

基于星光矢量的鱼眼相机在轨标定方法^{*}

廖 平¹, 孙 鹏¹, 董明利¹, 庄 炜¹, 余 快²

(1. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院 北京 100192;
2. 中国空间技术研究院遥感卫星总体部 北京 100094)

摘要:针对在轨摄影测量中近距离超大尺寸测量以及测量系统内部参数发生改变等难题,提出了一种基于星光矢量的鱼眼相机在轨标定新方法。首先,基于状态标识法提出了一种改进型的星图识别算法,该算法对图像失真更不敏感,同时通过四星三角联合判决法降低了鱼眼星图识别结果的冗余度,从而提高识别速度。其次,针对在轨环境下鱼眼相机内部参数发生变化,导致星图识别率急剧下降,无法满足相机标定所需全场数据的问题,提出了一种联合星图识别和区域迭代扩展策略的鱼眼相机自标定光束平差算法。该算法通过逐步扩展视场区域,并结合区域识别结果迭代优化相机内外参数,逐步提升全场识别率,直至满足标定要求。最后,通过鱼眼相机采集246张天区图像组成相机多姿态星图合集进行实验验证。地面采集星图实测实验表明,在识别阈值较大时(0.25°),改进的星图识别算法所用识别时间仅为状态标识法的36.91%,识别效率得到显著提高。同时在相机内部参数发生较大变化时(主距变化0.15 mm),提出的算法可实现星点的全场识别,此时鱼眼星图星点识别率可达98.6%,满足相机标定所需全场数据的需求;相机标定后的星点像面坐标的重投影均方根误差为1/5 pixels。实验数据表明,所提算法可实现测量系统参数的高精度自校准,为视觉测量在轨应用中面临的系统参数标定难题提供方案和参考数据。

关键词:在轨摄影测量;鱼眼相机;鱼眼星图识别;在轨标定

中图分类号: TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.40

Fisheye camera on-orbit calibration method based on starlight vectors

Liao Ping¹, Sun Peng¹, Dong Mingli¹, Zhuang Wei¹, Yu Kuai²

(1. School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Institute of Remote Sensing Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: To address the challenges of close-range, ultra-large-scale measurement in on-orbit photogrammetry and variations in the internal parameters of the measurement system, a novel fisheye camera on-orbit calibration method based on starlight vectors is proposed. First, an improved star pattern recognition algorithm is developed based on the state identification method. The algorithm is less sensitive to image distortion and effectively reduces redundancy in fisheye star pattern recognition using a four-star triangle joint decision method, thereby improving recognition speed. Second, to address the loss of recognition accuracy and the limited acquisition of full-field data for calibration caused by variations in the internal parameters of the on-orbit fisheye camera, a self-calibration bundle adjustment method is developed. This method integrates star-pattern recognition with a regional iterative expansion strategy. The algorithm progressively expands the field-of-view region and iteratively optimizes the camera's internal and external parameters by incorporating recognition results from each region, gradually improving the overall recognition rate until the calibration requirements are satisfied. Finally, experimental validation is carried out using a multi-attitude star pattern dataset constructed from 246 fisheye images of the celestial sphere. Ground-based experiments show that when the recognition threshold is relatively large (0.25°), the improved star pattern recognition algorithm requires only 36.91% of the time consumed by the state identification method, demonstrating a significant improvement in efficiency. Moreover, when the internal parameters of the camera change considerably (principal distance variation of 0.15 mm), the proposed algorithm achieves full-field star recognition, with the recognition rate reaching 98.6%, thereby satisfying the

requirement for full-field data in camera calibration. After calibration, the root mean square error of the reprojected star point image coordinates is 1/5 pixels. The experimental results indicate that the proposed algorithm enables high-precision self-calibration of measurement system parameters, providing an effective solution and reference data for addressing the calibration challenges of system parameters in on-orbit visual measurement applications.

Keywords: on-orbit photogrammetry; fisheye camera; fisheye star pattern recognition; on-orbit calibration

0 引言

随着空间技术的发展,摄影测量(photogrammetry, PG)作为一种非接触式高精度测量手段,已被广泛应用于卫星天线、太阳帆、空间望远镜等大型空间结构的地面或在轨测量任务中^[1],并表现出良好的适应性和工程实用性。在PG在轨应用中,由于相机站位受航天器本身结构限制,需要在近距离下对大范围目标进行测量。并且随着卫星天线尺寸的增大,对相机视场范围要求更为严格,因此具备超大视场角的鱼眼相机成为了近距离PG测量任务中的关键设备,其投影模型及标定方法是在轨测量任务中急需解决的关键问题。

在地面测量任务中^[2-4],PG应用广泛且测量精度较高。相比之下,PG在轨应用的研究相对有限,测量精度较低。美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在该领域开展了较为系统的研究^[5-7]。其中,2022年NASA兰利研究中心与约翰逊航天中心利用摄影测量系统对滚转展开式太阳能阵列的形貌和相关结构运动参数进行测量,三维测量结果均方根误差(root mean squared error, RMSE)为15 mm^[8]。

上述研究应用系统均需进行地面预标定,但实际在轨PG应用中,由于PG系统和空间参考物在搭载航天器发射过程及工作中受到零重力及外部环境因素的影响,导致相关参考信息发生变化。若此时PG在轨系统直接使用PG系统预标定参数作为参考,则会引入系统误差大大降低测量精度。因此,在开展在轨测量时,需采用在轨环境下仍可提供稳定空间参考信息的物体对测量系统进行标定定向,进而修正补偿摄影测量系统预标定参数。

鱼眼相机投影模型主要分为:立体投影、等距投影、等立体角投影及正交投影模型^[9-10]。目前,已有多种鱼眼相机矫正方法^[11-12]被提出。2019年张春森等^[13]针对鱼眼相机自身大视场、超短焦距等特点,提出了一种基于Kannala模型的鱼眼相机标定优化方法。2022年Zhou等^[14]提出了一种正射校正方法,并通过实验验证方法的有效性。2024年Zhou等^[15]提出了一种基于主光轴共线约束和极线正交-横轴的双目鱼眼图像的新型标定模型。

通过以上研究发现,现有的鱼眼相机标定方法

均需要组建多站位观测交汇网络,并提供足够且稳定的空间参考物从而完成相机标定定向。而目前航天器的设备搭载空间、空间结构稳定性、载荷能力及在轨建造扩展能力有限,导致在轨环境下地面摄影测量标定定向方法不再适用。在轨摄影测量系统需寻找更为可靠简便的空间信息参考物,对PG系统参数进行校正。

在天球坐标系下,恒星具有高精度矢量指向的空间已知观测信息,可使用图像星点像面坐标和对应星图中的恒星矢量数据标定相机。而如何将相机像面的星点与恒星库数据一一对应是实现相机在轨标定的前提和关键点。

星图识别旨在将相机视场内恒星与导航星库中的参考星进行对应匹配,已有多种识别算法被提出并广泛应用^[16]。然而,目前针对鱼眼星图识别方法研究较少,仅有基于角距匹配的算法适用于鱼眼星图识别^[17]。2018年张喆等^[18]为解决鱼眼相机超大视场带来的单幅图像数据量大、识别冗余、识别效率低等问题,提出了一种基于圆形视场分割的鱼眼相机星图识别方法。但该方法使用传统三角形法识别中心星,识别速度受限。2022年Li等^[19]提出了一种由精确点定位/惯性导航系统集成支持的鱼眼星图识别算法。该方法识别速度较快,但需要提供较准确的相机初始姿态。

