

视场网状分区域建模的星敏感器标定方法

金 荷^{1,2}, 毛晓楠^{1,2}, 孙少勇^{1,2}, 余路伟^{1,2}, 周 琦^{1,2}, 张 晴³

- (1. 上海航天控制技术研究所, 上海 200233;
2. 中国航天科技集团公司红外探测技术研发中心, 上海 200233;
3. 上海应用技术大学 计算机科学与信息工程学院, 上海 201418)

摘 要: 星敏感器标定是基于更高精度的测量基准对光学系统内方位元素进行建模与最优化解算的过程。针对大视场星敏感器光学系统误差分布非理想轴对称的实际情况, 提出了一种采用视场网状分区域建模的内方位元素最优化解算方法。首先, 在补偿了星敏感器与标定系统初始对准误差后, 基于针孔模型计算主点和焦距; 然后, 在视场分区域建模思想的指导下, 采用多项式拟合结合双线性插值的方法修正畸变; 最后, 提出了基于测角误差的标定精度评价准则。经实验室标定与外场观星验证, x 轴与 y 轴标定残差较全局建模法分别降低了 35% 和 20%, 证明了该方法的有效性。

关键词: 大视场星敏感器; 分区域校正; 双线性插值; 测角误差; 初始对准误差

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1017006

Star tracker calibration method based on the model of net zone-division field of view

Jin He^{1,2}, Mao Xiaonan^{1,2}, Sun Shaoyong^{1,2}, Yu Luwei^{1,2}, Zhou Qi^{1,2}, Zhang Qing³

- (1. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 200233, China;
2. Research and Development Center of Infrared Detection Technology, China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 200233, China;
3. School of Computer Science and Information Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: Based on the measuring benchmark of higher precision, the inner orientation elements of star tracker were modeled and optimized. Because of the fact that the error of the optical system with large FOV is not ideally axial symmetry, a calibration model based on net zone-division field of view and the corresponding optimization method was proposed to calculate inner orientation elements of star tracker. Firstly, the principle point and focal length were resolved based on pinhole model after the compensation of initial alignment error. Then, the polynomial combined with bilinear interpolation was used to correct the optical distortion under the guidance of zone-division modeling theory. Finally, measurement angle error was applied to the accuracy evaluation of calibration. A calibration experiment in lab and a real sky test validated the proposed method with the residual error of x axis decreased by 35% and y axis decreased by 20%.

Key words: star tracker with large field of view; zone-division calibration; bilinear interpolation; measurement angle error; initial alignment error

收稿日期: 2017-02-05; 修订日期: 2017-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(61401281); 上海市自然科学基金(14ZR1440700)

作者简介: 金荷(1992-), 女, 硕士生, 主要从事星敏感器误差抑制方面的研究。Email: 13621946541@163.com

导师简介: 孙少勇(1974-), 男, 研究员, 硕士, 主要从事空间光电测量技术方面的研究。Email: sunshaoyong@aliyun.com

0 引言

星敏感器是当前精度最高的空间飞行器姿态敏感器,在卫星姿态确定中被广泛应用。星敏感器主要由光学系统、电子学组件、遮光罩和支撑这三部分的主结构组成。电子学部分主要引入随机误差,该误差通过卫星姿轨控系统的数据融合或滤波可以有效抑制。光学系统部分主要引入低频误差,难以被卫星姿轨控系统滤除,是星敏感器误差抑制技术的难点。为了抑制低频误差,在使用前需要对星敏感器光学系统进行有效的标定,目的是建立星敏感器光学系统的精确数学模型,通过该模型计算与焦平面上的像点对应的入射星光矢量,服务于姿态确定算法。

精密测角法是基于单星模拟器和高精度转台构成的标定系统,以转台转角为基准对星敏感器光学系统内方位元素进行建模与最优化解算的过程,是星敏感器标定最典型的一种方法,已有较多学者开展了相关研究和试验^[1-6]。主要原理是基于光学系统畸变的轴对称特性和针孔模型,在全视场内建立统一的星矢量计算模型,通过最优化方法求出主点和焦距,再进行畸变修正,获得较高的星矢量测量精度。然而,对于较大视场的星敏感器(视场大于 15°),该方法有两个环节限制标定精度提高:(1)星敏感器测量坐标系与转台坐标系存在初始对准的误差,直接以双轴转台转角作为基准将影响标定精度;(2)对于大视场星敏感器,畸变并非理想的轴对称分布,全视场建立统一模型可能影响修正效果。

