

文章编号: 0253-2239(2010)05-1343-06

星敏传感器标定方法研究

钟红军¹ 杨孟飞² 卢欣¹

(¹北京控制工程研究所, 北京 100190; ²中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要 星敏传感器标定是对其内部各种参数的估计,能有效减小星敏传感器的系统误差,提高其姿态输出精度。根据待定系数标定和内部参数标定参数的不同,建立了星敏传感器标定参数模型。并针对不同标定模型,分别介绍了各种标定参数的地面标定方法和计算方法。在分析现有在轨标定方法、比较在轨标定和地面标定的差别的基础上,重点分析了星敏传感器焦距和主点等内部参数的在轨标定方法,采用扩展卡尔曼滤波对在轨星图进行处理。仿真结果表明,焦距和主点估计值的扩展卡尔曼方法较最小二乘估计法,其收敛速度快、稳定性好且精度高,在 5000 幅星图后输出即可稳定,可有效去除星点随机误差影响,提高标定精度。

关键词 光学器件;星敏传感器;标定;模型

中图分类号 V241.62+3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20103005.1343

Calibration Method of Star Sensor

Zhong Hongjun¹ Yang Mengfei² Lu Xin¹

(¹ Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)
(² Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract Calibration is the estimation of the internal parameters of star sensor, which can decrease the system error and improve the pointing precision. Based on the different calibration method between coefficients to be determined and internal parameters, the calibration models are established. The different approaches of ground calibration and data processing are summarized according to different calibration models. The on orbit calibration method of focal length and optical center offset is analyzed, and the on orbit star images are processed with extended Kalman filter. The simulation results indicate that the new method can converge more quickly and eliminate the random centroiding measurement errors more efficiently than the nonlinear least squares estimation.

Key words optical devices; star sensor; calibration; model

1 引 言

星敏传感器是卫星姿态控制系统中的重要测量部件,也是当前广泛应用的光学姿态敏感器;它以太空中的恒星作为姿态测量的参考源,输出其在惯性参考系中的指向。星敏传感器标定是对其内部各种参数的估计,能有效减小星敏传感器的系统误差,提高姿态输出精度。星敏传感器的理想模型为针孔模型,由于和实际状态存在较大差别,因此存在标定误差,包括焦距估计误差、光轴和像面交点误差、像面和光轴不垂直度误差、像面转动误差以及光学畸变等。每个星敏传感器的标定参数均不完全相同,因此标定试验

是所有星敏传感器的必经过程^[1~3]。

由于星敏传感器地面标定在常温常压下进行,与其在轨应用环境有较大差别;星敏传感器标定参数也易受卫星发射过程振动等原因的影响;同时采用实际观星标定方法时无法完全消除大气折射对星图的影响;因此在轨阶段需要将标定参数进行适应性调整,以提高其在轨姿态测量精度。在轨标定无法采用地面标定所用的转台,只能利用在轨拍摄星图进行标定,和地面标定最大的区别为在轨不能消除星图中星点的随机误差^[1~3]。

本文介绍了星敏传感器标定模型,包括理想针孔

收稿日期: 2009-05-31; 收到修改稿日期: 2009-07-28

基金项目: 国家 863 计划(2006AA703221)资助课题。

作者简介: 钟红军(1978—),男,硕士,高级工程师,主要从事星敏传感器方面的研究。E-mail: mailzonecn@yahoo.com.cn

模型和实际模型,给出了待定系数标定和内参数标定的地面标定方法,并介绍了星敏传感器内参数的在轨标定方法。

2 星敏传感器标定模型

星敏传感器的理想模型为针孔模型,如图 1 所示。星光经过光学系统在成像敏感器件上形成弥散斑。星敏传感器图像坐标系为 (x_s, y_s, z_s) 假设星像中心坐标为 (x_i, y_i) ,则恒星单位矢量在星敏传感器本体坐标系中可为

$$\mathbf{S}_i = \frac{1}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -x_i \\ -y_i \\ f \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 f 为光学系统焦距。