以上研究表明,现有的鱼眼星图识别方法都需要预先标定相机,以保证鱼眼星图的快速准确识别,而在轨环境下鱼眼相机内参发生变化,导致鱼眼星图的识别速度和准确率难以保证。

针对以上问题,设计了一种基于星光矢量的鱼眼相机在轨标定方法。首先,针对鱼眼星图识别准确率和识别速度易受图像失真与畸变影响的问题,基于三角形状态标识法^[20]提出了一种改进型的星图识别算法。该算法对图像失真更不敏感,在一定程度的图像失真条件下,能实现全场星点的有效识别,并在图像失真严重时仍能识别出图像中心区域的星点。其次,针对在轨环境下,相机内方位参数发生变化,严重影响图像全场星点的正确识别,从而无法满足相机标定所需全场数据的问题,提出了一种联合星图识别和区域迭代扩展策略的鱼眼相机标定算法。先采用星图识别算法识别图像中心区域星点,然后基于迭代扩展的标定策略实现全场星点识别和鱼眼相机的参数标定。

1 鱼眼相机恒星成像和光束平差模型

1.1 鱼眼相机星光几何投影模型

在鱼眼相机正交投影模型的基础上,通过添加星光矢量坐标约束,建立鱼眼相机星光几何投影模型和畸变模型。图 1 为鱼眼相机正交投影模型成像示意图。

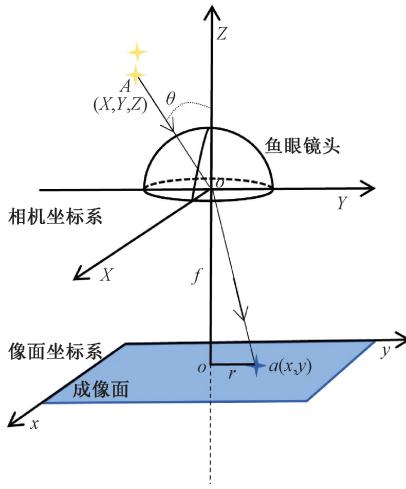


图 1 正交投影模型成像

Fig. 1 The illustration of orthographic projection imaging

成像模型如式(1)所示。

$$r = f \sin(\theta) \quad (1)$$

其中, r 表示像面目标点与主点间的距离; f 为镜头主距; θ 则表示相机光轴与入射光线的夹角。

导航星数据库提供了恒星的赤经 α 和赤纬 β 。此时,在天球坐标系下,相机视场内第 n 颗恒星的矢量方向可表示为 (α, β) , 其单位矢量坐标 \mathbf{W}_n 如式(2)所示。天球坐标系下与相机坐标系下的恒星单位矢量坐标转换关系如式(3)所示。

$$\mathbf{W}_n = \begin{bmatrix} \cos \beta_n \cos \alpha_n \\ \sin \beta_n \cos \alpha_n \\ \sin \beta_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\gamma}_{m_n} = \begin{bmatrix} X_{m_n} \\ Y_{m_n} \\ Z_{m_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{m_{11}} & \mathbf{R}_{m_{12}} & \mathbf{R}_{m_{13}} \\ \mathbf{R}_{m_{21}} & \mathbf{R}_{m_{22}} & \mathbf{R}_{m_{23}} \\ \mathbf{R}_{m_{31}} & \mathbf{R}_{m_{32}} & \mathbf{R}_{m_{33}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_n \cos \alpha_n \\ \sin \beta_n \cos \alpha_n \\ \sin \beta_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, \mathbf{R}_m 表示相机在第 m 个观测时刻下在天球坐标系中的姿态矩阵, 由相机姿态角决定; $\boldsymbol{\gamma}_{m_n}$ 为相机系中第 n 颗星点的单位矢量坐标。鉴于实际成像过程中, 无法排除主点偏移和图像畸变等误差, 因此在式(1)的投

影模型基础上, 进一步构建包含主点和畸变修正参数的星点像面坐标投影模型, 对相机坐标系下的星点单位矢量坐标进行修正。在第 m 个相机姿态下, 第 n 颗恒星的坐标表达式如式(4)所示。

$$\begin{cases} x_{m_n} = -f \cdot \sin(\theta_{m_n}) \cdot \left(\frac{X_{m_n}}{\sqrt{X_{m_n}^2 + Y_{m_n}^2}} \right) + x_p - \Delta x_{m_n} \\ y_{m_n} = -f \cdot \sin(\theta_{m_n}) \cdot \left(\frac{Y_{m_n}}{\sqrt{X_{m_n}^2 + Y_{m_n}^2}} \right) + y_p - \Delta y_{m_n} \end{cases} \quad (4)$$

其中, (x_{m_n}, y_{m_n}) 为恒星像面投影坐标; (x_p, y_p) 为像面主点坐标; $[\Delta x_{m_n}, \Delta y_{m_n}]$ 表示畸变量。 θ_{m_n} 为第 m 个相机姿态下第 n 颗恒星的入射角, 如式(5)所示。

$$\theta_{m_n} = \arcsin \left(\frac{\sqrt{X_{m_n}^2 + Y_{m_n}^2}}{\sqrt{X_{m_n}^2 + Y_{m_n}^2 + Z_{m_n}^2}} \right) \quad (5)$$

模型中的畸变量 $[\Delta x_{m_n}, \Delta y_{m_n}]$ 的定义式如式(6)所示。

$$\begin{cases} \Delta x_{m_n} = \bar{x}_{m_n} (k_1 r_{m_n}^2 + k_2 r_{m_n}^4 + k_3 r_{m_n}^6) + \\ p_1 (2\bar{x}_{m_n}^2 + r_{m_n}^2) + 2p_2 \bar{x}_{m_n} y_{m_n} + b_1 \bar{x}_{m_n} + b_2 \bar{y}_{m_n} \\ \Delta y_{m_n} = \bar{y}_{m_n} (k_1 r_{m_n}^2 + k_2 r_{m_n}^4 + k_3 r_{m_n}^6) + \\ p_2 (2\bar{y}_{m_n}^2 + r_{m_n}^2) + 2p_1 \bar{x}_{m_n} y_{m_n} \\ \bar{x}_{m_n} = x_{m_n} - x_p \\ \bar{y}_{m_n} = y_{m_n} - y_p \\ r_{m_n} = \sqrt{\bar{x}_{m_n}^2 + \bar{y}_{m_n}^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_1, k_2, k_3 表示径向畸变参数; p_1, p_2 表示切向畸变参数; b_1, b_2 表示仿射畸变参数。由于采用星光矢量作为空间参考信息辅助相机投影模型参数及姿态角求解, 矢量坐标存在如式(7)所示。

$$X_{m_n}^2 + Y_{m_n}^2 + Z_{m_n}^2 = 1 \quad (7)$$

则此时式(4)可简化, 简化后如式(8)所示。

$$\begin{cases} x_{m_n} = -f \cdot X_{m_n} + x_p - \Delta x_{m_n} \\ y_{m_n} = -f \cdot Y_{m_n} + y_p - \Delta y_{m_n} \end{cases} \quad (8)$$

1.2 多站位光束平差算法

为得到全局最优且完全解耦的相机内方位参数、畸变系数及外方位参数, 利用多站位光束平差算法^[21]对不同相机姿态下对应的星点观测及参考数据进行处理, 进而得到相机的内、外方位(姿态角)参数及畸变系数。根据像面重投影(reprojection, RP)误差计算方法, 针对式(8)设计误差方程, 如式(9)所示。

