

大视场星敏传感器标定技术研究

贺鹏举^{1,2} 梁斌¹ 张涛¹ 杨君¹

(¹ 清华大学自动化系, 北京 100084)
(² 酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 732750)

摘要 大视场星敏传感器光学系统,由于畸变量较大,在轨标定过程中,直接采用最小二乘最优估计(LMS)或扩展卡尔曼滤波方法(EKF)无法精确求解其标定参数。在深入分析星敏传感器测量误差因素的基础上,对考虑畸变和不考虑畸变两种情况的在轨标定结果进行了仿真对比;指出了标定焦距之前需先标定光学畸变的必要性,并介绍了4种可用于在轨校正光学畸变的方法;提出先标定主点偏差,再标定光学畸变参数,最后标定焦距的标定方法。仿真结果表明,可以采用像面旋转法求取主点偏差,利用高阶多项式方法求取光学畸变参数,畸变校正后,采用LMS和EKF标定算法估计焦距,标定精度达到了 $3.1\ \mu\text{m}$ 和 $2.2\ \mu\text{m}$ 。对100幅模拟星图处理后,星间角距统计偏差约为传统在轨标定方法的 $1/10\sim 1/8$ 。

关键词 光学器件;星敏传感器;标定;控制点;光学畸变

中图分类号 V241.62+3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1023001

Calibration Method for Wide Field of View Star Sensor

He Pengju^{1,2} Liang Bin¹ Zhang Tao¹ Yang Jun¹

(¹ Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)
(² Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan, Gansu 732750, China)

Abstract It's very difficult to calculate the calibration coefficients precisely using least mean squares (LMS) and extended Kalman filters (EKF) algorithm for wide field of view star sensor because of large optical aberration. And the error factors that affect measuring precision of star sensors are analyzed, which indicate that it is important to calibrate optical distortion before focal length calibration by comparing simulation data with and without distortion and noise. At the same time, four kinds of optical distortion methods are introduced. In order to improve calibration precision, a new method is proposed, in which main point is calibrated firstly, optical distortion parameter secondly and focal length finally. Simulation results demonstrate that the focal length calibration deviation reaches $3.1\ \mu\text{m}$ and $2.2\ \mu\text{m}$ using LMS and EKF algorithm after optical aberration correction. The statistical error of star angular distance is about $1/10\sim 1/8$ of the traditional on-orbit calibration method.

Key words optical devices; star sensor; calibration; control points; optical distortion

OCIS codes 230.4685; 230.4320; 220.1000

1 引 言

星敏传感器以天球惯性坐标系中的恒星作为参考基准,输出载体在惯性空间中的姿态信息,是目前航天器测量精度最高的一种定姿设备,在民用和军用领域得到了广泛的应用。大视场星敏传感器是指视场

角在 20° 左右的星敏传感器^[1,2],由于其具有导航星表小、姿态输出频率高、系统质量小等诸多优点,得到了越来越广泛的应用。但是由于视场大,即使采用高精度的光学系统,在像面边缘畸变量也达到两个像元以上,为了提高测量精度,标定是其研制过程中

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-05-18

基金项目: 航空科学基金(20080758003)资助课题。

作者简介: 贺鹏举(1980—),男,硕士研究生,工程师,主要从事星敏传感器技术方面的研究。

E-mail: hpj08@mails.thu.edu.cn

导师简介: 梁斌(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事空间机器人技术、智能控制和微小卫星技术等方面的研究。

E-mail: bliang@tsinghua.edu.cn

必不可少的步骤。

星传感器的理想模型为针孔模型,实际成像模型和针孔模型有较大差异,存在测量误差。测量误差主要包括星等测量误差、焦距估计误差、像平面主点偏移误差、光学系统畸变、光轴指向误差以及像面水平和旋转误差等。其中焦距估计误差、光学系统畸变、像平面主点误差是影响星传感器测量精度的主要因素^[3]。星传感器标定可分为地面标定和在轨标定两种途径^[4],地面标定确定了在轨服务的初始参数。星传感器在外太空工作一段时间后,电子器件性能下降,受辐射、振动、重力、应力和温度等因素影响,使光学系统参数发生漂移,测量精度下降,需要对其进行在轨标定。

