

多相机视觉测量系统在轨自主定向方法

赵艳芳^{1,2}, 孙鹏^{1,2*}, 董明利^{1,2}, 刘其林^{2,3}, 燕必希^{1,2}, 王君^{1,2}¹北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100192;²北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100192;³长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 在轨组装、维修等航天应用需要大尺寸高精度的在轨测量手段,而视觉测量具有极大的应用潜力。针对目前在轨多相机视觉测量系统缺少人工参考物辅助相机定向的问题,提出一种利用恒星和基准长度尺使多相机视觉测量系统实现外方位参数标定的方法。首先提出一种基于相对外方位参数的恒星和基准长度尺成像模型,解决无人工目标点时多相机空间位置和姿态的解算问题;然后提出一种基于先验误差估计的加权联合平差算法,将三类不同数据融合,实现多相机外方位参数高精度标定。实测实验表明,利用所提标定方法,恒星和基准长度尺端点像面误差的标准差分别为 $0.48\ \mu\text{m}$ (1/7 像素) 和 $0.21\ \mu\text{m}$ (1/16 像素)。另外,在 $2.5\ \text{m} \times 1.4\ \text{m}$ 的测量范围内,所提方法的空间 X、Y 和 Z 坐标误差的标准差分别为 $0.15\ \text{mm}$ 、 $0.04\ \text{mm}$ 和 $0.05\ \text{mm}$ 。所提方法能为视觉测量在轨应用中面临的系统参数标定问题提供方法和参考数据。

关键词 多相机系统; 在轨标定; 相对外方位参数模型; 联合平差

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231907

On-Orbit Autonomous Orientation of Multi-Camera Vision Measurement System

Zhao Yanfang^{1,2}, Sun Peng^{1,2*}, Dong Mingli^{1,2}, Liu Qilin^{2,3}, Yan Bixi^{1,2}, Wang Jun^{1,2}¹*School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;*²*Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;*³*School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China*

Abstract Space operations such as on-orbit assembly and maintenance hinges on the use of large-scale and high-precision on-orbit measurement methods. Vision measurement holds the greatest potential in this regard. However, insufficient assistant artificial targets necessitate the deployment of on-orbit targets to reliably and accurately calibrate the multi-camera vision measurement system. To address this issue, this study proposes an exterior parameter calibration method using fixed stars and scale rulers. First, we propose an imaging model of fixed stars and scale rulers based on relative exterior parameters to solve the problem of multi-camera localization and orientation when there are insufficient artificial target points. Then, we propose a weighted joint bundle adjustment algorithm based on prior error estimation, which fuses three different kinds of observation data to achieve high-precision exterior parameter calibration. Real data experiments demonstrate that this calibration method yields standard deviations of image errors of the fixed stars and the scale ruler endpoints of $0.48\ \mu\text{m}$ (1/7 pixel) and $0.21\ \mu\text{m}$ (1/16 pixel), respectively. In addition, with this calibration method, the standard deviations of spatial coordinate measurement errors along the X, Y, and Z axes are $0.15\ \text{mm}$, $0.04\ \text{mm}$, and $0.05\ \text{mm}$, respectively, within the measurement range of $2.5\ \text{m} \times 1.4\ \text{m}$. This study provides a method and reference data for calibrating vision system parameters in on-orbit applications.

Key words multi-camera system; on-orbit calibration; relative exterior parameter model; joint bundle adjustment

收稿日期: 2023-08-14; 修回日期: 2023-10-01; 录用日期: 2023-10-20; 网络首发日期: 2023-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(51475046)、北京市教委科技计划重点项目(KZ201711232029)、北京信息科技大学促进内涵发展科研水平提高项目(2020KYNH223)

通信作者: *sunpeng@bistu.edu.cn

1 引言

近年来,随着空间科学、空间技术、空间应用等领域的全面发展,航天在轨工程任务量逐步增多,空间大型构件^[1-6]在完成航天工程任务中得到了非常广泛的应用,为了保障其性能和可靠运行,需要进行高精度的装配、监测和维护,使得在轨环境下的大尺寸高精度测量技术尤为重要。视觉测量技术具有非接触、测量范围广、测量速度快、多点同时测量等优点,在构件在轨高精度测量中展现出极大潜能^[7]。

相机定向技术作为视觉测量的一项关键技术,包括测定相机的空间位置(定位)和姿态角(定向),其准确性直接影响系统的测量精度。因此,探索有效的相机系统外方位参数在轨标定方法十分重要。传统的相机定向方法主要有自标定光束平差法^[8-9]、相对定向法^[10-11]和绝对定向法^[12-14]。马开锋^[9]采用自标定光束平差对测量系统进行标定,将该方法用于天线面型高低温热变形测量中,其方式是在不同站位拍摄天线表面的大量人工标志点,然后利用光束平差解算相机内外参数,这个方法需要大量在视场中均匀分布的三维空间点。相对定向仅利用同名点对的像面坐标数据求解图像对之间的相对外方位参数,依靠的是本质矩阵的求解和分解^[15]。韩首榜等^[11]提出了一种基于五点法的链路扩张相对定向方法,通过相对定向、比例缩放和刚性变换实现了局部网络的全局拼接,为多面体航天器构件摄影测量提供了可靠的外方位参数初值。但它使用的是机器视觉的隐性成像模型,仅适用于提供外方位参数初值,而且由于无法提供准确的比例信息,其用于三维测量时的精度还有待评价。绝对定向法是在已知相机内方位参数(主点、焦距和畸变系数)的情况下,给定单张影像点及其对应控制点的三维坐标,恢复相机拍摄时位置和姿态的过程,通常采用后方交会的方法^[16]计算相机的外方位参数。绝对定向需要根据被测物的结构特征、测量空间和相机视场角等选择合适的相机站位,要求有大量空间分布均匀的、三维坐标已知的参考点,而且定向精度受参考点坐标精度影响大。在轨视觉测量与在地面模拟环境测量不同,缺少结构化的合作目标。以天线为例,在天线表面设置标志点会影响其工作性能,同时标志点的分布受限,而且在轨环境无法保证标志点的稳定和高精度。因此,前述传统方法无法实现相机系统在轨定位定向。也有学者利用空间非合作目标进行视觉系统在轨标定的相关研究。2020年,Zhang等^[17]在研究嫦娥四号月球车立体视觉系统现场标定方法的过程中,利用月球车上的线条和月球地形上的特征点完成了系统的自标定,但经该方法标定后的系统测量误差约为4 mm。因此,现阶段基于非合作目标的系统的标定精度普遍较低。

