

文章编号:1002-2082(2012)05-0855-07

基于天顶观测的光学系统精确标定方法

张 磊¹, 王安国², 李 辉³, 石一鸣³

(1. 海军大连舰艇学院 研究生管理大队, 辽宁 大连 116018;

2. 海军大连舰艇学院 航海系, 辽宁 大连 116018;

3. 海军 91550 部队, 辽宁 大连 116018)

摘 要:针对光学系统在实际应用中与载体坐标系协调的问题, 将光学系统基准面放置于站心地平坐标系水平面上并摄取星图, 对星图处理获取星像坐标, 应用天体自动辨识技术和恒星视位置计算技术得到对应天体的赤道坐标, 以天顶点为原点建立天球切平面基准坐标系, 把星体赤道坐标转化为所对应的基准坐标, 利用天顶点切平面与站心地平坐标系的对应关系, 将天体基准坐标转换为站心像平面坐标, 建立星体站心像平面坐标与星图像平面坐标的标定方程, 解算光学系统综合标定参数。实验结果表明: 标定精度达到角秒量级, 实现光学系统像平面坐标系到载体坐标系的高精度转换。

关键词: 光学系统; 标定参数; 载体坐标系; 天顶观测

中图分类号: TN206; TH741.2

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201233.0501006

Accurate calibration method for optical system based on zenith observation

ZHANG Lei¹, WANG An-guo², LI Hui³, SHI Yi-ming³

(1. Department of Graduate Management, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

2. Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

3. Unit 91550 of Navy, Dalian 116018, China)

Abstract: Aiming at the problem of optical system coordinated with carrier in practical application, the optical system was placed on the plane of horizontal coordinate system and the star image was taken. Coordinates of star image were calculated through image processing. The equatorial coordinates of stars were obtained by automatic celestial body identification and star apparent position calculation. Reference coordinate was established in plane of the sky centered by zenith point. The equatorial coordinates of stars were converted to reference coordinates, and then to topocentric image coordinates according to the relation between zenithal tangent plane and topocentric coordinate. The calibration equation between image coordinates and topocentric coordinates of stars was set up to calculate the deviation parameter of system. The calibration accuracy is arc-second magnitude. The high precision coordinate conversion from star sensor to carrier is realized by this method.

Key words: optical system; calibration parameter; carrier coordinate; zenith observation

收稿日期: 2012-03-13; 修回日期: 2012-05-10

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAH36B03)

作者简介: 张磊(1983—), 男, 河北唐山人, 博士研究生, 主要从事天文导航与舰船武器装备系统与校准方面研究工作。

E-mail: zl0406@yahoo.com.cn

引言

光学系统是测量载体的重要组成部分,对光学系统内外参数进行标定是保证载体高精度测量的必要前提^[1]。文献[2]中提供的方法很好地解决了光学系统本身的标定问题,但在光学系统实际应用过程中,即使光学系统本身具备再高的精度,如果其在安装载体过程中存在误差,也不能高精度地反映载体所需信息,对于载体应用而言也是毫无价值的。把光学系统与载体相固联的平面称为光学系统基准面,光学系统与载体通过基准面相统一,所以需要标定光学系统像平面到基准面的转换关系。

本文提出一种通过观测天顶星空图像对光学系统标定的方法,求取光学系统像平面与基准面之间的标定参数,使光学系统与载体坐标系统一,解决了光学系统实际应用中的当务之急。

1 标定方法

光学系统需要标定的内容主要包含2个方面:一是光学系统本身的参数^[3],包括镜头畸变、焦距、中心偏移量、纵横比等参数;二是光学系统应用于载体过程中所产生的像平面与基准面的偏差。例如星敏传感器通过拍摄星图来解算载体姿态等信息,星敏传感器通过基准面与载体相固联,基准面反映载体姿态信息,而星敏传感器通过像平面获取星像信息,需要标定两平面之间的偏差,才能保证星敏传感器测量值为载体的姿态信息,如图1所示。