在轨标定的思想起源于1981年,Shuster等^[5]提出了对星载姿态传感器准直误差进行在轨估计的方法,突破了仅依靠发射前的标定数据限制。之后,孙高飞等^[6]总结分析了Davenport等提出的多种在轨估计姿态传感器准直误差的标定方法。2001年,Pittelkau等^[7]提出了一种对星传感器安装误差进行地面标定和在轨标定的卡尔曼滤波算法。2006年之后,Samaan等^[4,8]研究了星传感器焦距的快速估计方法,对星像点偏移和热变形在轨标定做了深入的研究,针对星传感器在轨测量误差和光学透镜焦距的变化,提出了一种自主在轨标定算法,该方法采用LMS方法计算主点偏移和焦距变化,并设计了EKF自主标定算法。袁彦红等^[9]对Samaan等提出的标定算法进行了仿真分析。2010年,钟红军等^[10]对随机测量噪声较小情况下,利用EKF方法进行星传感器焦距和主点标定进行了仿真分析。上述方法均没有考虑非线性光学畸变对星传感器参数在轨标定精度带来的影响,因此对大视场星传感器标定精度较低。

2 传统在轨标定方法的不足

星传感器焦距为 f , 主点位于成像平面 $O_s(c_x, c_y)$ 处, 恒星星光 v_1 经光学系统在成像平面 π 成像, 像点坐标位于 (x_1, y_1) , 如图1所示。

如果不考虑星传感器的测量噪声和畸变量, 那么像面上的第 $i(1, \dots, N)$ 颗恒星像点坐标为 (x_i, y_i) , 对应的测量矢量可以表示为

$$w_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i - c_x)^2 + (y_i - c_y)^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -(x_i - c_x) \\ -(y_i - c_y) \\ f \end{bmatrix}. \quad (1)$$

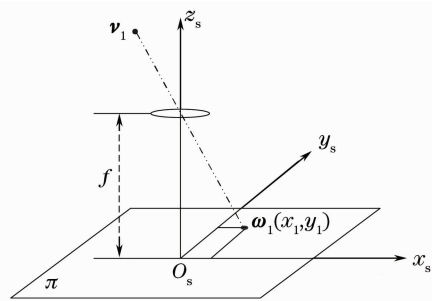


图1 星传感器成像原理图

Fig.1 Imaging principle of star sensors

导航星表中与之对应的第 $i(1, \dots, N)$ 颗导航星赤经和赤纬坐标为 (α_i, δ_i) , 参考矢量可表示为

$$v_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \delta_i \end{bmatrix}. \quad (2)$$

星传感器测量矢量 w_i 和 w_j 之间的夹角, 与导航星表中与之对应恒星矢量 v_i 和 v_j 之间的夹角 θ_{ij} 保持不变, 取矢量夹角的方向余弦, 则测量矢量与参考矢量满足:

$$v_i^T v_j \approx w_i^T w_j = g_{ij}(c_x^g, c_y^g, f^g), \quad (3)$$

式中 (c_x^g, c_y^g, f^g) 为 (c_x, c_y, f) 的估计值, 估计值与真实值之间的偏差记作 $(\Delta c_x, \Delta c_y, \Delta f)$, 由此可得

$$R_{ij} = v_i^T v_j - g_{ij}(c_x^g, c_y^g, f^g) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{ij}}{\partial c_x} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial c_y} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta c_x \\ \Delta c_y \\ \Delta f \end{bmatrix}. \quad (4)$$

若通过星图识别方法, 得到 n 对测量矢量和对应参考恒星矢量, 则可列出超定方程组为

$$\begin{bmatrix} R_{12} \\ R_{13} \\ \vdots \\ R_{n-1,n} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \Delta c_x \\ \Delta c_y \\ \Delta f \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{A} 矩阵是由偏导数构成的 Jacobian 矩阵, 方向余弦偏差构成列向量 \mathbf{R} , 采用最小二乘法可解得

$$\Delta \mathbf{z} = [\Delta c_x \quad \Delta c_y \quad \Delta f]^T = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{R}. \quad (6)$$

