

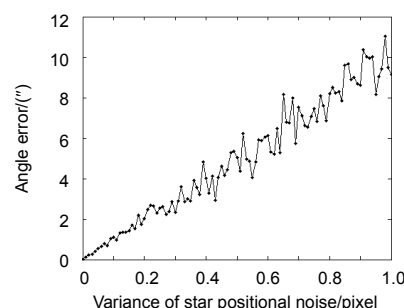


# 大视场星敏感器矢量观测在轨检校模型

袁晓波<sup>1,2</sup>, 张超<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>信息工程大学导航与空天目标工程学院, 郑州 450001;

<sup>2</sup>北斗导航应用技术河南省协同创新中心, 郑州 450001



**摘要:** 针对大视场星敏感器的在轨标定问题, 提出了一种基于矢量观测的检校新模型。将 3 个罗德里格参数代替欧拉角, 作为外方位参数与畸变参数、内方位参数一起求解, 简化了运算。采用仿真星图分析了模型的性能, 结果表明, 该模型较采用欧拉角的传统标定模型精度更高, 在星点位置噪声方差为 0.05 pixels 的情况下, 仍能准确解算出星敏感器参数, 其星内角距的统计偏差为 0.483",  $x$ 、 $y$  方向的残差绝对均值分别为 0.019 pixels、0.016 pixels, 且算法的参数设置简单, 无需计算初值。将检校模型应用于 ZY-3 号卫星星敏感器的检校, 结果表明模型可以有效提高检校的精度。建议在实际应用中采用精度更高的星点中心计算算法。

**关键词:** 在轨标定; 大视场星敏感器; 矢量观测; 罗德里格参数; 欧拉角

中图分类号: V448.2

文献标志码: A

## An on-orbit calibration model for wide field of view star sensor based on the vector observations

Xiaobo Yuan<sup>1,2</sup> and Chao Zhang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Navigation & Aerospace, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China; <sup>2</sup>Beidou Navigation Technology Collaborative Center of Henan, Zhengzhou 450001, China

**Abstract:** Focused on the on-orbit calibration problem of the wide field of view star sensor, a novel calibration model based on vector observations is proposed. The model uses 3 Rodrigues parameters, instead of Euler angles, as the exterior parameters to simplify the calculation, and complete the joint solution with intrinsic parameters and third order distortion parameters. Simulation shows that it has a higher accuracy than the traditional model with Euler angles. In case of a standard deviation of 0.05 pixels star point error, the model can still accurately calculate the camera parameters and the angle error after calibration is 0.483 arcsecond, and the mean residual errors are 0.019 pixels in  $x$  direction and 0.016 pixels in  $y$  direction. Furthermore, the initial parameters are simpler and there is no need to set initial values. Its accuracy is further verified by actual star maps of ZY-3 satellite, and result shows that it can improve the calibration accuracy largely. To further improve the calibration accuracy, higher precision centroid algorithm is recommended in actual applications.

**Keywords:** calibration; wide field of view star sensor; vector observations; Rodrigues parameters; Euler angles

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.05.005

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(5): 505–510

收稿日期: 2017-02-24; 收到修改稿日期: 2017-04-04

\*E-mail: zhangchao1973@163.com

## 1 引言

星敏感器在航天飞行器的姿态测量和控制系统中起着重要的作用,是最精密的姿态测量部件<sup>[1]</sup>。其原理是利用匹配星对信息解算出星敏感器视轴在天体空间的瞬时指向,从而确定空间飞行器的姿态<sup>[2]</sup>。随着人类空间活动的不断拓展和延伸,对星敏感器的姿态测量精度提出了越来越高的要求,提高星敏感器相关模型和算法的精度成为星敏感器研究中的重点内容。