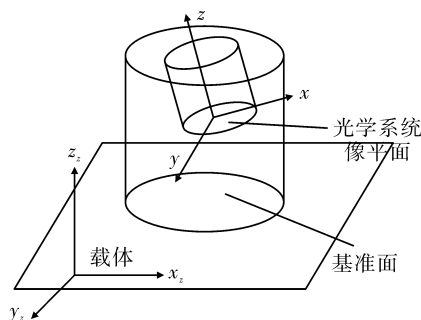


图1 标定示意图

Fig. 1 Calibration scheme

本文提出的标定方法是将光学系统基准面放在所建立的站心地平坐标系水平面上,通过光学系统获取标定时刻的天顶附近星空图像,经星图处理得到星像质心在像平面坐标系中的坐标,

从而得到标定的实测数据;依据星像质心和恒星视位置间的几何结构通过天体自动辨识技术确定各星像对应天体的星号,采用多天体视位置同步计算技术^[4-5],计算观测历元时各天体的赤道坐标,并将其转换为平面坐标(基准坐标),进而转化为站心像平面坐标,由此得到标定基准数据。通过建立光学系统像平面坐标与站心像平面坐标之间的标定方程,最终得到星敏传感器整体的标定参数。

1.1 标定数据的获取

1.1.1 站心地平坐标系的建立

首先建立站心地平坐标系的水平面 $X_T T_d Y_T$, 站心地平坐标系 $T-X_T Y_T Z_T$, 如图2所示。站心 T_d 为原点, Z_T 轴与站心 T_d 处的垂线重合, 指向天顶为正, X_T 轴为站心 T_d 所在子午圈切线, 指向北为正, Y_T 轴指向东与 Z_T 轴、 X_T 轴构成左手直角坐标系。

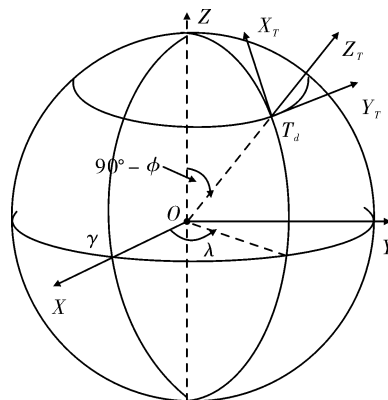


图2 站心地平坐标系

Fig. 2 Horizontal coordinate system

地平坐标系 $X_T Y_T Y_T$ 平面的建立可以采用差分工作方式的电子水平仪,其最高精度能达到 $0.2''$ 。将电子水平仪放置在所建立的平面上,通过调整平面的水平度,使差分电子水平仪的读数在垂直的2个方向读数均为0。为了消除电子水平仪的零位误差,取正反方向(相差 180°)测量数据平均值作为一次测量结果。由于纵横方向的调整具有交叉干扰,水平标校往往要反复进行。

1.1.2 赤道坐标到基准坐标的转换

将光学系统基准面放在所建立的站心地平坐标系 $X_T T_d Y_T$ 平面上,保证2个平面共面。控制光学系统拍摄星图,对星图进行处理得到星体在像平面中的坐标 (x_i, y_i) ($i=1, \dots, n$ 为星像序号)

作为量测数据。为了全面反映光学系统的光学特性,应选择星体密集、分布均匀、亮度均衡的天区进行拍摄。得到星体的像平面坐标后,利用恒星视位置间的几何关系基本不变的特性,在导航星库中辨识出各个星像所对应的恒星,从而获得该星体基于星表历元平位置的赤道坐标,再经过天体视位置同步计算,获得各星像对应天体在观测历元时的赤道坐标 (α_i, δ_i) ($i=1, \dots, n$ 为天体序号),以此作为标定计算的基准数据^[6-8]。标定的实施必须建立起基准数据与量测数据之间的对应关系^[9-12]。由于恒星赤道坐标 (α_i, δ_i) 是一种球面坐标,而 (x_i, y_i) 是一种平面坐标,两者难以直接对应,因此,需要把恒星赤道坐标变换为平面坐标形式。

