

## 基于三轴转台的多视场星敏感器标定方法

熊 琨, 王春喜, 吴 跃, 王锴磊, 姜云翔

(北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076)

**摘 要:** 提出了一种基于三轴转台的多视场星敏感器标定方法。该方法利用转台的 3 个旋转自由度, 无需重新安装即可对任意轴向的视场进行标定数据采集。通过对于测量模型、结构参数模型及外参数模型的建模及优化整合得到实验室标定模型。使用 Levenberg-Marquardt 非线性最小二乘法求解各视场的测量模型参数和各视场间的结构模型参数。该方法无需通过外场观星数据确定结构模型参数, 大大节省了标定数据采集的工作量, 也避免了大气对恒星矢量的影响引入的参数估计误差。通过一台数字三视场星敏感器的仿真试验和一台双视场星敏感器样机的实际试验验证了该方法的有效性。与基于外场观测的传统方法相比, 视场内星间平均角距误差减小了 20.32%, 视场间星间角距平均误差减小了 59.34%。

**关键词:** 星敏感器; 标定; 多视场; 结构模型

**中图分类号:** V448.22    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0417002

## Calibration method for multiple FOV star sensors based on three-axis turntable

Xiong Kun, Wang Chunxi, Wu Yue, Wang Kailei, Jiang Yunxiang

(Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** A novel calibration method for multiple FOV star sensors based on three axis turntable was proposed. The method mainly took advantages of the turntable's three rotational freedom degrees to calibrate FOVs of arbitrary directions without reinstalling the sensor. Modeling for laboratory calibration was achieved through optimizing and trimming of the observation model, the structure model and the external parameter model. The observation model parameters of each FOV and the structure model parameters among distinct FOVs were solved by the Levenberg-Marquardt nonlinear least square algorithm. Without the need of outfield star observation in the calibration process of structure model parameters, huge amount of data sampling work load was saved, hence, the estimation error caused by the atmosphere refraction and disturbance phenomena was avoided. The validity of the method was demonstrated by the simulation of a triple FOV digital star sensor and the real experiment of a dual FOV star sensor. Compared to the conventional method that utilizes outfield star observation data, the average angle distance error within single FOV reduces by 20.32%, and the average angle distance error between FOVs reduces by 59.34%.

**Key words:** star sensor; calibration; multiple FOV; structure model

收稿日期: 2018-11-19; 修订日期: 2018-12-21

作者简介: 熊琨(1987-), 男, 工程师, 博士, 主要从事光学瞄准定向方面的研究。Email: xiongekun8748@163.com

## 0 引言

受测量原理限制,单视场星敏感器<sup>[1]</sup>绕光轴的姿态误差远远大于其他两个轴向<sup>[2]</sup>。多视场星敏感器通过不同轴向视场内恒星的融合解算,可实现三轴等精度测量输出。

多视场星敏感器的标定比单视场星敏感器更加复杂。除需确定各个视场测量模型的参数外,还需要确定各视场测量参考系相互转换的结构模型参数。目前普遍采用两步法对上述参数标定:先在实验室利用转台和单星模拟器标定出各个视场的测量模型参数<sup>[3-6]</sup>;然后各视场分别对外场不同天区进行观测。利用各视场单独测得姿态信息或是不同视场星点间的角距信息对于结构模型参数进行求解<sup>[7-8]</sup>。然而,由于大气蒙气差效应及湍流现象<sup>[9-10]</sup>以及恒星自行补偿残差等因素的影响,结构模型参数的估计偏差较大。

文中针对上述情况,提出了一种可在实验室条件下对测量模型参数和结构模型参数同步估计的多视场星敏感器标定方法。方法利用高精度三轴转台发生角度采集数据;在测量模型、结构模型和外参数模型的基础上得到综合标定模型;最终利用两次非线性优化算法进行解算。该方法无需外场观测数据采集,能够准确估计多视场星敏感器各项模型。

## 1 实验室标定建模

针对多视场星敏感器实验室标定的建模包括:

- (1) 在各视场测量坐标系下描述星点质心位置与入射星光矢量关系的单视场测量模型;
- (2) 将各视场测量坐标系转换至统一的坐标系下的结构模型;
- (3) 描述模拟单星矢量和星敏感器安装误差的外参数模型。