星敏感器的精密检校是实现精密姿态确定的重要前提,国内外学者对此进行了大量研究。1981年,Shuster等率先对姿态敏感器准直误差进行了在轨标定<sup>[3]</sup>,突破了以往依赖发射前的数据结果;2001年,Ju提出基于星对角距的恒星检校方法,该方法采用星对角距的正弦相等的原理对星敏感器的内参数进行了检校<sup>[4]</sup>,后来Samaan、邢飞和郝雪涛等也采用相似的原理进行了检校试验<sup>[5-7]</sup>;2009年,谢俊峰等提出了一种改进的恒星相机在轨检校方法,将二阶畸变参数与内方位参数一并检校,获得了比不解算畸变参数和先解算内方位参数、再多帧拟合畸变参数方法更好的效果<sup>[8]</sup>;2010年,申娟等提出一种基于卡尔曼滤波的星敏感器在轨校准方法,该方法采用一阶径向畸变模型,利用摄像机标定中的径向排列约束(RAC),通过两次卡尔曼滤波迭代对内外参数进行在轨检校,在星点成像噪声标准差为0.05 pixels的情况下,校准后 $x$ 、 $y$ 方向的平均误差分别为0.044 pixels、0.049 pixels<sup>[9]</sup>;2012年,原玉磊等针对鱼镜头的标校问题,将内外参数与畸变参数进行联合平差解算,提出一种基于半视场角约束的检校模型,并成功应用于超大视场天文导航系统<sup>[10]</sup>;2014年,魏新国等提出了针对星敏感器的内外参数标定法,其研究表明该方法可有效提高定姿精度<sup>[11]</sup>;2015年,王爽等针对像面的旋转误差和参数的强非线性问题,先用EKF方法检校内参数和畸变参数,再采用最小二乘方法估计图像旋转误差,经两步检校后,星点位置误差由15.42%降至1.389%<sup>[12]</sup>;同年,熊凯等针对参数解耦问题,提出了内外参数分步解耦的检校方法,将内参数精度由50.83%提高至86.47%<sup>[13]</sup>;2016年,詹银虎等根据矢量观测原理,提出了一种基于矢量观测的鱼眼相机检校新模型,相比基于半视场角约束的检校模型,该模型在约束方位角方面具有明显优势<sup>[14]</sup>。

本文将构建一种基于矢量观测的大视场星敏感器检校模型,与以往方法不同,本文将3个罗德里格参

数代替传统的3个欧拉角作为外方位参数,与畸变参数、内方位参数一并求解,并将畸变参数扩展至三阶。将模型应用于ZY-3号卫星星敏感器的在轨检校,结果表明可以有效提高星敏感器的检校精度;基于仿真星图与采用欧拉角的传统检校模型进行了比较,结果表明该模型在精度和参数设置上有较大优势。文章还对该模型进行了精度分析,并得出了一些有益的结论。

## 2 基于矢量观测的大视场星敏感器检校模型

星敏感器是一种精密的光学仪器,其视场越大,采集的恒星数越多,理论上定姿的精度越高,但其畸变也更难控制。要想实现大视场星敏感器在空间中的应用,达到角秒甚至亚角秒级的定姿精度,实现精密的在轨标定是重要前提。现在,常规的在轨标定方法通常不考虑畸变或仅考虑到低阶,无法准确描述镜头的畸变;且通常采用3个欧拉角作为外方位参数,标定过程复杂、运算量大。本文从矢量的角度出发,将罗德里格参数引入到参数求解中,构建一种新的大视场星敏感器检校模型。

### 2.1 矢量观测模型

星敏感器可以看成是小孔成像模型。设某恒星的赤经、赤纬为 $(\alpha, \delta)$ ,则该恒星在赤道惯性坐标系下的直角坐标为

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \delta \\ \sin \alpha \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

恒星经星敏感器在CCD面阵的成像坐标为 $(x, y)$ ,则映射到星敏感器坐标系下的直角坐标为

$$\mathbf{S}_s = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_0 - x}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + f^2}} \\ \frac{y_0 - y}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + f^2}} \\ \frac{f}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + f^2}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: $f$ 为焦距, $(x_0, y_0)$ 为星点成像的像主点坐标。

### 2.2 畸变模型与罗德里格参数

星敏感器成像系统由于设计、制作和装配等原因会引起像点偏离理想位置,这种偏差即为畸变差。镜头光学畸变差通常可分为径向畸变和偏心畸变,由于偏心畸变相对较小<sup>[10]</sup>,本文主要研究径向畸变,其三

阶表达式为

$$\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7, \quad (3)$$

投影到成像点坐标上为

$$\begin{cases} \Delta x = (x - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ \Delta y = (y - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{cases}, \quad (4)$$

