

doi: 10.7690/bgzdh.2018.05.014

经纬度相关的似均匀星表划分方法

黄 为, 李永刚, 张煜昕, 胡 健, 张 龙

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 针对传统的基于经纬度或均匀星表划分方法的不足, 构建了一种经纬度信息相关的准均匀星表划分方法。以天球内接正 8 面体对天球表面进行第一层次剖分, 在 2 维经纬度网格上进行三角网格划分, 将划分结果映射到天球 3 维表面上, 得到似均匀的星表划分结果。分析结果表明: 该方法既能构建天球表面的准均匀分布网格, 又能留存数据的经纬度信息特征, 使导航星表的查询和应用效率得到提升。

关键词: 星传感器; 星图识别; 导航星表; 球面剖分

中图分类号: TJ22 **文献标志码:** A

Quasi-uniform Division of Guide Star Catalogue in Consideration of Latitude and Longitude

Huang Wei, Li Yonggang, Zhang Yuxin, Hu Jian, Zhang Long

(Chinese Satellite Maritime Tracking & Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: The traditional guide star catalogue division methods include latitude/longitude based methods and uniform spherical subdivision methods. It constructs a quasi-uniform catalog division method in consideration of latitude and longitude information. It firstly performs a triangular mesh division on a 2 dimensional grid of latitude and longitude. Then it maps the division results onto the 3 dimensional surface of the celestial sphere. As a result, this division method has the property of quasi-uniformity. Analysis shows that the method can establish quasi-uniformity mesh of celestial sphere surface, keep the latitude and longitude information feature of data, and improve queries and application efficiency of catalog navigation.

Keywords: star sensor; star pattern recognition; guide star catalogue; spherical subdivision

0 引言

星传感器是实现航天器自主姿态测量的核心部件, 具有自主性好、可靠性高等特点, 在航天器定姿定轨、高性能飞行和航天器对接等方面得到了广泛的应用^[1-3]。

星传感器在进行航天器姿态测量时, 需要将当前视场中的恒星与导航星表进行比较匹配, 这一过程称为星图识别^[4]。恒星在导航星表中的匹配效率决定了星图识别的效率^[5]。导航星表为天球坐标系下对恒星的描述, 主要包括恒星的赤经、赤纬和亮度等。在全天星图识别时, 若直接对整个导航星图进行检索, 效率非常低; 为了加快导航星表的检索速度, 通常需要对导航星表进行划分^[6-7], 以提高星传感器星图识别的效率。

实际上, 对导航星图或者说星表的划分可以转化为对天球表面的剖分。传统的星表划分方法将全天星图基于赤经、赤纬来进行空间划分, 各个区域的空间划分极为不均匀, 不利于导航星表数据库的

组织与调度; 另一类天球划分方法为天球均匀划分方法, 该类方法完全抛弃了天球的经纬度信息, 得到了天球表面的均匀划分, 但这类方法边界划分较为复杂, 且检索方式不够直观。

针对上述方法的不足, 笔者构建了一种经纬度信息相关的似均匀星表划分方法。由于在剖分过程中考虑到天球表面经纬度信息, 使得该方法的剖分边界易于构建。

1 常用星表划分方法

星表的划分可以加快恒星在导航星表中的检索速度, 在星图识别中具有重要作用。笔者将常见的星表划分方法分为 2 大类。

1) 基于赤经、赤纬的划分方法。

该类方法将天球表面基于赤经、赤纬进行剖分。Jeffery^[8]将天球用平行于天球赤道的平面, 把天球划分为一系列的球带。陈元枝等^[9]将天球在赤经和赤纬方向上分别划分为 40 等分和 20 等分, 由此将整个天区划分为 800 个球矩形, 每个球矩形代

收稿日期: 2018-03-14; 修回日期: 2018-04-19

作者简介: 黄 为(1985—), 男, 湖北人, 博士, 工程师, 从事天文导航、卫星导航方面研究。

表在天球上 9° 的赤经、赤纬跨度。这种方式边界清晰，计算简单，但从天球赤道到南北极剖分网络的面积随着天球赤纬的增大而逐步缩小，剖分网络的表面积极不均匀，不利于导航星的快速检索。

2) 均匀划分算法。

该类算法均实现了天球的均匀划分。Ju 等^[10]用圆锥法对天球进行了划分。该方法以天球球心为顶点，用 11 000 个相同的圆锥体将天球面分成大小完全相等的区域，得到的天球表面剖分网格会互相重叠，对存储空间的需求比较大。张广军等^[11]构建了一种内接正方体星表划分方法。该方法先用内接正方体将天球表面均匀分成 6 个区域，再将每个区域等分为 $N \times N$ 个字块，实现了天区均匀且无重叠的划分，但对恒星的块边界的判断较为复杂。

