度,因此在各视场星图识别过程中,优先采用各视场中亮度较高的星点。在保证视场中的探测星数量尽可能接近 N_{star} 颗的同时,确保恒星的星等足够小。为了在最少的识别次数中获取与导航星匹配的观测星组合,需根据亮星优先的原则选取导航星。如在实际应用中,星敏感器将星图中所有 N_d 颗探测星按照亮度排序,取前 N_{star} 颗亮星参与星图下一步识别过程,删除剩余暗星。因此,在构建导航星库时,生成覆盖全天的交叠视场,选取每个视场

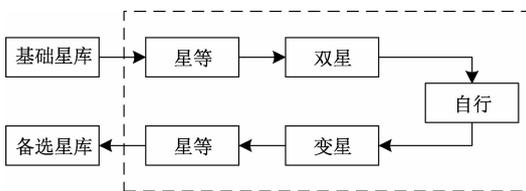


图 2 基础星库预处理流程

Fig. 2 Preprocessing flowchart of basic star database

2 基于交叠视场优选亮度算法

合理的导航星库不仅能有效提高星图识别成功率和匹配速率,而且可提高星敏感器的姿态精度,对

内亮度排名前 N_{th} 颗 ($N_{th} \geq N_{star}$) 的恒星作为导航星。

为增加参与姿态解算的导航星的平均角距 θ_{sep} , 均匀分布每个视场范围内天区的导航星。由于星敏传感器实际视场内的天区只占天球很小一部分, 因此将视场范围内的天区视作平面区域, 如果能实现任意光轴指向的视场内导航星的星像在像面上均匀分布, 那么所有导航星在天球上可近似均匀分布^[14]。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos q \sin p - \sin r \sin q \cos p & \cos q \cos p - \sin r \sin q \sin p & \cos r \sin q \\ \sin q \sin p - \sin r \cos q \cos p & -\sin q \cos p - \sin r \cos q \sin p & \cos r \cos q \\ \cos r \cos p & \cos r \sin p & \sin r \end{bmatrix} \quad (2)$$

恒星映射在探测器像平面上的坐标为

$$\begin{cases} x = \left(-f \frac{a_{11}v_1 + a_{12}v_2 + a_{13}v_3}{a_{31}v_1 + a_{32}v_2 + a_{33}v_3} + \frac{x_{pixelsize} D_x}{2} \right) / D_x \\ y = \left(-f \frac{a_{21}v_1 + a_{22}v_2 + a_{23}v_3}{a_{31}v_1 + a_{32}v_2 + a_{33}v_3} + \frac{y_{pixelsize} D_y}{2} \right) / D_y \end{cases} \quad (3)$$

式中: r, p, q 分别为星敏传感器光轴指向的赤经、赤纬、旋转角; (v_1, v_2, v_3) 为恒星在天球坐标系下的坐标; f 为星敏传感器的镜头焦距; $x_{pixelsize}, y_{pixelsize}$ 分别为探测器像平面沿 X, Y 轴方向的像元数; D_x, D_y 分别为每个像元沿 X, Y 轴方向的尺寸。

2) 根据恒星在像平面上的坐标 (x, y) 与像平面上主点 (x_m, y_m) 的关系, 对恒星在像面上的位置进行区域划分, 共分成 4 个相等的扇形区域 (见图 3), 其表达式为

$$F = \begin{cases} 1, & x - x_m \geq 0, y - y_m \geq 0 \\ 2, & x - x_m < 0, y - y_m \geq 0 \\ 3, & x - x_m < 0, y - y_m < 0 \\ 4, & x - x_m \geq 0, y - y_m < 0 \end{cases} \quad (4)$$

3) 根据赤经从 1° 至 360° 每隔 M° , 再根据赤纬从 -90° 至 90° 每隔 M° 进行光轴指向, 生成 N 个交

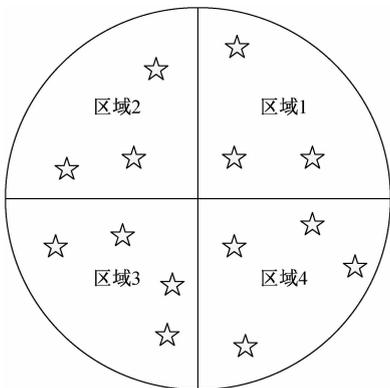


图 3 视场内扇形区域划分示意

Fig. 3 Schematic diagram of fan section partition in FOV

基于上述思想, 将像面上的星像密度作为筛选导航星的指标, 把导航星在天球上的分布问题转化为星像在像平面上的分布问题。

导航星均匀分布的实现步骤如下:

1) 以星敏传感器视场的内切圆为视场, 将视场范围内的天区恒星三维坐标转换为像平面上的二维坐标, 则基于光轴指向计算转移矩阵为

叠视场, 分别统计每个像平面和扇形区域内的星颗数。根据精度要求, 参与姿态解算有 N_{star} 颗星, 确定像平面星颗数的阈值 N_{FOV} , 计算每个扇形区域的阈值 $N_q, N_q \geq N_{FOV}/4$; 优先判断像平面的星颗数是否大于 N_{FOV} , 若不是, 则不作处理, 若是, 则判断该像平面内每个扇形区域的星颗数是否大于 N_q , 若某区域的星颗数小于 N_q , 则不处理, 否则, 按照亮度排序该区域的恒星, 优先选取前 N_q 颗亮星, 将剩余暗星作为待删除星; 依次统计每个视场, 将所得的待删星库从备选星库中删除, 得到最终导航星库。

3 仿真试验及结果分析

某国产星敏传感器的敏感极限为 6.1 星等, 视场为 $14.5^\circ \times 14.5^\circ$, 先进摄影系统 (APS) 的尺寸为 2048×2048 像素。星库预处理中, 星等阈值 $M_{th} = 6.5$, 角距阈值 $\theta_{th} = 0.212^\circ$, 周年光行差阈值 $d_g = 0.5''$ 。参与姿态解算的星颗数 N_{star} 为 15 颗, 阈值 $N_{FOV} = 25, N_q = 7$ 。

采取交叠视场亮度优先方法构建星库时, 视场间隔参数 M 对星库均匀性和星库规模的影响较大。通过设置不同 M 值, 对比不同规模星库的均匀性, 得出最优的 M 值。由于星敏传感器的视场半径为 7.25° , 因此 M 小于等于 7.25° 。不同星库的星颗数分布见表 2。表中通过设置不同的视场间隔参数, 得到了不同规模的星库, 随机生成 10 000 个光轴指向, 并统计每个光轴指向天区视场内的星颗数, 按照星颗数所在区间统计在该区间的光轴比例。由表 2 可见: 当视场间隔参数 M 为 3.625 时, 得到的 3 959 颗导航星的星库, 在 10~25 颗和 15~20 颗的光轴个数分别占 97.38%、55.82%, 相比其他方法制作的星库比例最高, 说明该星库的恒星在全天球中分布最为均匀。随机光轴星颗数如图 4 所示。由表 2、图 4 可知, 导航星库在 10~25 颗的光轴个数仅占 75.65%, 比备选星库提高了 21.73%。

表 2 不同星颗数区间的光轴分布概率

Tab. 2 Optical axis distribution probability of different star number sections

%

导航星库规模/颗	视场内星颗数/颗						
	<5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	>30
3 510 ($M=1$)	0.01	5.05	50.43	41.12	3.36	0.03	0
3 679 ($M=2$)	0.02	3.30	43.57	47.60	5.47	0.04	0
3 959 ($M=3.625$)	0	2.32	28.66	55.82	12.90	0.30	0
4 073 ($M=5$)	0	2.24	26.55	53.41	16.99	0.81	0
4 221 ($M=6$)	0	2.21	22.59	49.35	24.04	1.81	0
4 327 ($M=7.25$)	0.01	2.15	22.81	44.66	26.16	4.10	0.11
5 046 (备选星库)	0	2.23	20.23	35.25	20.17	10.21	11.91
5 583 (星等阈值)	0	1.09	14.04	31.16	25.17	11.90	16.64