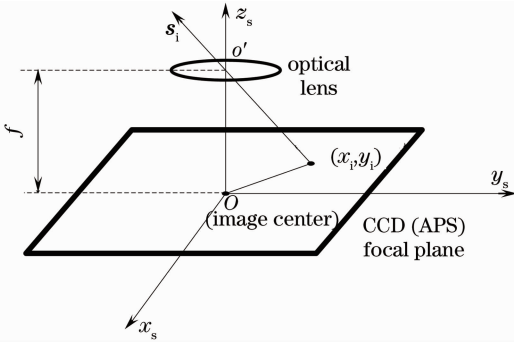


图 1 星敏传感器理想针孔模型

Fig. 1 Ideal pinhole model of star sensor

针孔模型是基于共线原理,星空中的每一个点都通过投影中心直接映射到图像平面上。针孔模型仅仅是真实星敏传感器的简单近似,不能准确描述成像几何关系,尤其是对于视场角较大的情况,远离图像中心将会出现较大的畸变。

2.1 待定系数法

由于星敏传感器存在各种误差,同时焦距 f 不能精确测定,(1)式将不适用,此时可用如下曲面方程代替

$$\mathbf{S}_s = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11}x_i^2 + k_{12}x_i y_i + k_{13}y_i^2 + k_{14}x_i + k_{15}y_i + k_{16} \\ k_{21}x_i^2 + k_{22}x_i y_i + k_{23}y_i^2 + k_{24}x_i + k_{25}y_i + k_{26} \\ \sqrt{1 - x^2 - y^2} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

利用大量离散星像来标定曲面方程的各项系数,称为待定系数方法。待定系数方法简单,计算中只有加法和乘法运算,避免了三角函数等超越函数的运算,可大大提高计算速度。如果需要标定精度

较高,可用更高次曲面方程对像面近似。例如 502 所 APS 高精度星敏传感器采用多阶曲面方程,德国 Jena 公司 ASTRO10 星敏传感器产品也采用待定系数标定法,共 40 个标定参数。

待定系数法的主要限制在于只能构造出一个曲率变化较小的曲面。当星敏传感器视场较小时,像面较平,曲率变化不大,因此待定系数法的标定精度较高;但对于大视场星敏传感器,其像面弯曲程度较大同时曲率变化也很大,很难在全视场范围内由一个曲面逼近整个像面,因此影响最终标定精度。

标定残差与标定点到视场中心的距离直接相关,标定点到视场中心的距离越近则标定残差越小,标定点到视场中心越远则残差越大。

2.2 内部参数法

星敏传感器的实际模型如图 2 所示。星敏传感器内部参数指的是星敏传感器成像的基本参数,如主点 O 、焦距、光学系统畸变和其他系统误差等参数。

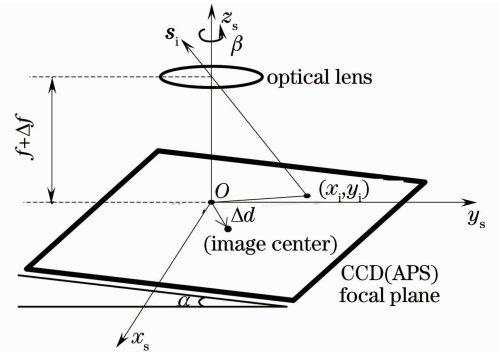


图 2 星敏传感器实际模型

Fig. 2 Actual model of star sensor

星敏传感器实际模型包含以下误差:焦距误差 Δf 、主点误差 Δd 、像面和光轴之间倾斜角 α 、像面旋转角 β 、光学系统畸变和色偏差等。

像面旋转角 β 可通过后期基准镜进行修正;由 JPL 实验室 Liebe 的研究^[6]可知,像面和光轴之间倾斜角 α 对星敏传感器精度影响较小,光学系统色偏差对精度影响也较小,均可忽略。因此星敏传感器标定参数为焦距、主点位置和光学系统畸变等三项主要参数。