大多数标定方法假设星敏感器测量坐标系与转台坐标系在标定的起点是重合的,然而由于主点位置不确定,初始对准误差总是存在的,若直接以转台转角作为基准,将对标定精度产生影响。远国勤等^[1]为了减小初始对准引入的误差提出了分步渐进的标定方法,然而实验方法较为复杂,耗时过长。张广军等^[2]对该项误差建模,该模型基于主点由物理方法求出的假设,但是物理方法求取主点对星敏感器装调及实验设备有很高的要求。

在畸变校正方面,虽然理想情况下星敏感器的光学系统畸变主要为径向畸变,然而由于制造和装调中产生的误差(比如像平面倾斜)^[3]及光学系统像差的复杂性(球差、慧差、象散、场曲、位置色差、倍率色差、畸变)^[4],所以径向畸变公式的拟合精度有限。

由于装调引入的误差与光学系统像差都和星敏感器像点位置有对应关系,可以利用像点位置对畸变进行多项式拟合,得到比径向畸变公式更好的拟合效果,但多项式拟合所求出的系数是基于全视场标定的最优值,尤其对于大视场星敏感器,局部标定的残差还有减小的空间^[5]。乔培玉等^[6]提出了分块校正的概念,使用相同的模型在不同的区域分别进行最小二乘参数拟合,但是并没有提及如何解决区域之间的平滑问题,即当星点从一个区域运动到另一个区域时,由于不同区域的畸变校正系数不同,原本平滑的星点轨迹出现跳动,严重时可能导致姿态跳动。李勉洪等^[7]提出了基于 BP 神经网络的畸变校正方法,认为神经网络的拟合效果最佳,然而参考文献^[7]中的实验对象是 $72^\circ \times 72^\circ$ 视场的星敏感器,出于抗杂光的需求,星敏感器视场一般不会超过 30° ,此时神经网络在非线形拟合方面的优势并不明显,而计算复杂度却大大增加,不利于嵌入式系统的实时工作。

标定误差的评价也是标定算法的重要部分。主要有两种标定误差评价方式,郝雪涛等^[8]将星对角距误差运用到标定误差评价中;李勉洪等^[7]以转台转角的误差评价标定误差,两种评价方式都能在某种程度上表征标定残差,但是没有直观的体现星敏感器的单星测量精度,难以估计星敏感器的姿态误差。

文中基于上述 3 个问题提出一种初始粗对准情况下的视场分区域建模星敏感器标定方法,并给出了结合标定测角误差和观星误差的精度评价方法,主要分为以下 3 个步骤:

(1) 对星敏感器测量坐标系与转台坐标系的初始对准误差进行建模;

(2) 基于 6° 视场内畸变较小的标定点建立模型,结合初始对准误差模型进行非线性最优化处理,求出主点、焦距及初始对准误差参数,在以上求出参数的基础上计算全视场内标定残差,在全视场内利用多项式校正结合分区域双线性插值,在保证区域连续性的同时进一步减小标定残差;

(3) 以星敏感器星矢量测量误差——测角误差评价标定精度,将其分解到星敏感器 x, y 轴,以此估算 x, y 姿态精度,并且通过观星数据进行姿态精度的验证。

1 原理分析

标定前首先保证单星模拟器与二维转台两个转

轴所构成的平面垂直,将星敏传感器固定在二维转台上,设置转台轨迹,控制转台的方位角和俯仰角,使得星矢量以不同的角度入射,从而在星敏传感器焦平面的不同位置成像,在每个成像位置连续测量多次求均值,减小噪声对标定的影响。常用数据采样方法有等步距采样法与随机采样法,并使采样的像点布满整个视场。需要说明的是,虽然不同的数据采样方法对标定的结果可能存在影响,但在数据采样方法相同的前提下,是能够比较不同光学系统误差校正方法效果的。文中所作分析基于转台在俯仰与方位两个方向上等步距转动,见图 1。