### 1.1 单视场测量模型

如图 1 所示,以星敏感器第 1 视场为例,理想的测量模型为小孔成像模型。以镜头光心为原点建立星敏感器测量坐标系  $O_{s1}-X_{s1}Y_{s1}Z_{s1}$ , 则星光矢量  $v$  与星点成像位置  $P$  之间的关系为:

$$\begin{cases} x_r = -f \cdot v(1)/v(3) \\ y_r = -f \cdot v(2)/v(3) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f$ 为镜头的焦距。为提高测量模型描述精确度,引入主点及畸变模型:

$$\begin{cases} x = x_r + x_0 + gx \\ y = y_r + y_0 + gy \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} gx = x_r[q_1(x_r^2 + y_r^2) + q_2(x_r^2 + y_r^2)^2] + [p_1(3x_r^2 + y_r^2) + 2p_2x_r y_r] \\ gy = y_r[q_1(x_r^2 + y_r^2) + q_2(x_r^2 + y_r^2)^2] + [2p_1x_r y_r + p_2(3x_r^2 + y_r^2)] \end{cases} \quad (3)$$

式中: $(x_0, y_0)$ 为主点坐标; $q_1, q_2$ 为 1 阶和 2 阶径向畸变系数; $p_1$ 和  $p_2$ 为切向畸变系数。

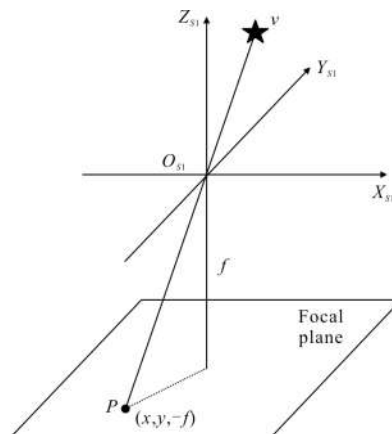


图 1 单视场测量模型示意图

Fig.1 Diagram of single FOV measurement model

### 1.2 多视场结构模型

多视场星敏感器各视场的视轴一般是旋转对称的。如图 2 所示是一个三视场星敏感器,不妨以旋转

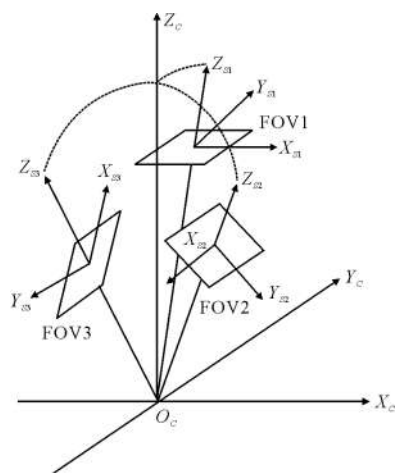


图 2 多视场结构模型示意图

Fig.2 Diagram of multiple FOV structure model

中心为基准建立星敏中心坐标系  $O_c-X_cY_cZ_c$ ,各视场测量坐标系记作  $O_{s_i}-X_{s_i}Y_{s_i}Z_{s_i}(i=1,2,3)$ 。在进行姿态融合解算时,需要将视场 2,3 的观测结果转换至视场 1 的测量坐标系下。视场 2 至视场 1 的转换矩阵

$M_{S_2}^{S_1}$  为:

$$M_{S_2}^{S_1} = M_C^{S_1} \cdot (M_C^{S_2})^T \quad (4)$$

式中:  $M_C^{S_i}(\theta_{x_i}, \theta_{y_i}, \theta_{z_i})$  为星敏中心坐标系到第  $i$  视场测量坐标系的转换矩阵。视场 3 至视场 1 的转换矩阵  $M_{S_3}^{S_1}$  与之类似。

### 1.3 外参数模型

如图 3 所示, 该标定方法的设备包括单星模拟器和高精度三轴转台。在转台的回转中心建立转台零位坐标系  $O_T-X_T Y_T Z_T$ , 转台的 3 个旋转轴与坐标轴相对称并满足右手定则。此外, 记发生角度后的转台实时坐标系为  $O_T'-X_T' Y_T' Z_T'$ 。

