

适用于星敏感器的导航星星库制定

陈元枝, 郝志航, 王国辉, 李德志

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021)

摘要: 导航星星库对星图识别、最终姿态获取具有重要意义。导航星星库的容量, 存储方式, 存储内容, 读取方式, 是影响星图识别的识别时间和识别率的关键因素。本文介绍了采用球矩阵存储和读取导航星库的方法, 阐述了导航星的选取规则及存储内容。球矩阵方法可以在全天空范围内快捷查找导航星的大致区域; 年中平位置及导航星星对角距的存储, 可使视位置转换时间及星图识别时间进一步减少。

关键词: 导航星星库; 平位置; 视位置; 星对角距; 球矩阵方法

中图分类号: V556.5 文献标识码: A

1 引言

采用星敏感器测卫星姿态是现行方法中精度最高的。如何将星敏感器视场中观测星与预先存储的导航星建立对应关系, 即星图识别, 是姿态测量的关键。星图识别是通过观测星星对角距与导航星星对角距进行匹配来确认观测星和导航星两者关系的。导航星星库的容量, 存储方式, 存储内容, 读取方式, 是影响星图识别的识别时间和识别率的关键因素。本文阐述了与星图识别相结合的导航星星库制定规则及方法。

2 导航星选取

我们将装载于卫星上的存储器中用于与观测星比照的恒星星表称为导航星库。导航星星库来源于基本星表。基本星表中包含有一定数量恒星的星号, 星名, 星等, 对应某一基本历元的星位置(平赤经与平赤纬), 自行等数据, 是对空间坐标系的描述。包含的恒星的视星等越高, 基本星表越完整, 恒星的数量也越多。但并不是任一星表、星表中的所有星, 均可作为导航星。导航星的选取有两条原则:

(1) 星等足够高

我们往往希望进行星识别时, 观测星正好与

导航星库中的星一一对应, 但这是不可能的。由于星敏感器上 CCD 的光谱特性使仪器星等与视星等存在差异。因此, 导航星星库的星等应比星敏感器的仪器星等高, 扩大到一些能量较弱的星, 从而尽可能使观测星包含在星库中。

采用平差方法解算姿态角及星识别算法, 均要求可识别星的个数应至少三颗, 而且像点间距分布越开, 姿态解算精度越高。导航星星库应保证在全天的每一视域范围至少有三颗导航星, 即基本星表应有足够的容量。其容量的大小与星敏感器视域大小成反比。

(2) 在满足(1)的条件下, 星等应尽可能低。

随星等的增加, 星数量急剧增加, 导航星库过大, 将导致识别时间的增加。因此需选择基本星表中某一星等以上的恒星作为导航星。

以 $12^\circ \times 12^\circ$ 视场为例, 选用 catalog/5/5050/ 星表, 取出全球分布的 450 个视场, 分别在 5.5 星等、5 星等、6.5 星等以上时, 星个数分布如表 1 所示。

Table 1 The distribution of star numbers

magn.	< 3stars	4stars	5stars - 8stars	> 8stars
< 5.5magn	3.6% (16 FOV)	4.7% (21)	41.6% (187)	50.1% (226)
< 6.0magn	0.2% (1)	0	4.4% (20)	95.4% (429)
< 6.5magn	0	0	0.2% (1)	99.8% (449)

当星敏感器的灵敏度取 6.0 星等时,基本可以保证每视域的星个数多于 3 颗,而且有 95.4% 的视域多于 8 颗星。因为一般在观测星数目较多时,常选其中最亮的 8-12 颗星用于识别,而且只需精确识别出其中的 5 颗星,即可满足姿态平差的精度要求。所以当我们选择 6.5 星等以上的星作为导航星时,基本能够满足包含绝大部分观测星的要求。