如果考虑主点位置误差,则恒星单位矢量在星敏传感器本体坐标系中的矢量方向 \mathbf{S}_i 可表示为

$$\mathbf{S}_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -(x_i - x_0) \\ -(y_i - y_0) \\ f \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 (x_0, y_0) 为主点像面坐标。

光学系统畸变参数属于星敏感器内参数的一部分,包括径向畸变和切向畸变。一般情况下,径向畸变是影响星敏感器标定精度的主要因素。径向畸变会引起图像点沿径向移动,离中心点越远,其变形量越大。其他切向畸变等误差源引起的畸变非常小,可以忽略不计,而且引入太多的畸变参数,不仅不能提高星敏感

器的标定精度,反而会使标定结果不稳定^[7]。

对于一般精度的星敏感器,可只取径向畸变的一级近似。对于大视场和高精度星敏感器,则需要更高的阶数。取径向畸变的参数 k_1, k_2 , 光学系统畸变最终标定结果^[8,9]为

$$\begin{aligned}\bar{x} - x_0 &= (x - x_0) + \Delta x_r = (x - x_0)(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ \bar{y} - y_0 &= (y - y_0) + \Delta y_r = (y - y_0)(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4),\end{aligned}\quad (4)$$

式中 (\bar{x}, \bar{y}) 为修正畸变后的星点坐标, $\Delta x_r, \Delta y_r$ 分别为星点在 x 和 y 方向上的畸变。

3 参数标定方法

3.1 待定系数标定方法

待定系数标定方法可同时对焦距、主点误差、空间量化误差和光学系统畸变等进行修正。可采用实验室高精度转台和外场实际观星两种标定方式。

实验室转台标定方法^[10]为:利用单星模拟器和精密转台,在视场内均匀设置标定网格点,由星敏感器测出各网格点的星像数据,并用星点质心算法计算出星像中心 (x_i, y_i) 。每个网格标定采集多幅星图,取星像中心的平均值以消除随机误差的影响,提高星点质心测量精度。同时由星敏感器光轴在模拟器及转台系统中的方位角和高度角,坐标变换可得高精度坐标 (x, y, z) ,利用最小二乘法可确定出全部的待定系数 $k_{i,j}$ 。

外场观星标定具体方法^[11]为:将地球当作均匀转动转台,由精确时钟替代刻度盘,用相对地球静止的星敏感器对天顶领域进行观测。把星点作为目标,让其匀速扫过视场,分别记录它们每个时刻在星敏感器像面坐标系中的位置及其在天球惯性坐标系中的坐标,将不同时刻拍摄的恒星坐标归算到观测起始时刻的位置。用多项式拟合星点位置和对应的像点坐标,得到标定系数。外场观星标定方法简单方便,但由于存在计时误差、恒星坐标归算到起始时刻的计算误差、视场恒星分布不均匀等因素影响,因而导致其标定精度较低,此方法只适用于中低精度星敏感器。

3.2 内参数标定方法

3.2.1 主点标定方法

在内参数标定方法中,主点必须先于其他参数标定。主要标定设备为转台和单星模拟器,星敏感

器固定于转台上。具体有以下两种方法:

1) 单星模拟器成像于星敏感器像面,将星敏感器沿光轴转动 360° ,记录下每个转动位置对应的星点成像坐标,所有成像点组成一个以主点为圆心的近似圆环。调整单星模拟器位置,使单星成像圆半径逐渐变小,重复上述过程,直至圆环缩小成一个点,此点即为标定主点。

