

适用于小视场星敏感器的导航星表构建方法

崔祥祥, 王宏力, 陆敬辉, 乔 兴, 邓长智, 张 勇, 赵爱罡

(第二炮兵工程大学 303 教研室, 陕西 西安 710025)

摘 要: 导航星表构建是星敏感器设计阶段的重要工作。对于小视场, 受限于恒星分布规律, 易出现导航星表“空洞”问题。为解决小视场条件下均匀完备导航星表构建问题, 对基于球面螺旋基准点的导航星表构建方法进行了改进: 摒弃了原方法通过改变球面螺旋基准点数量和位置重新构建导航星表的思路, 转而通过增选部分恒星来达到减少星表“空洞”的目的。设立了描述恒星消除星表“空洞”能力的权值, 并以该权值递减顺序开展恒星增选; 同时, 设计了增选恒星距离阈值条件以保持增选后导航星表的均匀性。仿真表明, 在 4° 圆形视场条件下, 相对于原方法, 文中方法得到的导航星表, 总星数减少 708 颗, 均匀性指标提高约 44%, 而星表“空洞”变化较小, 显示了较好的性能。

关键词: 导航星表; 星敏感器; 球面螺旋基准点; 均匀性

中图分类号: V448.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1249-05

Guide star selection method for star tracker with thin field of view

Cui Xiangxiang, Wang Hongli, Lu Jinghui, Qiao Xing, Deng Changzhi, Zhang Yong, Zhao Aigang

(303 Unit, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: Guide star selection is a crucial part of star tracker design. For thin field-of-view star tracker, guide star catalog “holes” are common as stars are not evenly distributed. To optimize the guide star selection for star tracker with thin field of view, the selection method based on spherical spiral points was modified. Building a new guide star catalog by increasing the number and changing the positions of spherical spiral points, which was usually adopted, was abandoned. Some new stars which can effectively decrease guide star catalog “holes” into the guide star catalog were proposed. The weights to measure stars' ability of decreasing guide star catalog “holes” were constructed and the adding star process was carried out on the order of the weights descending. And the new star added into guide star catalog was required far away from the guide stars to keep the guide stars even. Simulations expressed that the modified method got less and evener guide stars than the original method with similar guide star catalog “holes”, which shows the superiority of the modified method.

Key words: guide star catalog; star tracker; spherical spiral points; uniformity

收稿日期: 2014-08-15; 修订日期: 2014-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(61203189); 陕西省自然科学基金计划(2014JM2-6107)

作者简介: 崔祥祥(1985-), 男, 博士生, 主要从事星敏感器相关技术方面的研究。Email: cuixiang0072@sina.com

导师简介: 王宏力(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事复合制导与信息融合技术方面的研究。Email: cc2084@163.com

0 引言

星敏传感器具有体积小、重量轻、功耗低、精度高等优点,正日益成为各型航天器的主要姿态测量设备^[1]。美、俄、英、法、德等先进国家为抢占技术优势,投入大量资源开发先进星敏传感器技术,并积极推进相关产品的系列化发展,国内科研机构也围绕先进星敏传感器技术开展了相应攻关,并取得了一定成果^[2-4]。星图识别和姿态确定是星敏传感器的两大关键技术^[5],而这两大技术都与导航星表密切相关,导航星的数量和分布直接影响星敏传感器的数据存储量、识别速度和可靠性、以及姿态确定精度,因此,构建合理的导航星表是星敏传感器设计阶段的重要工作^[6-7]。

Vedder^[8]指出:提高导航星分布的均匀性,可以在不降低星敏传感器性能的同时,减少导航星表的数据存储量,是导航星表构建的目标之一。为达到该目标, Kim 等^[9]提出了一种自组织导航星选择方法,其以满足任意光轴指向视场内导航星数量大于一定值为前提,根据恒星亮度以及恒星间的相互位置关系,逐个挑选导航星。该方法挑选的导航星分布比较均匀,但过程复杂,且速度较慢^[10]。Prakash 等^[11]提出了一种基于球面螺旋点构建导航星表的方法,其利用球面螺旋点具有球面近似均匀分布的特性,以球面螺旋点作为导航星的期望位置,选取距离其最近的恒星作为导航星,使得导航星的分布非常均匀,且选星速度较快。陈聪等^[12]为提高导航星的平均亮度,提出了“距离-星等”加权概念,综合考虑了恒星到基准点的距离和恒星自身的亮度两个指标,在确保导航星分布均匀的条件下使选取的导航星更便于观测。但通过上述方法建立的导航星表并不能完全满足星敏传感器设计要求,特别是对于小视场而言,受限于恒星自身的分布规律,星表将出现某些“空洞”(星敏传感器光轴指向该天球区域时无法观测到导航星)。此时增加球面螺旋基准点数量,会改变螺旋基准点位置,需重新构建导航星表,不仅不能很好地解决星表“空洞”问题,还会增加计算量,而且由于基准点间距离减小导致某些不适宜恒星选为导航星,给导航星表均匀性造成影响,反而降低星表性能。