(6)式中, 通过星图识别, 得到3个以上矢量对, 则可解得 $\Delta \mathbf{z}$ 。标定过程中, 每步加入新的观测角距信息, 采用LMS算法, 求得 \mathbf{R}_{ij} 和 \mathbf{A} 矩阵后, 将 $\Delta \mathbf{z}$ 代入EKF方程求解得

$$\begin{cases} \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1} \\ \mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + \mathbf{K}_k [\Delta \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k] \\ \mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_k + [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_k \end{cases}. \quad (7)$$

这种在轨标定方法, 存在的问题是: 只能估计出焦距和主点位置, 不能校正非线性畸变, 无法分离非

线性畸变对焦距和主点偏差标定精度带来的影响,如图 2 所示。

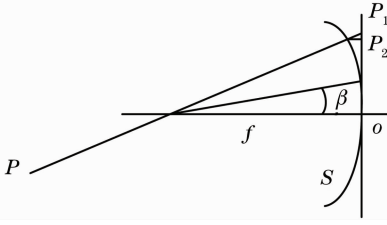


图 2 非线性畸变对小孔成像模型的影响

Fig. 2 Effect of nonlinear distortion on pinhole image models

星敏传感器光学成像模型并不是理想的小孔成像模型,存在非线性畸变。点 P 在针孔模型下的像位于 P_1 位置,但由于畸变的原因,其投影在像平面的实际位置位于 P_2 点, P_1 和 P_2 之间的距离即为畸变量。由图 2 可看出,畸变量随着视场角的增加迅速增加。在视场的中心区域,视场角小于 β 时,非线性畸变量很小,此时用该范围内的点建立矢量对,光学系统的焦距精度较高;在大视场区域,视场角大于 β 时,畸变量是随机噪声的数倍到数十倍,非线性畸变参数具有抗噪特性。在轨标定过程中,识别出的恒星像点分布不均匀,建立的标定点数目也不相同,因此主点和焦距标定结果偏差较大,稳定性也较差,需要研究一种新方法。

3 大视场星敏传感器标定方法

大视场星敏传感器影响其测量精度最重要的因素是焦距,光学畸变量会直接影响焦距标定的精度,因此对光学畸变标定必须在焦距标定之前完成。在光学畸变标定研究中,考虑较多的是镜头的径向畸变,忽略切向畸变因素的影响^[11],求解镜头的非线性畸变系数是大视场星敏传感器标定的关键。主点作为光学畸变的参考中心,需要首先进行标定。

3.1 主点标定方法

在轨标定中,对主点标定只能采用估计的方法。对大视场星敏传感器而言,这种标定方法受畸变影响,精度很低,并且稳定性差。一般可认为完成地面主点标定^[10]之后,在轨飞行中,主点的偏移量受环境变化较小,不再对其进行标定。

3.2 非线性光学畸变的标定

消除畸变的途径包括硬件方法和软件方法。大视场光学系统中,畸变通过硬件方法不可能做到很小,故而软件畸变校正就显得尤为重要。可用于计算光学畸变系数的方法包括:成像模型分析方法、高

阶多项式方法、极坐标 Zernike 多项式方法和高精度的分区标定方法^[12]。随着多项式阶次的增加,畸变残差减小,但阶次过高会导致校正效率下降,一般采用 3~5 阶多项式进行计算。极坐标 Zernike 多项式是以主点为原点的极坐标描述方法,和高阶多项式具有相同的效率,较适合于对轴性较好的光学系统标定。分区法是将视场分成若干个区域,在每个区域中采用同样的校正参数进行计算,分区越小,畸变残差越小。

3.2.1 成像模型分析方法

光学系统畸变主要包括三类:径向畸变、偏心畸变和薄棱镜畸变^[13]。径向畸变引起图像沿像面径向移动,距离像面中心越远,畸变量越大,正的径向畸变会引起图像远离中心点的移动,反之亦然。偏心畸变是因为组成光学系统的多个镜头光轴不完全共线,这种畸变包含径向分量和切向分量。薄棱镜畸变是指由光学镜头制造误差和成像敏感器阵列制造误差引起的图像畸变,亦可分解为径向分量和切向分量。一般情况下,径向畸变远远大于切向畸变。按照模型分析的方法,可以将畸变量表示为^[13]

$$\begin{cases} \Delta x_i = x_i(k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4 + k_3 r_i^6) + \\ \quad [p_1(r_i^2 + 2x_i^2) + 2p_2 x_i y_i][1 + p_3 r_i^2] \\ \Delta y_i = y_i(k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4 + k_3 r_i^6) + \\ \quad [2p_1 x_i y_i + p_2(r_i^2 + 2y_i^2)][1 + p_3 r_i^2], \end{cases} \quad (8)$$