3 导航星星库的内容

导航星星库具有两方面用途,一是用于星图识别,二是用于取得摄影时刻已识别星的视位置,以获取姿态。

3.1 年中平位置的存储

我们手中只有 FK5 基本星表,FK5 星表提供的是恒星在标准历元(J2000)的平赤道坐标(平位置),而星敏感器上所得的是恒星在观测瞬时的真赤道坐标(观测位置)在 CCD 框标坐标系上的投影。我们需要的姿态是观测时刻的瞬时姿态,需进行平位置到视位置的转换,其转换精度将直接影响所获取姿态的精度。

由标准历元平位置换算到视位置的过程是:标准历元平位置加上由标准历元到当年年中的岁差和自行就得到当年年中的平位置。年中平位置加上由年首到当天的岁差和自行则得当天平位置,当天平位置加上章动则得真位置。由太阳质心换算到地球质心,即加入光行差,则得视位置(赤经坐标系)。

标准历元平位置(α_0, δ_0)与距观测历元最近的贝塞尔年中平位置之差仅由岁差和自行以及它们的变化项引起,两者的关系为:

$$\begin{cases} \alpha_{\text{平}} = \alpha_0 + \frac{d\alpha}{dT}(t - t_0) + \frac{d^2\alpha}{dT^2} \frac{(t - t_0)^2}{200} \\ \delta_{\text{平}} = \delta_0 + \frac{d\delta}{dT}(t - t_0) + \frac{d^2\delta}{dT^2} \frac{(t - t_0)^2}{200} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\frac{d\alpha}{dT}, \frac{d\delta}{dT}, \frac{d^2\alpha}{dT^2}, \frac{d^2\delta}{dT^2}$ 为赤经和赤纬的年变和长期变化,表达式为:

$$\begin{cases} \frac{d\alpha}{dT} = m + n \sin \alpha_0 \tan \delta_0 + \mu_\alpha \\ \frac{d\delta}{dT} = n \cos \alpha_0 + \mu_\delta \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{d^2\alpha}{dT^2} = \frac{dm}{dT} + \sin \alpha_0 \tan \delta_0 \frac{dn}{dT} + \\ n \cos \alpha_0 \tan \delta_0 \left(\frac{d\alpha}{dT} + \mu_\alpha \right) + \\ n \sin \alpha_0 \sec^2 \delta_0 \left(\frac{d\alpha}{dT} + \mu_\delta \right) + 2\mu_\alpha \mu_\delta \tan \delta_0 \\ \frac{d^2\delta}{dT^2} = \cos \alpha_0 \frac{dn}{dT} - n \sin \alpha_0 \left(\frac{d\alpha}{dT} + \mu_\alpha \right) - \mu_\delta^2 \sin \delta_0 \cos \delta_0 \end{cases} \quad (3)$$

m, n 为赤经总岁差和赤纬岁差,分别为:

$$\begin{cases} m = 46''.1243625 + 0''.0279312T - 0''.000002775T^2 \\ n = 20''.043109 - 0''.008533T - 0''.00000217T^2 \end{cases} \quad (4)$$

T 是从 J2000 至起算历元的儒略世纪数,因为起算历元即取基本历元,所以 $T = 0$ 。(t—— t_0) 为从标准历元到计算的年中的年数。

进一步化为观测历元(时刻)平位置:

$$\begin{cases} \alpha_{\text{平}} = \alpha_{\text{平}} + (m + n \sin \alpha_0 \tan \delta_0) \tau + \mu_\alpha \tau \\ \delta_{\text{平}} = \delta_{\text{平}} + n \cos \alpha_0 \tau + \mu_\delta \tau \end{cases} \quad (5)$$