为解决小视场条件下均匀完备导航星表构建问题,文中改进了基于球面螺旋基准点的导航星表构

建方法,摒弃了通过增加球面螺旋基准点数量来减少星表“空洞”的方法,转而通过增选部分“关键恒星”来达到减少星表“空洞”的目的。仿真表明,相对于增加球面螺旋基准点数量而言,文中方法得到的导航星表性能更优。

1 基于球面螺旋基准点的导航星表构建方法

Bauer^[13]给出了生成球面上近似均匀分布点的方法:设需要在单位球面上找到 n 个均匀分布点,则近似满足该条件的 n 个点的球面坐标可通过下式求出:

$$\begin{aligned} z_k &= 1 - (2k+1)/n \\ \phi_k &= \arccos(z_k) \\ \theta_k &= \phi_k \sqrt{\pi n} \\ x_k &= \sin(\phi_k) \cos(\theta_k) \\ y_k &= \sin(\phi_k) \sin(\theta_k) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $k=0, 1, 2, \dots, n-1$ 。

由以上构造过程可知,设 z 轴方向上(即不同行之间)相邻螺旋点之间的距离为 σ , 则:

$$\sigma = 2\sqrt{\pi/n} \quad (2)$$

而螺旋线方向上(即同一行中)相邻两个螺旋点之间的距离为:

$$\Delta k \sqrt{\left(\frac{dx}{dk}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dk}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dk}\right)^2} = 2\sqrt{\pi/n - 1/n^2} \approx \sigma \quad (3)$$

其中, $\Delta k=1$ 。

上式表明,当 n 足够大时,球面螺旋基准点之间沿 z 轴方向以及螺旋线方向上的距离几乎相同,因此,其在球面上几乎是均匀分布的。

Prakash 等^[11]指出,如果导航星具有与球面螺旋基准点相同的位置,则导航星的分布是近似均匀的,进而给出了基于球面螺旋基准点的导航星表构建方法:

1) 根据星敏传感器视场大小和单视场期望恒星数目,确定球面螺旋基准点个数 n ;

2) 根据球面螺旋基准点坐标公式,求解基准点坐标;

3) 定义相邻球面螺旋基准点之间距离的一半为 r , 分别以各球面螺旋基准点为圆心,以 r 为半径,找到相应区域内的恒星,其中距离圆心最近的恒星被选为导航星;若某些球面螺旋基准点没有找到相应的导航星,则将其搜索区域的半径放大到 $2r$,重复上述过程。

4) 将所有被选中的导航星提取出来, 并按照其坐标进行排序, 就得到了导航星表。

采用该方法建立导航星表, 整个过程比较简单, 计算量小, 速度较快, 且导航星分布较均匀, 具有较大的优势。

2 改进的导航星表构建方法

当星敏感器视场较小时, 受限于恒星自身的分布规律, 星表将出现某些“空洞”。此时增加球面螺旋基准点数量, 不仅不能很好地解决星表“空洞”问题, 还会由于某些原因降低星表性能。

为了解决上述问题, 文中提出了解决星表“空洞”问题的另一思路, 即: 不重新构建整个星表, 而是针对现有星表存在“空洞”的位置, 通过增选部分“关键恒星”, 来达到减少“空洞”的目的。算法具体流程如下。

1) 采用标准的基于球面螺旋基准点的导航星表构建方法建立基本导航星表;

2) 建立总数为 N 的球面螺旋基准点集, 作为星敏感器光轴参考指向以具体描述星表“空洞”位置;

3) 以新建立的球面螺旋基准点集为参考指向, 分析基本导航星表在各参考指向下的可观测导航星数量, 并找出各星表“空洞”对应的参考指向;

4) 以星表“空洞”对应的参考指向为基准, 搜索天文星表中能被星敏感器观测但未被选为导航星的恒星, 将其标记为待增选导航星, 并对该恒星的权值变量加 1;

5) 对所有待增选导航星按照其权值由高到低进行排序, 权值越高, 代表该恒星能补足的星表“空洞”位置越多;