式中 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ 为畸变量, (x_i, y_i) 为像点坐标值, $r_i^2 = x_i^2 + y_i^2$, $k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, p_3$ 为要求解的畸变参数,由于上述方程中共有 6 个未知数,采用控制点法,获得 3 个以上控制点即可利用 LMS 方法求取畸变参数。

3.2.2 高阶多项式方法

高阶多项式方法也是一种控制点方法,通过图像上的对应坐标点建立控制点方程,求解方程的系数,即可求得光学畸变模型。

用幂函数方程来描述坐标变换^[14]过程为

$$\begin{cases} u = p(x, y) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-1} a_{ij} x^i y^j \\ v = q(x, y) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-1} b_{ij} x^i y^j \end{cases}, \quad (9)$$

上述方程中,所需要的控制点数目由选用的模型阶数来确定,选用的模型阶数越高,需要的控制点数目越多。提高阶次可以提高校正的精度,但是随着阶次的提高,方程中未知数的个数迅速增加,当采用 4

阶模型时,需要至少 15 个控制点来求解 30 个畸变参数。成像模型分析方法是高阶多项式方法的一个简化,通过求解多项式的系数,可构造出光学系统畸变模型曲面。

3.2.3 极坐标 Zernike 多项式方法

Zernike 多项式是 F. Zernike 在 1934 年构造的,它是正交、线性无关的,Zernike 多项式的各项与光学像差有相应的对应关系,用 Zernike 多项式对镜面面形数据进行处理的方法已经广泛应用于工程项目、光学系统设计软件和干涉检查等。极坐标形式的 Zernike 多项式,与光学系统设计者惯用的 Seidel 像差系数很容易地建立联系,具体表达式为

$$U_n^l(\rho, \theta) = R_n^l(\rho) \cdot \Theta_n^l(\theta). \quad (10)$$

式中 $n(0, 1, 2, \dots)$ 为多项式的阶数, l 为与 n 相关的序号,其值恒与 n 同奇偶性,且绝对值小于或等于阶数。基底函数系选定后,采用级数分布函数来描述为

$$F(\rho, \theta) = \sum_{k=0}^{\infty} Q_k U_n^{r-2m}(\rho, \theta) = Q^T \cdot U. \quad (11)$$

用逆矩阵法求 Zernike 多项式系数 Q 的过程可以分解为如下 4 个步骤进行:所取采样点归一化,转换到单位圆内;计算 Zernike 多项式 U ,作为基底函数;将 Zernike 多项式单位正交化;用广义逆矩阵方法求解 Zernike 多项式拟合系数 Q ,由此即可用来校正光学系统的变形。极坐标 Zernike 多项式由于采用了关于主点对称的方法,因此需要的控制点数量相对较少。存在的缺点是:对非严格对称的畸变型面标定效果稍差^[12]。

3.2.4 分块法

分块法标定思想是将图像平面划分成若干个子空间,在每个子空间上分别进行光学畸变系数的求解,采用分块化的畸变参数标定方法能取得较高的

标定精度^[12,15]。为了在图像平面上划分子空间,可以采用先细分,然后依据畸变大小和一定判断准则设定阈值,将相似的子空间合并,得到子空间分块。子空间的划分原则为保证系统所要求的校正精度。

在星敏感器应用中,依据 3 颗星像点或者 4 颗星像点组成的平面构成成像子平面,依据要求的精度和未知参数个数,建立方程组,求解子平面的光学畸变参数。利用这种方法,对大视场星敏感器标定,具有较好的光学畸变标定效果。