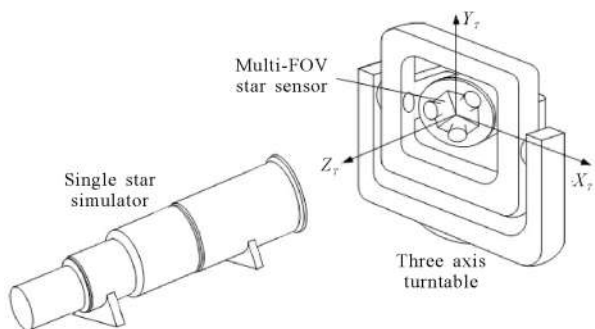


图 3 实验室标定设备

Fig.3 Laboratory calibration equipment

使用方位角  $\alpha$  与倾斜角  $\beta$  描述转台零位坐标系下的单星模拟器的星光矢量  $v$ :

$$v = [\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) \quad \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) \quad \sin(\beta)]^T \quad (5)$$

星敏传感器安装在转台台面上, 存在一定的安装误差。安装误差矩阵  $M_T^C(\phi_x, \phi_y, \phi_z)$  表示转台零位坐标系至星敏传感器中心坐标系的转换关系。

## 2 实验室标定方法及建模

该标定方法使用高精度三轴转台作为角度发生装置, 其 3 个旋转自由度在不改变星敏传感器安装方式的条件下即可对任意轴向视场进行数据采集。对于视轴满足轴对称分布的多视场星敏传感器而言, 转台的两个轴用于不同单星矢量的产生; 第 3 个轴用于标定视场的切换。

### 2.1 标定模型

如图 4 所示, 结合单视场测量模型、多视场结构

模型和外参数模型可以得出多视场星敏传感器实验室标定的总模型。利用数据采集过程中单星模拟器、高精度转台及星敏传感器的安装保持不变的性质, 现对标定模型进行简化。

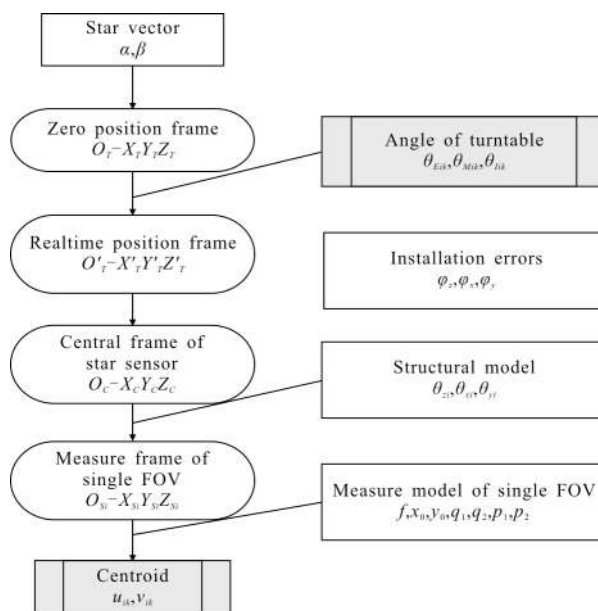


图 4 多视场星敏传感器标定模型

Fig.4 Calibration model of multiple FOV star sensors

转台实时坐标系经过安装误差矩阵和结构模型矩阵 2 次转换得到星敏测量坐标系。由于星敏传感器的安装方式始终保持不变, 各视场的安装误差  $M_T^C$  是相同的。将各视场结构模型旋转矩阵  $M_C^{S_i}$  分别与安装误差旋转矩阵  $M_T^C$  合并为结构-安装误差旋转矩阵  $M_T^{S_i}(\varphi_{x_i}, \varphi_{y_i}, \varphi_{z_i})$ 。

$$M_T^{S_i} = M_C^{S_i} \cdot M_T^C \quad (6)$$

则视场  $k$  至视场 1 的结构模型为:

$$M_{S_k}^{S_1} = M_T^{S_1} \cdot (M_T^{S_k})^T \quad (7)$$

由于单星模拟器的位置保持不变, 各视场标定中的星矢量方位角  $\alpha$  与倾斜角  $\beta$  相同。在不经设备准直的标定中, 待解算的各模型参数间存在着耦合现象: 即由于采集数据中的误差将导致模型参数的估计产生偏差。通过保持部分模型参数不变进行多次标定的方式可有效地抑制耦合。该标定模型中各视场的标定可视为外参数模型不变的多次标定, 模型各参数的估计精度将得到提升。