6) 根据权值排序结果, 依次计算每一待增选导航星与导航星表中其它导航星的星间角距, 若大于设定门限, 则该星选为导航星, 并随着新恒星的选入, 对导航星表进行更新; 否则, 舍弃该恒星。

7) 当增选导航星数量满足要求, 或所有待增选导航星遍历结束时, 算法结束。

上述算法利用了之前建立的导航星表, 没有舍弃原有成果; 同时针对导航星表“空洞”进行导航星增选, 针对性强; 且待增选恒星的顺序根据其能补足的星表“空洞”数排列, 效果明显; 最后, 以待增选恒

星与导航星表其它导航星之间的角距为门限, 避免了将距离已选导航星较近的恒星选入, 保持了导航星分布的均匀性。

3 仿真实验

为了说明文中算法的优势, 采用 SKY 2000 主星表作为参考星表, 使用星等阈值处理得到 7 等以上恒星共 15 567 颗, 作为导航星表构建的基本星表。

星敏感器视场设为 $4^\circ \times 4^\circ$ 圆形视场。在此条件下, 若假设地球上导航星满足均匀分布, 期望单个视场内平均出现 1 颗导航星, 则期望导航星数量大约为 3 283 颗。这里采用 4 100 个球面螺旋基准点, 使用 Prakash 等^[11]提出的导航星表构建方法建立导航星表, 共得到导航星 4 010 颗, 其分布如图 1 所示。为考察该导航星表的“空洞”情况, 生成了 20 000 个球面螺旋基准点作为星敏感器光轴测试指向, 分析各测试指向下星敏感器可以观测到的导航星数量, 其频数统计结果如表 1 所示。采用 Vedder 提出的星表全局均匀性评价指标, 计算 4 010 颗导航星组成的导航星表的均匀性指标为 $7.088 5 \times 10^{-5}$ 。Vedder 指出, 该指标值越小, 说明星表均匀性越好。

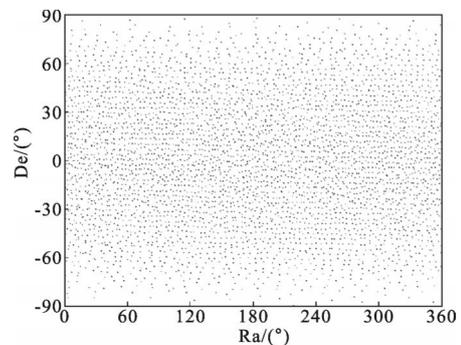


图 1 4 010 颗导航星在地球上的分布
Fig.1 Distribution of 4 010 guide stars

表 1 20 000 次仿真视场内导航星个数的频数统计
Tab.1 Frequency of guide stars in the FOV in 20 000 simulation directions

Number of guide stars in FOV	0	1	2	3	4	5	6
4 010 guide stars	2 307	11 606	5 454	617	16	-	-
5 750 guide stars	885	6 964	8 662	3 135	349	4	1
5 042 guide stars	951	9 317	7 829	1 786	117	-	-

从表 1 中可以看出, 对于 4 010 星表而言, 视

场内导航星个数为 0 颗的频数达到了 2 307, 这表明 4 010 星表存在较多“空洞”。

为减少星表“空洞”数量, 将球面螺旋基准点个数增加到 6 000 个, 使用 Prakash 等^[1]提出的导航星表构建方法建立导航星表, 共得到导航星 5 750 颗, 其中与 4 010 星表不同的导航星共 3 692 颗。为比较其与 4 010 星表的不同, 只将 3 692 颗与 4 010 星表不同的恒星进行了绘图, 如图 2 所示。5 750 星表的频数统计见表 1, 其均匀性指标为 0.517 1。

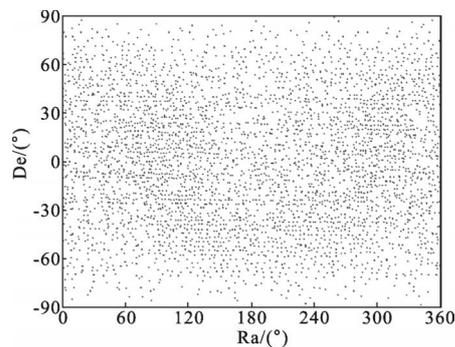


图 2 3 692 颗不同导航星在天球上的分布

Fig.2 Distribution of 3 692 different guide stars

使用文中算法以 4 010 星表为基础增选导航星 1 032 颗, 增选导航星在天球的分布如图 3 所示。增选后, 导航星表共包含导航星 5 042 颗, 其频数统计结果如表 1 所示, 其均匀性指标为 0.288 4。