3.3 焦距的标定

完成非线性畸变参数求解之后,对像点位置进行一次畸变校正,能够有效提高焦距标定的精度。由于焦距是影响星敏感器测量精度的最重要因素,焦距引起的误差量占据了星敏感器测量误差的 70% 以上^[3],对焦距的精确标定是大视场星敏感器标定研究的重点。将(4)式中主点估计值(c_x^g, c_y^g)用地面标定结果(c_x, c_y)代替,则

$$R_{ij} = \mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_j - g_{ij}(c_x, c_y, f^g) \approx \frac{\partial g_{ij}}{\partial f} \Delta f. \quad (12)$$

焦距可采用 LMS 或 EKF 算法进行标定。这种方法将主点和焦距标定分离,能够降低 EKF 方法中主点和焦距标定结果的耦合影响,提高标定的精度和计算速度。

4 标定精度的评价方法

星敏感器作为高精度的姿态测量设备,在进行星图识别时,星内角距是主要的识别特征参数,以星内角距的测量值和理论值的偏差统计量作为标定精度的评价指标,具有非常直观的实际应用价值,能够直接判断焦距的标定精度。若 N 表示视场内的星点数目,采用星内角距的统计偏差^[8]

$$\Delta r = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{2}{N(N+1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [\arccos(\mathbf{w}_i \mathbf{w}_j) - \arccos(\mathbf{v}_i \mathbf{v}_j)]^2}, \quad (13)$$

或采用星内角集合偏差

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N-1} (\sin \Theta_{ij} - \sin \theta_{ij}), \quad (14)$$

作为评价指标。 Θ_{ij} 和 θ_{ij} 分别为参考矢量和测量矢量的角距,以上两种方法作为评价标定结果的指标,能够直观确定标定后星内角距的偏差量。焦距与光学畸变相互影响,在轨标定时,尽可能利用像面中心区域的像点坐标标定焦距,可提高收敛速度。

5 仿真结果分析

本文以 Skymap2000 编制星表为基础,采用星等阈值(VMT)过滤方法,剔除双星、变星,建立导航星表。依据导航星表中给出的恒星自行数据和拍摄时刻的儒略时计算出恒星地球坐标系精确坐标。

星敏感器视场角为 $17^\circ \times 17^\circ$,像元阵列为 $2336 \text{ pixel} \times 2336 \text{ pixel}$,焦距真值为 51.5 mm ,主点 c_x 为 3.5 pixel , c_y 为 2.0 pixel ,探测星等为 6.5 Mv ,按照

成像模型分析方法给出畸变模型为 $k_1 = 2.0 \times 10^{-5}$, $k_2 = 2.9 \times 10^{-9}$, $k_3 = 1.0 \times 10^{-14}$, $p_1 = -1.2 \times 10^{-5}$, $p_2 = -1.0 \times 10^{-5}$, $p_3 = -1.0 \times 10^{-8}$, 加入零均值, 方差为 0.2 像元的高斯噪声, 产生模拟星图。焦距初始

值为 51 mm, 利用单幅星图, 在理想小孔模型、光学畸变及噪声影响两种情况下, 分别采用传统 LMS 算法和 EKF 算法进行在轨标定, LMS 算法运行 70 步, EKF 算法运行 200 步, 仿真结果如图 3 所示。

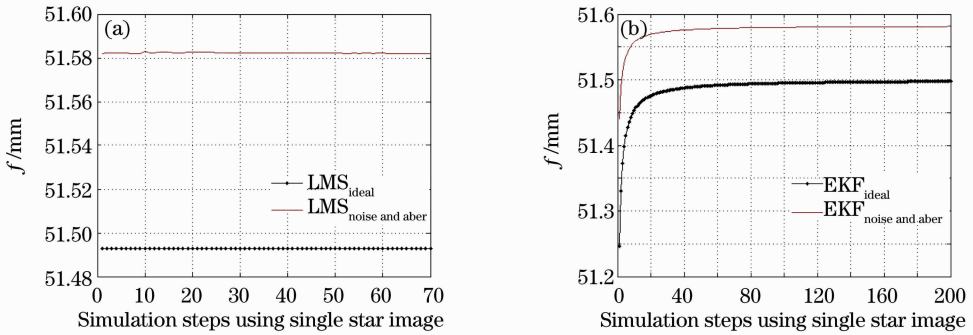


图 3 理想小孔模型和光学畸变及噪声影响情况下焦距标定结果。(a) LMS; (b) EKF

Fig. 3 Focal length calibration results at ideal pinhole model and with optical aberration and noise. (a) LMS; (b) EKF