τ 为从最靠近的年中到观测历元的年的小数,小于 0.5,上半年取负。

平位置和真位置之差仅由章动引起:

$$\begin{cases} \alpha_{\text{真}} = \alpha_{\text{平}} + (\Delta\Psi + d\Psi) \\ \quad (\cos \epsilon + \sin \epsilon \sin \alpha_0 \tan \delta_0) - (\Delta\epsilon + d\epsilon) \cos \alpha_0 \tan \delta_0 \\ \delta_{\text{真}} = \delta_{\text{平}} + (\Delta\Psi + d\Psi) \sin \epsilon \cos \alpha_0 + \\ \quad (\Delta\epsilon + d\epsilon) \sin \alpha_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 ϵ 为黄赤交角, $\Delta\Psi$ 和 $d\Psi$ 为黄经章动的长期项和短周期项, $\Delta\epsilon$ 和 $d\epsilon$ 为交角章动的长周期项和短周期项, $\Delta\Psi, d\Psi, \Delta\epsilon$ 和 $d\epsilon$ 只与时间有关。

坐标原点从日心移到地心后,原点的移动引起周年视差,原点绕日心公转引起周年光行差。周年视差的量值很小可忽略。周年光行差的改正公式为:

$$\begin{cases} \alpha_{\text{视}} = \alpha_{\text{真}} + \frac{1}{15} C \sec \delta_0 \cos \alpha_0 + \frac{1}{15} D \sec \delta_0 \sin \alpha_0 \\ \delta_{\text{视}} = \alpha_{\text{真}} + C(\tan \epsilon \cos \delta_0 - \sin \delta_0 \sin \alpha_0) + \\ \quad D \sin \delta_0 \cos \alpha_0 \end{cases} \quad (7)$$

其中 C 和 D 表达式为:

$$\begin{cases} C = 1191''.286\overset{\circ}{Y} \\ D = -1191''.286\overset{\circ}{X} \end{cases} \quad (8)$$

$\overset{\circ}{X}$ 和 $\overset{\circ}{Y}$ 是以每个平太阳日的天文单位表示的地球相对于太阳系质心运动的赤道直角坐标速度分量。

由上可知,每颗星的视位置都将随观测时刻

而改变。而年中平位置仅与岁差、自行和 J2000 年到起测的年中之间的儒略年数有关,与观测时刻无关,因此一年不变。

由于年中平位置是向视位置转换的必经步骤,因此导航星库中可以直接存储年中平位置。省去了由标准历元平位置向年中平位置的转换,将缩短转换时间。但由年中平位置至视位置,具有较高精度的转换的有效期只有一年,第二年需进行修正。

3.2 星对角距的存储

星图识别以星对角距(星与星之间与地球的球心角表示)为识别特征。星对角距 e_{ij} 是单位矢量 s_i 和 s_j 夹角。

$$s_i = \begin{bmatrix} \cos\alpha \times \cos\delta_i \\ \sin\alpha \times \cos\delta_i \\ \sin\delta_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$e_{ij} = \cos^{-1} \frac{s_i \cdot s_j}{|s_i| \cdot |s_j|} \quad (10)$$

其中 i 和 j 为星号, α 为赤经, δ_i 为赤纬。

星对角距的变化仅由恒星自行引起,已测定的恒星的自行以蛇夫座的巴纳德星为最大,每年自行只有 10.31" 左右。本人采用连通聚类匹配星图识别算法(另文发表)使星对角距的匹配门限达 180", 因此在卫星执行任务的 1、2 年中,星对角距的变化均在比较门限范围内,即短期内可以忽略平位置计算的星对角距与视位置计算的星对角距的差异。

以平位置计算星对角距存入导航星库,将有效地节省星图识别时间。

4 导航星库的存储与读取方式——球矩阵法^[3]