其中:  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为径向畸变的三个参数,  $r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$ 。

理想成像点  $(x', y')$  与实际成像点  $(x, y)$  关系为

$$\begin{cases} x' = x - \Delta x \\ y' = y - \Delta y \end{cases}. \quad (5)$$

由此, 物方空间点在星敏传感器坐标系下的坐标为

$$\mathbf{S}_s = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(x_0 - x)K}{\sqrt{[(x_0 - x)K]^2 + [(y_0 - y)K]^2 + f^2}} \\ \frac{(y_0 - y)K}{\sqrt{[(x_0 - x)K]^2 + [(y_0 - y)K]^2 + f^2}} \\ \frac{f}{\sqrt{[(x_0 - x)K]^2 + [(y_0 - y)K]^2 + f^2}} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中  $K = 1 - k_1 r^2 - k_2 r^4 - k_3 r^6$ 。根据矢量经小孔成像后夹角不变的原理, 知  $\mathbf{S}_s$  与  $\mathbf{S}_1$  存在旋转关系:

$$\mathbf{S}_s = \mathbf{C} \mathbf{S}_1, \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{C}$  即为星敏感器的姿态矩阵, 由外方位参数决定。由于在计算姿态矩阵  $\mathbf{C}$  时涉及到三角函数的计算, 为减少计算量, 采用罗德里格矩阵  $\mathbf{Q}$  代替  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{Q}$  存在如下关系<sup>[15,16]</sup>:

$$\mathbf{C} = (\mathbf{I} + \mathbf{Q})(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1}, \quad (8)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 & -c & -b \\ c & 0 & -a \\ b & a & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为罗德里格参数,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。

可以证明,  $\mathbf{Q}$  具有如下性质<sup>[14]</sup>:

$$(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1}(\mathbf{I} + \mathbf{Q}) = (\mathbf{I} + \mathbf{Q})(\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1}, \quad (10)$$

所以  $\mathbf{S}_s$  与  $\mathbf{S}_1$  存在如下旋转关系:

$$(\mathbf{I} - \mathbf{Q})\mathbf{S}_s = (\mathbf{I} + \mathbf{Q})\mathbf{S}_1, \quad (11)$$

将式(9)代入式(11)整理得:

$$\begin{bmatrix} 0 & -Z_s - Z_1 & -Y_s - Y_1 \\ -Z_s - Z_1 & 0 & X_s + X_1 \\ Y_s + Y_1 & X_s + X_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 - X_s \\ Y_1 - Y_s \\ Z_1 - Z_s \end{bmatrix}, \quad (12)$$

由此可以构造误差方程:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -Z_s - Z_1 & -Y_s - Y_1 \\ -Z_s - Z_1 & 0 & X_s + X_1 \\ Y_s + Y_1 & X_s + X_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_1 - X_s \\ Y_1 - Y_s \\ Z_1 - Z_s \end{bmatrix}. \quad (13)$$

从式(13)可看出, 采用 3 个罗德里格参数作为外方位参数避免了三角函数的计算, 误差方程也更简单。

### 2.3 参数求解

检校的目的是为了求得检校参数的改正数, 设检校参数为  $\mathbf{X} = [k_1, k_2, k_3, x_0, y_0, f, a, b, c]^T$ , 线性化误差方程, 得到如下形式:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A} \cdot \delta \cdot \hat{\mathbf{X}} + \mathbf{L}, \quad (14)$$

式中  $\mathbf{L}$  的表达形式为

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 & -Z_s - Z_1 & -Y_s - Y_1 \\ -Z_s - Z_1 & 0 & X_s + X_1 \\ Y_s + Y_1 & X_s + X_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \\ c_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_1 - X_s \\ Y_1 - Y_s \\ Z_1 - Z_s \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中  $a_0$ 、 $b_0$ 、 $c_0$  为罗德里格参数的初始值, 可任意选取。由于偏导数矩阵  $\mathbf{A}$  的求解过程过于复杂, 所占篇幅较长, 本文未予以列出。由此根据平差原理求得改正数为

$$\delta \hat{\mathbf{X}} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{L}), \quad (16)$$

待估参数为

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}_0 + \delta \hat{\mathbf{X}}, \quad (17)$$