本文提出一种利用星点与基准长度尺进行在轨视觉测量系统高精度定位定向的方法,但是该方法面临两个关键问题:1)无结构化参考目标点时的多相机空间

位置解算问题;2)多源(星光、视觉测量标志点、基准长度)数据如何在平差过程中得到融合,提高多相机定位定向精度的问题。针对1),提出一种能够解耦多相机外参数相关性的相对外参数模型,以及基于基准长度的相对平移量平差方法。针对2),提出一种多类观测数据融合的多相机外方位参数联合平差模型与方法。

2 多相机视觉测量系统在轨外方位参数标定原理

本文旨在利用恒星和基准长度尺实现多相机视觉测量系统在轨自主定位定向。首先,通过多相机系统拍摄恒星,求解相机姿态角初值;其次,拍摄长度尺,利用尺两端标志点成像和长度约束计算较为准确的相机位置初值;最后,通过对星点成像、长度尺端点成像及长度约束3类数据进行融合,建立联合平差模型,实现多相机系统外方位参数高精度优化。本文只涉及多相机系统外方位参数的求解,所有像面坐标均得到畸变校正。

2.1 基于星光矢量的相机星点成像模型及姿态角标定方法

天球坐标系以天球中心为原点,指向春分点的轴为 x 轴,指向北天极的轴为 z 轴,如图1所示。其中 α 和 β 分别表示恒星在天球坐标系下的赤经和赤纬,星表提供了恒星的赤经和赤纬信息。

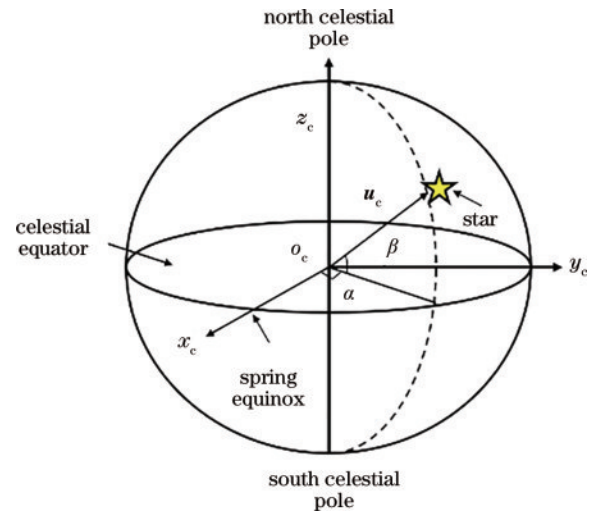


图1 天球坐标系

Fig. 1 Celestial coordinate system

某颗恒星在天球坐标系中的单位矢量 u_c 为

$$u_c = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

设此恒星成像点坐标为 (x, y) ,相机主距为 p ,那么恒星在相机坐标系中的单位矢量 w_s 为

$$w_s = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + p^2}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -p \end{bmatrix}. \quad (2)$$

设相机坐标系相对于天球坐标系的旋转矩阵为 \mathbf{R} , 那么相同恒星在天球和相机坐标系下的单位矢量满足

$$\mathbf{w}_s = \mathbf{R}\mathbf{u}_c, \quad (3)$$

$$\begin{cases} x = -\frac{\rho(R_{11} \cos \alpha \cos \beta + R_{12} \sin \alpha \cos \beta + R_{13} \sin \beta)}{R_{31} \cos \alpha \cos \beta + R_{32} \sin \alpha \cos \beta + R_{33} \sin \beta} + x_p \\ y = -\frac{\rho(R_{21} \cos \alpha \cos \beta + R_{22} \sin \alpha \cos \beta + R_{23} \sin \beta)}{R_{31} \cos \alpha \cos \beta + R_{32} \sin \alpha \cos \beta + R_{33} \sin \beta} + y_p \end{cases}, \quad (4)$$

式中: R_{ij} 表示旋转矩阵 \mathbf{R} 中的元素; (x_p, y_p) 表示主点在图像平面的位置; (x, y) 表示畸变校正后的星点像面坐标。恒星矢量在长时间内保持不变, 因此可以作为一种空间参考信息辅助相机姿态角求解^[18]。简化式(4)中相机对恒星的成像过程:

$$\mathbf{xy}_{ms} = \mathbf{f}_1(\varphi_m, \omega_m, \kappa_m | \rho_m, \alpha_s, \beta_s), \quad (5)$$

式中: \mathbf{f}_1 是式(4)描述的隐式星点成像方程; $m = 1, 2, 3, \dots, M$ 表示第 m 台相机; $s = 1, 2, 3, \dots, S$ 表示第 s 颗星, 下标 ms 表示第 m 台相机视场内的第 s 个星点; α 和 β 分别为恒星的赤经和赤纬, 均为已知量; \mathbf{xy} 表示畸变校正后的星点像面坐标向量。对于任意恒星像面点, 经过一阶泰勒公式展开后, 式(5)可近似为

$$\hat{\mathbf{v}}_{ms} + \hat{\mathbf{l}}_{ms} = \mathbf{J}_{ms} \hat{\boldsymbol{\delta}}_m, \quad (6)$$

式中: \mathbf{v}_{ms} 是第 m 台相机对第 s 个星点成像的残余误差; $\hat{\mathbf{l}}_{ms}$ 表示某恒星像点的测量坐标与利用外方位参数估计值求解得到的坐标之间的差别; \mathbf{J}_{ms} 表示星点成像方程(5)对相机外参数求导的雅可比矩阵; $\hat{\boldsymbol{\delta}}_m$ 表示相机外参数的改正量。在此阶段, 仅对外方位参数中的姿态角进行求解。 M 台相机对恒星成像, 误差方程为

$$\hat{\mathbf{v}} + \hat{\mathbf{l}} = \mathbf{J} \hat{\boldsymbol{\delta}} \Rightarrow \begin{bmatrix} v_{1s1} \\ v_{1s2} \\ \vdots \\ v_{1sS} \\ v_{2s1} \\ v_{2s2} \\ \vdots \\ v_{2sS} \\ \vdots \\ v_{ms1} \\ v_{ms2} \\ \vdots \\ v_{MS} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{1s1} \\ l_{1s2} \\ \vdots \\ l_{1sS} \\ l_{2s1} \\ l_{2s2} \\ \vdots \\ l_{2sS} \\ \vdots \\ l_{ms1} \\ l_{ms2} \\ \vdots \\ l_{MS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{1s1} & 0 & \cdots & 0 \\ J_{1s2} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ J_{1sS} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & J_{2s1} & \cdots & 0 \\ 0 & J_{2s2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & J_{2sS} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & J_{ms1} \\ 0 & 0 & \cdots & J_{ms2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & J_{MS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\delta}_1 \\ \hat{\delta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\delta}_M \end{bmatrix}, \quad (7)$$

姿态角参数改正量的最小二乘解为

$$\boldsymbol{\delta} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \hat{\mathbf{l}}. \quad (8)$$

