

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

# 高精度星敏感器天文标定方法及观测分析

李春艳<sup>1,2</sup>, 李怀锋<sup>1,2</sup>, 孙才红<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**提出了一种利用天顶观测来进行星敏感器标定的新方法。将地球当作均匀转动的转台,由一较精确的时钟代替刻度盘,用相对地球静止的星敏感器对天顶邻域进行观测。把星点作为目标,让其匀速扫过视场,建立星点坐标和对应恒星像点坐标的数学模型,求出位置传递函数。此方法简单、方便,标定精度高。通过实际星空观测,对连续拍摄的 2037 幅星图进行标定计算,每幅星图的积分时间为 80 ms。实际观测星在  $\alpha$  与  $\delta$  方向上的标定误差分别为  $7.267 2''$  和  $6.922 0''$ ,系统总的标定误差为  $10.036 2''$ 。利用标定结果对连续拍摄的星图进行识别,得到星敏感器光轴指向误差为  $4.846 2''$ ,标定结果比较理想。

**关键词:**星敏感器;标定;天顶观测;传递函数

**中图分类号:**V448.22 **文献标识码:**A

## Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sensor

Li Chun-yan<sup>1,2</sup>, Li Huai-feng<sup>1,2</sup>, Sun Cai-hong<sup>1</sup>

(1. *National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;*  
2. *Graduate Scholl of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** A new method utilizing observe zenith to calibrate star sensor was proposed. By regarding the earth as the evenly rotational turntable and the star spots as the targets in this method, the star spots were transited the FOV evenly. Then the mathematics that the coordinates of star spots correspond to the star images were established to calculate the position transfer function. This method can achieve the higher calibration accuracy, and it is also very simple. Through observing the real sky, the 2037 star maps continuously are calibrated and calculated in integration time of every star map of 80 ms. The results show the calibration error of the observed stars are  $7.267 2''$  and  $6.922 0''$  in the direction of  $\alpha$  and  $\delta$ , respectively, system calibration error is  $10.036 2''$ . The obtained star maps are identified using the calibration result, the results indicate that optical axis directional error is  $4.846 2''$ , which shows the calibration result is more perfect.

**Key words:** star sensor; calibration; zenith observing transfer function

## 1 引言

星敏传感器本质上是一架安装在卫星上的望远镜,作为一类姿态传感器,它的有效输入信号是使它扫描到视场中成像在光敏面上的恒星星像,包括每颗恒星的星像位置 $(x_i, y_i)$ 和星像亮度幅值 $I_i$ ,它的输出数据通常用实时描述该传感器空间姿态的四元素来表示。在星敏传感器从输入到输出过程中,首先需要将每次在 $t$ 时刻观测到的一组恒星集合 $(\alpha_i, \beta_i, M_{vi})$ 转换为一组与之对应的恒星星像的集合 $(x_i, y_i, I_i)$ ,并且通过对星敏传感器硬件系统的精确标定,确定上述输入量与输出量之间的函数关系,用星敏传感器的位置传递函数和亮度传递函数来分别描述二者间的关系;然后以 $t$ 时刻观测到的星像数据 $(x_i, y_i, I_i, t)$ 和位置传递函数为依据(输入量),求出此时刻该仪器飞行过程中在空间的实时姿态四元素(输出量)<sup>[1-4]</sup>。所以,星敏传感器必须获得一个经标定精确确定的位置传递函数,由它完成从星像坐标到对应恒星像点坐标的映射关系,有了这个关系就可最终求出光轴在绝对空间的指向或星敏传感器在天球坐标系中的姿态四元素<sup>[5-9]</sup>。

本文介绍了一种利用天顶观测来进行星敏传感器标定的新方法。文章共分为三个部分,首先介绍了星敏传感器天文标定模型与标定方法,接着介绍了采用该方法进行实际星空观测的标定结果与分析,最后是整篇文章的结论。

## 2 标定模型与标定方法

利用天顶观测进行星敏传感器标定的方法就是将地球当作一个均匀转动的转台,由一较精确的时钟代替刻度盘,相对地球静止的星敏传感器对天顶邻域进行观测,把星点作为目标,让星点匀速地扫过 CCD 视场<sup>[10]</sup>。分别记录它们每个时刻在 CCD 本体坐标系中的位置 $(x_i, y_i)$ 以及其在天球惯性坐标系中的坐标 $(\alpha_i, \beta_i)$ ,用多项式拟合星点坐标和对应的像点坐标,得到标定系数。