单位权中误差为

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{\mathbf{V}^T \mathbf{V}}{3n - 9}}. \quad (18)$$

参数求解过程中需要进行迭代, 每次迭代计算出新参数后, 再作为下次迭代的初始参数, 当前后两次迭代的相对单位权中误差小于  $10^{-5}$  时, 迭代结束。至此完成了检校的全部流程。

## 3 检校精度的评价

星敏感器在进行星图识别和姿态计算时, 通常会用到星内角距, 以星内角距的实际值与理论值的统计偏差作为检校效果的评定指标具有非常直观的实际意义, 该指标不但反映了星敏感器的工作特点, 而且与星敏感器的姿态有直接对应关系, 其定义为<sup>[7]</sup>

$$\Delta R = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{2}{N(N+1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\chi - \gamma)^2},$$

$$\chi = \arccos(\hat{\mathbf{S}}_{s,i} \cdot \hat{\mathbf{S}}_{s,j}), \quad \gamma = \arccos(\hat{\mathbf{S}}_{1,i} \cdot \hat{\mathbf{S}}_{1,j}), \quad (19)$$

式中:  $N$  为星点个数,  $\hat{\mathbf{S}}_{s,i}$ 、 $\hat{\mathbf{S}}_{1,i}$  分别表示第  $i$  颗星的星敏传感器坐标系下的坐标和赤道惯性直角坐标系下的坐标,  $\Delta R$  为星对角距的统计偏差, 其值越小, 说明检

校精度越高。

此外,也可采用统计在  $x$ 、 $y$  方向残差来评定检校的效果,公式如下:

$$\begin{cases} \Delta x = x' - x \\ \Delta y = y' - y \end{cases}, \quad (20)$$

式中  $x'$ 、 $y'$  为根据解算参数和  $(\alpha, \delta)$  反算的星点坐标,  $x$ 、 $y$  为提取的星点坐标。

## 4 算例分析

### 4.1 检校实例

卫星搭载的星敏感器在发射前通常会进行检校,随着星敏感器在空间中的使用,其发射时受到的冲击、工作环境的改变以及长期工作带来的老化和磨损,都会使其内部参数发生变化<sup>[1]</sup>。为了保证星敏感器的测量精度和可靠性,有必要对其进行在轨标定。采用恒星法检校星敏感器不需要构造专门的检校场,作为控制点的恒星数量众多,且分布均匀,适于在轨检校<sup>[14]</sup>。

采用 ZY-3 号卫星星敏感器在轨星图进行检校实验,星敏感器给定的出厂参数为:视场  $20.3^\circ \times 20.3^\circ$ ,分辨率  $1024 \text{ pixels} \times 1024 \text{ pixels}$ ,像元尺寸  $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ ,焦距  $43.3 \text{ mm}$ (等效于  $2886.5 \text{ pixels}$ )。采用质心法提取星点,根据星图的拍摄时间,采用 NOVAS 软件计算恒星视位置,挑选星等不大于 5.5 等的恒星建立导航星表,经过星图识别,共得到 15 颗识别成功的恒星(如表 1)。

表 1 检校用的恒星.

Table 1 The stars for calibration.

No.	$x/\text{pixel}$	$y/\text{pixel}$	$\alpha/(\text{^\circ})$	$\delta/(\text{^\circ})$
1	115.166	814.399	258.11589	10.585082
2	3.734	652.121	258.66189	14.390443
3	38.602	836.754	259.65416	10.864146
4	139.553	602.085	255.78290	14.091733
5	459.400	750.400	251.45787	8.582668
6	331.474	727.382	253.50179	10.165241
7	534.690	543.263	248.15061	11.487774
8	309.088	783.887	254.41608	9.374997
9	550.415	388.333	246.35411	14.033067
10	461.188	140.669	245.47989	19.15328
11	316.533	83.949	247.55464	21.489563
12	659.203	150.599	242.01874	17.046961
13	784.641	957.652	247.72833	1.983676
14	817.723	139.217	239.11437	15.657291
15	933.545	83.001	236.54715	15.421685

将这些识别成功的恒星作为控制点,再采用本文方法进行检校,表 2 列出了检校结果,图 1 为检校后的像点残差图。经计算,检校后星内角距的统计偏差检校前的  $12.246''$  提高至  $2.376''$ ,这个水平基本代表当前的定姿精度水平;而  $x$ 、 $y$  方向的残差最大分别为  $0.257 \text{ pixels}$ 、 $0.151 \text{ pixels}$ ,这也基本代表了星点提取的精度水平。

表 2 ZY-3 号卫星星敏感器的检校结果.