利用 Gauss-Newton 算法, 在给定各相机系统姿态角初值的情况下, 用求解的改正量修正姿态角初值, 并进行不断迭代, 得到最佳相机姿态角^[19]。

式中: \mathbf{R} 由相机相对于图 1 天球坐标系 y_c, x_c, z_c 轴的旋转角度 $\mathbf{E} = [\varphi, \omega, \kappa]$ 计算获得。星点像面坐标的计算公式为

2.2 基于相对外方位的标志点成像模型及长度约束下的相机位置标定方法

在太空中利用航天器上的相机系统拍摄恒星和长度尺时, 由于恒星距离无限远, 测量网络(包括相机系统、基准长度尺和空间测点)整体的位置移动对成像效果不产生影响^[20], 这意味着整个测量网络可以在空间中进行任意平移, 相机的定位问题没有唯一解。数学上表现为, 利用基准长度的空间信息进行非线性迭代解算相机位置的过程中法方程出现缺秩现象。故本文采用相对外方位模型, 将测量空间坐标系固定于其中一个相机(称为基准相机), 减少了未知量的数量, 进而消除缺秩导致的解不唯一问题。多相机视觉测量系统在轨定向如图 2 所示, 长度尺分布于天线周围, 对相机的姿态角和位置参数进行约束。

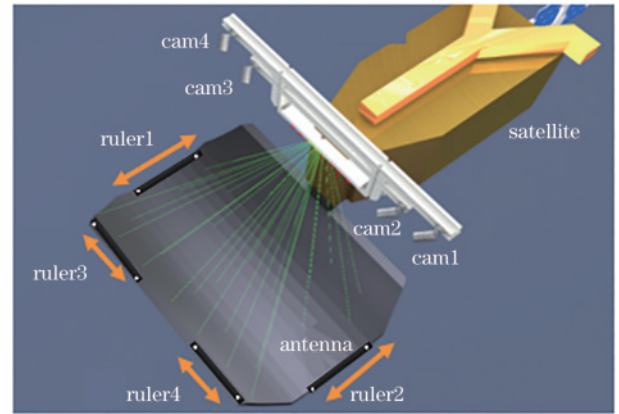


图 2 多相机视觉测量系统在轨定向示意图

Fig. 2 On-orbit orientation diagram of multi-camera vision measurement system

以每根长度尺端点在空间中的三维坐标和除基准相机以外其他相机的位置参数为未知量建立相对外方位参数成像模型^[20], 则共线方程的隐式表达为

$$\mathbf{xy}_{mnk} = \mathbf{f}_2(\mathbf{T}_m, \mathbf{X}_{nk} | \mathbf{E}_m), \quad (9)$$

式中: \mathbf{f}_2 表示对长度尺端点成像的隐式共线方程; $n = 1, 2, 3, \dots, N$ 表示第 n 根长度尺; $k = 1, 2$ 表示长度尺的第 k 个端点; \mathbf{xy} 表示长度尺像面坐标点向量; \mathbf{X}_{nk} 表示第 n 根长度尺的第 k 个端点的空间点坐标; \mathbf{T}_m 表示相机的平移向量, \mathbf{E}_m 表示相机的姿态角向量, 当基准相机拍摄时, \mathbf{T}_m 为 $[0 \ 0 \ 0]$, \mathbf{E}_m 为 $[0 \ 0 \ 0]$ 。

对于任意基准尺标志点的像面点,经过一阶泰勒公式展开后,共线方程线性近似为

$$\underset{(2 \times 1)}{\boldsymbol{v}_{mnk}} + \underset{(2 \times 1)}{\boldsymbol{l}_{mnk}} = \underset{(2 \times 3)(3 \times 1)}{\boldsymbol{A}_{mnk}} \underset{(2 \times 3)(3 \times 1)}{\hat{\boldsymbol{\delta}}_m} + \underset{(2 \times 3)(3 \times 1)}{\boldsymbol{B}_{mnk}} \underset{(2 \times 3)(3 \times 1)}{\hat{\boldsymbol{\delta}}_{nk}}, \quad (10)$$

式中: \boldsymbol{A} 和 \boldsymbol{B} 分别表示共线方程(9)对相机外方位参数和长度尺端点空间坐标求导的雅可比矩阵; $\hat{\boldsymbol{\delta}}$ 和 $\hat{\boldsymbol{\delta}}$ 分别表示相机外方位参数和长度尺端点空间坐标的改正量。在此阶段,只对外方位参数中的平移量和长度尺端点坐标进行求解。另外,基准长度尺的长度已知,可由约束方程表示:

$$L_n = \sqrt{(X_{n1} - X_{n2})^2 + (Y_{n1} - Y_{n2})^2 + (Z_{n1} - Z_{n2})^2}, \quad (11)$$

式中: $n1$ 和 $n2$ 表示第 n 根长度尺的两个目标点。 L_n 表示长度尺两端点间的距离,其线性化的近似表达为

$$\underset{(1 \times 1)}{\boldsymbol{v}_{L_n}} + \underset{(1 \times 1)}{\boldsymbol{l}_{L_n}} = \underset{(1 \times 3)(3 \times 1)}{\boldsymbol{C}_{n1}} \underset{(1 \times 3)(3 \times 1)}{\hat{\boldsymbol{\delta}}_{n1}} + \underset{(1 \times 3)(3 \times 1)}{\boldsymbol{C}_{n2}} \underset{(1 \times 3)(3 \times 1)}{\hat{\boldsymbol{\delta}}_{n2}}, \quad (12)$$

式中: \boldsymbol{C} 表示距离约束方程(11)对端点空间点坐标求导的雅可比矩阵。那么,联立式(10)和式(12), M 个相机对 N 根长度尺进行成像,包含像点和空间距离的扩展误差方程为