2 本文算法

本文算法结合了经纬度划分方法和均匀划分方法的优势。下面先对典型的基于内接正四面体的均匀划分方法加以介绍，然后给出本文中的天球表面划分算法以及编码存储方式。

2.1 内接正方体星表划分方法

该方法在直角坐标系下用内接正方体对天球表面进行剖分，如图 1 所示。天球球心和正方体每个侧面的 4 条边的连线构成一个锥体(如图 1(a))，该锥体与球面相交的大圆弧将球面划分为 6 个均匀区域(如图 1(b))。对于每个区域，先将正方体的一个侧面正方形分为 $N \times N$ 的子块，然后用每个子块分别与球心构成锥体，将锥体与球面相交，即可得到均匀划分的球面剖分子块。按照这种方式，即可将球面划分为 $6 \times N \times N$ 的等面积子块。

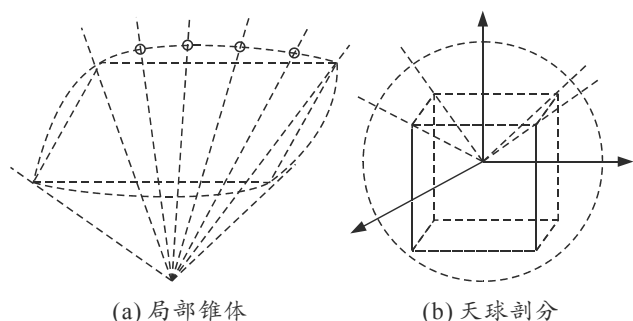


图 1 内接正方体天球划分

2.2 经纬度相关的似均匀星表划分方法

笔者选取正 8 面体作为球面剖分网格的基础，使其 6 个顶点分别对应天球的南北极、天球赤道与 0° 经线、东西经 90° 经线以及东西经 180° 经线的交

点。将天球球心与正 8 面体的任意一个面的 3 条边连接得到棱锥，棱锥体投影到天球表面得到的大圆弧形成一个球面三角形，就完成了第一层次的球面剖分。第一层次的剖分将天球球面分成 8 个等面积球面三角形，如图 2 所示。

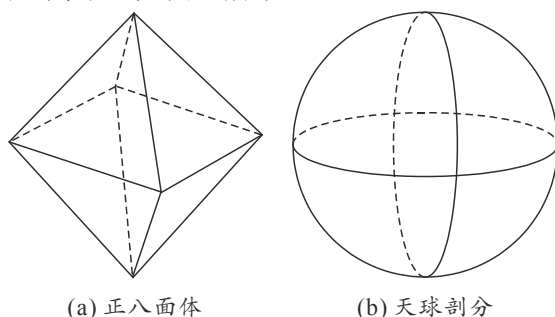
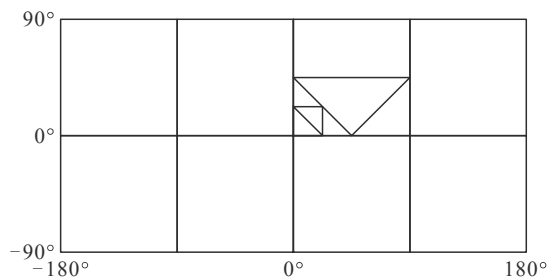


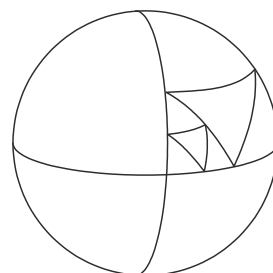
图 2 内接正 8 面体天球表面第一层次剖分

在随后的剖分过程中，对内接正 8 面体的每个表面三角形的边取中点，与球心构成一个子棱锥，将该棱锥的边延长投影到天球表面得到的大圆弧可将一个球面三角形划分为 4 等分。这种剖分方法称为大圆弧平分法，实际上采用了球心投影的方式来生成大圆弧。

笔者首先构建天球表面对应的经纬度坐标平面，其次在该 2 维平面上根据天球的经纬度信息对三角面片取中点，然后用连接两点的直线来对面片进行细分，最后将在 2 维平面上的划分结果反映到 3 维天球表面，如图 3 所示。