如图 3 所示, 理想情况下, LMS 和 EKF 算法都能求得精确且稳定的焦距值, 标定结果分别为 51.4928 mm 和 51.4975 mm, 主点标定值分别为 $(-0.011, 0.013)$ pixel 和 $(1.6 \times 10^{-4}, -6.3 \times 10^{-6})$ pixel。在光学畸变和噪声影响下, LMS 和 EKF 算法焦距标定结果分别为 51.5820 mm 和 51.5813 mm, 主点标定值分别为 $(-30.937, -2.002)$ pixel 和 $(-28.018, -2.156)$ pixel。从图 3 中可看出, LMS 算法收敛速度明显快于 EKF 算法。由于光学畸变和噪声的影响, 直接采用上述在轨标定方法不能满足精度要求。产生以上标定偏差的原因是给定的光学畸变模型使星点成像位置向外扩散, 改变了理想像点的坐标, 采用其作为控制点, 使得焦距标定结果偏大。

据求得的像面中心, 求解光学畸变参数, 然后对星点位置进行一次校正, 减小畸变的影响, 最后进行焦距标定。为了验证主点标定算法的可行性, 以距离主点 10 个像元为单位间隔, 加入光学畸变模型和噪声, 生成一系列圆环样本点作为仿真数据。采用最小二乘圆拟合, 参考距离主点较近的 20 次仿真结果, 可求得主点位于 $(3.4939, 1.9970)$ pixel。随着圆环的增大, 畸变模型明显影响主点的标定结果。

本文采用三阶多项式分析方法, 解得 (9) 式的非线性畸变参数一次项系数为 $a_2 = 1.001367$, $b_3 = 1.001705$ 。 a_2 和 b_3 是像面中像点与理想星点坐标的偏差系数, 反映了实际像点与理想像点的位置关系, 与系统焦距成线性关系, 越趋近于 1 说明焦距标定精度越高。对像点进行一次畸变校正后, 采用 LMS 和 EKF 算法, 焦距标定结果如图 4 所示。

为了提高焦距的标定精度, 在主点标定之后, 依

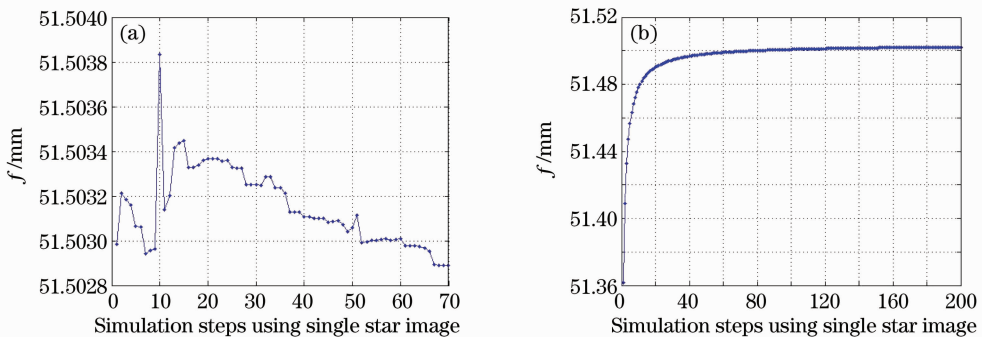


图 4 光学畸变校正后焦距标定结果。(a) LMS; (b) EKF

Fig. 4 Focal length calibration results after optical aberration correction. (a) LMS; (b) EKF

光学畸变校正后, 采用 LMS 和 EKF 算法, 焦距标定结果分别为 51.5031 mm (均值)、51.5022 mm。由于 EKF 算法计算量大, 收敛速度慢, 依据以上分析

和仿真, 采用 LMS 算法标定焦距, 取其均值作为标定结果能够满足在轨标定速度和精度的折中。采用 LMS 算法, 分别将传统在轨标定结果和畸变校正后

的标定结果输入仿真程序,对 100 幅仿真星图进行识别,得到的姿态确定误差数据如图 5 所示。

利用传统在轨标定算法得到的焦距和主点(由于主点位置偏差较大,带入零值进行计算),姿态确定数据如图 5(a)所示,与仿真给定值相比偏差较大,并且累积误差量也较大。利用改进的在轨标定