如图3所示,在天球切平面上以测者天顶点 T 为原点建立平面直角坐标系 $\mu T v$, v 轴指向天北极,赤道增加的方向; μ 轴指向赤经增加的方向, $\mu T v$ 就是基准坐标系。将辨识得到的星像赤道坐标转换为基准坐标,如图3所示, T 点是天顶点与天球的交点,其赤道坐标为 (α_0, δ_0) ,将赤道坐标系 $OXYZ$ 绕 OZ 轴旋转 α_0 ,以旋转后的 OY 为轴旋转 $(90^\circ - \delta_0)$,并将最终得到的 OX 轴反向,由此得到新坐标系,新系的 XTY 平面即为基准坐标系 $\mu T v$ 平面。天体矢量在基准坐标系 $\mu T v$ 中的矢量为

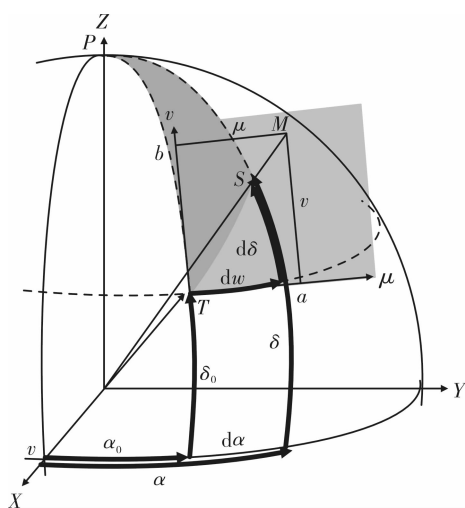


图3 赤道坐标和基准坐标

Fig. 3 Equatorial coordinates and reference coordinates

$$\mathbf{OS}_i = P_X R_Y (90^\circ - \delta_0) R_Z (\alpha_0) \begin{bmatrix} \cos \delta_i \cos \alpha_i \\ \cos \delta_i \sin \alpha_i \\ \sin \delta_i \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -\sin \delta_0 \cos \delta_i \cos (\alpha_i - \alpha_0) + \cos \delta_0 \sin \delta_i \\ \cos \delta_i \sin (\alpha_i - \alpha_0) \\ \cos \delta_0 \cos \delta_i \cos (\alpha_i - \alpha_0) + \sin \delta_0 \sin \delta_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\begin{bmatrix} \cos \delta_i \cos \alpha_i \\ \cos \delta_i \sin \alpha_i \\ \sin \delta_i \end{bmatrix}$ 为天体 S_i 在赤道坐标系中的矢

量;标定位置地理坐标为 (λ, ϕ) ;天顶点 T 的赤经 $\alpha_0 = S_G + \lambda$, 赤纬 $\delta_0 = \phi$; S_G 为观测时刻的格林恒星时角(可由观测时刻的世界时角转换得到)。

由于天体为单位球, $z = \cos \delta_0 \cos \delta_i \cos (\alpha_i - \alpha_0) + \sin \delta_0 \sin \delta_i = 1$, 据此将基准坐标系中的矢量写成规范化形式:

$$\mathbf{OS}_i = \begin{bmatrix} (\cos \delta_0 \sin \delta_i - \sin \delta_0 \cos \delta_i \cos (\alpha_i - \alpha_0)) / \\ (\cos \delta_0 \cos \delta_i \cos (\alpha_i - \alpha_0) + \sin \delta_0 \sin \delta_i) \\ \cos \delta_i \sin (\alpha_i - \alpha_0) / (\sin \delta_0 \sin \delta_i + \\ \cos \delta_0 \cos \delta_i \cos (\alpha_i - \alpha_0)) \end{bmatrix} \quad (2)$$