(a) 天球表面划分的 2 维展示



(b) 2 维划分对应的 3 维划分效果

图 3 基于经纬度信息的 2 维剖分与 3 维剖分的对应关系

对于赤纬相同的 2 个点间圆弧的生成，大圆弧平分法和文中方法的比较如图 4 所示。

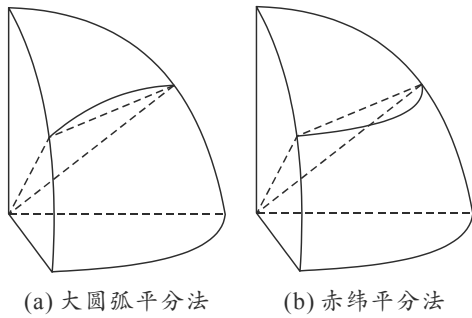


图 4 2 种划分方法

文中采用的经纬度信息相关的内接正 8 面体天球剖分方法遵循了如下原则：1) 在第 1 层次剖分时，直接采用内接正 8 面体到天球表面的投影将天球表面划分为 8 等分；2) 在随后的剖分过程中，首先构建天球表面对应的 2 维网格，其次在 2 维网格上直接根据经纬度信息提取三角形的中点，然后用直线将各个中点连接起来进行三角形的剖分，最后将 2 维网格上的剖分结果映射到 3 维天球表面。基于文中方法得到的内接正 8 面体第 2 层次剖分，如图 5 所示。

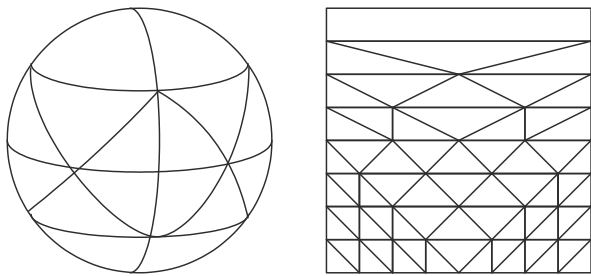


图 5 基于经纬平分法的剖分网格

按照上述方法对天球表面进行划分后，可将所有的划分子块进行存储作为导航星表。各个子块的存储结构如图 6 所示，其中 index 代表该子块在导航星表中的序号，memberList 为该子块中恒星的列表，包括每个恒星的星号、星等以及赤经赤纬信息。

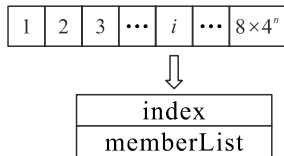


图 6 导航星表中子块的存储结构

文中的 index 为 2 维形式 (nIndexX, nIndexY)。该索引采用了经纬度相关的数据编码方式，这里展示了赤经范围为(0°, 90°)、赤纬范围为(0°, 90°)的天球表面 N=3，即第 3 层次剖分的编码，其中赤经坐标轴的边缘数字 1、2、3、4 为纬度编码，而剖分

网格内部数字为经度编码，如图 7 所示。

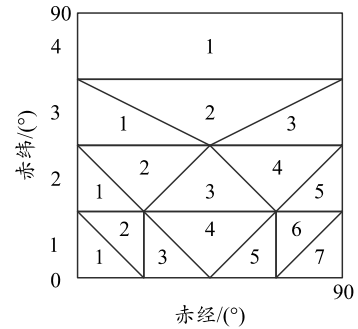


图 7 经纬度相关的编码实例

由于采用了经纬度相关的剖分方式，由子块索引 index 很容易得到该子块的赤经赤纬范围。如图 7 中 index 为(2,3)的网格的赤纬、赤经范围分别为(22.5°, 45°)、(22.5°, 67.5°)。

3 分析与结论

根据文献[12-13]的结论可知，文中得到的划分网格满足其所定义的似均匀网格，从而具有如下的特性：1) 天球表面各层次的剖分网格面积近似相等；2) 各层次剖分网格单元的几何形状近似相同；3) 天球表面同一层次剖分网格单元的形变随着剖分层次的增加是收敛的。这些特性保证了文中算法剖分得到网格单元的“似均匀性”。

在实际的工程应用中，若已知星敏感器光轴指向的方向向量，由于文中划分方法的经纬度相关性，可快速地从经纬度信息得到其在导航星表中对应的子块的索引以及邻近区域，由此得到恒星列表，实现导航星的快速搜索。以 8°×8°视场为例，为使一个子块区域能够将视场尽可能完整地包含，取 N=3，把天球表面划分为 8×43=512 个子块，最多需要 6 个子块，即平均搜索范围为全天球搜索的 6/512=0.012。

传统的基于经纬度信息的星图划分方法会造成在天球赤道附近相对于天球南北极处得到的剖分网格表面积大很多，不利于导航星图的组织与检索；而各种天球均匀划分算法虽然得到了天球表面的均匀划分，但都没有保留面片的经纬度信息，不便于数据的使用。文中的方法既构建了天球表面的准均匀分布网格，又留存了数据的经纬度信息特征，使得导航星表的存储变得方便，同时使用起来也更为高效，能够较好地支持导航星表在 3 维天球表面空间的查询和应用。