$$\boldsymbol{v} + \boldsymbol{l} = \boldsymbol{D}\hat{\boldsymbol{\delta}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D}_1 & \boldsymbol{D}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\delta}} \\ \hat{\boldsymbol{\delta}} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{1.11} \\ \boldsymbol{v}_{1.12} \\ \vdots \\ \boldsymbol{v}_{1.N1} \\ \boldsymbol{v}_{1.N2} \\ \boldsymbol{v}_{2.11} \\ \boldsymbol{v}_{2.12} \\ \vdots \\ \boldsymbol{v}_{2.N1} \\ \boldsymbol{v}_{2.N2} \\ \vdots \\ \boldsymbol{v}_{M.11} \\ \boldsymbol{v}_{M.12} \\ \vdots \\ \boldsymbol{v}_{M.N1} \\ \boldsymbol{v}_{M.N2} \\ \vdots \\ \boldsymbol{v}_{L1} \\ \vdots \\ \boldsymbol{v}_{LN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{l}_{1.11} \\ \boldsymbol{l}_{1.12} \\ \vdots \\ \boldsymbol{l}_{1.N1} \\ \boldsymbol{l}_{1.N2} \\ \boldsymbol{l}_{2.11} \\ \boldsymbol{l}_{2.12} \\ \vdots \\ \boldsymbol{l}_{2.N1} \\ \boldsymbol{l}_{2.N2} \\ \vdots \\ \boldsymbol{l}_{M.11} \\ \boldsymbol{l}_{M.12} \\ \vdots \\ \boldsymbol{l}_{M.N1} \\ \boldsymbol{l}_{M.N2} \\ \vdots \\ \boldsymbol{l}_{L1} \\ \vdots \\ \boldsymbol{l}_{LN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & B_{1.11} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & B_{1.12} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & B_{1.N1} & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & B_{1.N2} \\ A_{2.11} & \cdots & 0 & B_{2.11} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ A_{2.12} & \cdots & 0 & 0 & B_{2.12} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ A_{2.N1} & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & B_{2.N1} & 0 \\ A_{2.N2} & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & B_{2.N2} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & A_{M.11} & B_{M.11} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & A_{M.12} & 0 & B_{M.12} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & A_{M.N1} & 0 & 0 & \cdots & B_{M.N1} & 0 \\ 0 & \cdots & A_{M.N2} & 0 & 0 & \cdots & 0 & B_{M.N2} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & C_{11} & C_{12} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & C_{N1} & C_{N2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\delta}}_2 \\ \vdots \\ \hat{\boldsymbol{\delta}}_M \\ \hat{\boldsymbol{\delta}}_{11} \\ \hat{\boldsymbol{\delta}}_{12} \\ \vdots \\ \hat{\boldsymbol{\delta}}_{N1} \\ \hat{\boldsymbol{\delta}}_{N2} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中: \boldsymbol{D}_1 和 \boldsymbol{D}_2 分别表示长度尺成像方程和长度约束方程对相机外方位参数和长度尺端点空间坐标求导的雅可比矩阵。各参数改正量的最小二乘解为

$$\hat{\boldsymbol{\delta}} = (\boldsymbol{D}^T \boldsymbol{D})^{-1} \boldsymbol{D}^T \boldsymbol{l}. \quad (14)$$

同样地,在给定相机位置和长度尺端点空间坐标初值情况下,不断迭代,得到最佳相机位置参数。

2.3 多类观测数据下外方位参数联合平差优化方法

在完成相机姿态角和位置的初步解算后,为了进一步提高定向和测量精度,有必要将星光矢量、视觉测量标志点(长度尺端点)和基准长度3种不同类型观测数据联合起来对标定结果进行进一步优化。联立式(7)和式(13),建立包含星光矢量、视觉测量标志点(长度尺端点)和基准长度的多相机外参数联合平差模型:

$$\tilde{\boldsymbol{v}} + \tilde{\boldsymbol{l}} = \boldsymbol{H}\hat{\boldsymbol{\delta}} \Rightarrow \begin{bmatrix} \boldsymbol{v} \\ \hat{\boldsymbol{l}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{l} \\ \hat{\boldsymbol{l}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D}_1 & \boldsymbol{D}_2 \\ \boldsymbol{J} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\delta}} \\ \hat{\boldsymbol{\delta}} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中: \boldsymbol{J} 表示恒星成像方程对相机外方位参数求导的

雅可比矩阵(对位置参数的偏导数值全部为0)。由于恒星成像、长度尺标志点成像及长度约束的数据类型不同,其测量精度也有差别,所以在融合平差过程中需要确定3类观测数据的权重。设长度尺端点观测误差的先验标准差为 s_{pr} ,空间距离长度误差的先验标准差为 s_1 ,星点像面观测误差的标准差为 s_{ps} ,以空间距离标准差作为单位权中误差,则参与联合平差优化的权阵可以表示为

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{P}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \boldsymbol{P}_3 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中: \boldsymbol{P}_1 、 \boldsymbol{P}_2 和 \boldsymbol{P}_3 均为对角矩阵,对角线元素分别为 s_1^2/s_{pr}^2 、 s_1^2/s_1^2 和 s_1^2/s_{ps}^2 。则加权联合平差的法方程为

$$\hat{\boldsymbol{\delta}} = (\boldsymbol{H}^T \boldsymbol{P} \boldsymbol{H})^{-1} \boldsymbol{H}^T \boldsymbol{P} \tilde{\boldsymbol{l}}. \quad (17)$$

3 实验结果与分析

为了验证所提多相机视觉测量系统在轨外方位参数标定方法的有效性并评价系统性能,设计搭建了实测实验系统。该多相机视觉测量系统由硬件系统和软件系统组成。硬件系统主要由基准长度尺、固定相机的殷钢结构件、工业相机、三脚架、闪光灯、计算机、触发盒、电源线、数据线等组成。软件系统主要由图像处理、像面坐标匹配、初值计算、外方位参数标定、三维重建及误差统计等算法程序组成。

表 1 相机及镜头参数

Table 1 Parameters of camera and lens

Type	Model	Parameter	
Camera	MV-CH120-10UM/UC	Resolution	4096×3000
		Pixel size	3.45 μm×3.45 μm
		Sensor size	14.1 mm×10.4 mm
Camera lens	12FA2524-25MP	Focal length	25.25 mm
		Field-of-view (FOV)	30°

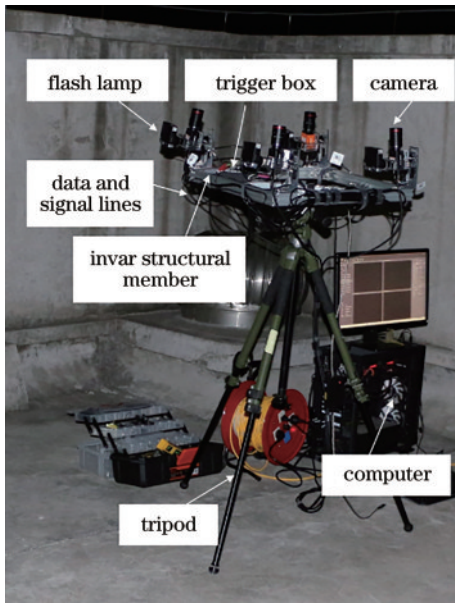


图 3 多相机视觉实验系统结构

Fig. 3 Structure of multi-camera vision experiment system

实验采用的基准长度尺是一根热膨胀系数极小的因瓦合金长度尺,长度尺两端固定回光反射目标球,具备标定、比例还原和精度溯源的功能,如图 4 所示,目标点间的距离通过精确测量为 1096.0372 mm,目标球的直径为 6 mm。

在相机系统对恒星和基准长度尺进行图像拍摄时,为保证拍摄时相机间图像同步采集,实验中使用了同步触发盒(MVM-B-0008,威视图像)。触发盒通过信号线与电脑连接,触发盒的 TTL 接口与相机和闪光灯的信号输入口连接。计算机向触发盒发射信号,触发盒发出同步信号控制闪光灯曝光和相机采集。