选择合适的星表存储方法和有效的读取方式,可以从整个的星表中快速抽取部分导航星,帮助星识别减少所需时间。

4.1 导航星库的存储

在球矩阵法中,由赤经圈和赤纬圈将天球分成不重叠的区域。用赤经和赤纬来表示的每个球

矩形的标定尺寸接近星敏感器视域的对角直径的一半。如对于 $12^\circ \times 12^\circ$ 的 FOV 是 9° , 整个天球共有 800 个球矩形。每个球矩阵赤经被限制为从 1 到 40, 赤纬被分为由 1 到 20。例如,1 号库中存储的是赤经 0 到 9° ; 赤纬 -90° 到 -81° 范围的星。所有的导航星按赤纬增长的顺序被存入相应的库中。每个星的存储格式为该星星号, 星等, 平赤经, 平赤纬, 小于该星赤纬(为避免重复)且与该星角距小于星敏感器视域的角距个数 i , 副 1 星号, 角距值 1, 副 2 星号, 角距值 2, ..., 副 i 星号, 角距值 i 。

4.2 导航星库读取

决定星敏感器视轴覆盖区域的赤纬的上界: 通过增加 1/2 的星敏感器视域对角线加不确定姿态到视轴赤纬, 然后由 SRM 尺寸分开(对于 $12^\circ \times 12^\circ$ 视域取 9°), 取这个数据的整数部分, 当上界在赤道上方时, 用 1 加在赤纬区域总数的 1/2 即 $1 + 20/2$ 在此例中。当上界低于赤道时, 加赤纬区域的总数的 1/2 即 $20/2$ 在此例中。下界也是类似处理。例如, 设视轴指向 20° , 加不确定姿态为 2° , 则上界为: $(20 + 9 + 2)/9 \approx 3.4444$ 取整为 3, $3 + 11 = 14$ 即上界为 DEC# 14。下界为 DEC# 12。对于上下界跨越极轴的情况需特殊考虑。

赤经的上下限的求法与此相似, 但由于随纬度不同赤经弧长不同, 需加或减星敏感器视野对角线的 1/2 除以视轴赤纬的 COS 值及不确定姿态, 然后除以球矩阵尺寸, 取整后加 1。当上下赤经的覆盖区域跨在 0 赤经时, 需特殊考虑。由此找到的是视轴覆盖的大致范围, 将球矩阵中的星数据调出, 并判断是否在视轴指向加减 10 内, 将此范围内的星作为用于比较的导航星。

5 结 论

选择 6.5 星等以上的星作为导航星, 应用球矩阵方法存储导航星库, 不仅易于实现, 而且调用时间平均少于 0.05s。由于存储了年中平位置和星对角距, 使星图识别时间和转换为视位置的时间减少。但也使导航星库的存储容量增大。

参考文献:

- [1] 冒蔚, 范瑜, 胡晓淳, 郭新建, 杜明辉. 基本星表和天球参考系 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [2] 南京紫金山天文台. 天文年历 [M]. 北京: 科学出版社, 1996; 1999.
- [3] Bone Jeffery W. On-orbit star processing using multi-star trackers[J]. Proc. SPIE, 1994, 2221: 6- 8.
- [4] 张光明, 王建军, 郭丽虹. 经纬仪的自动星体标校[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(4): 105- 110.

Constitution of guide star catalog for star sensor

CHEN Yuan-zhi, HAO Zhi-hang, WANG Guo-hui, LI De-zhi

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China*)

Abstract: Guide star catalog is significant for identifying star map, acquiring final attitude. The capacity, store manner, store content and read manner of the guide star catalog are key factors which influence the time and efficiency of star map identification. The paper introduces the method which adopts spherical matrix method for storing and reading guide star catalog, and elaborates the selecting rules and storing content on guide stars. Using spherical matrix method, the rough region of guide stars can be searched rapidly in all celestial sphere, that storing midyear average position and the angular distance between guide star pairs can further reduce sight position transformation time and star map identification time.

Key words: guide star catalog; average position; sight position; angular distance between star pair; spherical rectangles method

作者简介: 陈元枝(1968-),男,吉林长春市人。1991年毕业于电子科技大学自动化系生物医学及仪器专业,取得学士学位,1993年考入吉林工业大学农机系攻读硕士学位并取得学位,1996年至今在长春光机所攻读光学工程专业博士学位。主要从事卫星在轨三轴姿态测量方面研究。