2) 方法同上,将星敏感器沿光轴转动 360° 后,得到由成像点组成的近似圆环,对得到的图形用标准圆形进行拟合,拟合后的圆心即为主点。如图 3 所示^[12]。

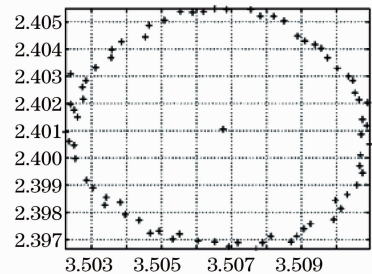


图 3 星敏感器主点位置估计曲线图

Fig. 3 Estimation of position of optical centre

方法 1) 需要人工判断干预,实验过程相对复杂,实际应用过程中单星位置尽量采用星敏感器提取坐标,以减小判读误差,同时严格星点重合判断条件,转台定位精度对最终标定精度有较大影响。方法 2) 实验过程简单,后期数据处理过程复杂,拟合计算后也可得到较高精度主点位置。

3.2.2 焦距标定方法

主点确定后,即可进行焦距标定,采用实际观星方式进行焦距标定,方法简单可靠。利用恒星跟踪转台,星敏感器拍摄当前视场多幅星图,对星图星点坐标进行多帧平均以减小随机误差的影响;根据当前星图的导航星表匹配识别结果,将拍摄星图中的星对角距和对应星表中的星对角距进行比较。由于

光学系统像差和倾斜角造成的误差在主点附近位置误差较小,因此应尽量采用主点附近的星对角距进行计算。

设第 i 颗恒星的赤经和赤纬分别为 α_i, δ_i , 则其在惯性空间指向为

$$\mathbf{v}_i = \begin{pmatrix} \cos \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \delta_i \end{pmatrix}. \quad (5)$$

恒星星对角距的计算公式如下^[13]

$$d_{ij} = \mathbf{v}_i^\top \mathbf{v}_j = \frac{(x_i - x_0)(x_j - x_0) + (y_i - y_0)(y_j - y_0) + f^2}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + f^2} \sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + f^2}}, \quad (6)$$

式中 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 分别为观测星点质心在像面上的坐标, d_{ij} 为导航星表星对角距。

可采集天顶附近其他光轴指向位置的多幅星图,对大量的测量结果进行最小二乘拟合,以提高标定精度^[14]。在最小二乘拟合过程中,可同时对焦距、主点坐标 (x_0, y_0) 进行拟合估计。

此方法特别适用于小孔径光学系统,因为孔径越小,光学系统像差造成的畸变也越小。如果星敏感器灵敏度足够高,可在光学系统外部进一步缩小其通光口径。

3.2.3 倾斜角标定方法

倾斜角标定在主点和焦距标定完成后进行。倾斜角的标定结果虽然不作为标定参数,但可据此估计出其对星敏感器测量精度的影响。倾斜角有以下两种标定方法:

i) 基于主点标定方法 2) 的测量结果,可得到每一个测量点至主点(拟合圆心)的距离,将其与拟合后的圆半径进行比较,可得到每一个测量点的偏差,经过简单转换即可得到倾斜角以及倾斜方向。

ii) 实际观星方法。选择视场中的两颗观测星,其中一颗观测星位于视场中间,并且尽量靠近主点,另外一颗观测星尽量靠近视场边缘;将星敏感器转动 360° ,记录下每一个观测位置的角距,由角距的变化情况可得到倾斜角的大小和方向。

3.2.4 畸变系数标定方法

所有其他参数标定完成后进行光学系统畸变系数的标定。同样采用实际观星方法,拍摄多幅星图,选择靠近主点的一颗观测星和另一颗靠近视场边缘的观测星,将观测星角距和星表中对应角距进行比较。根据(4)式可得光学系统畸变参数校正公式^[15,16]

$$r_m - r_c = k_1 r^3 + k_2 r^5, \quad (7)$$

式中 r_m 为实际观测的星对角距, r_c 为观测星对应星表中的星对角距。用最小二乘估计方法(LSE)即可求出畸变参数 k_1, k_2 。

4 在轨标定方法

由于地面标定在常压下进行,光学系统折射率在真空和常压下会有所变化,因而导致焦距等参数在轨会发生变化;在轨标定可补偿因星敏感器工作温度、发射过程振动等原因引起的标定参数变化,同时也可消除地面实际观星标定过程中大气折射对星图的影响。