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{1_1} \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{1_n} \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{m_n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{1_1} \\ \vdots \\ \mathbf{e}_{1_n} \\ \vdots \\ \mathbf{e}_{m_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{E_1} & 0 & 0 & \mathbf{J}_{I_1} \\ 0 & \ddots & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & \mathbf{J}_{E_m} & \mathbf{J}_{I_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{E}_1 \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{E}_m \\ \Delta \mathbf{I} \end{bmatrix} \\
 & \mathbf{J}_{E_m} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{x_{m_1}}}{\partial \phi_m} & \frac{\partial F_{x_{m_1}}}{\partial \omega_m} & \frac{\partial F_{x_{m_1}}}{\partial \kappa_m} \\ \frac{\partial F_{y_{m_1}}}{\partial \phi_m} & \frac{\partial F_{y_{m_1}}}{\partial \omega_m} & \frac{\partial F_{y_{m_1}}}{\partial \kappa_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_{x_{m_n}}}{\partial \phi_m} & \frac{\partial F_{x_{m_n}}}{\partial \omega_m} & \frac{\partial F_{x_{m_n}}}{\partial \kappa_m} \\ \frac{\partial F_{y_{m_n}}}{\partial \phi_m} & \frac{\partial F_{y_{m_n}}}{\partial \omega_m} & \frac{\partial F_{y_{m_n}}}{\partial \kappa_m} \end{bmatrix} \\
 & \mathbf{J}_{I_m} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{x_{m_1}}}{\partial f} & \frac{\partial F_{x_{m_1}}}{\partial x_p} & \frac{\partial F_{x_{m_1}}}{\partial y_p} & \frac{\partial F_{x_{m_1}}}{\partial k_1} & \frac{\partial F_{x_{m_1}}}{\partial k_2} & \frac{\partial F_{x_{m_1}}}{\partial k_3} & \frac{\partial F_{x_{m_1}}}{\partial p_1} & \frac{\partial F_{x_{m_1}}}{\partial p_2} & \frac{\partial F_{x_{m_1}}}{\partial b_1} & \frac{\partial F_{x_{m_1}}}{\partial b_2} \\ \frac{\partial F_{y_{m_1}}}{\partial f} & \frac{\partial F_{y_{m_1}}}{\partial x_p} & \frac{\partial F_{y_{m_1}}}{\partial y_p} & \frac{\partial F_{y_{m_1}}}{\partial k_1} & \frac{\partial F_{y_{m_1}}}{\partial k_2} & \frac{\partial F_{y_{m_1}}}{\partial k_3} & \frac{\partial F_{y_{m_1}}}{\partial p_1} & \frac{\partial F_{y_{m_1}}}{\partial p_2} & \frac{\partial F_{y_{m_1}}}{\partial b_1} & \frac{\partial F_{y_{m_1}}}{\partial b_2} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_{x_{m_n}}}{\partial f} & \frac{\partial F_{x_{m_n}}}{\partial x_p} & \frac{\partial F_{x_{m_n}}}{\partial y_p} & \frac{\partial F_{x_{m_n}}}{\partial k_1} & \frac{\partial F_{x_{m_n}}}{\partial k_2} & \frac{\partial F_{x_{m_n}}}{\partial k_3} & \frac{\partial F_{x_{m_n}}}{\partial p_1} & \frac{\partial F_{x_{m_n}}}{\partial p_2} & \frac{\partial F_{x_{m_n}}}{\partial b_1} & \frac{\partial F_{x_{m_n}}}{\partial b_2} \\ \frac{\partial F_{y_{m_n}}}{\partial f} & \frac{\partial F_{y_{m_n}}}{\partial x_p} & \frac{\partial F_{y_{m_n}}}{\partial y_p} & \frac{\partial F_{y_{m_n}}}{\partial k_1} & \frac{\partial F_{y_{m_n}}}{\partial k_2} & \frac{\partial F_{y_{m_n}}}{\partial k_3} & \frac{\partial F_{y_{m_n}}}{\partial p_1} & \frac{\partial F_{y_{m_n}}}{\partial p_2} & \frac{\partial F_{y_{m_n}}}{\partial b_1} & \frac{\partial F_{y_{m_n}}}{\partial b_2} \end{bmatrix} \\
 & \Delta \mathbf{I} = [\Delta f \quad \Delta x_p \quad \Delta y_p \quad \Delta k_1 \quad \Delta k_2 \quad \Delta k_3 \quad \Delta p_1 \quad \Delta p_2 \quad \Delta b_1 \quad \Delta b_2]^T \\
 & \Delta \mathbf{E}_m = [\Delta \phi_m \quad \Delta \omega_m \quad \Delta \kappa_m]^T
 \end{aligned} \tag{9}$$

式中: \mathbf{v}_{m_n} 表示第 m 个相机姿态下的第 n 个星点在像面上的残差, 即观测星点像面坐标与其真实值之间的偏差; \mathbf{e}_{m_n} 为目标点像面观测坐标与用估计参数所计算的目标点像面坐标之间的误差向量; 函数 F 为式(8) 中的投影模型; I 是相机内方位参数及畸变系数; \mathbf{E}_m 则代表第 m 个姿态下的相机外方位参数; $\Delta \mathbf{I}$ 与 $\Delta \mathbf{E}_m$ 分别代表上述参数的修正值; 雅可比矩阵 \mathbf{J}_{I_m} 和 \mathbf{J}_{E_m} 则通过式(8) 对相关参数求偏导获得。式(9) 可隐式表达, 具体形式如式(10) 所示。

$$\mathbf{v}_{\text{all}} + \mathbf{e}_{\text{all}} = \mathbf{H}_{\text{all}} \boldsymbol{\delta}_{\text{all}} \tag{10}$$

式中: \mathbf{v}_{all} 表示所有相机姿态下所有像面目标点的重投影残余误差向量; \mathbf{e}_{all} 表示所有相机姿态下所有像面目标点的计算误差向量; 矩阵 \mathbf{H}_{all} 由雅各比矩阵 \mathbf{J}_{E_m} 和 \mathbf{J}_{I_m} 构成, $\boldsymbol{\delta}_{\text{all}}$ 为所有待标定相机参数的修正值。由式(10) 可得全部相机参数的修正方程如式(11) 所示。

$$\boldsymbol{\delta}_{\text{all}} = (\mathbf{H}_{\text{all}}^T \mathbf{H}_{\text{all}})^{-1} \mathbf{H}_{\text{all}}^T \mathbf{e}_{\text{all}} \tag{11}$$

对所有相机成像参数进行迭代修正^[22-23], 直至所有相机姿态中全部像面目标点坐标的重投影误差达到最小, 此时相机内方位参数、畸变系数及外方位参数为全局最优解。

2 星图识别和鱼眼相机标定算法

2.1 基于状态标识法的改进型星图识别算法

选用依巴谷星表作为原始星表。为使导航星库包含相机可观测到的所有导航星, 以及保证星图识别结果的准确性, 对星表进行两方面处理: 1) 剔除原始星表中双星、高自行恒星; 2) 通过国际天文联合会 (International Astronomical Union, IAU) 提供的基础天文学标准库对恒星自行、岁差、章动等进行精准校正, 并对星光受大气影响产生的折射现象进行相应的补偿校正。