Table 2 The calibration results of star sensor on ZY-3 satellite.

参数	$k_1$	$k_2$	$k_3$
检校值	-4.656e-09	-1.444e-14	3.546e-20
参数	$x_0/\text{pixel}$	$y_0/\text{pixel}$	$f/\text{pixel}$
检校值	526.437	512.662	2887.444

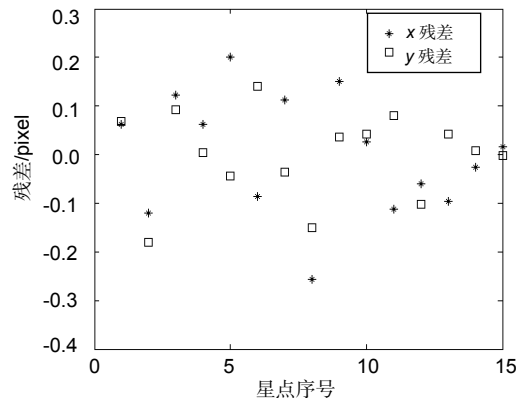


图 1 检校后  $x$ 、 $y$  方向上的残差.

Fig. 1 The residual errors in  $x$  and  $y$  directions after calibration.

### 4.2 仿真算例与精度分析

为进一步分析本文方法的精度,进行了仿真实验。实验中星敏感器的参数与 ZY-3 号卫星的星敏感器的出厂参数一致。按任意方向仿真星图,视场中共有 18 颗恒星,将这些恒星作为检校的控制点。考虑到实际观测中存在误差,对星点坐标添加均值为 0、标准差为  $0.05 \text{ pixels}$  的高斯白噪声,再采用本文方法进行检校。同时,为了说明本文模型提出的采用罗德里格参数作为外方位参数的效果,将本文模型与采用欧拉角作为外方位参数的传统标定模型进行比较,结果如表 3~表 4,其中表 4 列出的是两种模型标定后的星内角距的统计偏差和  $x$ 、 $y$  方向上的残差的绝对均值。

从表 3~表 4 可以看出,在  $0.05 \text{ pixels}$  星点噪声的情况下,两种模型经过 5 次迭代均能很好地解算出系统参数,且相比采用欧拉角为外方位参数的传统模型,本文提出的采用罗德里格参数作为外方位参数的模型

表3 本文模型与传统标定模型的标定参数结果对比。

Table 3 The comparison between the calibrations proposed in the paper and the traditional model.

参数	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$x_0/\text{pixel}$	$y_0/\text{pixel}$	$f/\text{pixel}$	迭代次数
真实值	3e-8	1e-13	1e-20	512	512	2886.5	/
本文模型的检校值	2.807e-08	1.150e-13	-6.147e-20	511.926	512.072	2886.484	5
传统模型的检校值	2.774e-08	1.089e-13	-4.621e-20	512.309	512.058	2886.898	5

表4 本文模型与传统标定模型的标定精度对比。

Table 4 The comparison of the calibration accuracy.

检校模型	$\Delta R/(\prime)$	Mean_abs(x)/pixel	Mean_abs(y)/pixel
本文模型	0.483	0.019	0.016
传统模型	0.573	0.025	0.021

表5 检校参数应用结果。

Table 5 The application results of the calibration parameters.