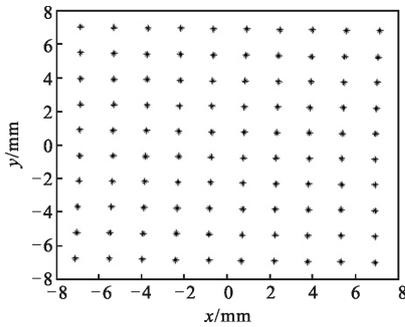


图 1 标定点视场分布

Fig.1 Calibration points distribution in field of view

1.1 建立初始对准误差模型

星敏传感器的测量坐标系以星敏传感器的光轴为 Z_m 轴,光轴与焦平面的交点为原点(即主点),探测器像元输出的行方向为 X_m 轴,通过右手法则确定 Y_m 轴。二维转台外框的转轴为 Y_r 轴,内框的转轴为 X_r 轴,通过右手法则确定 Z_r 轴(如图 2 所示)。

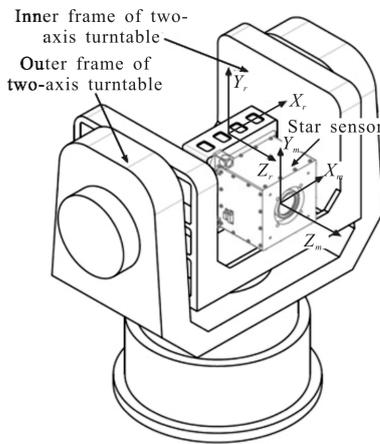


图 2 星敏传感器测量坐标系和转台坐标系

Fig.2 Star tracker measurement coordinate frame and turntable coordinate frame

当星敏传感器装在二维转台上时,理论上,星敏传感器测量坐标系与转台坐标系严格对准,但实际上对准误差总是存在。以三轴欧拉角 $(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ 描述两个坐标系之间的关系,转换矩阵如公式(1)^[2]:

$$A=R_z(\varphi_3)R_y(\varphi_2)R_x(\varphi_1)$$

$$R_x(\varphi_1)=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi_1 & \sin\varphi_1 \\ 0 & -\sin\varphi_1 & \cos\varphi_1 \end{bmatrix}$$

$$R_y(\varphi_2)=\begin{bmatrix} \cos\varphi_2 & 0 & -\sin\varphi_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi_2 & 0 & \cos\varphi_2 \end{bmatrix}$$

$$R_z(\varphi_3)=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi_3 & \sin\varphi_3 \\ 0 & -\sin\varphi_3 & \cos\varphi_3 \end{bmatrix}$$
(1)

由于 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 均为小角度,为了便于计算,可做如下近似, $\cos\varphi \approx 1, \sin\varphi \approx \varphi$ 。

转台初始位置下,星矢量在转台坐标系中的坐标为 $[0, 0, 1]^T$,当转台转动时,假设方位角为 α ,俯仰角为 β ,则此时星矢量在转台坐标系中的位置如公式(2):

$$v_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_i & \sin\beta_i \\ 0 & -\sin\beta_i & \cos\beta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha_i & 0 & -\sin\alpha_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha_i & 0 & \cos\alpha_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$
(2)

则星矢量在星敏传感器测量坐标系中的单位矢量如公式(3):

$$w_i = Av_i = [w_{i1}, w_{i2}, w_{i3}]^T$$
(3)

假设焦距为 f ,主点为 (x_0, y_0) ,可以由第 i 个平行光矢量根据小孔成像模型求出在星敏传感器焦平面上的理想成像点如公式(4):

$$\begin{cases} x_{id} = -\frac{w_{i1}}{w_{i3}}f + x_0 \\ y_{id} = -\frac{w_{i2}}{w_{i3}}f + y_0 \end{cases}$$
(4)

实际成像点为 (x_i, y_i) ,实际成像点与理想成像点的差见公式(5):

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1id} - x_1 \\ y_{1id} - y_1 \\ x_{2id} - x_2 \\ y_{2id} - y_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{w_{11}}{w_{13}}f + x_0 - x_1 \\ -\frac{w_{12}}{w_{13}}f + y_0 - y_1 \\ -\frac{w_{21}}{w_{23}}f + x_0 - x_2 \\ -\frac{w_{22}}{w_{23}}f + x_0 - y_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ \vdots \end{bmatrix} = P$$
(5)

求解非线性最优化问题,首先对未知数 $\varphi_1, \varphi_2,$

φ_3 和 x_0, y_0, f 求 Jacobi 矩阵如公式(6):

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial P}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial P}{\partial \varphi_3} & \frac{\partial P}{\partial f} & \frac{\partial P}{\partial x_0} & \frac{\partial P}{\partial y_0} \\ \frac{\partial p_1}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial p_1}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial p_1}{\partial \varphi_3} & \frac{\partial p_1}{\partial f} & \frac{\partial p_1}{\partial x_0} & \frac{\partial p_1}{\partial y_0} \\ \frac{\partial p_2}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial p_2}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial p_2}{\partial \varphi_3} & \frac{\partial p_2}{\partial f} & \frac{\partial p_2}{\partial x_0} & \frac{\partial p_2}{\partial y_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (6)$$