3.1 实验系统

实验系统选用了海康工业相机,该相机能够对 5 等星亮度及以上的恒星显著成像,并搭配了凤凰光学镜头和闪光灯(Lux Junior),相机及镜头的参数如表 1 所示。为了保证整个相机系统结构的稳定性,设计了正方形的殷钢结构件,该结构件将 4 台相机固定,相机间的基线距离为 500 mm,为了增加公共视场和测量范围,相机交会角仅为 10°。拍摄时将稳定的结构件固定在三脚架的云台上,实验系统整体结构如图 3 所示。

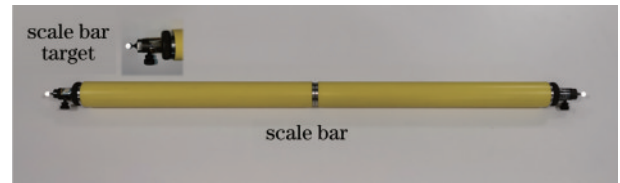


图 4 因瓦合金长度尺

Fig. 4 Invar alloy scale bar

3.2 现场实验流程

实验地点的经纬度分别为 116.2661354° 和 40.1770964°,实验在晚间 22:00 开始,当时温度约为 10 °C,整个标定和测量过程在 30 min 内完成,环境温度的变化小于 0.8 °C。各相机的内方位参数和畸变系数在实验室内由自标定光束平差方法提前标定。在实测实验中,首先设置图像采集软件参数,调整相机光圈(调节到 F2.4),分别对 5 个天区进行拍摄,每个天区拍摄 20 张星图,共计 100 张星图,完成多相机姿态角标定;然后,设置图像采集软件参数,调整相机光圈(调节到 F16),打开闪光灯,对基准长度尺端点标志点拍摄,共计拍摄 100 张基准长度尺图片,完成相机位置标定;最后,采用多类数据融合的联合平差标定算法对各相机外方位参数进行优化。标定过程如图 5 所示。