采用星间角距作为特征组建导航特征库, 如图 2 所示。

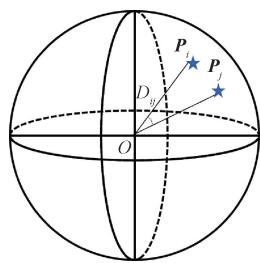


图 2 导航星的星间角距

Fig.2 The illustration of angular distances between navigation stars

定义导航星库中两颗导航星的坐标矢量分别为 \mathbf{P}_i 和 \mathbf{P}_j , 则它们在天球坐标系下的坐标矢量如式(12)所示。

$$\begin{aligned}\mathbf{P}_i &= [\cos \beta_i \cos \alpha_i, \sin \beta_i \cos \alpha_i, \sin \beta_i]^T \\ \mathbf{P}_j &= [\cos \beta_j \cos \alpha_j, \sin \beta_j \cos \alpha_j, \sin \beta_j]^T\end{aligned}\quad (12)$$

如图 2 所示, 将两颗导航星坐标矢量间的夹角定义为星间角距 D_{ij} , 如式(13)所示。

$$D_{ij} = \arccos \left(\frac{\mathbf{P}_i \cdot \mathbf{P}_j}{|\mathbf{P}_i| \cdot |\mathbf{P}_j|} \right) \quad (13)$$

相应的, 在像面坐标系中, 设两颗恒星对应的星点坐标分别为 (x_{m_i}, y_{m_i}) 和 (x_{m_j}, y_{m_j}) , 由式(7)和(8)可反解出像面星点所对应的相机坐标系下的矢量坐标, 如式(14)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{P}'_i = \begin{bmatrix} X_{m_i} \\ Y_{m_i} \\ Z_{m_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(x_{m_i} - x_p + \Delta x_{m_i})/f \\ -(y_{m_i} - y_p + \Delta y_{m_i})/f \\ \sqrt{1 - X_{m_i}^2 + Y_{m_i}^2} \end{bmatrix} \\ \mathbf{P}'_j = \begin{bmatrix} X_{m_j} \\ Y_{m_j} \\ Z_{m_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(x_{m_j} - x_p + \Delta x_{m_j})/f \\ -(y_{m_j} - y_p + \Delta y_{m_j})/f \\ \sqrt{1 - X_{m_j}^2 + Y_{m_j}^2} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (14)$$

则此时像面星点对应的星间角距 d_{ij} 表达式如式(15)所示。

$$d_{ij} = \arccos \left(\frac{\mathbf{P}'_i \cdot \mathbf{P}'_j}{|\mathbf{P}'_i| \cdot |\mathbf{P}'_j|} \right) \quad (15)$$

理论上, 两颗恒星的星间角距在不同的坐标系中能够保持不变。可利用这一原理, 并采用状态标识算法实现导航星星间角距和像面星点星间角距的快速准确识别。但在鱼眼星图识别时, 由于鱼眼星图数据量大、图像失真的问题, 导致状态标识法出现识别冗余和识别效率低的问题。基于状态标识法的基础上提出了一种改进的鱼眼星图识别方法。此外, 当全场星点识别率阈值较低时, 由于鱼眼星图星点较多, 易出现误匹配的情况, 而全场星点识别率阈值设定较高时, 受图像质量或者噪声的影响导致图像可靠性降低, 易出现丢失相关数据的情况, 综合考虑以上两点将 80% 设定为判断阈值。算法流程图如图 3 所示。

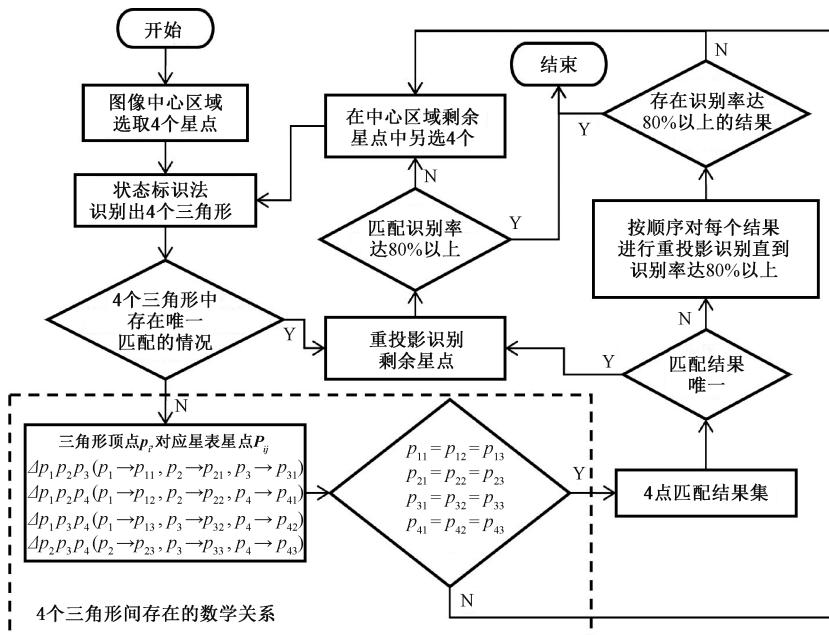


图 3 改进的状态标识法流程

Fig.3 Flowchart of the improved state labeling method

具体步骤为:

1) 首先在图像中心区域选取 4 个星点, 并组成 4 个

三角形如图4所示,然后利用状态标识法识别出4个三角形。

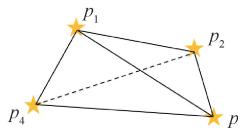


图4 四星结构示意图

Fig. 4 The illustration of four-star structure

2)识别出的4个三角形中如果存在三角形唯一匹配的情况,则确定对应的3颗基准星,并采用最优四元数估计(estimation of optimal quaternion, ESOQ)算法^[24]求解出旋转矩阵,从而重投影识别剩余星点,并判断重投影识别的星点是否达到全图的80%以上。若达到,则识别成功,程序结束;若未达到,则重新选取4颗星进行识别。

3)若识别出的4个三角形均不唯一,则根据4点组成的4个三角形间存在的数学关系对其进行联合判决,得到对应的4点匹配结果集,当4点匹配结果集为空时,重新选取4颗星进行识别。

4)若4点匹配结果唯一,则采用ESOQ算法求解出旋转矩阵并重投影识别剩余星点,然后判断全图重投影识别率。若达到80%以上,则识别成功,程序结束;若未达到,则重新选取4颗星进行识别。

5)若4点匹配结果不唯一,则遍历求解旋转矩阵并重投影识别剩余星点,直到全图重投影识别率达80%以上,此时对应的匹配结果即为正确识别结果,程序结束;若4点匹配结果集已全部遍历完,仍不存在重投影识别的星点达到全图的80%以上的结果,则重新选取4颗星进行识别。

2.2 联合星图识别和区域迭代扩展策略的标定算法

基于状态标识法的改进型星图识别算法对图像失真更不敏感,在一定程度的图像失真条件下,能实现全场星点的有效识别,可为后续鱼眼相机标定提供数据支持。但在在轨环境下,由于鱼眼相机受航天器发射振动以及真空下零重力等因素影响使得相机内方位参数发生变化,此时相机主距变化可达0.1 mm,故此图像失真更为严重,导致星图识别已无法识别全场星点,仅能识别中心区域的星点,无法满足相机标定所需的全场数据。因此在所提的星图识别算法基础上,提出了一种联合星图识别和区域迭代扩展策略的标定算法,以实现鱼眼相机的在轨标定。算法流程图如图5所示。

具体步骤为:

1)导入全部图像数据,选取第1张图片,并按照图6

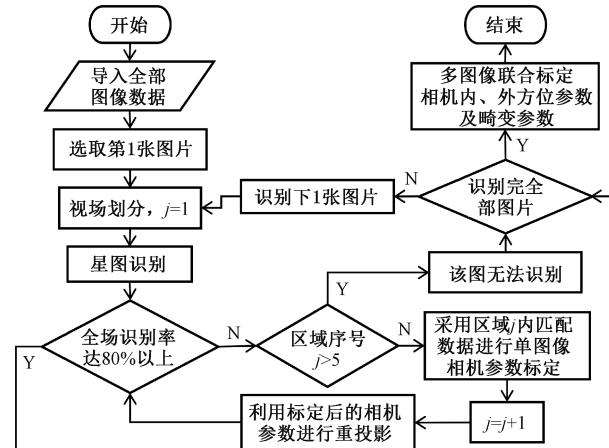


图5 标定算法流程

Fig. 5 Flowchart of the calibration algorithm

所示划分视场,区域从中心向外扩展,其中编号大的区域包含小的区域。

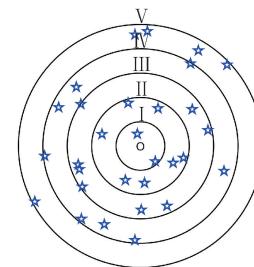


图6 区域划分示意图

Fig. 6 The illustration of area division

2)采用所提星图识别方法进行识别,并判断全场识别率是否达到80%以上。若达到,则识别下一张图片;若未达到,则进行下一步。

3)按图6所示,利用星图识别方法得到区域j中匹配的数据,此时j=1。

4)采用区域j中的匹配数据进行单图标定得到修正后的相机内、外方位参数及畸变参数,并采用修正后参数进行重投影识别。此时j=j+1,并判断全场识别率是否达到80%以上,若达到,则进行步骤6)。

5)若全场识别率没达到80%以上,则按图6所示,采用区域j数据,重复步骤4);当识别区域序号>5时,该图识别失败,进行下一步。

6)识别完每张图片都进行一次判断,判断当前是否识别完全部图片,若未识别完,则识别下一张图片,若全部识别完,则采用全部图像下对应的星点观测及参考数据,通过1.2节所提的多站位光束平差算法对相机的内、外方位参数及畸变系数进行标定。

此外,为了减少误匹配以及噪声星点的影响,选取每

张图像中重投影全场识别率最高以及重投影误差最小的识别结果作为最终结果。

3 整体算法框架

整体算法框架如图 7 所示。主要由两部分组成:

多姿态图像处理以及导航星库和导航特征库的建立

第 1 部分为多姿态图像处理以及导航星库和导航特征库的建立;第 2 部分为基于星光几何投影模型的鱼眼相机标定,该部分采用联合星图识别和区域迭代扩展策略的标定算法进行标定,星图识别部分则采用提出的基于状态标识法的改进型星图识别算法。

基于星光几何投影模型的鱼眼相机标定

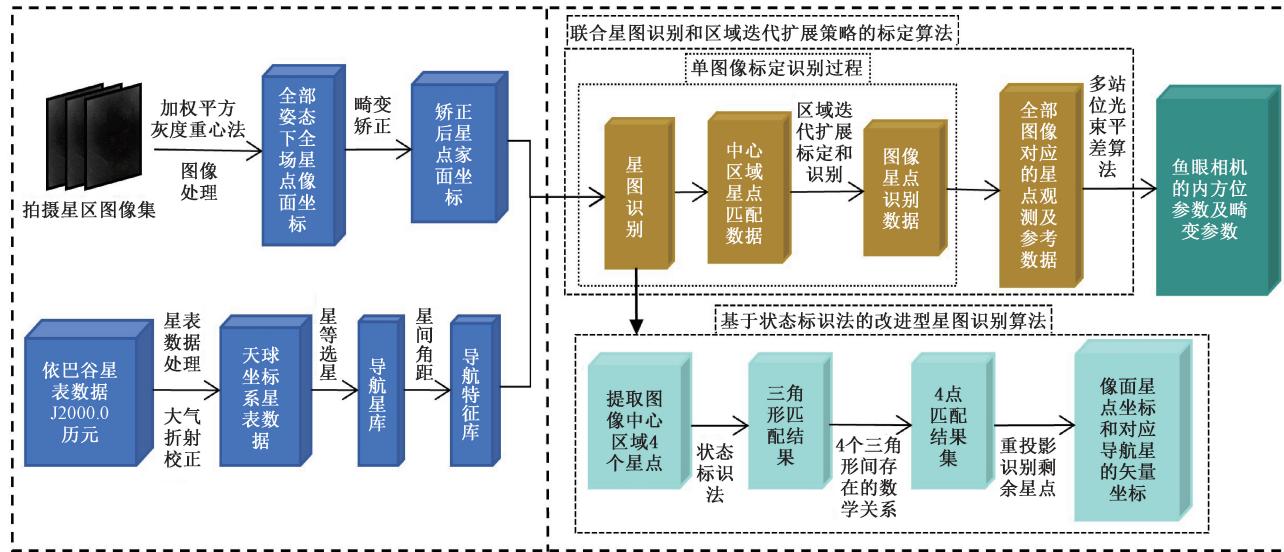


图 7 整体算法框架

Fig. 7 Overall algorithm framework

4 实验及结果分析

4.1 实验设备及数据预处理

实验所用相机为 Nikon D810 相机,镜头为尼康 AF 16 mm f/2.8D 镜头,所用计算机的处理器为 Intel i9-13900HX。相机及镜头参数如表 1 所示。

表 1 相机及镜头参数

Table 1 Camera and lens parameters

设备	参数	指标
Nikon D810	分辨率/pixels	7 360×4 912
	像素尺寸/ μm	4.878×4.878
	传感器尺寸/mm	35.9×24.0
尼康 AF 16 mm f/2.8D	焦距/mm	16
	视场角/($^{\circ}$)	180

实验采用恒星坐标基准为 J2000 国际天球参考系的依巴谷星表构建基础导航星库。先通过 IAU 提供的基础天文学标准库对恒星自行、岁差、章动等进行精准校正,然后进行星光大气折射校正、暗星剔除、星点分布均匀化

等处理,建立星等<6 的导航星库,并使用星间角距构建导航特征库。最终星表恒星分布示意图如图 8 所示。

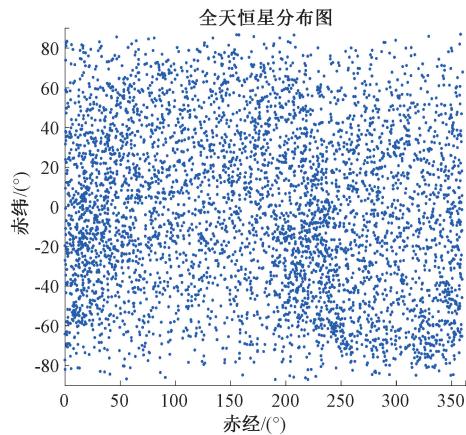


图 8 依巴谷星表预处理后恒星分布

Fig. 8 Star distribution after preprocessing of Hipparcos star catalog

实验现场如图 9 所示,通过三脚架云台微调相机姿态角对天区进行多姿态拍摄,采集相机多姿态星图合集,共拍摄 246 张天区图像。为避免星点饱和或丢失,固定相机拍摄参数,其中光圈数 2.8,感光度为 1 000,曝光时间 3 s。