将建立的方程和对应的 Jacobi 矩阵代入 MATLAB 最优化工具箱, 给定未知数初始值, 以最小二乘原则求出未知数的最优值使得理想点与实际点的差最小, 即 $\min[\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta x_2, \Delta y_2, \dots]^T$ 。

1.2 多项式拟合及分区域校正建模

将 6° 视场内受畸变影响较小的标定代入以上初始对准误差模型, 求解初始对准误差参数、主点及焦距, 然后根据公式(1)~(5)可以得到全视场内残差的分布情况, 由于光学系统像差和装调产生的星点成像误差与星点在像平面上的成像位置有平滑的对应关系, 多项式可以很好的拟合这种关系。在多项式阶数选择方面, 如果阶数过低则拟合效果不好, 如果阶数过高, 会产生龙格现象^[6], 即参加标定的点精度提高, 标定之外的点精度降低。为了进一步减小标定残差又不引起龙格现象, 采用三阶多项式拟合结合分区域校正的方法, 最大程度减小全视场内的残差。

三阶多项式校正公式如公式(7):

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1 & \Delta y_1 \\ \Delta x_2 & \Delta y_2 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & x_1^3 & x_1^2 y_1 & x_1 y_1^2 & y_1^3 \\ x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & x_2^3 & x_2^2 y_2 & x_2 y_2^2 & y_2^3 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} \\ r_{12} & r_{22} \\ r_{13} & r_{23} \\ r_{14} & r_{24} \\ r_{15} & r_{25} \\ r_{16} & r_{26} \\ r_{17} & r_{27} \\ r_{18} & r_{28} \\ r_{19} & r_{29} \end{bmatrix} \quad (7)$$

将所有标定点的测量值及上一步最优化计算后的残差代入以上公式, 列出超定方程, 这是一个线性

最小二乘问题, 容易求得多项式校正系数矩阵 R 。

100 个标定将视场分为 81 个区域, 如图 1 所示, 呈网状分布, 每个区域有 4 个标定, 每个区域中的点利用这 4 个标定点进行双线性插值, 求得对应的残差。

假设某个方形区域的 4 个角上的标定点为 a, b, c, d , 可以列出如下方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_a & \Delta y_a \\ \Delta x_b & \Delta y_b \\ \Delta x_c & \Delta y_c \\ \Delta x_d & \Delta y_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a & y_a & x_a y_a & 1 \\ x_b & y_b & x_b y_b & 1 \\ x_c & y_c & x_c y_c & 1 \\ x_d & y_d & x_d y_d & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \\ g_{31} & g_{32} \\ g_{41} & g_{42} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: 等式左边为各标定经过多项式拟合后的残差, $(x_a, y_a), (x_b, y_b), (x_c, y_c), (x_d, y_d)$ 为实际采集星点质心坐标。这是一个线性方程组, 容易求出系数矩阵 G , 则每个该区域内的点可以根据该系数矩阵求得对应残差, 然后进行校正。由于利用了相邻点的插值, 避免了星点从一个区域运动到另一个区域时的星轨迹跳动。

1.3 标定精度评价

测角误差反映星敏感器对星矢量的测量误差, 是星敏感器最基本的误差衡量准则, 理论上可以用来估计姿态误差^[8], 所以将标定残差转化为测角误差, 再分解到星敏感器的 x 轴和 y 轴上, 即为 x 轴和 y 轴的测角误差。

L_r 为入射星矢量在星敏感器测量坐标系中的理想值, L_c 是星矢量在星敏感器测量坐标系中的实际值。单星模拟器所发出的星光矢量在星敏感器像面成像, 将提取的星点质心数据由公式(7)和(8)校正后, 可以根据小孔成像模型计算出 L_c , 理想情况下 L_c 与 L_r 平行, 然而由于标定残差两者并不平行, 存在测角误差。为了便于分析将其分解为 x 方向的测角差 ΔL_x 和 y 方向的测角差 ΔL_y , 分别对应星敏感器 x 轴精度和 y 轴精度。