另外,采用标定后的结果对控制场进行测量,对测量误差进行统计分析,具体的实验流程如图 6 所示。

3.3 外方位参数标定结果分析

多相机视觉系统的姿态角和位置参数标定实验场景如图 7 所示,完成恒星和基准长度尺的图像采集。

采用灰度重心法对图像进行星点和基准长度尺端点提取,图 8 为某一时刻某一天区各个相机拍摄恒星的星点图像,利用三角形算法完成星图匹配。

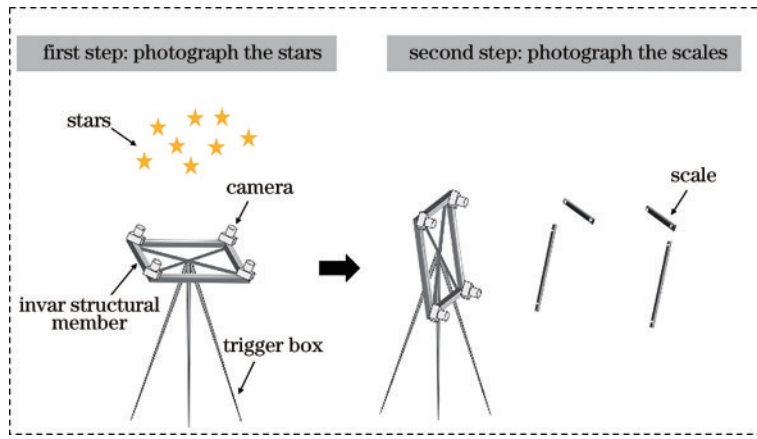


图 5 多相机视觉系统外方位参数的标定过程

Fig. 5 Calibration process of exterior parameters of multi-camera vision system

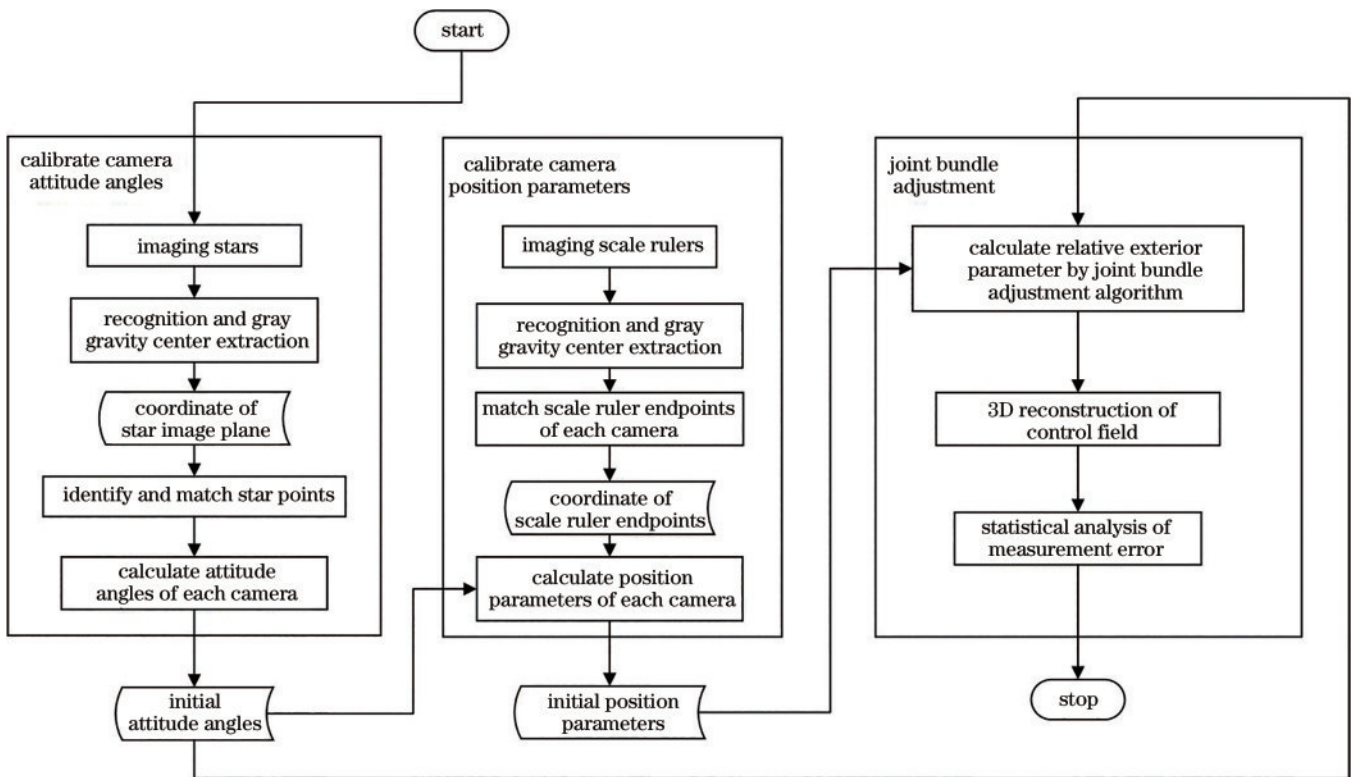


图 6 实验流程图

Fig. 6 Experimental flow chart

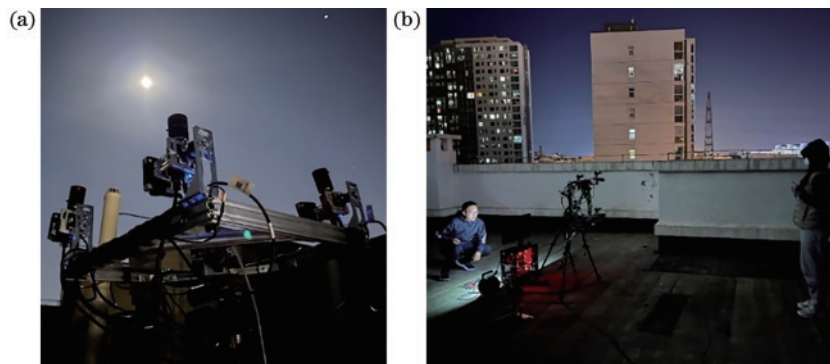


图 7 多相机外方位参数标定实验。(a)姿态角标定实验;(b)位置参数标定实验

Fig. 7 Calibration experiment for multi-camera exterior parameters. (a) Attitude angle calibration experiment; (b) position parameter calibration experiment

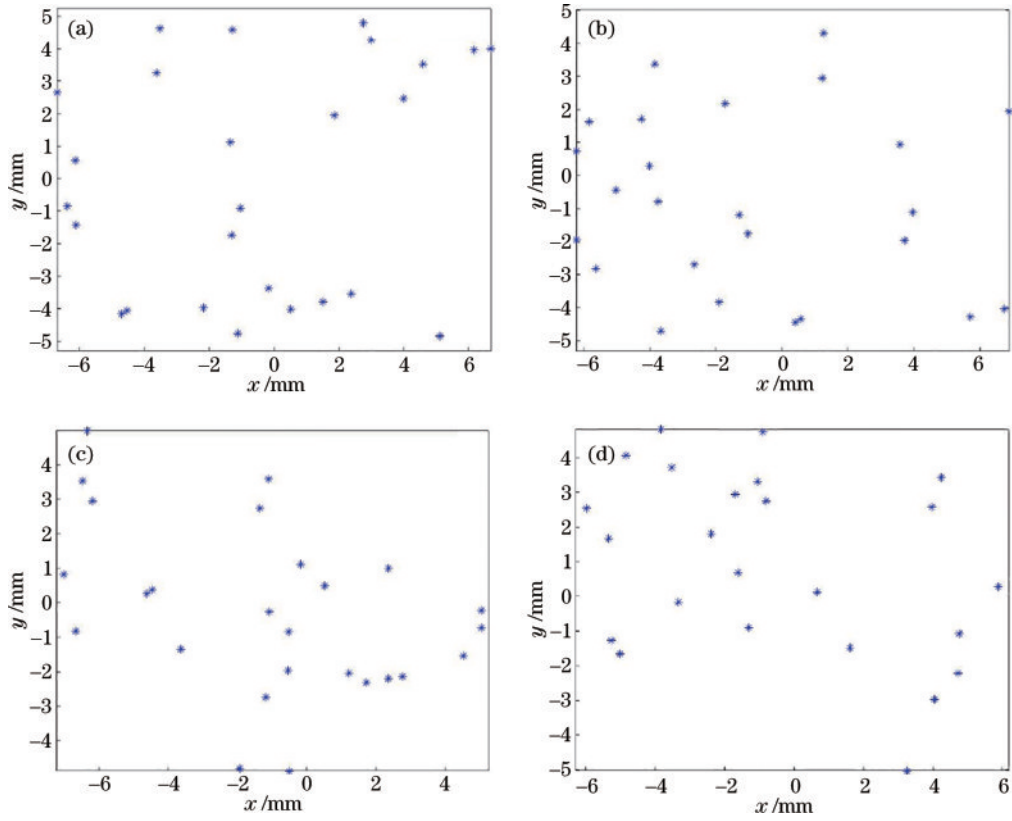


图 8 各个相机恒星成像图。(a)相机 1;(b)相机 2;(c)相机 3;(d)相机 4

Fig. 8 Imaging points of the stars in each camera. (a) Cam1; (b) Cam2; (c) Cam3; (d) Cam4