No.	$\Delta R/(\prime)$	Mean_abs(x)/pixel	Mean_abs(y)/pixel
1	0.507	0.021	0.022
2	0.708	0.022	0.019
3	0.755	0.015	0.018
4	0.734	0.028	0.019
5	0.662	0.022	0.020
6	0.751	0.022	0.018
7	0.632	0.022	0.018
8	0.477	0.025	0.015
9	0.698	0.022	0.024
10	0.554	0.025	0.020

的检校精度更高,但提升并不十分明显。实验中还发现,传统模型对初值的精度要求较高,偏差太大的初始参数会增加迭代次数甚至导致不收敛,而本文模型对初值的要求则更简单,即使当初值的偏差很大时,经过有限次的迭代能收敛到较精确的值。

为验证检校参数的应用效果,随机抽取 10 个视场,分别计算星内角距的统计偏差、在  $x$ 、 $y$  方向的残差绝对均值,结果如表 5。

从表 5 可以看出,随机抽取的 10 个视场的应用精度稍差于自身的应用精度,这可能与星点噪声的浮动有关,但总体上精度水平相当,说明算法解算的参数有较好的通用性。

对比两次算例,检校实例的精度低于仿真算例,原因在于检校实例中星点提取的精度未知。为进一步分析星点坐标误差对检校精度的影响,对星点坐标依次添加标准差为 0~1.0 pixels、步长为 0.01 pixels 的高斯白噪声,分别统计 100 次实验精度指标的均值,结果如图 2,其中图 2(a)显示的是星点误差对星内角距的统计偏差的影响,图 2(b)显示的是星点误差对  $x$ 、 $y$  方向残差的影响。

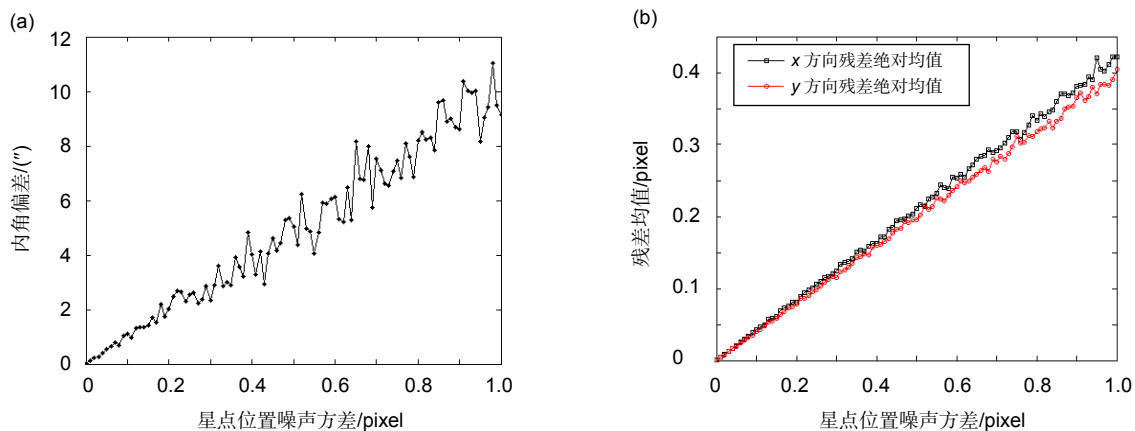


图2 星点误差对检校精度的影响。(a) 星点误差对星内角距的统计偏差的影响。(b) 星点误差对  $x$ 、 $y$  方向残差的影响。

Fig. 2 The star position error's influence on calibration accuracy. (a) The star position error's influence on star angle error. (b) The star position error's influence on the residual errors in  $x$  and  $y$  directions.

从图2可以看出,检校精度随星点位置误差的增大而逐渐降低,当星点误差在0.20 pixels~0.33 pixels时,星内角距偏差为1.74"~3.60",与检校实例的精度较为相符,再一次印证了检校实例的星点提取精度是制约检校精度提高的关键因素。可见,要想进一步提高检校精度,提高星点精度是关键所在。

## 5 结论

本文提出了一种改进的基于矢量观测的大视场星敏传感器恒星检校模型,将3个罗德里格参数作为外方位元素引入到参数求解中,推导了相关公式,并给出了检校的整个流程。基于ZY-3卫星的星敏传感器在轨星图和仿真星图进行了实验和精度分析,得到以下结论:

1) 该模型较采用欧拉角作为外方位参数的传统标定模型具有更高的精度,且参数设置简单,无需提前计算初值;

2) 在星点位置噪声方差为0.05 pixels的情况下,该模型仍能准确解算出星敏传感器参数,检校后星内角距的统计偏差为0.483",在 $x$ 、 $y$ 方向的残差均值分别为0.019 pixels、0.016 pixels;ZY-3卫星的星敏传感器经本文模型检校后较检校前精度大幅提高;