根据第 1.1 节的计算结果及公式(1)~(4)可以得出全视场星点的理想值 (入射光在星敏感器上成像的理想值) 及主点焦距, 由公式(9)计算出:

$$L_r = \begin{bmatrix} L_r(1) \\ L_r(2) \\ L_r(3) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{(x_{id}-x_0)^2 + (y_{id}-y_0)^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -(x_{id}-x_0) \\ -(y_{id}-y_0) \\ f \end{bmatrix} \quad (9)$$

将星敏感器实际成像点根据公式(7)和(8)校正后, 由公式(10)求得:

$$L_c = \begin{bmatrix} L_c(1) \\ L_c(2) \\ L_c(3) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{(x+\Delta x-x_0)^2+(y+\Delta y-y_0)^2+f^2}} \begin{bmatrix} -(x+\Delta x-x_0) \\ -(y+\Delta y-y_0) \\ f \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中： (x, y) 为星点实际坐标； Δx 为 x 坐标的畸变校正正值； Δy 为 y 坐标的畸变校正正值。

将 L_r 和 L_c 的矢量差由公式(11)和(12)分解到星敏感器 x 轴和 y 轴上：

$$\Delta L_x = \frac{L_c(2) - L_r(2)}{L_r(3)} \quad (11)$$

$$\Delta L_y = \frac{L_r(2)L_c(2) - L_r^2(2) - L_r^2(3) + L_r(3)L_c(3)}{L_r(3)} \quad (12)$$

式中： ΔL_x 为 x 轴的测角误差； ΔL_y 为 y 轴的测角误差。

所以 x 方向的测角误差为 $3 \cdot \text{std}(\Delta L_x)$ ， y 方向的测角误差为 $3 \cdot \text{std}(\Delta L_y)$ 。

平均定姿星数可以通过探测器的探测能力估算，若星敏感器运行时平均定姿星数为 N ，假设星点在探测器上均匀分布，则 x, y 方向姿态误差估计值分别为 $\frac{3 \cdot \text{std}(\Delta L_x)}{\sqrt{N}}$ ， $\frac{3 \cdot \text{std}(\Delta L_y)}{\sqrt{N}}$ 。

2 标定实验数据分析与观星验证

2.1 标定试验数据分析

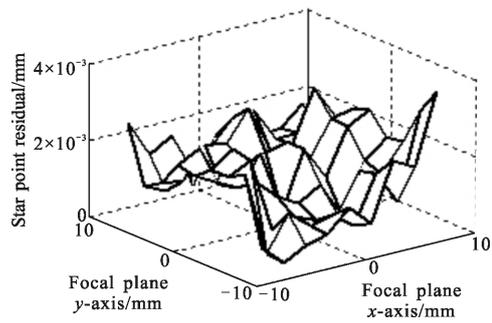
将某型视场 20° 的 APS 星敏感器根据上述实验方法进行标定，首先建立 1.1 节中的初始对准误差模型，求出参数 $\varphi_1=0.009\ 0\ \text{rad}$ ， $\varphi_2=-0.001\ 3\ \text{rad}$ ， $\varphi_3=0.017\ 6\ \text{rad}$ ， $f=43.442\ 1\ \text{mm}$ ， $x_0=0.074\ 8\ \text{mm}$ ， $y_0=0.409\ 1\ \text{mm}$ 。由上述参数根据公式(1)~(5)计算出全视场内的残差，使用 4 种方式对全视场内的残差进行拟合：径向畸变公式、多项式、文中方法、神经网络。其中径向畸变公式、多项式和神经网络都是全局校正方法，文中方法为分区域修正方法。

表 1 中将该方法与 3 种全局校正方式进行对比，可以看出文中方法的畸变校正效果最好，与多项式全局校正方法相比， x 方向测角误差降低 35%， y 方向降低 20%；径向畸变公式的畸变校正效果最差。采用 BP 前向神经网络拟合畸变效果比分区域校正稍差。图 3(a)~(b)分别为径向畸变公式、多项式、文中方法、BP 前向神经网络校正之后星点误差在视场中的分布。

表 1 畸变校正方式精度对比

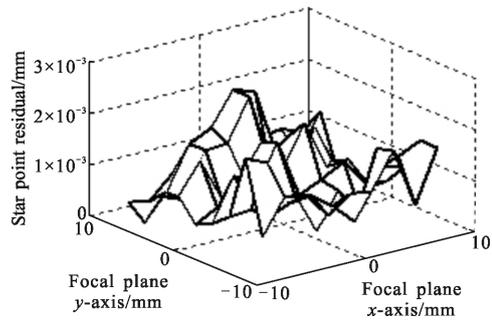
Tab.1 Comparison of distortion calibration method accuracy