在轨标定无法采用地面标定所用的转台,只能利用在轨拍摄星图信息进行标定。常用的在轨标定方法为通过遥测通道下传星敏感器在轨拍摄星图,地面对星图进行处理得到标定参数,完成后将标定数据上传。此方法一方面由于在轨实际星图中会存在较多的弱星,与地面实验相比星图信噪比有所降低,导致星点定位精度下降,最终影响标定精度;另一方面由于在轨过程中不能保证对同一观测位置连续成像,即不能采用平均值的方法减小星图星点随机误差的影响,导致标定精度降低。

在轨星图处理可采用扩展卡尔曼滤波器(EKF)对星点随机误差进行处理。EKF是一种应用最广泛的非线性系统滤波方法,EKF算法简单,易于实现,其计算方程如下

$$\begin{cases} \Delta X_{k|k-1} = \Delta X_{k-1|k-1} \\ \mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{P}_{k-1|k-1} \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^\top [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^\top + \mathbf{R}_{\text{noise}}]^{-1} \\ \Delta X_{k|k} = \Delta X_{k|k-1} + \mathbf{K}_k [\mathbf{R}_k - \mathbf{H}_k \Delta X_{k|k-1}] \\ \mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 \mathbf{K}_k 为增益矩阵, \mathbf{P}_{k+1} 为协方差矩阵, $\mathbf{R}_{\text{noise}}$ 为测量过程中星点随机误差, ΔX_k 为标定参数和初始设定值之差,包括主点 $\Delta x_0, \Delta y_0$ 和焦距 Δf 。线性化过程如下:令

$$\mathbf{v}_{ij}^\top \mathbf{v}_j = g_{ij}(x_0, y_0, f),$$

(x_0, y_0, f) 的估计值为 $(\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{f})$, 即:

$$x_0 = \hat{x}_0 + \Delta x, y_0 = \hat{y}_0 + \Delta y, f = \hat{f} + \Delta f, \quad (9)$$

将(9)式代入(6)式可得

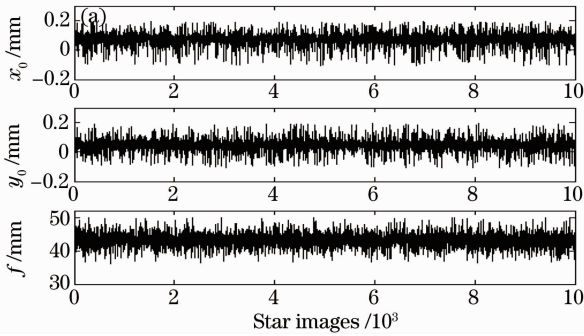
$$\mathbf{R}_{ij} = \mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_j - g_{ij}(\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{f}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{ij}}{\partial x_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial y_0} & \frac{\partial g_{ij}}{\partial f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \Delta f \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中 \mathbf{R}_{ij} 组成(8)式中的 \mathbf{R}_k 矩阵, 偏微分矩阵即为(8)式中的 \mathbf{H}_k 矩阵。为满足(8)式运行条件, 还需给定协方差矩阵的初始值 \mathbf{P}_0 以及标定参数初始值 $\Delta \mathbf{X}_0$ 。

光学系统畸变系数也可采用上述相同的方法进行在轨校正。

5 仿真结果分析

星敏传感器采用针孔模型, 视场为 $20^\circ \times 20^\circ$, 成像器件为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 面阵, 像元尺寸 $15 \mu\text{m}$,