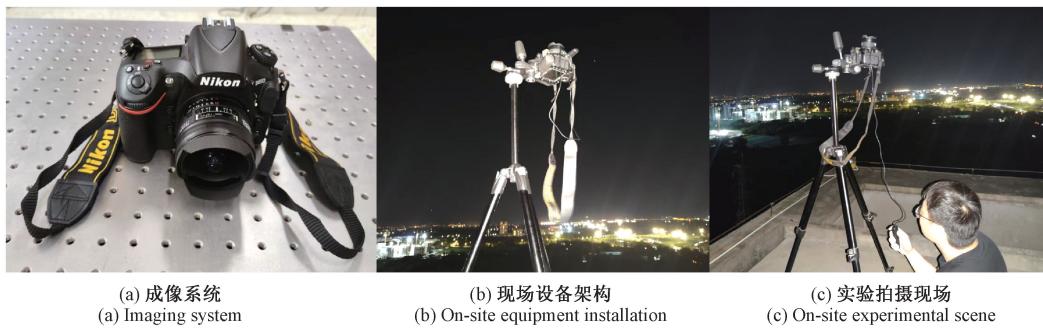


图 9 实验设备及实验现场

Fig. 9 Experimental equipment and experimental setup

4.2 星图识别算法性能比较

为验证所提星图识别算法性能的优越性和鲁棒性, 分别采用状态标识法和所提改进型星图识别算法对实验所采集的 246 张实际星图进行星图识别, 并统计两种算法识别速度、识别冗余度, 以此评估算法性能。图 10 展示了两种算法在不同识别误差阈值时识别 246 张实际星图的平均时间曲线。

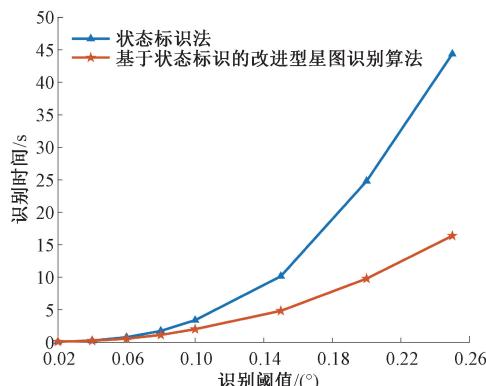


图 10 不同识别误差阈值下算法识别时间曲线

Fig. 10 Algorithm runtime under varying recognition error thresholds

从图 10 中可以看出在识别误差阈值较小时, 两种星图识别算法所用识别时间相差不大; 但随着识别误差阈值的增大, 状态标识法所用时间急剧增大, 而改进的星图识别算法的时间曲线则相对平滑。且在识别误差阈值为 0.25° 时, 所提方法识别星图所用时间远低于状态标识法。这表明在识别误差阈值较大时, 所提算法在识别速度上有显著提升。

为进一步分析和验证算法性能, 以某张图像在不同识别误差阈值时识别出的三角形个数以及 4 点匹配结果集进行比较, 数据结果如表 2 所示。

由表 2 中数据可以发现, 随着识别误差阈值的增大, 状态标识法的冗余度急剧增大; 而改进的星图识别算

表 2 不同算法识别冗余度比较

Table 2 The comparison of identify redundancy comparisons

识别误差阈值/ (°)	状态标识法识别三角形个数	改进型星图识别算法 4 点匹配结果个数
0.02	1	1
0.04	3	1
0.06	14	1
0.08	47	1
0.10	93	1
0.15	330	2
0.20	730	36
0.25	1 431	92

法在识别误差阈值较大 (0.25°) 时, 冗余结果仍远少于状态标识法的冗余结果, 这表明改进的方法可以减少识别冗余度, 加快识别速度。

以上实验结果表明在识别误差阈值较小时, 改进的星图识别算法具有较好的性能; 并且随着识别误差阈值的增大, 改进的星图识别算法较状态标识法而言, 具有识别冗余度低、识别速度快、鲁棒性高的优点, 适用于复杂背景下的鱼眼星图识别任务。

在轨测量时, 所用相机具备高分辨率、高成像质量特点, 所提方法可实现星图的快速准确识别。当使用低成本相机或获取的图像质量较低时, 改进的星图识别算法仍适用, 但受限于图像低分辨率及低质量图像, 星点定位误差增大, 星图识别率会有所下降, 标定精度也因此有所降低。

4.3 鱼眼相机星光标定

当鱼眼相机内部参数发生改变时, 星图识别无法识别全视场星点, 仅能识别中心区域的星点, 如图 11 所示。此时图 11(a) 的相机内参变化量为: 主距 Δf 为 0.05 mm、主点 Δx_p 为 0.03 mm、 Δy_p 为 0.02 mm, 径向畸变 Δk_1 为实际 k 的 10%; 图 11(b) 的相机内参变化量为: 主距

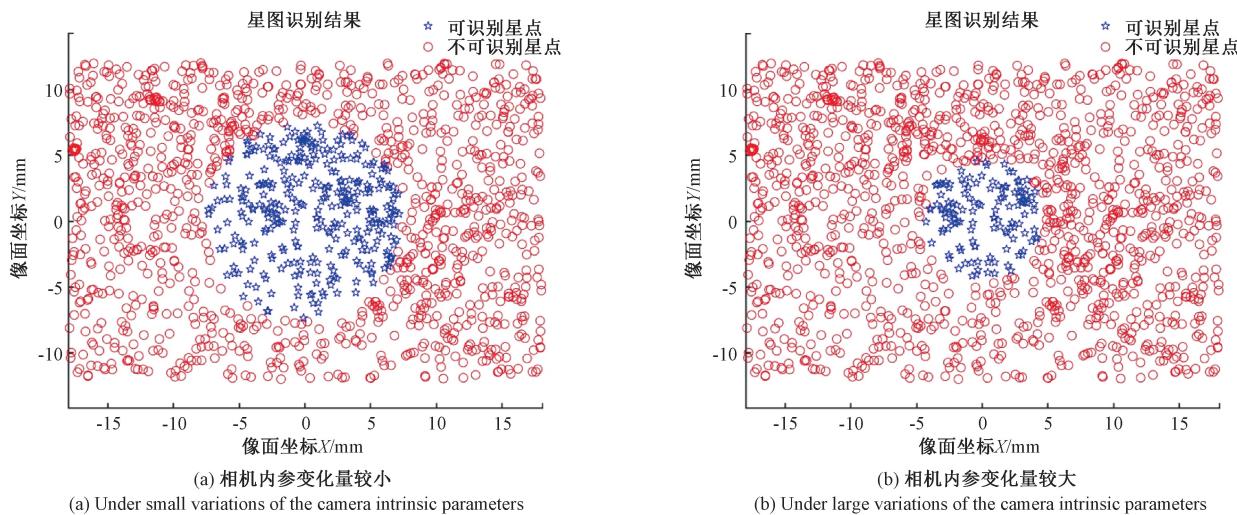


图 11 相机内参变化时理论成像星点识别结果

Fig. 11 Star point recognition results with varying camera intrinsic parameters

Δf 为 0.15 mm、主点 Δx_p 为 0.05 mm、 Δy_p 为 0.05 mm, 径向畸变 Δk_1 为实际 k 的 10%。为验证所提联合星图识别和区域迭代扩展策略的标定算法在相机内部参数改变时(在轨环境下)的可行性, 进行以下实验。

首先, 对相机实际内部参数添加误差以模拟在轨环境下相机内部参数发生变化的情形, 此时添加的误差量

与图 11(b)的相机内参变化量相同。然后利用联合星图识别和区域迭代扩展策略的标定算法对此时相机进行标定。某张星图在不同的迭代扩展次数时, 识别到的像面星点图像如图 12 所示。