Calibration method	x-axis calibration residual/(")	y-axis calibration residual/(")
Radial distortion formula	13.6	16.2
Polynomial	11.2	10.8
Proposed method	7.3	8.6
Neural net	7.8	9



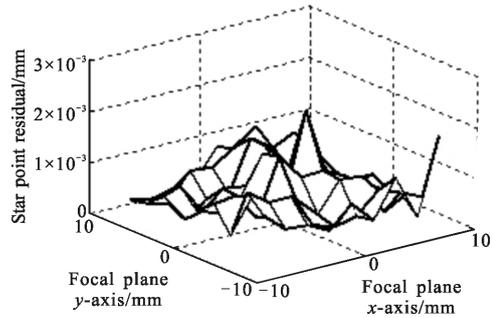
(a) 径向畸变校正后星点误差

(a) Star points error after being calibrated by radial distortion



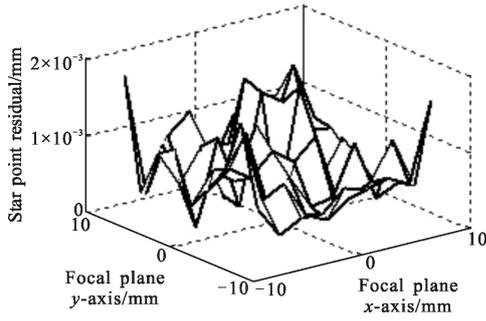
(b) 多项式畸变校正后星点误差

(b) Star points error after being calibrated by polynomial distortion



(c) 文中方法校正后星点误差

(c) Star points error after being calibrated by this paper method



(d) 神经网络校正后星点误差

(d) Star points error after being calibrated by neural net

图 3 畸变校正后的星点误差

Fig.3 Star points error after being calibrated by distortion

确保星矢量修正后的连续与平滑是星敏感器光学系统误差分区域建模必须注意的问题。由于在区域内采用同样的校正参数,星轨迹一定是平滑的,跳动只可能发生在区域的边界,所以取边界上的点对跳动情况进行观察,见图 4。边界上的点采用不同区域的校正参数,求得不同的校正点,以两个校正点的差值衡量星点跳动的程度。上述星敏感器在各区域边界上的点的星矢量跳动为 $0.00004^\circ(3\sigma)$,可以忽略。

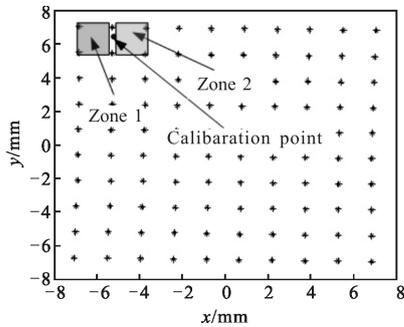


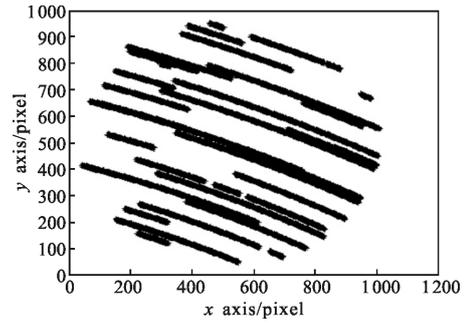
图 4 相邻区域临界点

Fig.4 Calibration points between adjacent zones

2.2 观星验证

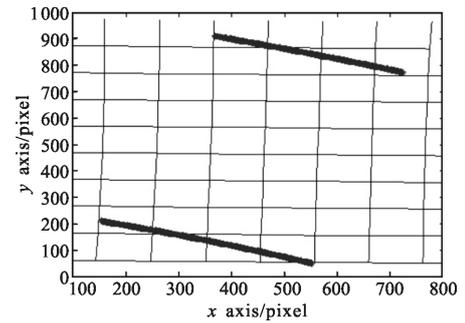
为了验证文中提出方法的有效性,开展了外场观星验证,试验的目的是:(1) 验证基于视场分区域建模的内方位元素计算的正确性;(2) 验证基于测角误差评价标定精度的有效性,即测角误差与光学系统误差引起的姿态低频误差(LSFE)的一致性。选择合适的窗口大小,由滑动窗口法求出三轴总误差^[10],拟合三轴总误差中的趋势项,即为低频误差。某型 APS 星敏感器数据更新周期为 330 ms,对其连续 12 000 帧数据进行分析。图 5(a)为该观星过程的