敏感星等 ($M_v=5$), 主点真实值为 $x_0 = 75 \mu\text{m}$, $y_0 = 45 \mu\text{m}$, 焦距真实值为 43.3 mm ; 主点初始估计值为 $x_0 = 45 \mu\text{m}$, $y_0 = 15 \mu\text{m}$, 焦距初始估计值为 41 mm 。随机生成星敏传感器光轴指向, 根据星敏传感器视场和标定参数真实值, 可以得到星敏传感器当前光轴指向对应天区的恒星在像面上投影位置。为了模拟在轨星图, 在星图每颗恒星位置上加入了均值为 0、标准差为 0.1 pixel 的高斯噪声作为干扰噪声。

采用最小二乘方法和卡尔曼滤波对焦距和主点位置进行估计, 结果如图 4 所示。可见, 最小二乘估计结果中含有较大噪声, 卡尔曼滤波可很好地将噪声去除, 焦距和主点估计值在大约 5000 幅星图后收敛。协方差矩阵初始值 \mathbf{P}_0 对收敛时间有较大影响, 为了加快结果的收敛速度, \mathbf{P}_0 取值可略大一点。

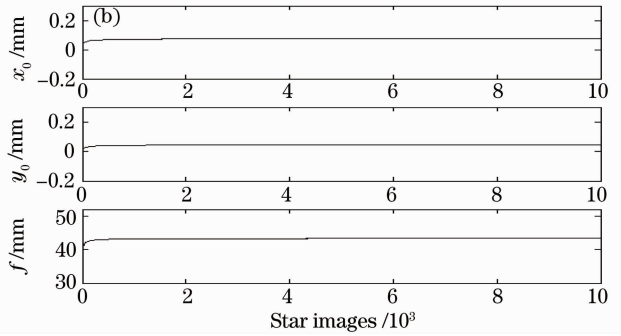


图 4 焦点和主点的估计结果。(a)最小二乘法;(b)卡尔曼滤波法

Fig. 4 Estimation results of optical center offset and focal length. (a) LSE; (b) Kalman filtering method

将每次估计结果和真实值进行比较, 可得到估计误差。最小二乘法和卡尔曼滤波法估计的误差结果如图 5 所示, 其中卡尔曼滤波估计结果与真实值的误差为 0.0036 pixel , 0.0006 pixel , 0.0293 mm 。最小二乘法输出主点和焦距估计结果标准差为 2.03 pixel , 1.95 pixel , 1.49 mm , 卡尔曼估计输出主点和焦距估计

结果标准差为 0.0105 pixel , 0.0048 pixel , 0.0038 mm 。可知, 卡尔曼估计方法比最小二乘估计方法收敛误差更小, 收敛结果的标准差也更小。

6 结 论

建立了星敏传感器的标定模型, 分析了待定系数标定和内参数标定两种星敏传感器常用的地面标定方法。针对不同的标定方法, 分别介绍了各标定参数的地面标定方法和参数计算处理方法。在分析现有在轨标定方法、以及比较在轨标定和地面标定的差别的基础上, 分析了星敏传感器焦距和主点等内部参数法的在轨标定方法, 采用扩展卡尔曼滤波对模拟在轨星图进行处理。仿真结果表明, 焦距和主点估计值的在轨标定方法较最小二乘估计法, 其收敛速度快、稳定性好且精度高, 在 5000 幅星图后输出即可稳定, 可有效去除星点随机误差影响, 提高标定精度, 使得星敏传感器在轨自主实时标定成为可能。介绍的在轨标定方法只适用于内部参数标定, 尚不能用于待定系数标定。

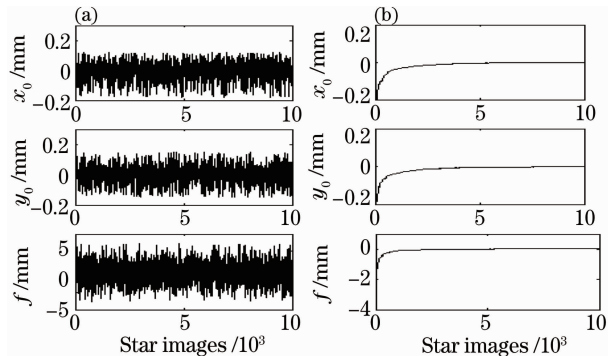


图 5 不同估计方法结果的误差比较。(a)最小二乘误差估计;(b)卡尔曼滤波

Fig. 5 Estimation error of different methods. (a) LSE; (b) Kalman filtering method