## 2.2 标定步骤

该方法包括数据采集、针孔模型标定、完整模型标定 3 个步骤。在数据采集阶段,滚转轴将各视场轮流转至单星模拟器入射范围内进行标定。另外两个轴发生一系列角度轨迹使得星点在视场不同位置处成像。如图 5 所示,标定轨迹点一般等间隔地布满各视场,且形成“之”字型。为尽量减小质心定位误差给参数估计带来的影响,可在各标定点处进行多次质心平均。

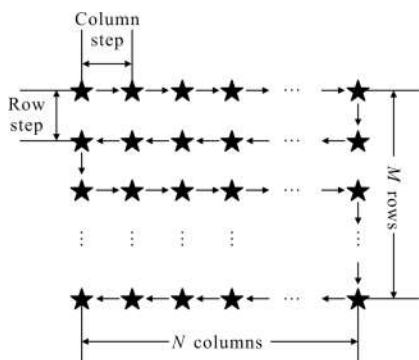


图 5 典型标定轨迹

Fig.5 Typical calibration track

数据采集得到各标定点处转台发生角度 $(\theta_{Eik}, \theta_{Mik}, \theta_{Ik})$ 与星点质心平均位置 $(u_{ik}, v_{ik})$ 之间的对应关系。应用 Levenberg-Marquardt 非线性最小二乘法对标定模型参数进行估计。各模型参数初始值与真值一般相差较大,为提升优化收敛能力,分针孔标定模型和完整标定模型两步进行参数求解。

记星光矢量为  $x_{star}=(\alpha, \beta)^T$ , 第  $i$  个视场的结构-安装误差参数为  $x_{ei}=(\varphi_{zi}, \varphi_{xi}, \varphi_{yi})^T$ , 针孔参数为  $x_{pi}=(f_i, x_{0i}, y_{0i})^T$ , 该视场采集的第  $k$  个星点位置记作  $(u_{ik}, v_{ik})^T$ 。记针孔标定模型下星敏感器的成像过程为  $F_{pi}$  和  $F_{pv}$ , 则:

$$\begin{pmatrix} \hat{u}_{1k} \\ \hat{v}_{1k} \\ \vdots \\ \hat{u}_{Nk} \\ \hat{v}_{Nk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{pi}(\hat{x}_{star}, \hat{x}_{e1}, \hat{x}_{p1}, \theta_{E1k}, \theta_{M1k}, \theta_{1k}) \\ F_{pv}(\hat{x}_{star}, \hat{x}_{e1}, \hat{x}_{p1}, \theta_{E1k}, \theta_{M1k}, \theta_{1k}) \\ \vdots \\ F_{pi}(\hat{x}_{star}, \hat{x}_{eN}, \hat{x}_{pN}, \theta_{ENk}, \theta_{MNk}, \theta_{Nk}) \\ F_{pv}(\hat{x}_{star}, \hat{x}_{eN}, \hat{x}_{pN}, \theta_{ENk}, \theta_{MNk}, \theta_{Nk}) \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中: ^ 号表示模型参数和质心位置的估计值。针孔模型的优化目标函数为:

$$\min_{x \in R^{200}} \sum_{k=1}^K \| (u_{1k}, v_{1k}, \dots, u_{Nk}, v_{Nk}) - (\hat{u}_{1k}, \hat{v}_{1k}, \dots, \hat{u}_{Nk}, \hat{v}_{Nk}) \|^2 \quad (9)$$

在针孔标定模型收敛的基础上,将星光矢量、结构-安装误差参数和针孔参数的估计值作为完整标定模型的初始值进行第 2 步优化。完整标定模型将引入各视场测量模型的畸变参数。