所有用于定姿的星轨迹,可以看出星轨迹几乎覆盖全视场,所以处理该观星过程得到的误差具有代表性;图 5(b)为两条视场边缘的星轨迹,跨越标定区域时轨迹连续平滑,与标定时统计情况一致。图 6 为姿态误差曲线,可以看出其总误差中的趋势项,即低频误差。



(a) 观星过程中的星轨迹

(a) Star trails during sky test

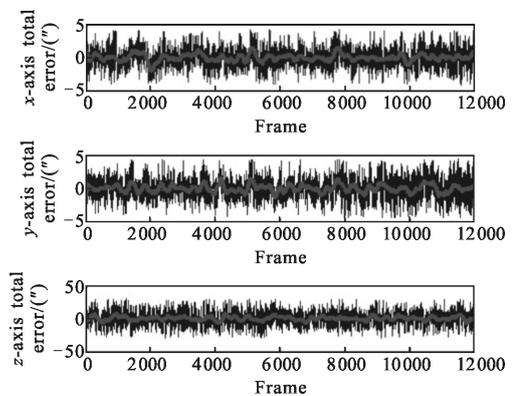


(b) 其中一条星轨迹

(b) One star trail

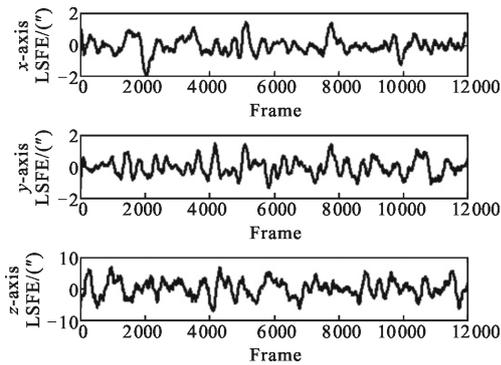
图 5 星轨迹

Fig.5 Star trail



(a) 总误差

(a) Total error



(b) 低频误差

(b) Low frequency error

图 6 APS 星敏感器观星数据处理

Fig.6 APS star sensor real sky test data processing

对某型 APS 星敏感器进行标定及观星验证,单星标定残差及基于观星数据分析所得低频误差见表 2,考虑到实际姿态测量时,多星定姿算法可有效

表 2 星敏感器标定及观星验证

Tab.2 Star tracker calibration and real sky test

Star tracker	Calibration method	Calibration residual (x/y)/(")	Average number of stars	Estimated LSFE/(")	Real sky test LSFE /(")
	Proposed method	7.3/8.6		1.7/2.0	1.4/1.5
APS star tracker	Radial distortion formula	13.6/16.2	18	3.2/3.8	3/3.4
	Polynomial	11.2/10.8		2.6/2.5	2.3/2.3
	Neural net	7.8/9		1.8/2.1	1.5/1.5

降低单星标定残差的影响,因此平均定姿星数亦列入该表。由标定残差估计的低频误差与实测值基本吻合,但是有一定的差别,可能的原因有 3 项:(1) 标定残差包含了一部分 S 曲线误差;(2) 观星环境与实验室环境在温度上的不一致;(3) 未修正光学系统色差。由观星数据可以看出该方法得到的低频误差比全局标定方法小,与标定结果基本一致。需要说明的是,文中根据外场观星实测的星点在像面上的坐标及星点识别结果作为算法验证的原始数据。虽然不同的标定数据可能导致星跟踪的结果不同,但是文中所列的 4 种方法跟踪状态基本相同。这是因为 4 种方法焦距和主点相同,区别仅在于对畸变误差的建模与修正方法,星跟踪算法在根据预测的星矢量计

算星点位置时只使用了主点和焦距。同时,4 种算法单星定位精度都小于 20",星矢量预测偏差在 10 pixel×10 pixel 的跟踪波门中可以忽略不计,在星敏感器内置导航星库双星剔除完成的情况下跟踪状态基本相同。在此基础上,可以更好的对比畸变误差建模与修正方法。