从图 12 可知, 经过多次迭代扩展后, 此时像面星点基本实现全场识别, 此时星点识别情况如表 3 所示。

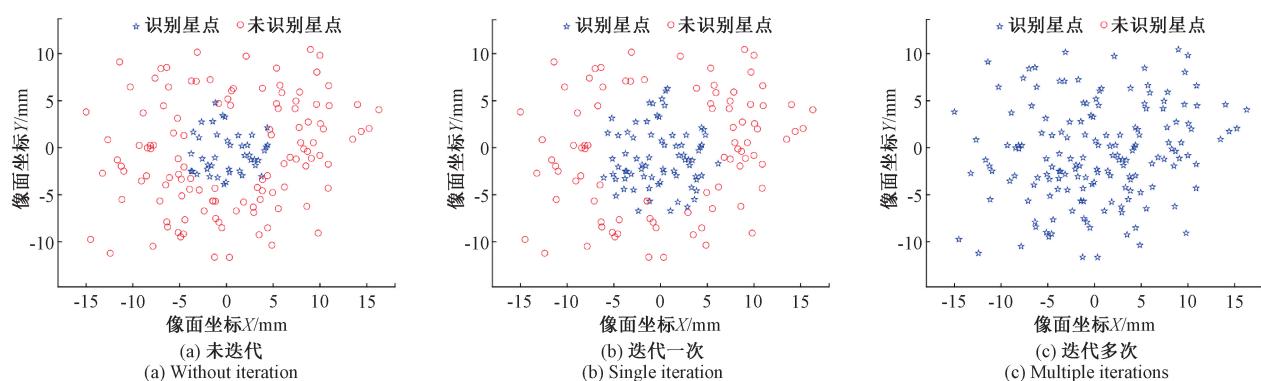


图 12 不同的迭代扩展次数时, 某星图的识别结果

Fig. 12 Recognition results of a specific star map under varying numbers of iteration expansions

表 3 星点识别情况

Table 3 Star point recognition statistics

图像序号	识别星点数	全部星点数	单图识别率/%	多图平均识别率/%	识别率标准差/%
1	162	162	100.00		
2	165	166	99.40		
⋮	⋮	⋮	⋮	98.60	1.14
245	149	151	98.67		
246	148	150	98.67		

通过对全部图像进行单图像迭代扩展标定识别后, 得到配准的星点数据集, 然后采用多站位光束平差算法对相机内方位参数、畸变系数及多姿态外方位(姿态角)参数进行标定, 标定误差如图 13 所示。

从图 13(a)可知, 全部姿态下相机标定后的星点 RP 误差分布符合误差均值为 -8.71×10^{-6} mm, RMSE 为 9.44×10^{-4} mm (1/5 pixels) 的正态分布。图 13(b)为某姿态下拍摄所得各个像面星点的 RP 误差场, 箭头从实际目标成像位置指向投影模型计算出的目标理论投影位置。图中误差箭头分布及趋势无明显系统误差。鱼眼相机标定结果如表 4 所示。

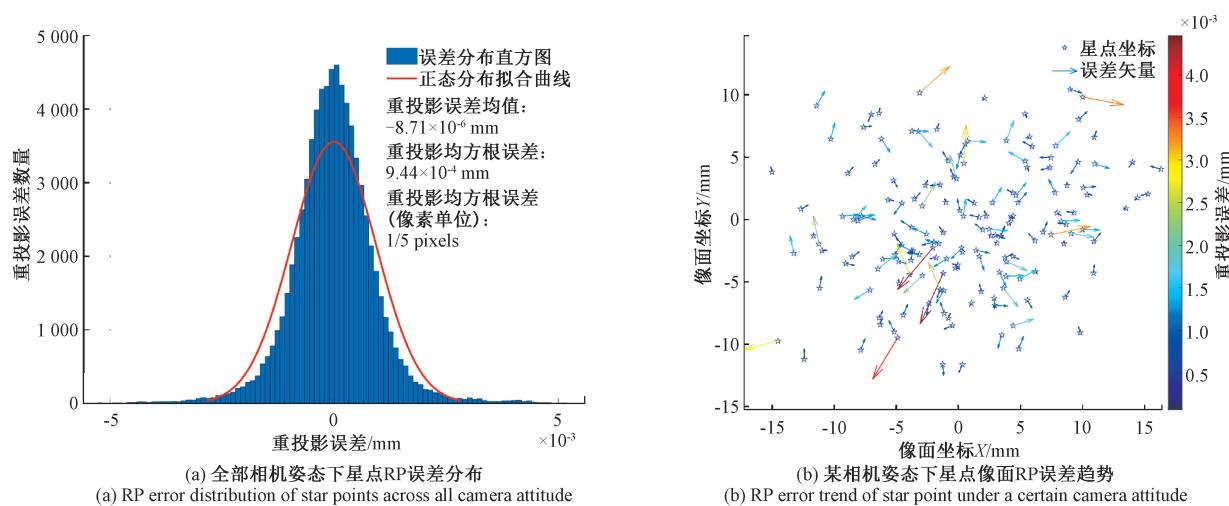


图 13 标定误差可视化

Fig. 13 Calibration error visualization

表 4 鱼眼相机标定结果

Table 4 Fisheye camera calibration results

主距 <i>f</i> /mm	主点偏移		径向畸变参数			切向畸变参数		仿射畸变参数	
	<i>x_p</i> /mm	<i>y_p</i> /mm	<i>k₁</i>	<i>k₂</i>	<i>k₃</i>	<i>p₁</i>	<i>p₂</i>	<i>b₁</i>	<i>b₂</i>
15.65	0.13	-0.05	-5.32×10^{-4}	-5.41×10^{-8}	-7.13×10^{-11}	-5.41×10^{-6}	3.22×10^{-6}	3.14×10^{-5}	5.28×10^{-5}

以上结果表明,联合星图识别和区域迭代扩展策略的标定算法可以实现测量系统参数的高精度自校准,具有在轨应用的潜力。

5 结 论

针对大型天线在轨摄影测量中面临的相机站位受限、测量范围巨大、鱼眼相机成像复杂且图像畸变严重、测量系统内部参数发生改变等难题,上述研究提出了一种基于星光矢量的鱼眼相机在轨标定方法,可实现在轨环境下测量系统参数的高精度自校准。首先针对鱼眼星图识别过程中,星图识别准确率和识别速度易受图像失真影响的问题,基于状态标识法提出了一种改进型的星图识别算法。该方法可在图像存在一定失真时,仍能快速准确识别完成全场星点识别。然后针对测量系统内部参数发生改变时,星图识别仅能图像中心区域星点,无法满足标定需求,设计了一种联合星图识别和区域迭代扩展策略的标定算法。从以上实验结果可发现,在 PG 系统内部参数改变时,该方法标定的 RP 的 RMSE 为 1/5 pixels,表明通过该方法可实现测量系统参数的高精度自校准,为视觉测量在轨应用中面临的系统参数标定难题提供方法和参考数据。

在未来工作中,为提高在轨鱼眼相机标定精度,需要

在投影模型建模、星点灰度响应矫正等方面开展更为深入的研究。同时,需对星光标定及近场目标标定的方法与评价体系开展系统研究,分析鱼眼相机成像畸变随景深变化的规律及其内在联系,以提高在轨环境下 PG 系统测量精度。

参考文献

- [1] WANG S CH, ZHANG D Y, MA X F, et al. A review of module adjustment for space on-orbit assembled antenna [J]. Space Solar Power and Wireless Transmission, 2025, 2(1): 10-19.
- [2] ZHANG P S, JIANG SH P, YANG L H, et al. Development of distortion measurement system for large deployable antenna via photogrammetry in vacuum and cryogenic environment [C]. 2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems, 2018, 10621: 93-102.
- [3] LUNT S R, WELLS C, RHODES D, et al. Use of close range photogrammetry in James Webb Space Telescope alignment testing under cryogenic conditions [J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems,

2020, 6(1): 018005.