新系的 X 轴对应于基准坐标系中的 v 轴, Y 轴对应于 μ , 于是得到:

$$\begin{aligned} \mu_i &= \frac{\cos \delta_i \sin (\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_0 \sin \delta_i + \cos \delta_0 \cos \delta_i \cos (\alpha_i - \alpha_0)} \\ v_i &= \frac{\cos \delta_0 \sin \delta_i - \sin \delta_0 \cos \delta_i \cos (\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_0 \sin \delta_i + \cos \delta_0 \cos \delta_i \cos (\alpha_i - \alpha_0)} \end{aligned} \quad (3)$$

由此将赤道坐标转换为以天顶点 (α_0, δ_0) 为原点的平面坐标, 即为基准坐标。

1.1.3 基准坐标到站心像平面坐标的转换

由于光学系统基准面与站心地平坐标系水平面 $X_T T_d Y_T$ 重合, 由此引入站心像平面坐标 $x' o' y'$, $o' x'$ 与 $T_d X_T$ 相对应, $o' y'$ 与 $T_d Y_T$ 相对应。站心像平面坐标 $x' o' y'$ 与基准坐标 $\mu T v$ 的对应关系如图4所示。图4中 C 是光学系统镜头的中心, M 是切点附近的一颗恒星, 其在基准平面上的投影为 N , 以心射切面投影的方式将星体 M 投射到光学系统像平面的投影为 s , 投射到站心像平面的投影为 s' , 由几何关系可知, 三角形 ocs' 和三角形 TCN 相似。通常认为天球为单位球, 天球半径 r 取1, CCD平面的尺寸为 $6.4672 \text{ mm} \times 4.8306 \text{ mm}$, 像素面阵为 768×576 。通过两三角形的相似关系可以将星像基准坐标转换为站心像平面坐标, 即:

$$\begin{aligned} x'_i &= 160 \cdot (\mu_i / 3.2336) \times 384 \\ y'_i &= 160 \cdot (v_i / 2.4153) \times 288 \end{aligned} \quad (4)$$

由此分别得到天体对应的光学系统像平面坐

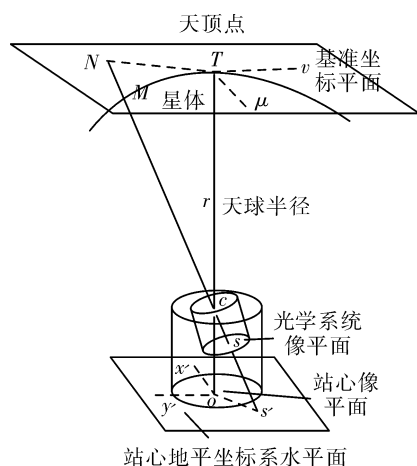


图4 基准坐标与站心像平面坐标

Fig. 4 Reference coordinates and topocentric coordinates
标 (x, y) 和站心像平面坐标 (x', y') ,它们之间的对应偏差反映光学系统与载体坐标系的协调关系^[13-15]。

1.2 标定方程的建立

在光学系统标定所需的量测数据和基准数据都已具备的前提下,可以通过星体像平面坐标与站心像平面坐标之间的关系建立标定方程。

星体像平面坐标与站心像平面坐标之间的偏差包括:像平面坐标系相对站心像平面坐标系原点的平移和旋转;像平面坐标系的两坐标轴未必正交;像平面坐标系与站心像平面坐标系的计量单位不同;甚至像平面坐标系两坐标轴上的单位也未必相同。图5给出上述误差的影响。