算法获得的光学系统参数(主点、焦距和畸变参数),计算出的姿态确定数据如图 5(b)所示,标定后姿态确定精度明显提高,随时间的累积误差大幅减小。仿真过程中,采用了 10 个矢量对,利用 QUEST 算法进行姿态确定计算。利用星内角距的统计偏差作为标定精度的评价指标,标定精度对比如图 6 所示。

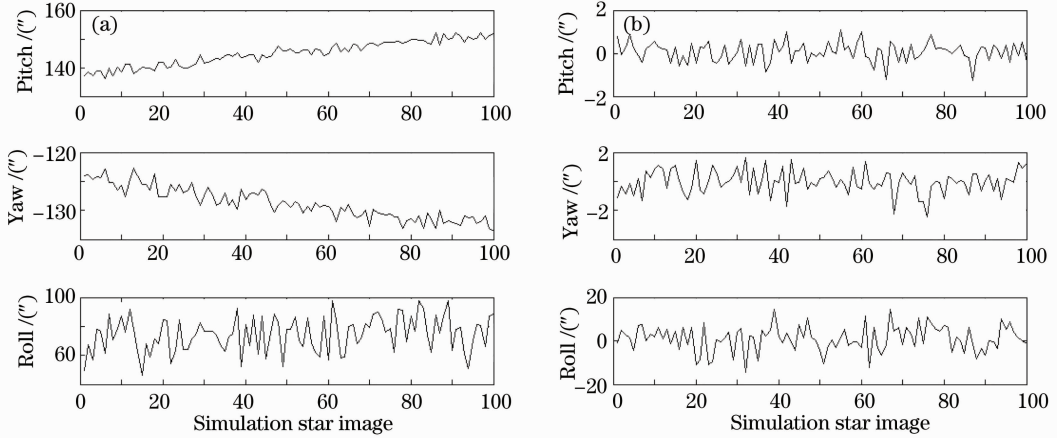


图 5 姿态确定误差曲线。(a)传统的在轨标定方法;(b)改进的在轨标定方法

Fig. 5 Error of attitude determination. (a) Traditional on-orbit calibration method; (b) modified on-orbit calibration method

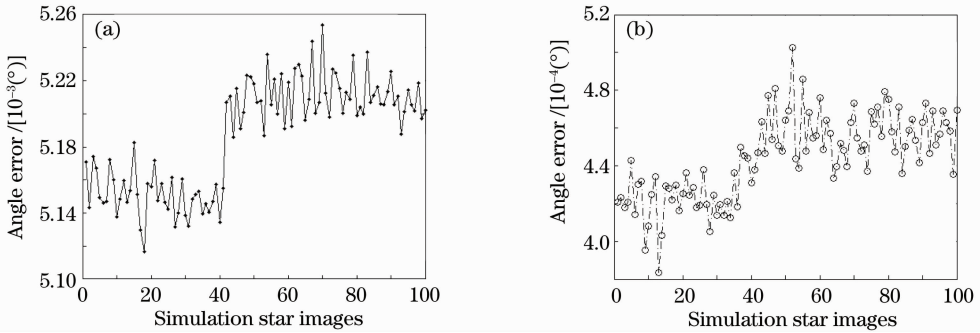


图 6 角距匹配偏差。(a)传统在轨标定方法;(b)改进的在轨标定方法

Fig. 6 Match deviation of angular distance between observed star vectors and reference vectors. (a) Traditional on-orbit calibration method; (b) modified on-orbit calibration method

将两种标定方法计算出的光学参数带入仿真程序,记录每幅图像的星间角距偏差绝对值,代入(13)式,计算星间角距统计偏差。由图 6(b)可看出,改进方法的星间角距统计偏差约为传统方法的1/10~1/8,能大幅度减小角距匹配误差限,提高星图识别成功率。

6 结 论

采用 LMS 和 EKF 在轨标定算法,在星像点无畸变和随机噪声较小的情况下,可以获得较高精度的焦距和主点标定结果,当光学畸变和随机噪声较大时,这种在轨标定算法存在较大偏差。本文通过