[4] 程天明, 李文龙, 王阳阳, 等. 基于双目视觉的卫星太阳翼模态辨识方法 [J]. 上海航天(中英文), 2024, 41(4): 96-101.
CHENG T M, LI W L, WANG Y Y, et al. Modal identification method of satellite solar wings based on binocular vision [J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2024, 41(4): 96-101.

[5] GILBERT M G, WELCH S S, PAPPA R S, et al. STS-74/MIR photogrammetric appendage structural dynamics experiment preliminary data analysis [C]. 38th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 1997: 1168.

[6] CHAMBERLAIN M K, KIEFER S H, LAPOINTE M, et al. On-orbit flight testing of the roll-out solar array [J]. Acta Astronautica, 2021, 179: 407-414.

[7] CHAMBERLAIN M K, KIEFER S H, BANIK J A. Photogrammetry-based analysis of the on-orbit structural dynamics of the roll-out solar array [C]. American Institute of Aeronautics and Astronautics SciTech Forum and Exposition 2019, 2019: 2375.

[8] JONES T W, LIDDLE D, BANIK J, et al. On-orbit photogrammetry analysis of the roll-out solar array (ROSA) [C]. American Institute of Aeronautics and Astronautics SciTech Forum and Exposition 2022, 2022: 1624.

[9] SCHNEIDER D, SCHWALBE E, MAAS H G. Validation of geometric models for fisheye lenses [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(3): 259-266.

[10] HUGHES C, DENNY P, JONES E, et al. Accuracy of fish-eye lens models [J]. Applied Optics, 2010, 49(17): 3338-3347.

[11] 宋阳, 周亚丽, 张奇志. 鱼眼镜头径向畸变的校正方法 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 1014-1023.
SONG Y, ZHOU Y L, ZHANG Q ZH. Correction method for radial distortion of fisheye lens [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 1014-1023.

[12] 魏利胜, 周圣文, 张平改, 等. 基于双经度模型的鱼眼图像畸变矫正方法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 377-385.
WEI L SH, ZHOU SH W, ZHANG P G, et al. Double longitude model based correction method for fish-eye image distortion [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(2): 377-385.

[13] 张春森, 严露, 于振. 一种 Kannala 模型的鱼眼相机标定方法优化 [J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(6): 1026-1032.
ZHANG CH S, YAN L, YU ZH. A fisheye camera calibration optimization method based on Kannala model [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(6): 1026-1032.

[14] ZHOU G Q, LI H X, SONG R H, et al. Orthorectification of fisheye image under equidistant projection model [J]. Remote Sensing, 2022, 14(17): 4175.

[15] ZHOU G Q, TANG Y, XIE Y F, et al. Calibration of fisheye camera with colinear constraint of the main optical axis and epipolar line orthogonality-transverse axis [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(12): 19373-19384.

[16] 孙婷, 杨康, 韩莹雪, 等. 可见光条件下的星图识别算法综述 [J]. 光学技术, 2023, 49(4): 469-475.
SUN T, YANG K, HAN Y X, et al. Overview of star identification algorithms in visible light [J]. Optical Technique, 2023, 49(4): 469-475.

[17] 李崇辉. 基于鱼眼相机的舰船天文导航技术研究 [D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2013.
LI CH H. Research on marine celestial navigation based on fisheye camera [D]. Zhengzhou: People's Liberation Army of China Information Engineering University, 2013.

[18] 张喆, 翟京生, 张亮. 基于圆形视场分割的鱼眼相机星图识别方法 [J]. 应用光学, 2018, 39(4): 505-510.
ZHANG ZH, ZHAI J SH, ZHANG L. Fisheye camera star identification method based on circular FOV segmentation [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(4): 505-510.

[19] LI CH H, YANG Y X, XIAO G R, et al. Rapid star identification algorithm for fish-eye camera based on PPP/INS assistance [J]. Journal of Navigation, 2022, 75(4): 168-185.

[20] YANG H L, WANG J, LIU H Y, et al. An algorithm for fast extraction and identification of star target [J]. Optik, 2015, 126(21): 3034-3038.

[21] 刘其林, 董明利, 孙鹏, 等. 大视场相机最优投影模型识别及星光标定方法 [J]. 仪器仪表学报, 2024,

45(1): 158-169.

LIU Q L, DONG M L, SUN P, et al. Optimal projection model identification and starlight calibration method for large field of view cameras [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 158-169.

[22] 汪佳宝, 张世荣, 周清雅. 基于视觉 EPnP 加权迭代算法的三维位移实时测量[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 166-175.

WANG J B, ZHANG SH R, ZHOU Q Y. Vision based real-time 3D displacement measurement using weighted iterative EPnP algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 166-175.

[23] 郭森, 李芳, 赵纪元. 高速气体超声波流量计飞行时间估计算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(8): 269-277.

GUO M, LI F, ZHAO J Y. Investigation of time of fly estimation algorithm for gas ultrasonic flowmeter under high speed[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(8): 269-277.

[24] 程会艳, 郑然, 武延鹏, 等. 一种提高多探头星敏感器姿态测量精度的方法[J]. 空间控制技术与应用, 2022, 48(4): 78-85.

CHENG H Y, ZHENG R, WU Y P, et al. A method to improve attitude measurement accuracy with multi-FOV star sensor [J]. Aerospace Control and Application, 2022, 48(4): 78-85.

作者简介



廖平, 2019 年于北京信息科技大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为光电与视觉检测。
E-mail: 2023020167@ bistu. edu. cn

Liao Ping received his B. Sc. degree from Beijing Information Science & Technology University (BISTU) in 2019. He is currently a master student at BISTU. His main research interest includes photoelectric and visual inspection.



孙鹏(通信作者), 2005 年于北京信息科技大学获得学士学位, 2008 年于北京信息科技大学获得硕士学位, 2019 年于北京邮电大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学副研究员, 主要研究方向为摄影测量和机器视觉。

E-mail: sunpeng@ bistu. edu. cn

Sun Peng (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from BISTU in 2005 and 2008, respectively, and his Ph. D. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2019. He is currently an associate researcher at BISTU. His main research interests include Photogrammetry and machine vision.



董明利, 1986 年于合肥工业大学获得学士学位, 1989 年于合肥工业大学获得硕士学位, 2009 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 博士生导师。主要研究方向为光电与视觉检测。

E-mail: dongml@ bistu. edu. cn

Dong Mingli received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hefei University in 1986 and 1989, respectively, and her Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2009. She is currently a professor and Ph. D. advisor at BISTU. Her main research interest includes photoelectric and visual inspection.



余快, 2008 年于北京航空航天大学获学士学位, 2011 年于北京航空航天大学获硕士学位, 现为中国空间技术研究院遥感卫星总体部研究员, 主要研究方向为航天器总体设计。

E-mail: happyfish512@ 163. com

Yu Kuai received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from Beibang University in 2008 and 2011, respectively. She is currently a researcher at the Institute of Remote Sensing Satellite, China Academy of Space Technology. Her main research interest is spacecraft system design.