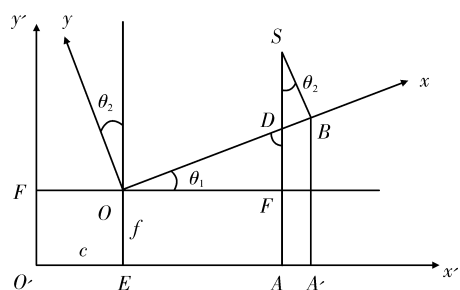


图5 量测数据和基准数据的误差

Fig. 5 Error between measuring data and reference data

对于在像平面坐标系中任一点,在站心像平面坐标系中的表达式为

$$\begin{aligned} x' &= mx \cos \theta_1 - ny \sin \theta_2 + c \\ y' &= mx \sin \theta_1 + ny \cos \theta_2 + f \end{aligned} \quad (5)$$

式中: θ_1 为 x 轴相对 x' 轴的旋转角; θ_2 为 y 轴相对 y' 轴的旋转角; m, n 分别为像平面坐标 x, y 的单位与站心像平面坐标 x', y' 的单位之间的比例; $c,$

f 为像平面坐标系 xoy 相对于站心像平面坐标系 $x'o'y'$ 的平移。引入符号:

$$\begin{aligned} a &= m \cos \theta_1 - 1 & b &= -n \sin \theta_2 \\ d &= m \sin \theta_1 & e &= n \cos \theta_2 - 1 \end{aligned} \quad (6)$$

则有:

$$\begin{aligned} x' - x &= ax + by + c \\ y' - y &= dx + ey + f \end{aligned} \quad (7)$$

(7)式即为光学系统标定的6参数模型,其中 x', y' 可由(8)式求解。考虑光学系统镜头平面倾斜等因素的影响,坐标间的对应关系可以由二次曲面表达。为此构造14参数的光学系统标定模型如下:

$$\begin{aligned} x' - x &= ax + by + c + k_{14}x^2 + k_{15}xy + k_{16}y^2 + \\ & k_{17}x(x^2 + y^2) \\ y' - y &= dx + ey + f + k_{24}x^2 + k_{25}xy + k_{26}y^2 + \\ & k_{27}y(x^2 + y^2) \end{aligned} \quad (8)$$

采用最小二乘法对上式进行求解。为满足方程解算需要提高计算精度,参与标定计算的星体数量至少要14颗,与(7)式相对应,可得结果如下:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= a \tan \left(\frac{d}{1+a} \right) & \theta_2 &= a \tan \left(\frac{-b}{1+e} \right) \\ m &= \frac{d}{\sin \theta_1} = \frac{1+a}{\cos \theta_1} & n &= \frac{-b}{\sin \theta_2} = \frac{1+e}{\cos \theta_2} \end{aligned} \quad (9)$$

2 实例分析

依据上述方法,对所研制的船用星敏感器进行标定,系统组成实物如图6(左侧)所示。传感器由CCD、镜头、控制器、硬盘和公共主板构成,用轻质韧性较好的航空材料固定。在使用过程中,船用星敏感器是以底座为基准面测量的,把传感器放在待测平面上,传感器底座有3个支架,既保证了底座的稳定性,又确定底座平面与待测平面是唯一相同平面。传感器通过拍摄星图输出CCD平面的姿态数据,通过标定使得CCD平面与底座基准面相协调。



图6 船用星敏感器实物图

Fig. 6 Marine star sensor material

具体标定过程:于2011年12月14日19 h 53 m 395 343 ms,在东经121°23′40″,北纬38°31′20″对船用星敏感器进行标定,经计算标定地点此刻的格林时角 $S_G=261^{\circ}13'17''$,所以天顶点的赤道坐标, $\alpha_0=22^{\circ}36'57.5''$, $\delta_0=38^{\circ}31'20.3''$ 。星敏感器获取的星图如图7所示,其中星图星像旁的虚像为标定后星像的实际位置,图8为星像识别标示图。