这种标定方法的优点是观测天顶邻域很容易改正大气折射的影响,另外,利用了一个优于 $0.1''$ 的十分精确的天球惯性坐标系。恒星的视角径几乎为 $0(<0.01'')$ ,且其平行光覆盖整个地球。

这是在地面上人工条件下很难得到的。

为讨论方便,本文暂且不考虑对星光亮度的标定和如何提取星象亮度中心的一些细节<sup>[11]</sup>,但是提取一组精确的星像中心是高精度标定的前提。

星敏传感器在进行标定前要计算天顶的天球赤道坐标 $(\alpha_z, \delta_z)$ ,可根据式(1)与式(2)得到地方平时 $m$ 与地方恒星时 $s$ <sup>[12]</sup>:

$$m = T_N - (N^h - \lambda), \quad (1)$$

$$s = s_0 + m + (m - \lambda)\mu, \quad (2)$$

其中 $(\lambda, \delta)$ 为观测地点的地理坐标, $T_N$ 为区时, $N^h$ 表示时区的顺序号, $s_0$ 为世界时 $0^h$ 的格林尼治的恒星时, $\mu = 0.002\ 737\ 9$ ,则观测时刻天顶的天球赤道坐标 $\alpha_z = s, \delta_z = \delta$ 。

以 $(\alpha_z, \delta_z)$ 为初始指向对观测的星空进行人工识别,并由这些星的位置推导出天顶 $(\alpha_z, \delta_z)$ 在本地坐标的位置 $(X_z, Y_z)$ 。将不同时刻拍摄的恒星坐标归算到观测起始时刻的位置:

$$\alpha_{ji} = \alpha_j + (T_i - T)\omega$$

$$\delta_{ji} = \delta_j$$

其中 $(\alpha_j, \delta_j)$ 为第 $j$ 颗恒星的天球赤道坐标, $T$ 为观测起始时间, $T_i$ 为第 $i$ 次观测时间, $(\alpha_{ji}, \delta_{ji})$ 为 $T_i$ 时观测的第 $j$ 颗恒星归算到观测起始时刻的天球赤道坐标, $\omega$ 为地球自转角速度。

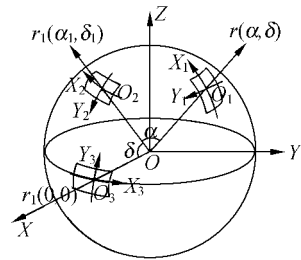


图 1 天球示意图

Fig. 1 Sketch for celestial sphere

将 $(\alpha_z, \delta_z)$ 分别绕与赤道面的垂线( $Z$ 轴)以及与过春分点的赤经圈的垂线( $Y$ 轴)旋转到天球坐标 $(0, 0)$ 处(如图 1),其它位置的坐标也要经过相同的旋转<sup>[13]</sup>。设旋转前后星像的矢量坐标分

$$\text{别为 } v = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{ji} \cos \delta_{ji} \\ \sin \alpha_{ji} \cos \delta_{ji} \\ \sin \delta_{ji} \end{bmatrix} \text{ 与 } w = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{ji}' \cos \delta_{ji}' \\ \sin \alpha_{ji}' \cos \delta_{ji}' \\ \sin \delta_{ji}' \end{bmatrix}.$$

那么, $(\alpha_z, \delta_z)$ 经过两次旋转到天球坐标 $(0, 0)$ 处满足关系式:

$$w = R_y(\alpha_z) * R_z(-\delta_z) * v$$

这里  $R_z(\theta)$  与  $R_y(\theta)$  分别为 Z 轴与 Y 轴的旋转矩

阵。即可以得到:

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha_{ji}' \cos \delta_{ji}' \\ \sin \alpha_{ji}' \cos \delta_{ji}' \\ \sin \delta_{ji}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\delta_z) & 0 & -\sin(-\delta_z) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(-\delta_z) & 0 & \cos(-\delta_z) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \alpha_z & \sin \alpha_z & 0 \\ -\sin \alpha_z & \cos \alpha_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \alpha_{ji} \cos \delta_{ji} \\ \sin \alpha_{ji} \cos \delta_{ji} \\ \sin \delta_{ji} \end{bmatrix}$$