## 2.3 标定结果评价

由于模型参数真值难以准确获知,需要采用间接的评价方式。实验室标定设备可准确发生入射角度,由此得到准确的星间角距基准。在质心定位误差水平一定的情况下,由于质心求得的角距误差只与标定模型的准确性相关,故角距误差可作为标定结果的评价指标。

(1) 单一视场内星间角距平均估计误差,用于间接表征测量模型参数估计的准确程度。

$$\Delta \bar{\theta}_k = \sqrt{\frac{2}{M(M+1)} \sum_{i=2}^M \sum_{j=1}^{i-1} (\theta(\hat{v}_{ik}, \hat{v}_{jk}) - \theta_{ij})^2} \quad (10)$$

式中:  $M$  为  $k$  视场内测试星点总数;  $\theta_{ij}$  为任两个星点间角距的真实值;  $\theta(\hat{v}_{ik}, \hat{v}_{jk})$  为通过标定模型参数计算得到的角距值。

(2) 视场间星间角距平均估计误差,用于间接表征视场间结构参数估计的准确程度。

$$\Delta \bar{\theta}_{jk} = \sqrt{\frac{2}{M_j M_k} \sum_{i=1}^{M_j} \sum_{l=1}^{M_k} (\theta(\hat{v}_{ij}, \hat{v}_{lk}) - \theta_{il})^2} \quad (11)$$

式中:  $M_j$  和  $M_k$  分别为视场  $j$  和视场  $k$  内测试星点总数;  $\theta_{il}$  为任两个星点间角距的真实值;  $\theta(\hat{v}_{ij}, \hat{v}_{lk})$  为通过标定模型参数计算得到的角距值。

## 3 仿真试验

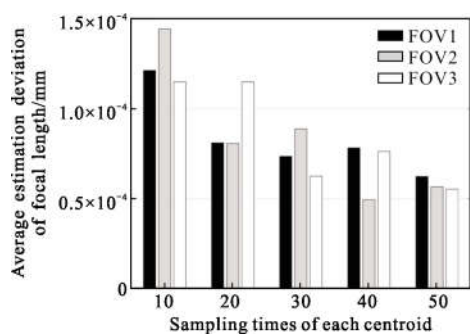
建立一个三视场数字星敏感器验证文中方法的有效性: 三个视场指向方位角互成  $120^\circ$ , 倾角  $30^\circ$ 。各视场均为  $10^\circ \times 10^\circ$ , 探测器面阵为  $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ , 像元尺寸  $5.5 \mu\text{m}$ , 且假定星敏感器质心定位亚像素误差  $\sigma_{cen} = 0.05 \text{ pixel}$ 。试验共重复进行 100 组, 单标定点采集质心数量 10、20、30、40、50 次各进行了 20 组。标定轨迹是  $-4^\circ \sim 4^\circ$ 、步进量  $0.25^\circ$  的正方形点阵。星敏感器质心定位亚像素误差。表 1 为各视场测量模型参数、结构欧拉角参数及外参数的真值。仿真在 Matlab R2015a 软件中进行, 硬件 CPU 为 8 核处理器 i5-8200, 内存 8 Gb。