图7 标定星图

Fig. 7 Star image used for calibration

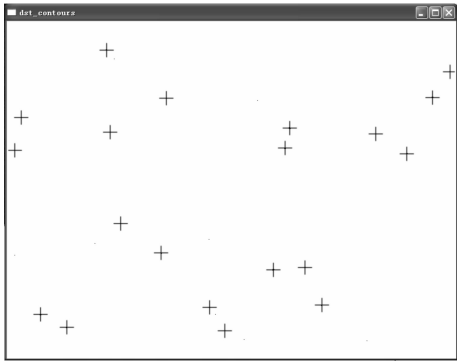


图8 星像识别标示图

Fig. 8 Labeled graph of star image identification

利用上述标定模型,计算系统整体标定参数如下:

$a=145.393\ 138\ 860\ 119\ 170$

$b=209.870\ 119\ 791\ 020\ 730$

$c=-1.993\ 554\ 530\ 115\ 139$

$d=0.056\ 470\ 972\ 606\ 988$

$e=0.056\ 707\ 150\ 294\ 171$

$f=-0.000\ 751\ 652\ 930\ 937$

$k_{14}=0.000\ 000\ 113\ 653\ 207$

$k_{15}=0.000\ 000\ 038\ 131\ 996$

$k_{16}=-0.000\ 001\ 842\ 980\ 460$

$k_{17}=0.000\ 000\ 598\ 992\ 783$

$k_{24}=0.000\ 002\ 268\ 707\ 459$

$k_{25}=-0.000\ 000\ 067\ 048\ 319$

$k_{26}=-0.000\ 000\ 001\ 579\ 357$

$k_{27}=0.000\ 000\ 009\ 175\ 466$

为检验标定精度,采用以上求得的参数,通过标定计算求取各星像的赤道坐标(α_i^B,δ_i^B),与实际的天体赤道坐标(α_i,δ_i)相减得到标定误差($\Delta\alpha,\Delta\delta$),所得结果列于表1和表2。

表1 星像赤道标定误差

Table 1 Calibration error of star image right ascension

| 序号 | $\alpha_i^B/(^{\circ})$ | $\alpha_i/(^{\circ})$ | $\Delta\alpha/(^{\prime\prime})$ |
|----|-------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 1 | 24.210 00 | 24.210 71 | -2.6 |
| 2 | 24.383 88 | 24.383 59 | 1.1 |
| 3 | 22.541 80 | 22.542 77 | -3.5 |
| 4 | 22.860 18 | 22.859 63 | 2.0 |
| 5 | 22.652 48 | 22.652 36 | 0.4 |
| 6 | 23.600 60 | 23.599 44 | 4.2 |
| 7 | 21.980 49 | 21.981 37 | -3.2 |
| 8 | 24.583 90 | 24.582 69 | 4.4 |
| 9 | 22.789 10 | 22.788 32 | 2.8 |
| 10 | 22.760 98 | 22.760 31 | 2.4 |
| 11 | 23.582 86 | 23.582 51 | 1.3 |
| 12 | 21.809 64 | 21.809 73 | -0.3 |
| 13 | 23.986 31 | 23.985 37 | 3.4 |
| 14 | 22.246 18 | 22.246 35 | -0.6 |
| 15 | 23.175 11 | 23.174 97 | 0.5 |
| 16 | 23.275 76 | 23.275 31 | 1.6 |
| 17 | 21.977 27 | 21.976 79 | 1.7 |
| 18 | 24.564 84 | 24.564 89 | -0.2 |
| 19 | 23.872 02 | 23.873 19 | -4.2 |
| 20 | 22.185 31 | 22.185 76 | -1.6 |

表2 星像赤纬标定误差

Table 2 Calibration error of star image declination

| 序号 | $\delta_i^B/(^{\circ})$ | $\delta_i/(^{\circ})$ | $\Delta\delta/(^{\prime\prime})$ |
|----|-------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 1 | 38.452 70 | 38.453 35 | 2.3 |
| 2 | 38.516 10 | 38.516 19 | 0.4 |
| 3 | 38.585 63 | 38.585 47 | -0.6 |
| 4 | 38.766 47 | 38.767 12 | 2.4 |
| 5 | 38.779 29 | 38.779 39 | 0.4 |
| 6 | 38.845 73 | 38.845 73 | 0.0 |
| 7 | 39.365 11 | 39.364 29 | -0.3 |