分析误差形成的因素,提出标定光学畸变是提高焦距标定精度的前提,在分析目前常用光学畸变标定方法的基础上,采用先对主点进行标定,确定光学畸变中心,利用控制点方法对光学畸变进行标定,最后对焦距进行标定的在轨标定方法。通过仿真分析,这种方法求解标定参数速度快,焦距标定精度高。利用改进的在轨标定方法计算获得的光学系统参数姿态确定精度高,累积误差小,星间角距统计偏差约为传统方法的 1/10~1/8,同时,这种方法也可应用于天文标定。

参 考 文 献

1 Wu Feng, Shen Weimin. Design of a catadioptric system for star

- sensors with wide field of view [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(2): 142~145
- 吴峰, 沈为民. 折反式大视场星敏感器光学系统设计[J]. 光学技术, 2004, **30**(2): 142~145
- 2 Zheng Yueying, Qian Weide, Du Yanwei *et al.*. An attitude determination method based on wide field of view star sensors[J]. *Aerospace Control*, 2008, **26**(4): 40~42
- 郑月英, 钱唯德, 杜彦卫等. 一种基于大视场星敏感器的定姿方法[J]. 航天控制, 2008, **26**(4): 40~42
- 3 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
- 4 Malak A. Samaan, Todd Griffith, Puneet Singla *et al.*. Autonomous on-orbit calibration of star trackers [C]. Springs: Core Technologies for Space Systems Conference, 2001. 1~18
- 5 M. D. Shuster, D. M. Chitre, D. P. Niebur. In-flight estimation of spacecraft attitude sensor accuracies and alignment [J]. *J. Guid. Control. Dyn.*, 1982, **5**(4): 339~343
- 6 Sun Gaofei, Zhang Guoyu, Zheng Ru *et al.*. Star sensor calibration research and development [J]. *J. 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
- 7 M. E. Pittelkau. Kalman filtering for spacecraft system alignment calibration [J]. *J. Guid. Control. Dyn.*, 2001, **24**(6): 1187~1195
- 8 Malak A. Samaan, Daniele Mortari, John L. Junkins. Nondimensional star identification for uncalibrated star cameras [J]. *J. Astronautical Sci.*, 2006, **54**(1): 1~17
- 9 Yuan Yanhong, Geng Yunhai, Chen Xueqin. Autonomous on-orbit calibration of star sensors[J]. *Aerospace Shanghai*, 2008, **25**(3): 6~10
- 袁彦红, 耿云海, 陈雪芹. 星敏感器自主在轨标定算法[J]. 上海航天, 2008, **25**(3): 6~10
- 10 Zhong Hongjun, Yang Mengfei, Lu Xin. Calibration method of star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1343~1348
- 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
- 11 Yang Biwu, Guo Xiaosong. Overview of nonlinear distortion correction of camera lens [J]. *J. Image and Graphics*, 2005, **10**(3): 269~274
- 杨必武, 郭晓松. 摄像机镜头非线性畸变校正方法综述[J]. 中国图像图形学报, 2005, **10**(3): 269~274
- 12 Ludovic Blarre, Julien Ouaknine, Lionel Oddos-Marcel *et al.*. High accuracy modern star trackers: recent improvements proposed on SED36 and HYDRA star trackers [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2006~6046
- 13 Zhu Zhengtao, Li Shaofa. Lens distortion and proofreading technology [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(1): 136~141
- 朱铮涛, 黎绍发. 镜头畸变及其校正技术[J]. 光学技术, 2005, **31**(1): 136~141
- 14 Liao Shizhong, Gao Peihuan, Su Yi *et al.*. A geometric rectification method for lens camera [J]. *J. Image and Graphics*, 2000, **5**(7): 593~596
- 廖士中, 高培焕, 苏艺等. 一种光学镜头摄像机图像几何畸变的修正方法[J]. 中国图象图形学报, 2000, **5**(7): 593~596
- 15 Liang Dongtai, Wang Xuanyin. Partition-based camera intrinsic and extrinsic parameters calibration for planar visual metrology [J]. *J. Shanghai Jiaotong University*, 2009, **43**(3): 422~426
- 梁东泰, 王宣银. 基于分块的摄像机内外参数标定方法[J]. 上海交通大学学报, 2009, **43**(3): 422~426