其中  $(\alpha_{ji}', \delta_{ji}')$  为第  $j$  颗恒星归算到观测起始时刻的天球赤道坐标旋转后的结果。

最后用两个曲面方程拟合星点在 CCD 平面坐标  $(x_{ji}, y_{ji})$  影射到天球坐标  $(\alpha_{ji}', \delta_{ji}')$  之间的关系:

$$\begin{aligned} \alpha_{ji}' &= a_0 + a_1 x_{ji} + a_2 y_{ji} + a_3 x_{ji}^2 + a_4 x_{ji} y_{ji} + a_5 y_{ji}^2 + \\ & a_6 x_{ji}^3 + a_7 x_{ji}^2 y_{ji} + a_8 x_{ji} y_{ji}^2 + a_9 y_{ji}^3 \\ \delta_{ji}' &= b_0 + b_1 x_{ji} + b_2 y_{ji} + b_3 x_{ji}^2 + b_4 x_{ji} y_{ji} + b_5 y_{ji}^2 + \\ & b_6 x_{ji}^3 + b_7 x_{ji}^2 y_{ji} + b_8 x_{ji} y_{ji}^2 + b_9 y_{ji}^3 \end{aligned}$$

即可求出标定系数。其中参数  $a_0 - a_9, b_0 - b_9$  可由最小二乘法求得,它反映了从精确目标到观测结果的位置传递函数。

### 3 标定结果与分析

2004 年 11 月 14 日晚,在国家天文台兴隆观测站进行了实际星空标定。当时天气状况为晴,风向:西北风 3~4 级,最高气温 10℃,最低气温 -2℃。星敏传感器使用的是 25 mm 的商用镜头, F1.4, 视场为 14°×11°, 积分时间为 80 ms。

实际观测开始前,要将星敏传感器探头大致指向天顶,使天顶趋近于 CCD 中心;调整 CCD 使星敏传感器视场内恒星扫过的轨迹尽量与 CCD 的边平行;然后调节镜头后截距,把光圈放置到最大的位置,固定观星架。从晚上 21 时 34 分开始观测记录,连续拍摄一组实际星空图像,得到一组(共 2 037 幅)连续的星图。图 2 即为拍摄到的一组连续星图中的一幅,人工识别出星图中的星像,得到其中主要星像的信息,参见表 1。另外,图 3 为星图中提取的星像示意图,图 4 为提取星像在观测时段内的运动轨迹示意图。根据式(1)与式(2)可求出观测时刻天顶的天球赤道坐标为 (30.306 847, 41.212 382)。



图 2 拍摄的实际星图(曝光时间 80 ms)

Fig. 2 An Night-sky image with an 80 ms exposure time

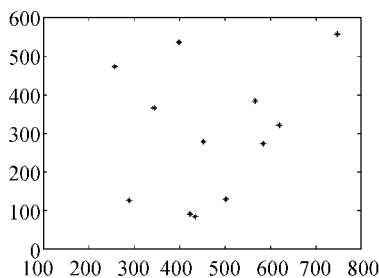


图 3 提取星像示意图

Fig. 3 Sketch for selected stars

表 1 加标记星信息

Tab. 1 Selected star information

Sign	1	2	3	4	5	6
Magnitude	2.16	4.10	4.84	4.79	4.95	4.97
Right ascension	02h40m12s	01h37m06s	02h13m32s	02h08m47s	01h40m53s	01h42m06s
Declination	42°21'21"	41°26'02"	44°15'25"	37°53'05"	40°36'16"	4238'26"

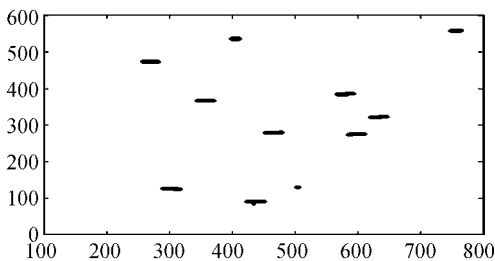


图 4 提取星像运动轨迹示意图

Fig. 4 Sketch for selected star motion trace

图 5 显示的是  $\alpha, \delta$  方向标定误差与非线性最小二乘法(NLS)拟合次数之间的关系。从图中可以看出随着拟合次数的增加,标定误差逐渐变小,但是在三次拟合之后,标定误差的变化幅度不很明显,而且拟合次数越大,占用的计算时间就越长,综合考虑,可以取三次曲面拟合来进行标定。

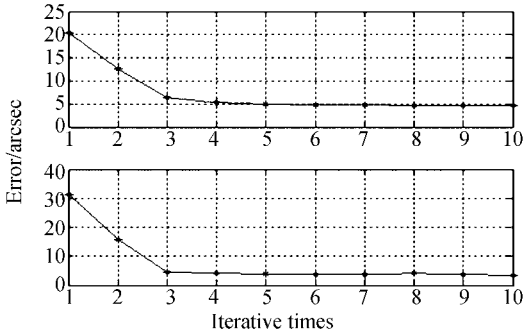


图 5 标定误差与 NLS 拟合次数关系

Fig. 5 Relation between calibration error and NLS iterative times

对连续拍摄的 2 037 幅实际星图进行标定,经过计算,实际观测星在  $\alpha$  与  $\delta$  方向上的误差(均方差)分别为  $7.267 3''$  和  $6.922 0''$ ,系统总的标定误差(均方差)为  $10.036 2''$ 。图 6 显示的是实际观测星分别在  $\alpha$  与  $\delta$  方向上的误差曲线。