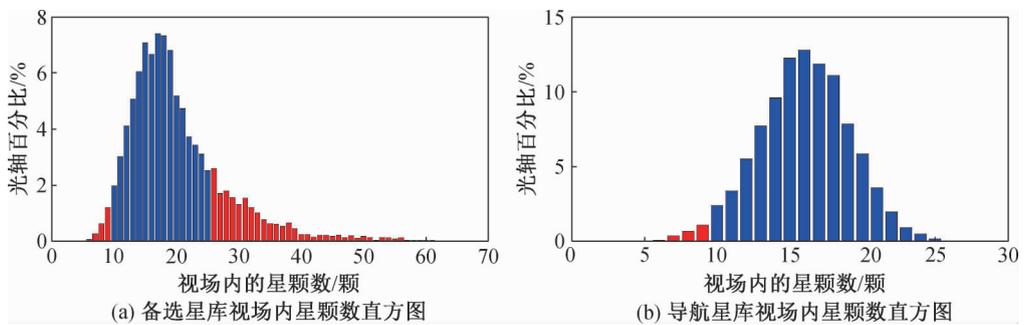


图 4 随机光轴星颗数直方图

Fig. 4 Histogram of random optical axis star number

根据某国产星敏感器的特性,设置探测器主点坐标为(1 024,1 024),镜头焦距 f 为 44.129 2 mm,

像元尺寸 D_x, D_y 均为 0.005 5 mm。不同视场内恒星分布如图 5 所示。随机生成 (124.25° ,

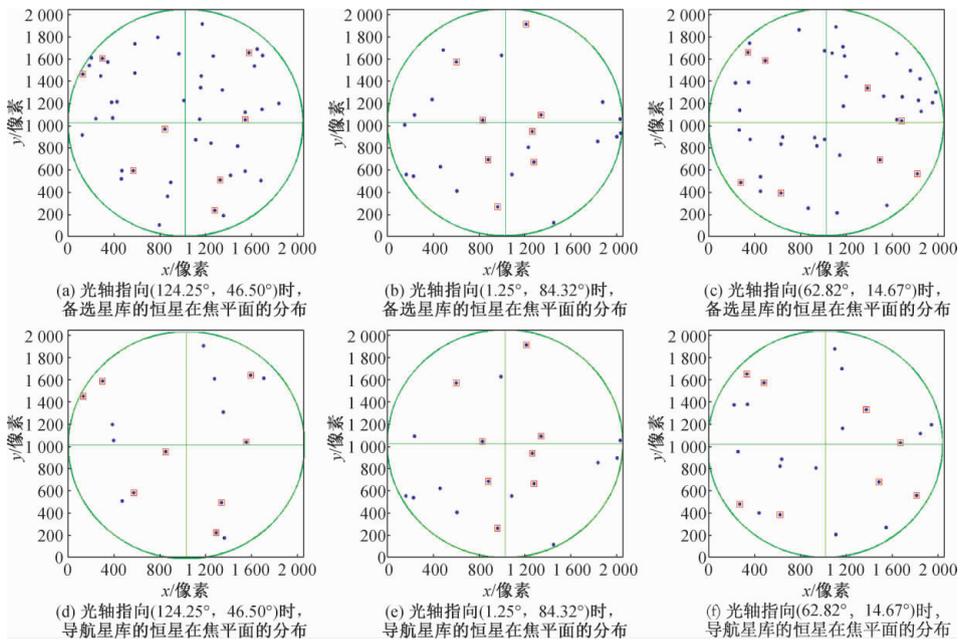


图 5 不同视场内的恒星分布

Fig. 5 Star distribution of different FOVs

-46.50°)、 $(1.25^\circ, 84.32^\circ)$ 、 $(62.82^\circ, 14.67^\circ)$ 3个光轴指向,将它们分别指向备选星库和导航星库的天球中,分别将图5(a)和(d)、图5(b)和(e)、图5(c)和(f)进行对比,从中可以明显看出,导航星库视场中的星分布明显比备选星库均匀,且表示每个扇形区域最亮2颗星的红色方框都没有改变位置,说明交叠视场亮度优先方法可保证视场中的亮星不被删除,同时删除其他分布密集的暗星,得到局部天区均匀分布的导航星库。

备选星库、待删星库、导航星库的二维分布如图6所示。由图可知:备选星库的恒星在全天球呈“V”形分布,待删星库中的恒星绝大多数都在“V”形内,而导航星库分布均匀。由此证明,本文方法能使导航星在全天球中均匀分布。