表 1 仿真参数真值

Tab.1 True values of the parameters in simulation

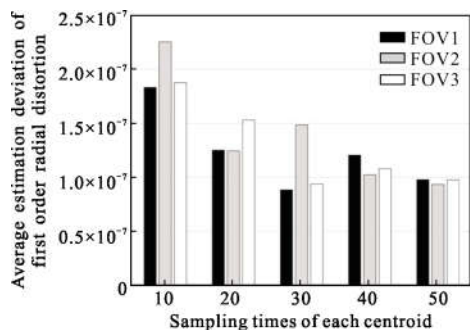
Parameter	FOV1	FOV2	FOV3
Focal length/mm	64.43	64.38	64.51
Principal point/pixel	(1 014,1 005)	(1 035,999)	(997,1 015)
Radial distortion	$-1.35 \times 10^{-5}$	$-1.56 \times 10^{-5}$	$-1.43 \times 10^{-5}$
$q_1, q_2$	$2.15 \times 10^{-7}$	$2.07 \times 10^{-7}$	$1.96 \times 10^{-5}$
Tangential distortion	$3.85 \times 10^{-5}$	$-2.15 \times 10^{-5}$	$9.37 \times 10^{-6}$
$p_1, p_2$	$1.10 \times 10^{-5}$	$8.84 \times 10^{-6}$	$1.39 \times 10^{-5}$
Yaw angle $\theta_y/(\circ)$	0.24	119.86	240.11
Pitch angle $\theta_x/(\circ)$	-29.95	-30.13	-30.01
Roll angle $\theta_z/(\circ)$	0.03	0.08	-0.17
Angle $\alpha/(\circ)$		73.2	
Angle $\beta/(\circ)$		89.7	
Angle $\varphi_x/(\circ)$		0.16	
Angle $\varphi_y/(\circ)$		-0.12	
Angle $\varphi_z/(\circ)$		0.17	

测量模型参数估计偏差的统计结果如图 6 所示。各参数估计准确度随着标定点质心采集次数的



(a) 焦距平均估计偏差

(a) Average estimation error of focal length



(b) 一阶径向畸变平均估计偏差

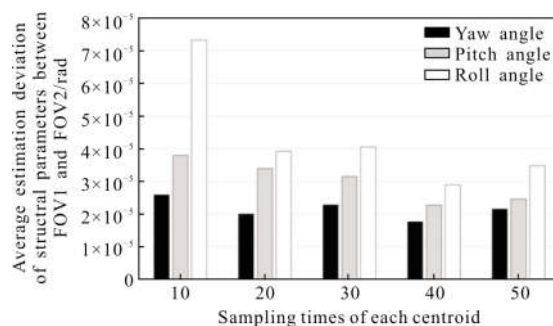
(b) Average estimation error of first order radial distortion

图 6 测量模型参数估计误差与表达点质心采集次数的关系

Fig.6 Estimation errors of observation model parameters with respect to centroid sampling counts

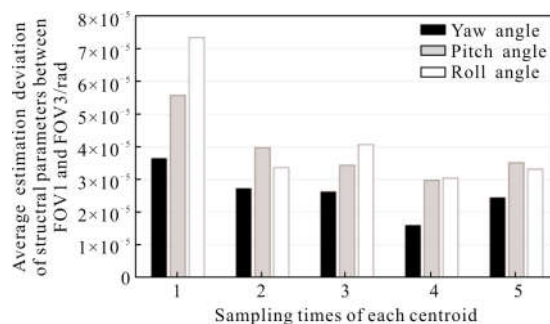
增加而提高。在当前幅度的质心定位亚像素误差水平下,单点质心采集次数在 30 次已基本达到最优的效果;焦距的估计偏差优于  $0.1 \mu\text{m}$ ;一阶径向畸变系数的估计偏差优于  $1.5 \times 10^{-7}$ 。

如图 7 所示,以欧拉角的形式分别列出了视场 2 至视场 1 及视场 3 至视场 1 的结构模型参数估计偏差。在标定点采样次数较少时,滚转角的估计偏差要明显大于偏航角和俯仰角,这是星敏感器绕视轴方向固有的精度缺陷所导致的。在当前幅度的质心定位亚像素误差水平下,单点质心采集次数在 20 次已基本达到最优的效果,各欧拉角均小于  $4 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 。



(a) 视场 2 至视场 1 结构参数平均估计偏差

(a) Average estimation error of structure model parameters between FOV2 and FOV1



(b) 视场 3 至视场 1 结构参数估计偏差

(b) Average estimation error of structure model parameters between FOV3 and FOV1

图 7 结构参数估计误差与标定点质心采集次数的关系

Fig.7 Estimation errors of structure model parameters with respect to centroid sampling counts

#### 4 样机标定试验

将该方法应用于某地面校准用双视场星敏感器进行实验室标定。该星敏感器成像传感器阵列为  $2\ 048 \times 2\ 048$ , 像元尺寸  $5.52 \mu\text{m}$ ; 光学镜头设计焦距