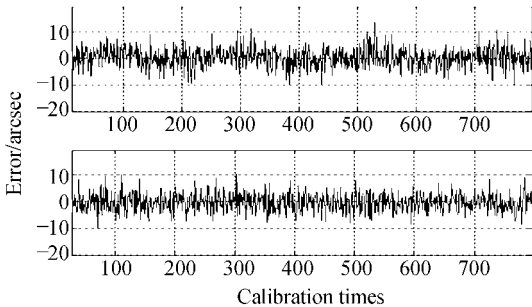


图 6 观测星标定误差曲线

Fig. 6 Calibration error curve

利用标定结果可以对连续拍摄的星图进行识别,识别完成后,根据 QUEST 算法,由公式  $L(A) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n a_i |\hat{w}_i - A\hat{v}_i|^2$ , 计算观测的四元素姿态数据<sup>[14]</sup>。依据星敏传感器本体坐标系与惯性坐标系的关系,将姿态数据转换到直角坐标系中讨论。对所有数据简单统计分析,可得星敏传感器光轴的指向均方差为  $4.846 2''$ ,表 2 所示为计算得到的

星敏传感器光轴三个分量的指向误差结果,图 7 显示了观测值与理想值在三个分量轴上的投影偏差, $x$  轴方向的偏差  $\sigma = 2.329 2''$ , $y$  轴方向的偏差  $\sigma = 3.387 8''$ , $z$  轴方向的偏差  $\sigma = 3.075 6''$ 。

表 2 星敏传感器光轴三个分量的误差数据

Tab. 2 Error data for  $x, y, z$  direction of optical axis

	X direction	Y direction	Z direction
Mean (arcsec)	0.3680	1.0272	0.6206
$1\sigma$ (arcsec)	2.3292	3.3878	3.0756
Max (arcsec)	11.4166	10.0484	9.9712

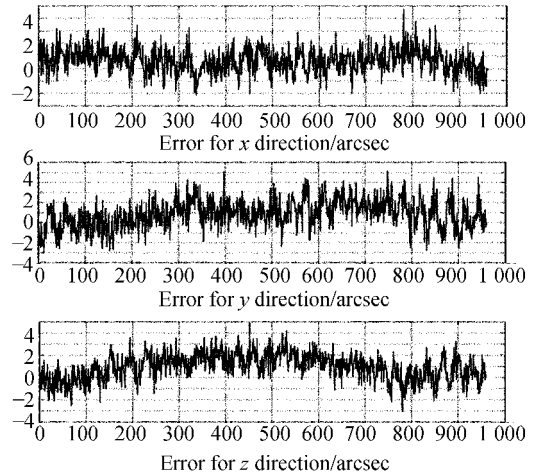


图 7 观测值与理想值在三个轴上的投影偏差

Fig. 7 Error curve for  $x, y, z$  direction of optical axis

通过对实际星空进行观测标定,得到了  $10.036 2''$  的标定误差和  $4.846 2''$  的星敏传感器光轴指向误差,计算结果比较理想。从计算的结果来看主要存在两种误差,一种是固定误差,这是由于整个系统的设计制造、安装校正不精确以及光敏器件光电转换过程中有限的信噪比造成的。另一种是随机误差,它是由星敏传感器天顶观测标定被测对象恒星分布、亮度、光谱引起的系统误差以及仪器设备和工作环境等因素产生的误差组成,还由于地面测量过程中受到大气云层、大气温度梯度不均匀分布,测量数据混入了系统性和随机性的误差而造成的。相对而言,这些误差或是系统的,可以通过标定剔除,或是随机但变化较缓慢的,可以通过数据处理方法予以抑制和平滑。

## 4 结 论

星敏传感器是空间飞行器上的高精度测姿仪器。由于标定精度是影响星敏传感器指向精度的关键因素,所以标定问题对于实现它的高精度具有重要意义。本文提出的利用天顶观测来进行星敏传感器标定的方法是将地球当作均匀转动的转台,把星点作为目标,让其匀速扫过视场,建立恒星天球坐标和对应恒星像点在 CCD 上坐标的标定公式,该标定公式可以用来修正 CCD 的空间量化误差和镜头的畸变等对测量误差的影响。