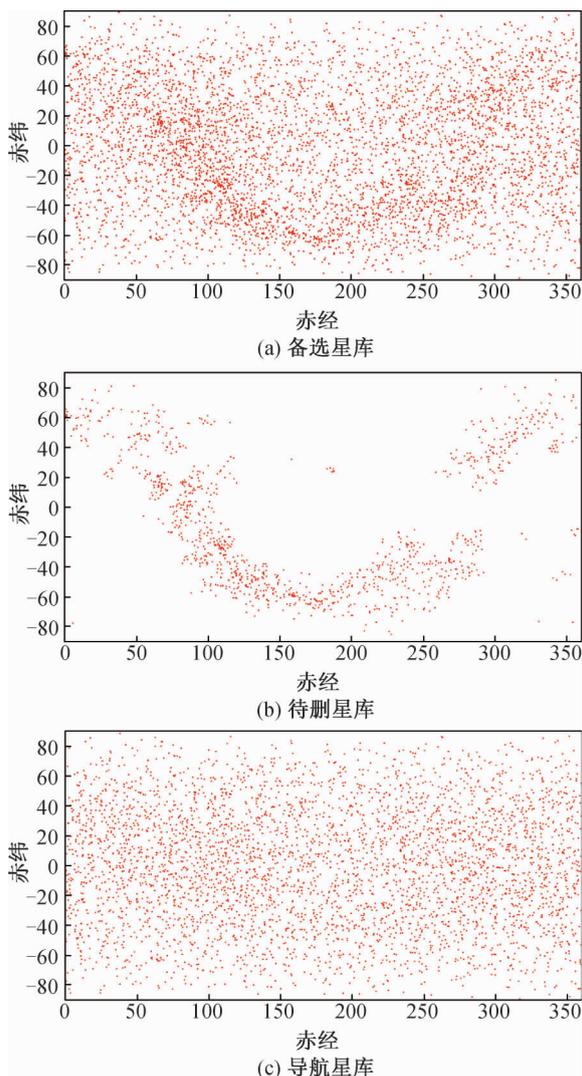


图6 不同星库的二维图

Fig. 6 Two-dimensional diagrams of different star databases

4 结束语

本文提出了一种基于交叠视场亮度优选算法的星敏传感器导航星库构建方法。在星库预处理中,按照恒星自行筛选和有选择地筛选变星。该方法与单一的以星等阈值进行星库预处理的方法相比,可有效删除影响星图识别成功率的恒星。在此基础上,采用交叠视场亮度优选算法,成功筛选出视场中亮度高且分布均匀的恒星,使所选的导航星在全天和局部天区中分布均匀、冗余度低、亮度高。该导航星库能为后续星敏传感器节省在轨存储空间,提高星图识别匹配速率和识别成功率。但在导航星库预处理时,“双星”的删除可能会丢失较多有用的恒星,后续可通过对“双星”等效处理,提高星图识别的成功率。此外,可进一步改进所采用的扇形划分和光轴生成方式,得到分布更均匀的导航星库。

参考文献

- [1] 朱长征, 居永忠, 杜晓辉. 导航星库制定方法研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1327-1330.
- [2] JOHN D V. Star trackers, star catalogs, and attitude determination: probabilistic aspects of system design [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1993, 16(3): 498-504.
- [3] BARRY K, HINDMAN M, YATES R. Application of flight data to space shuttle CCD star tracker catalog design [C] // Proceedings of the Annual Rocky Mountain Guidance and Control Conference, 16th, Keystone, CO, NASA Johnson Space Center, Houston, TX, United States, 1993: 57-70.
- [4] 陈雪芬, 康国华. 基于 ITSI 优选算法的星敏传感器导航星库建立[J]. 传感技术学报, 2015, 28(3): 381-386.
- [5] 吴量, 王建立, 王昊京. 三视场天文导航视场间星图识别的导航星选取[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1732-1741.
- [6] 郑胜, 吴伟仁, 田金文, 等. 一种新的导航星选取算法研究[J]. 宇航学报, 2004, 25(1): 35-40.
- [7] HYE Y K, JUNKINS L. Self-organizing guide star selection algorithm for star tracker; thinning method [C] // IEEE on Aerospace Conference Proceeding, Big Sky, Montana: IEEE, 2002: 2275-2283.
- [8] 李立宏, 林涛, 宁永臣, 等. 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.
- [9] 郑万波, 刘智, 郝志航. 二维精简索引分层导航星库

- 的构造[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2003, 21(2): 123-127.
- [10] 张晨, 陈朝阳, 张金林, 等. APS 星跟踪器亚像素质心定位[J]. 光电工程, 2005, 32(6): 5-8.
- [11] 魏新国, 张广军, 江洁. 星敏感器中星图图像的星体细分定位方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(9): 812-815.
- [12] 刘朝山, 刘光斌, 王新国, 等. 弹载星敏感器原理及系统应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.
- [13] 阚道宏, 朱铮, 过瑞英. 星敏感器用导航星表的建立[J]. 宇航学报, 1992, 14(4): 43-49.
- [14] 吴峰. 自主导航星敏感器关键技术的研究[D]. 苏州:苏州大学, 2012.

(本文编辑:应振华)