64.4 mm; 双视场视轴指向相差 180°, 与天顶倾角 50°。经过针孔模型标定、完整模型标定后, 求得的各项参数如表 2 所示。

表 2 星敏传感器双视场标定结果

Tab.2 Calibration result of a dual-FOV star sensor

Calibration parameter	FOV1	FOV2
Focal length/mm	64.542 6	64.515 6
Principal point/pixel	(994.3,1 001.1)	(1 004.9,1 008.0)
Radial distortion $q_1, q_2$	$-8.568 4 \times 10^{-6}$ $1.007 4 \times 10^{-7}$	$-1.213 8 \times 10^{-5}$ $1.091 4 \times 10^{-7}$
Tangential distortion $p_1, p_2$	$-4.013 0 \times 10^{-5}$ $1.622 5 \times 10^{-5}$	$-2.143 4 \times 10^{-5}$ $2.8171 \times 10^{-5}$
Structural model matrix	$\begin{bmatrix} -0.999 8 & -0.019 2 & 0.000 9 \\ -0.002 3 & 0.164 1 & 0.986 4 \\ -0.019 0 & 0.986 3 & -0.164 1 \end{bmatrix}$	

利用外场观星的传统方法亦得到双视场间的转换矩阵, 利用 2.3 节的星间角距间接评价, 对两种标定方法得到的模型参数进行比较, 结果如表 3 所示。文中方法的视场内平均角距误差较传统方法减少 23.32% 以上; 视场间平均角距误差较传统方法减少 59.34%。

表 3 文中方法与传统方法星间角距测试比较

Tab.3 Angle distance bias comparison between novel method and conventional method

Mean angle distance bias	New method	Conventional method
Single FOV/rad	$1.051 4 \times 10^{-5}$	$1.371 2 \times 10^{-5}$
Between 2 FOVs/rad	$2.009 4 \times 10^{-5}$	$4.941 6 \times 10^{-5}$

## 5 结 论

文中提出了一种多视场星敏传感器标定方法。该方法使用高精度三轴转台作为角度发生装置, 其 3 个旋转自由度在不改变星敏传感器安装方式的条件下即可对任意轴向视场进行数据采集。各视场数据采集过程中星敏传感器的安装误差保持不变使得结构模型外参数与模型中的安装误差得以分离而准确求出。同时, 多视场重复数据采集过程中外参数保持不

变减小了参数耦合现象的发生, 也使得测量模型参数估计更为准确。该方法在实验室中即可完成, 省去了传统方法外场观测的工作量, 避免了大气蒙气差及湍流对标定结果带来的影响。

## 参考文献:

- [1] Jørgensen J L, Liebe C C. The advanced stellar compass, development and operations [J]. *Acta Astronautica*, 1996, 39 (9-12): 775-783.
- [2] Liebe C C. Accuracy performance of star trackers—a tutorial [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587-599.
- [3] Qiao Peiyu, He Xin, Wei Zhonghui, et al. Calibration of high-accuracy star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2779-2784. (in Chinese)
- [4] Liu Yu, Dai Dongkai, Fu Sihua, et al. Research on the calibration errors of star sensor intrinsic parameters[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2017, 15(6): 77-83. (in Chinese)
- [5] Zhang Yao, Wang Hongli, Lu Jinghui, et al. Calibration method of optical errors for star sensor based on particle swarm optimization algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1017002. (in Chinese)
- [6] Tan Di, Zhang Xin, Wu Yanxiong, et al. Analysis of effect of optical aberration on star centroid location error [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0217004. (in Chinese)
- [7] Guo Jingming, Zhao Jinyu, He Xin, et al. Calibration of installation angle for high accuracy shipboard star sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(3): 609-615. (in Chinese)
- [8] Jiao Hongwei, Guo Jingming, Su Xuwei, et al. A dynamic installation matrix calibration method of ship-borne star sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(6): 7-12, 18. (in Chinese)
- [9] Wang Hongli, He Yiyang, Lu Jinghui, et al. Ground calibration method of installation error for star sensor based on three positions method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1113003. (in Chinese)
- [10] Tang Jun, Li Wei, Xu Xuanbin. New method of star sensor's calibration and leading building [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1610-1615. (in Chinese)