- [4] 卞立新, 罗兴柏, 李金明, 等. 导弹武器系统研制费用估算方法[J]. 火力与指挥控制, 2017, 6(6): 136-139.
- [5] 张丽叶, 郑绍钰. 基于 LS-SVM 的装备研制费用模型与分析[J]. 兵工自动化, 2009, 2(2): 16-21.
- [6] 张丽叶, 谢文秀. 基于 PSO_LS-SVM 的装备研制费用预测研究[J]. 海军航空工程学报, 2010(6): 690-694.
- [7] 焦鹏, 王新政. 基于 SVM 的模拟电路故障诊断及参数优化方法[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(8): 2039-2043.
- [8] CORTES, VAPNIK V. Support Vector Network[J]. Machine Learning, 1995(20): 273-297.
- [9] CHAPELLE O, VAPNIK V. Choosing multiple parameters for support vector machines[R]. New York: AT&T Research Labs, 2001.
- [10] 郑连清, 吴萍, 刘小龙. 基于遗传算法的 LS-SVM 在谐波源建模中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 1674-3415.
- [11] 熊南, 刘百芬. 基于自适应粒子群优化 LSSVM 的网络流量在线预测[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(9): 21-24.
- [12] SHI B, LI Y X, YU X h, et al. A modified particle swarm optimization and radial basis function neural network hybrid algorithm model and its application[J]. WRI Global Congress on Intelligent Systems, 2009, 1: 134-138.
- [13] 黄国权, 尤新华. 改进粒子群算法优化最小二乘支持向量机的网络流量混沌预测[J]. 激光杂志, 2015, 36(3): 96-99.
- [14] 王贺, 胡志坚. 基于 IPSO-LSSVM 的风电功率短期预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 107-112.
- [15] 柴远斌. 改进粒子群算法和最小二乘支持向量机的电力负荷预测[J]. 交通电气, 2015, 34(12): 46-49.
- [16] 汪洋, 龚仁喜. 基于改进粒子群优化 LS-SVM 的谐波源特性研究[J]. 计算机仿真, 2015(9): 58-62.
- [17] 程思嘉, 张昌宏. 基于粒子群算法优化最小二乘支持向量机的电路故障诊断方法[J]. 兵器装备工程学报, 2016(3): 98-101.
- [18] 王营, 王蔚. 基于改进粒子群优化 LSSVM 的光伏功率预测[J]. 科技经济导刊, 2016(28): 114-115.

(上接第 51 页)

- [2] 赵少华. 转管机枪缓冲器优化设计[D]. 太原: 中北大学, 2010: 1-3.
- [3] 杜敏. 12.7 mm 链式机枪缓冲装置的优化与设计[D]. 太原: 中北大学, 2014: 1-3.
- [4] 李磊, 张建润, 陈琳. 柴油机运动机构多学科协同优化设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 33-37.
- [5] 刘豪, 王丽娟, 陈宗渝, 等. 多学科优化在后背门改进设计中的应用[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(5): 766-770.
- [6] 朱家莹, 潘玉田, 孙明颜. 某型火炮摇架结构拓扑优化设计[J]. 兵工自动化, 2017, 36(6): 17-20.
- [7] 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 94-95, 193-195.
- [8] 李海军, 王殿宇, 陈玉良. 基于 EHA 的机载导弹弹簧蓄能弹射可行性分析[J]. 兵器装备工程学报, 2016(4): 5-7.

(上接第 54 页)

参考文献:

- [1] 魏新国, 徐佳, 张广军. 星敏感器质心定位的 S 曲线误差补偿[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 849-857.
- [2] 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.
- [3] HYUNJAE L, HYOCHOONG B. Star pattern identification technique by modified grid algorithm[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 1112-1116.
- [4] 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.
- [5] PRAKASH A, WU A, LIU J Y, et al. Performance based evaluation of star catalog generation methods[C]. Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Monterey, California: AIAA, 2002: 5-8.
- [6] 田宏, 林玲, 郝永杰, 等. 星敏感器导航星表建立[J]. 空间控制技术与应用, 2010, 36(3): 43-46.
- [7] 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.
- [8] JEFFERY W B. On-orbit star processing using multi-star star trackers[J]. SPIE, 1994, 2221: 6-14.
- [9] 陈元枝, 郝志航, 王国辉, 等. 适用于星敏感器的导航星星库制定[J]. 光学精密工程, 2000, 8(4): 331-334.
- [10] JU G, KIM H, POLLOCK T, et al. DIGSTAR: a low-cost micro star tracker[C]. Space Technology Conference & Exposition, Albuquerque, NM: AIAA, 1999: 99-4603.
- [11] 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.
- [12] 赵学胜, 孙文彬, 陈军. 基于 QTM 的全球离散格网变形分布及收敛分析[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 438-442.
- [13] 孙文彬, 赵学胜, 高彦丽, 等. 球面似均匀格网的剖分方法及特征分析[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(1): 53-56.
- [14] SUN W B, ZHAO X S, GAO Y L, et al. Partition methods and character analysis of near-equal grids on spherical facet[J]. Geography and geo-information science, 2009, 25(1): 53-56.