通过实际星空观测,得到 2 037 幅连续的星图,每幅星图的积分时间为 80 ms。对连续拍摄的星图进行标定计算,得到观测星在  $\alpha$  与  $\delta$  方向上的标定误差分别为 7.267 2"和 6.922 0",系统

总的标定误差为 10.036 2"。利用标定结果对连续拍摄的星图进行识别,得到星敏传感器光轴指向误差为 4.846 2",一般能够满足星敏传感器高精度标定的要求。但是提取一组精确的星像中心是高精度标定的前提,目前星像中心精度还不能完全达到要求,如果能够获得非常高的星像中心精度,那么星敏传感器的标定精度会进一步提高。

本文介绍的标定方法不需要造价昂贵的高精度转台和模拟星光学设备等,而且这种方法是观测天顶邻域,很容易改正大气折射的影响,标定时利用了一个优于 0.1"的十分精确的天球惯性坐标系,这是在地面上人工条件下很难得到的。另外,这种运用天顶观测的标定方法非常简单方便,所以它不失为是进行星敏传感器地面标定的一种实用的好方法。

### 参考文献:

- [1] LIEBE C C, DENNISON E W. Active Pixel Sensor (APS) based star sensor[J]. *IEEE*, 1998:119-127.
- [2] LIEBE C C, ALKALAI L. Micro APS based star sensor[J]. *IEEE*, 2002:2285-2300.
- [3] JU G. *Autonomous star sensing, pattern identification, and attitude determination for spacecraft: an analytical and experimental study* [D]. America: Texas A&M University, 2001. 171-183.
- [4] SAMAAN M A. Toward faster and more accurate star sensors using recursive centroiding and star identification [D]. America: Texas A&M University, 2003. 25-33.
- [5] SAMAAN M A, GRIFFITH T. Autonomous on-orbit calibration of star sensors [J]. aerounix. tamu. edu/~dtg8332/index/WSC\_2002. ppt
- [6] JACOBSSON B, NYLUND M, OLSSON T, et al. Star tracker/gyro calibration and attitude reconstruction for the scientific satellite odin-in flight results[J]. www. ssc. se/.../20049612942476Star Tracker, Gyro Calibration and Attitude Reconstruction.
- [7] Puneet Singla, D. Todd Griffith, John L. Crassidis, etc. Attitude Determination and Autonomous on-orbit Calibration of Star Tracker for the GIFTS Mission. AAS 02-101.
- [8] 周富强等. CCD 摄像机快速标定技术[J]. *光学 精密工程*. 2000,8(1):96-100.  
ZHOU F Q, et al. A High Speed CCD Camera Calibration Technique[J]. *Optics and Precision Engineering*. 2000,8(1):96-100. (in Chinese)
- [9] 陈刚等. 一种基于立体模板的双目视觉传感器现场标定方法[J]. *光学 精密工程*. 2004,12(6):626-631.  
CHEN G, et al. Stereo Vision Sensor Field Calibration Method Based on Volume Template[J]. *Optics and Precision Engineering*. 2004,12(6):626-631. (in Chinese)
- [10] 孙才红. 轻小型星敏传感器研制方法和研制技术. 中国科学院国家天文台博士学位论文. 2002,49-56.  
Sun C H. Developing Technologies and Methods of Lightweight High Accuracy Star Sensor. Chinese Academy of Sciences Doctor Paper. 2002:49-56. (in Chinese)
- [11] GIANCARLO Rufino, DOMENICO Accardo. Enhancement of the centroiding algorithm for star tracker measure refinement [J]. *Acta Astronautica*, 2003, 53:135-147.
- [12] 苗永宽. 球面天文学[M]. 科学出版社. 1983, 46-73.  
MIAO Y K. *Sphere Astronomy*[M]. Beijing: Science Press. 1983:46-73. (in Chinese)

- [13] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京航空航天大学出版社. 1998, 137-147.  
ZHANG R W. *Satellite Orbit Attitude Dynamics and Control* [M]. Beijing: BeiHang University Press. 1998:  
137-147. (in Chinese)
- [14] Van Bezooijen, Roelof W. H. Automated Star Pattern Recognition [D]. America: Stanford University, 1989, 80-182.

作者简介:李春艳(1977—),女,辽宁铁岭人,中国科学院国家天文台在读博士生,主要研究方向为天文仪器与天文技术。

Email:lcy@sst.bao.ac.cn.