3) 模型具备较好的通用性,检校结果应用于不同视场的星图均能取得较高的精度;

4) 星点精度是制约模型检校精度提高的主要因素,建议在实际应用中采用精度更高的星点中心计算算法。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(4160411, 41174025, 41174026)。

## 参考文献

- Sun Gaofei, Zhang Guoyu, 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): 8–14.  
孙高飞, 张国玉, 郑茹, 等. 星敏传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): 8–14.
- Li Xinlu, Yang Jinhua, Zhang Liu, et al. Attitude determination of the star sensor with the star proper motion correction[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(2): 35–40.  
李欣璐, 杨进华, 张刘, 等. 带有恒星自行校正的星敏传感器定姿[J]. *光电工程*, 2015, **42**(2): 35–40.
- Shuster M D, Chitre D M, Niebur D P. In-flight estimation of spacecraft attitude sensor accuracies and alignments[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1982, **5**(4): 339–343.
- Ju G. Autonomous star sensing, pattern identification, and attitude determination for spacecraft: an analytical and experimental study[D]. Texas: Texas A & M University, 2001: 99–131.
- Samaan M A. Toward faster and more accurate star sensors using recursive centroiding and star identification[D]. Texas: Texas A&M University, 2003: 25–29.
- Xing Fei, Dong Ying, Wu Yanpeng, et al. Star tracker parametric analysis for autonomous calibration[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2005, **25**(11): 1484–1488.  
邢飞, 董瑛, 武延鹏, 等. 星敏传感器参数分析与自主校正[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2005, **45**(11): 1484–1488.
- Hao Xuetao, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Star Sensor model parameter analysis and calibration method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(3): 5–8.  
郝雪涛, 张广军, 江洁. 星敏传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.
- Xie Junfeng, Gong Jianya, Jiang Wanshou. An improved on-orbit calibration method for stellar camera[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, **34**(2): 121–123.  
谢俊峰, 龚健雅, 江万寿. 一种改进的恒星相机在轨检校方法[J]. *测绘科学*, 2009, **34**(2): 121–123.
- Shen Juan, Zhang Guangjun, Wei Xinguo. On-orbit calibration of star sensor based on kalman filter[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, **31**(6): 1220–1224.  
申娟, 张广军, 魏新国. 基于卡尔曼滤波的星敏传感器在轨校准方法[J]. *航空学报*, 2010, **31**(6): 1220–1224.
- Yuan Yulei. Research on fish-eye camera stellar calibration technology[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2012: 206–214.  
原玉磊. 鱼眼相机恒星法检校技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012: 206–214.
- Wei Xinguo, Zhang Guangjun, Fan Qiaoyun, et al. Star sensor calibration based on integrated modelling with intrinsic and extrinsic parameters[J]. *Measurement*, 2014, **55**: 117–125.
- Wang Shuang, Geng Yunhai, Jin Rongyu. A novel error model of optical systems and an on-orbit calibration method for star sensors[J]. *Sensors*, 2015, **15**(12): 31428–31441.
- Xiong Kun, Wei Xinguo, Zhang Guangjun, et al. High-accuracy star sensor calibration based on intrinsic and extrinsic parameter decoupling[J]. *Optical Engineering*, 2015, **54**(3): 034112.
- Zhan Yinhu, Zheng Yong, Zhang Chao, et al. Fish-eye camera calibration model based on vector observations and its application[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, **45**(3): 332–338.  
詹银虎, 郑勇, 张超, 等. 鱼眼相机矢量观测检校模型及其应用[J]. *测绘学报*, 2016, **45**(3): 332–338.
- Zeng Wenxian, Tao Benzao. Non-linear adjustment model of three-dimensional coordinate transformation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, **28**(5): 566–568.  
曾文宪, 陶本藻. 三维坐标转换的非线性模型[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2003, **28**(5): 566–568.
- Yuan Yulei, Jiang Lixing, Liu Lingjie. Applications of Lodrigues matrix in coordinates transformation[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, **35**(2): 178–179, 119.  
原玉磊, 蒋理兴, 刘灵杰. 罗德里格矩阵在坐标系转换中的应用[J]. *测绘科学*, 2010, **35**(2): 178–179, 119.