图 9 为某一时刻各相机对基准长度尺端点的成像,根据各个长度尺的成像位置完成长度尺端点像面

的坐标匹配。恒星和基准长度尺端点像面误差以及长度尺空间长度的误差先验标准差 s_{ps} 、 s_{pr} 和 s_l 分别设置

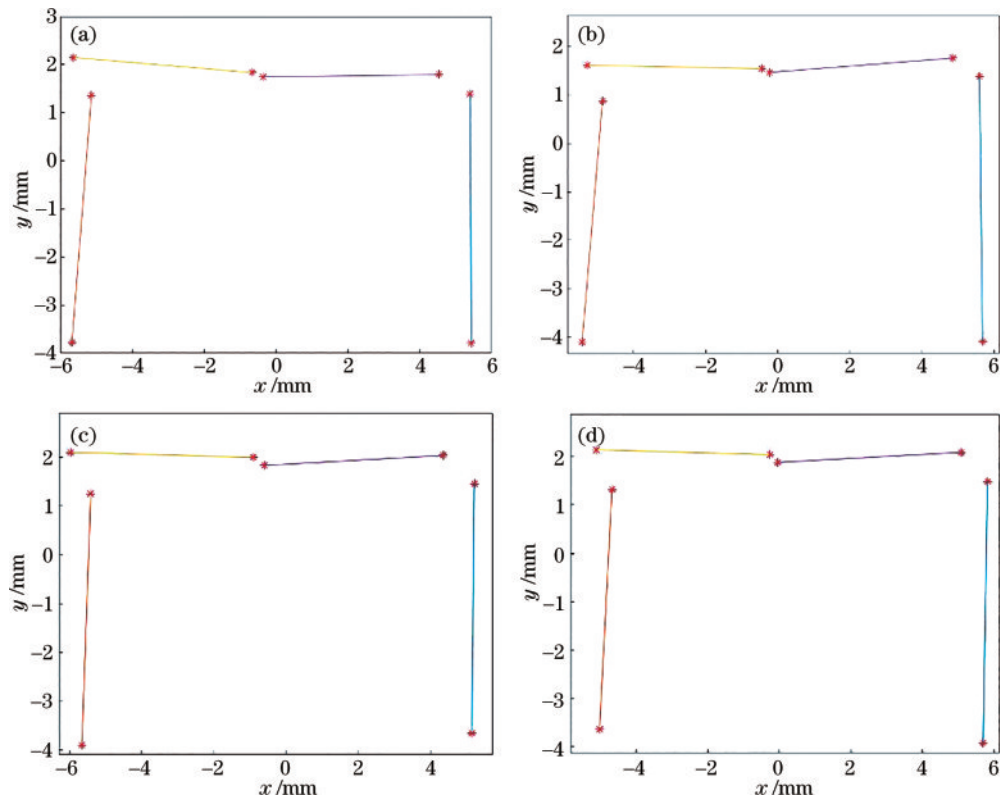


图 9 各个相机基准长度尺端点成像图。(a)相机 1;(b)相机 2;(c)相机 3;(d)相机 4

Fig. 9 Imaging points of the scale ruler in each camera. (a) Cam1; (b) Cam2; (c) Cam3; (d) Cam4

为 0.4 μm、0.2 μm 和 0.2 mm。

实验中,将相机 1 作为基准相机,表 2 列出了 100 次外方位参数标定的平均值。

在外方位参数不断优化的过程中,恒星像点误差、长度尺端点像点误差和长度尺空间长度误差在联合平差过程中不断减小,统计迭代最后各像面及长度误差,其残余误差统计如表 3 所示,残余误差分布如图 10 所示。

上述结果表明,恒星像面和长度尺端点像面后验误差标准差分别为 0.48 μm (1/7 像素) 和 0.21 μm (1/16 像素),与其各自误差先验标准差 0.4 μm 和 0.2 μm 具有一致性,同时误差分布呈现明显的正态分布特征,表明标定结果系统误差小,联合平差标定方法

表 2 多相机视觉测量系统对外方位参数的标定结果

Table 2 Calibration for exterior parameters of multi-camera visual measurement system

Exterior parameter	Cam1	Cam2	Cam3	Cam4
T_x /mm	0	470.6490	14.9698	481.6733
T_y /mm	0	-16.5413	427.1731	401.7269
T_z /mm	0	-63.1880	-25.4267	-87.1868
φ /rad	0	-0.0347	-0.0184	-0.0391
ω /rad	0	0.0192	-0.1707	-0.1655
κ /rad	0	0.2308	0.0029	0.2459

成功地标定了多相机的外方位参数。

表 3 星点、长度尺端点像面残余误差以及空间长度残余误差统计

Table 3 Residual errors of imaging point of stars, ruler endpoints, and spatial length

Error type	Mean error /mm	Maximum error /mm	Standard deviation /mm
Imaging plane error of star	-1.06×10^{-6}	1.90×10^{-3}	4.82×10^{-4}
Imaging plane error of ruler	8.49×10^{-7}	8.00×10^{-4}	2.13×10^{-4}
Length error	4.07×10^{-6}	1.14×10^{-1}	4.58×10^{-2}

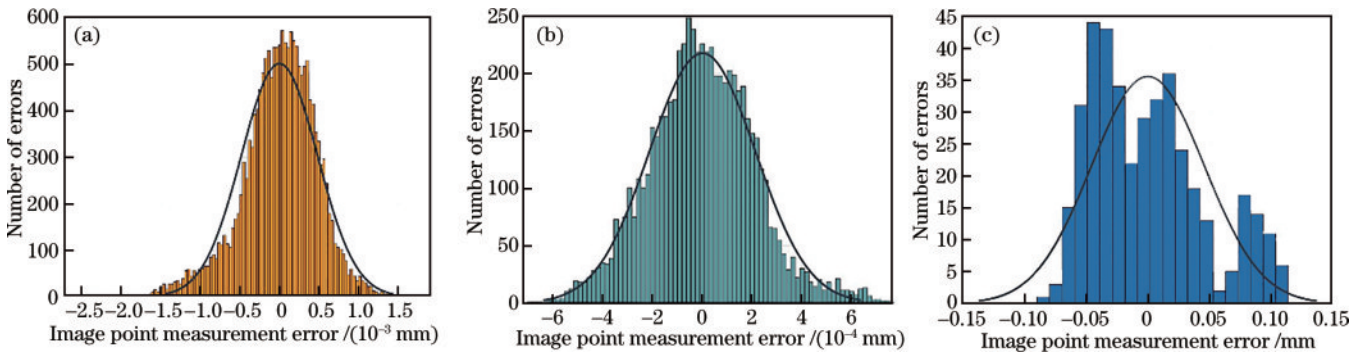


图 10 恒星、长度尺端点像面残余误差及空间长度残余误差分布直方图。(a)恒星像面残余误差分布;(b)基准长度尺像面残余误差分布;(c)空间长度残余误差分布

Fig. 10 Histograms of residual errors of imaging point of stars, ruler endpoints, and spatial length. (a) Residual error of imaging point of stars; (b) residual error of imaging plane of ruler endpoints; (c) residual error of spatial length

3.4 多相机视觉系统测量结果分析

为了验证标定后系统的测量精度,分别利用本系统和 V-STARS 多图像摄影测量系统对控制场进行测量,以 V-STARS 系统的坐标测量结果为真值统计所提方法的测量误差。控制场如图 11 所示,在 2.5 m × 1.4 m 的墙面布置 12 个编码点、321 个普通点和 1 个十字定向靶。表 4 为 V-STARS 系统给出的空间坐标测量误差的均方根误差(RMSE)值和最大值,可见其测量精度很高,可以作为坐标真值评价系统的测量精度。

在利用标定好的多相机系统进行测量时,外方位参数取 100 次联合平差标定结果的平均值,对测量场进行 300 次测量实验。表 5 列出了多相机视觉测量系统相较 V-STARS 测量系统的坐标测量误差,各坐标轴上误差分布如图 12 所示。

可见,以 V-STARS 多图像摄影测量系统的测量

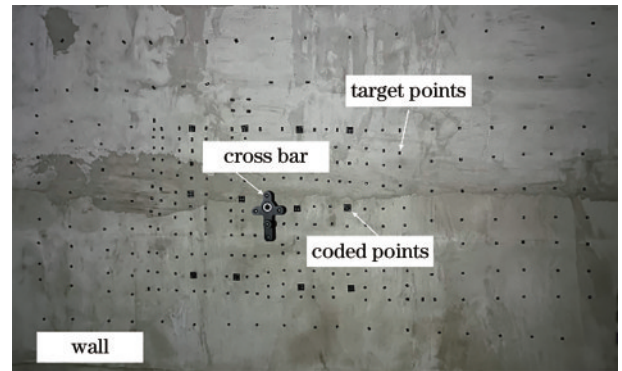


图 11 测量控制场

Fig. 11 Measurement control field

结果为真值,所提方法沿 X、Y 和 Z 空间坐标测量误差的标准差分别约为 0.15 mm、0.04 mm 和 0.05 mm,相对测量精度达 1/17000,进一步验证了所提多类观测数据融合的联合平差外方位参数标定方法的可行性。