3 结论

文中提出了一种视场分区域建模的星敏感器标定方法。首先建立了初始对准误差模型,为内方位元素解算提供了更符合实际情况的最优化模型;然后建立了视场内分区域校正模型,利用双线性插值方法在多项式校正模型的基础上将 x 方向标定精度提高 35%,y 方向标定精度提高 20%,并解决了视场分区域建模可能导致的星点跨区域时的轨迹跳动问题;最后提出了基于测角误差的标定精度评价准则,并以此估算姿态精度。标定及观星实验证明了该方法的有效性。标定时对 s 曲线误差、色差和温度的补偿还可以进一步减小标定残差,同时令姿态估计值更接近真实值。

参考文献:

[1] Yuan Guoqin, Ding Yalin, Hui Shouwen, et al. Grouped approach algorithm for mapping camera calibration based on method of exact measuring angle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 1-6. (in Chinese)
远国勤,丁亚林,惠守文,等.基于精密测角法的测绘相机分组渐进标定算法[J].光学学报,2012,32(1):1-6.

[2] 张广军,郝雪涛,江洁.一种星敏感器内外方位元素校准方法:中国,200510112553.7[P].2007-11-17.

[3] Sun Ting, Xing Fei, You Zheng. Optical system error analysis of high accuracy star trackers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0323003. (in Chinese)
孙婷,邢飞,尤政.高精度星敏感器光学系统误差分析[J].光学学报,2013,33(3):0323003.

[4] Wu Yanxiong. Study on several key technologies for high-accuracy star tracker [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
伍雁雄.高精度星敏感器若干关键技术研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2015.

[5] He Pengju, Liang Bin, Zhang Tao, et al. Calibration method

- for wide field of view star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1023001. (in Chinese)
- 贺鹏举, 梁斌, 张涛, 等. 大视场星敏传感器标定技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1023001.
- [6] Qiao Peiyu, He Xin, Wei Zhonghui, et al. Calibration of high accuracy star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2780–2784. (in Chinese)
- 乔培玉, 何昕, 魏仲慧, 等. 高精度星敏传感器的标定[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2780–2784.
- [7] Li Mianhong, Ding Guopeng, Zheng Weibo. Calibration technology for wide field of view star sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015, 34(7): 40–47. (in Chinese)
- 李勉洪, 丁国鹏, 郑伟波. 大视场星敏传感器标定技术[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(7): 40–47.
- [8] Carl Christian Liebe. Accuracy performance of star trackers-a tutorial [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 581–599.
- [9] Hao Xuetao, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Star sensor model parameter analysis and calibration method[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2005, 32(3): 6–8. (in Chinese)
- 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): 6–8.
- [10] Schmidt U, Elstner C H, Michel K. ASTRO 15 star tracker flight experience and further improvements towards the ASTRO APS star tracker [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2008.
- [11] Zheng Xunjiang, Zhang Guangjun, Mao Xiaonan. A very high precision errors test method for star sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1606–1609. (in Chinese)
- 郑循江, 张广军, 毛晓楠. 一种甚高精度星敏传感器精度测试方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1606–1609.
- [12] Sun Yahui, Deng Yunhai, Wang Shuang. Analysis and calibration of star sensor's image plane displacement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3322–3328. (in Chinese)
- 孙亚辉, 邓云海, 王爽. 星敏传感器像位移误差的分析与校正[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3322–3328.
- [13] Fan Qiaoyun, Li Xiaojuan, Zhang Guangjun. Selection of star sensor lens aberration model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 666–670. (in Chinese)
- 樊巧云, 李小娟, 张广军. 星敏传感器镜头畸变模型选择[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 666–670.
- [14] 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): 610–615. (in Chinese)
- 郭敬明, 赵金宇, 何昕, 等. 船载高精度星敏传感器安装角的标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(3): 610–615.
- [15] Li Chunyan, Li Huaifeng, Sun Caihong. Astronomical calibration method and observation analysis for high accuracy star sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(4): 559–563. (in Chinese)
- 李春艳, 李怀峰, 孙才红. 高精度星敏传感器天文标定方法及观测分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 559–563.
- [16] Liang Bin, Zhu Hailong, Zhang Tao, et al. Research status and development tendency of star tracker technique [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 17–29. (in Chinese)
- 梁斌, 朱海龙, 张涛, 等. 星敏传感器技术研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 17–29.
- [17] Zhi Shuai, Zhang Liu, Li Xinlu. Realization of simulated star map with noise[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 582–587. (in Chinese)
- 支帅, 张刘, 李欣璐. 带噪声模拟仿真星图的实现[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 582–587.