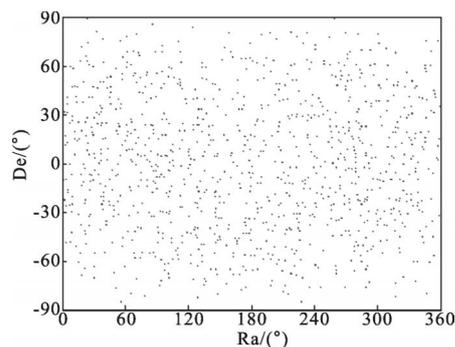


图 3 1 032 颗不同导航星在天球上的分布

Fig.3 Distribution of 1 032 different guide stars

从表 1 可看出, 文中算法通过增选 1 032 颗导航星有效减少了星表“空洞”的存在, 与 4 010 星表相比, “空洞”数减少 1 356 个; 与 5 750 星表相比, “空洞”数虽然多了 66 个, 但导航星总数减少了 708 颗, 星表均匀性指标提升了 44%, 体现了算法较好的性能。

4 结 论

导航星表是星敏感器软件系统的重要组成部分, 构建合理的导航星表是星敏感器设计阶段的重要工作。对于小视场而言, 受限与恒星自身的分布规律, 导航星表存在“空洞”现象, 单独增加球面螺旋基准点数量, 并不能很好地解决“空洞”问题, 反而会导致星表性能下降。文中摒弃了通过增加球面螺旋基准点数量来减少星表“空洞”的方法, 转而通过增选部分“关键恒星”来达到减少星表“空洞”的目的。通过分析“空洞”附近恒星与各“空洞”的相对位置, 得到了恒星重要性权值; 再结合该恒星与其它导航星的距离条件, 得到增选恒星。仿真表明, 相对于增加球面螺旋基准点数量而言, 文中方法得到的导航星表均匀性更好, 导航星数量较少, 且星表“空洞”得到了较好的抑制。

参考文献:

- [1] Lu Jinghui, Wang Hongli, Sun Yuan, et al. Star pattern identification algorithm by triangle incircle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 752-756. (in Chinese)
陆敬辉, 王宏力, 孙渊, 等. 三角形内切圆的星图识别算法 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 752-756.
- [2] Blarre L, Ouaknine J, Pierre L O, et al. High accuracy Sodem star trackers: recent improvements proposed on SED 36 and HYDRA star trackers [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2006, 6046.
- [3] 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. (in Chinese)
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.
- [4] Ye Shenglong, Wei Xinguo, Fan Qiaoyun, et al. Operation mode design of multi-FOV star sensor [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36 (10): 1244-1247. (in Chinese)
叶生龙, 魏新国, 樊巧云, 等. 多视场星敏感器工作模式设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(10): 1244-1247.
- [5] Liebe C C. Accuracy performance of star tracker—a tutorial [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(20): 587-599.

- [6] Lu Jinghui, Wang Hongli, Sun Yuan, et al. Main star identification algorithm based on similar pattern vectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 164–168. (in Chinese)
陆敬辉, 王宏力, 孙渊, 等. 应用相近模式向量的主星星图识别算法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 164–168.
- [7] Lu Jinghui, Wang Hongli, Wen Tao, et al. Design and implementation of missile guide catalog [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(9): 1895–1901. (in Chinese)
陆敬辉, 王宏力, 文涛, 等. 弹载导航星表的设计与实现[J]. 宇航学报, 2011, 32(9): 1895–1901.
- [8] Vedder J D. Star trackers, star catalogs, and attitude determination: probabilistic aspects of system design [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1993, 16(3): 493–504.
- [9] Kim H Y, Junkins J L. Self-organizing guide star selection algorithm for star trackers: thinning method [C]//IEEE on Aerospace Conference Proceedings, 2002, 5: 2275–2284.
- [10] Zhu Changzheng, Ju Yongzhong, Du Xiaohui. Approach to founding a guide star catalogue [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(5): 1327–1330. (in Chinese)
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.
- [11] Prakash A, Wu A, Liu J Y, et al. Performance based evaluation of star catalog generation methods [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2002: 5–8.
- [12] Chen Cong, Wang Hongli, Lu Jinghui, et al. Guide star selection method based on spired reference points[J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2012, 32(5): 29–32. (in Chinese)
陈聪, 王宏力, 陆敬辉, 等. 基于螺旋基准点的导航星选取方法[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(5): 29–32.
- [13] Bauer R. Distribution of points on a sphere with application to star catalog [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2000, 23(1): 130–137.