续表 2

| 序号 | $\delta_i^B / (^\circ)$ | $\delta_i / (^\circ)$ | $\Delta\delta / (")$ |
|----|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| 8 | 39.354 65 | 39.354 88 | 0.8 |
| 9 | 39.390 39 | 39.390 26 | -0.5 |
| 10 | 39.494 27 | 39.494 61 | 1.2 |
| 11 | 39.639 24 | 39.639 54 | 1.1 |
| 12 | 39.653 56 | 39.654 36 | 2.9 |
| 13 | 39.881 36 | 39.881 72 | 1.3 |
| 14 | 38.403 93 | 38.403 42 | -1.8 |
| 15 | 38.450 90 | 38.450 22 | -2.4 |
| 16 | 38.570 64 | 38.570 57 | -0.3 |
| 17 | 38.680 75 | 38.681 69 | 3.4 |
| 18 | 38.817 94 | 38.817 22 | -2.6 |
| 19 | 38.992 96 | 38.993 10 | 0.5 |
| 20 | 39.466 06 | 39.465 32 | -2.7 |

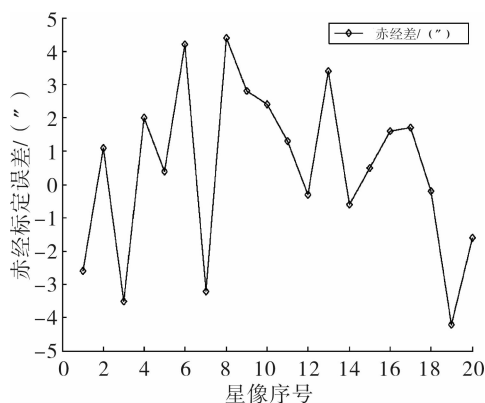


图9 赤经标定误差

Fig.9 Calibration error of star image right ascension

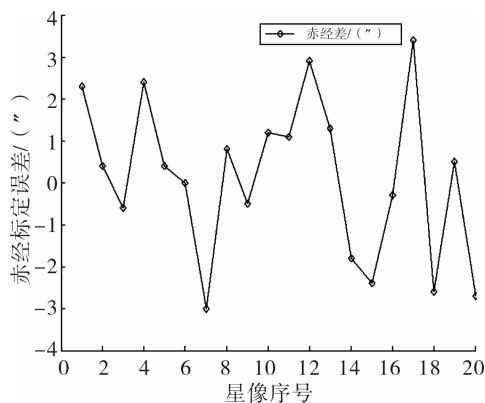


图10 赤纬标定误差

Fig.10 Calibration error of star image declination

由图9和图10可知, $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\delta$ 分别为标定计算得到的星像对应天体的赤经和赤纬与基准数据

之间的差值,其中赤经最大差值为 $4.4''$,平均差值为 $2.1''$,赤纬最大差值为 $3.4''$,平均差值为 $1.5''$,赤经标定均方差为 $1.5''$,赤纬标定均方差为 $1.1''$ 。

3 结论

本文提出了一种光学系统与载体坐标系相统一的标定方法,详细提供了标定方法的步骤和数学模型,为系统应用奠定基础。实验结果表明,标定精度可达到角秒量级,该方法也可应用到任何开放天区下的光学仪器设备标定之中,为光学测量系统解决实际问题提供了新思路。

参考文献:

- [1] 孙高飞,张国玉,郑茹,等.星敏感器标定方法的研究现状与发展趋势[J].长春理工大学学报:自然科学版,2010,33(4):9-14.
SUN Gao-fei, ZHANG Guo-yu, ZHENG Ru, et al. Star sensor calibration research and development[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 33(4): 9-14. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 王安国,王华斌,唐君,等.基于星图自动辨识的光学系统精确标定方法[J].电子学报,2011,39(3):575-578.
WANG An-guo, WANG Hua-bin, TANG Jun, et al. An accurate calibrating method of optical system based on the automatic identification of star map[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3): 575-578. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 苏超.捷联式天文航姿测量技术研究[D].大连:海军大连舰艇学院,2009.
SU Chao. Research of the trap-down astronomical attitude measure techniques[D]. Dalian: Dalian Navel Academy, 2009. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 唐君,王安国,张磊.高精度姿态测量技术静态检验方法[J].交通运输工程学报,2011,11(5):115-119
TANG Jun, WANG An-guo, ZHANG Lei. Static test method in the technology of high-precision attitude measurement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(5): 115-119. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 王安国.船用恒星视位置高精度计算[J].交通运输工程学报,2004,4(4):117-120.
WANG An-guo. Precise apparent position calculation of star in navigation[J]. Journal of Traffic and

- Transportation Engineering, 2004, 4(4): 117-120. (in Chinese with an English abstract)
- [6] WANG An-guo. A three-dimensional fixing method based on the measurement of angles between references[J]. Chinese Journal of Electronics, 2007, 16(4):165-170.
- [7] WANG An-guo, LI Hui, WANG Yan, et al A principle of astronomical three-dimensional position fixing based on single baseline radio interferometry[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(1): 183-186.
- [8] SAMAN M A. Toward faster and more accurate star sensors using recursive centroiding and star identification[D]. America: Texas A & M University, 2003.
- [9] 张辉, 田宏, 袁家虎, 等. 星敏感器参数标定及误差补偿[J]. 光电工程, 2005, 32(9):1-4.
ZHANG Hui, TIAN Hong, YUAN Jia-hu, et al. Parameter calibration and error compensation of star sensor[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(9):1-4. (in Chinese with an English abstract)
- [10] 李立宏, 曹泉, 张福恩, 等. 基于 CCD 星跟踪器的飞行器姿态估计算法研究[J]. 光电工程, 2000, 27(1): 20-24.
LI Li-hong, CAO Quan, ZHANG Fu-en, et al. Research of spacecraft attitude estimation algorithm based on CCD star tracker[J]. Opto-Electronic Engineering, 2000, 27(1):20-24. (in Chinese with an English abstract)
- [11] 李春艳, 李怀锋, 孙才红. 高精度星敏感器天文标定方法及观测分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 558-563.
- LI Chun-yan, LI Huai-feng, SUN Cai-hong. Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4):558-563. (in Chinese with an English abstract)
- [12] 王岩. 一种星敏感器与捷联惯导高精度安装误差标定方法[J]. 战术导弹控制技术, 2009, 26(3):17-20.
WANG Yan. A high accuracy calibration method of the installation error between SINS and star sensor[J]. Control Technology of Tactical Missile, 2009, 26(3):17-20. (in Chinese with an English abstract)
- [13] 钟红军, 杨孟飞, 卢欣. 星敏感器标定方法研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5):1343-1348.
ZHONG Hong-jun, YANG Meng-fei, LU Xin. Calibration method of star sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5):1343-1348. (in Chinese with an English abstract)
- [14] 郝雪涛, 张广军, 江洁. 星敏感器模型参数分析与校准方法研究[J]. 光电工程, 2005, 32(3): 5-8.
HAO Xue-tao, ZHANG Guang-jun, JIANG Jie. Star sensor model parameter analysis and calibration method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(3): 5-8. (in Chinese with an English abstract)
- [15] 段发阶, 胡亮. 基于参考像平面的 CCD 摄像机标定新技术[J]. 传感技术学报, 2006, 19(1):166-169.
DUAN Fa-jie, HU Liang. A new camera parameter calibration technology using reference image plane method[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(1):166-169. (in Chinese with an English abstract)