参 考 文 献

- 1 Tu Shancheng. Attitude Dynamics and Control of Satellite(3) [M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 2003. 122~183
屠善澄. 卫星姿态动力学与控制(3)[M]. 北京: 宇航出版社, 2003. 122~183
- 2 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
- 3 Li Yong, Su Xianyu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1162~1166
李 勇, 苏显渝. 一种大视场相机测量轮廓术系统标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1162~1166
- 4 Li Chenyan, Li Huaifeng, Sun Caibong. Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sensor[J]. *Optics Precision Engineering*, 2006, **14**(4): 558~563
李春艳, 李怀锋, 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): 558~563
- 5 C. C. Liebf. Accuracy performance of star tracker—a tutorial [J]. *IEEE T. Aero. Elec. Sys.*, 2002, **38**(2): 587~599
- 6 Zhang Hui, Tian Hong, Yuan Jiahu. Parameter calibration and error compensation of star sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(9): 1~4
张 辉, 田 宏, 袁家虎. 星敏传感器参数标定及误差补偿[J]. *光电工程*, 2005, **32**(9): 1~4
- 7 Yu Jun, Lin Jiaming, Yang Jianyu *et al.*. Distortion measurement and calibration technology for CCD camera system based on new target board[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1440~1442
余 俊, 林家明, 杨建宇 等. 基于新型靶的 CCD 摄像系统畸变测量与校正[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1440~1442
- 8 T. E. Paulsen, L. Maresi. Calibration and verification of the TERMA star tracker for the NEMO satellite[J]. *AIAA*, 2000, **5338**: 1~8
- 9 Zhang Jing, Zhu Dayong, Zhang Zhiyong. Nonmetric calibration of camera lens distortion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1552~1557
张 靖, 朱大勇, 张志勇. 摄像机镜头畸变的一种非量测校正方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1552~1557
- 10 P. Oosthuizen, S. Fellowes, C. Collingwood *et al.*. Development and on-orbit results of the SSTL low cost commercial star tracker[C]. *AIAA*, 2006, **6045**: 1~11
- 11 Zhang Weiguang, Zhao Hong, Zhang Qi *et al.*. Calibration method for three-dimensional measurement system based on linear-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 182~188
张维光, 赵 宏, 张 琦 等. 线结构光三维轮廓测量系统的标定方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 182~188
- 12 M. A. Samaan. Toward faster and More Accurate Star Sensors Using Recursive Centroiding and Star Identification[D]. Texas: A&M University, 2003. 25~32
- 13 Li Honghai, Wang Jingdong. A research on camera calibration technique[J]. *Optical Instruments*, 2007, **29**(4): 7~12
李洪海, 王敬东. 摄像机标定技术研究[J]. *光学仪器*, 2007, **29**(4): 7~12
- 14 Zhou Fuqiang, Zhu Jigui, Yang Xueyou *et al.*. A high speed CCD camera calibration technique[J]. *Optics Precision Engineering*, 2000, **8**(1): 96~100
周富强, 郝继贵, 杨学友 等. CCD 摄像机快速标定技术[J]. *光学精密工程*, 2000, **8**(1): 96~100
- 15 Wang Zhihe, Shu Rong, He Zhiping *et al.*. New method of CCD camera calibration based on collimator[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2007, **26**(6): 465~468
王志和, 舒 嵘, 何志平等. 基于平行光管的 CCD 相机标定新方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(6): 465~468
- 16 Li Weimin, Yu Qiaoyun, Liu Chao. Calibration method with separation pattern of a single-camera based on difference coordinates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 697~701
李为民, 俞巧云, 刘 超. 采用分离式差分标定靶的单摄像机标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 697~701