表 4 V-STARS 系统的坐标测量误差

Table 4 Coordinate measurement error of V-STARS system

Direction	Maximum error /mm	RMSE /mm
X-direction	8.00×10^{-3}	6.00×10^{-3}
Y-direction	4.00×10^{-3}	3.00×10^{-3}
Z-direction	4.00×10^{-3}	3.00×10^{-3}

表 5 多相机视觉测量系统的测量误差

Table 5 Measurement error of multi-camera vision measurement system

Direction	Mean value /mm	Maximum error /mm	Standard deviation /mm
X-direction	3.00×10^{-3}	0.36	0.15
Y-direction	1.70×10^{-2}	0.15	0.04
Z-direction	-6.00×10^{-3}	0.23	0.05

另外,仅利用拍摄的某一时刻的 4 幅基准长度尺图像,采用五点法标定多相机系统的相对外方位参数,并利用该标定结果对墙面上的控制点进行测量,各轴测量误差统计结果如表 6 所示。

表 6 五点法标定后的多相机视觉测量系统的测量误差

Table 6 Measurement error of multi-camera vision measurement system calibrated by 5-point method

Direction	Mean value /mm	Maximum error /mm	Standard deviation /mm
X-direction	0.21	0.80	0.21
Y-direction	-0.13	0.38	0.07
Z-direction	0.11	0.42	0.08

从表 6 可知:采用五点法对标定结果进行测量后,X、Y 和 Z 空间坐标测量误差的标准差分别约为 0.21 mm、0.07 mm 和 0.08 mm,相对测量精度约 1/12000;另外,测量误差均值大,表明五点法在标定过程中存在系统误差,主要原因是观测数据量少,目标点的随机误差对结果的影响大。而所提联合平差标定方法标定后的系统对各轴的测量误差均值很小。

为了保证系统外方位参数标定的准确性,在不影响被测物工作的情况下,令基准尺尽可能均匀分布于视场范围,避免所有基准尺端点共线分布,防止外参数求解失败。

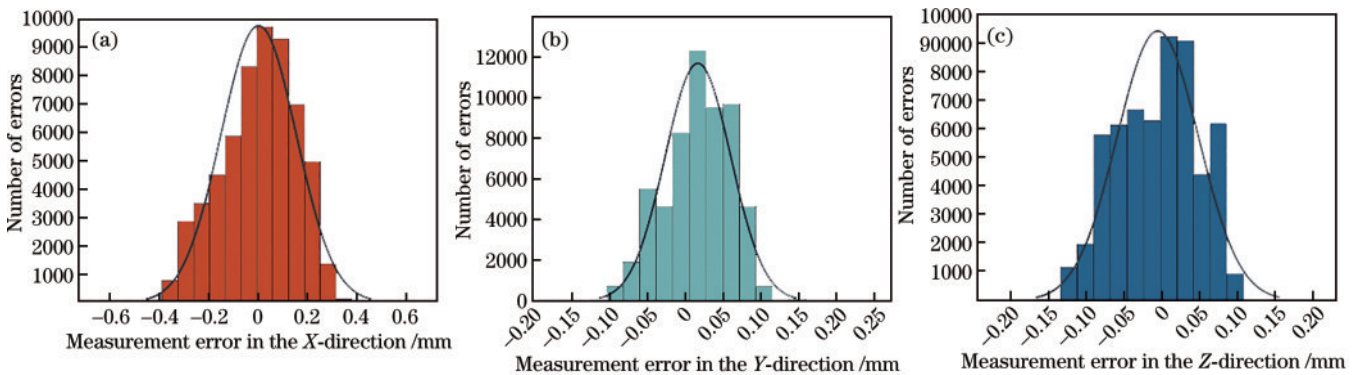


图 12 本系统测量误差的直方图。(a)X方向;(b)Y方向;(c)Z方向

Fig. 12 Measurement error histograms of our system. (a) X-direction; (b) Y-direction; (c) Z-direction

4 结 论

提出了一种基于星光矢量和空间长度的多相机视觉测量系统在轨自主定位定向方法,该方法通过观星实现相机姿态角标定,通过拍摄基准长度尺实现相机位置标定,最后对多类数据进行加权融合平差,实现外方位参数整体优化。实验证明所提定向方法能够解决在轨缺少人工标志物辅助的情况下相机定位定向的问题。同时,以 V-STARS 多图像摄影系统的结果为真值,基于先验误差估计的联合平差标定方法的相对测量精度达 1/17000。所提标定方法在轨标定时不需要合作目标点,在保证标定精度的同时,极大降低了对标定环境的要求,进而减小了对航天器工作性能的影响;另外,基准长度尺在发射和在轨运行中能够保持长度稳定,从而保证标定结果的一致性,同时其精度可溯源,可以对测量系统进行在轨精度评价。这些优点将对视觉测量技术应用于在轨高精度测量、组装、维修等

航天测量任务时具有重要意义。

后续将进一步研究相关理论和方法,将相机内方位参数和畸变系数也纳入所提方法标定体系,最终实现视觉测量系统全部参数的在轨自主标定;将研究基准长度尺分布对测量精度的影响,指导基准长度尺数量、空间分布和姿态的设定,以提高视觉系统的测量精度。

参 考 文 献

- [1] 沈晓凤,曾令斌,靳永强,等.在轨组装技术研究现状与发展趋势[J].载人航天,2017,23(2):228-235,244.
Shen X F, Zeng L B, Jin Y Q, et al. Status and prospect of on-orbit assembly technology[J]. Manned Spaceflight, 2017, 23(2): 228-235, 244.
- [2] 刘荣强,史创,郭宏伟,等.空间可展开天线机构研究与展望[J].机械工程学报,2020,56(5):1-12.
Liu R Q, Shi C, Guo H W, et al. Review of space deployable antenna mechanisms[J]. Journal of Mechanical

- Engineering, 2020, 56(5): 1-12.
- [3] Suzuki Y, Tsuchiya S, Okuyama T, et al. Mechanism for assembling antenna in space[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(1): 254-265.
- [4] Datashvili L, Endler S, Wei B, et al. Study of mechanical architectures of large deployable space antenna apertures: from design to tests[J]. CEAS Space Journal, 2013, 5(3): 169-184.
- [5] Oegerle W R, Purves L R, Budinoff J G, et al. Concept for a large scalable space telescope: in-space assembly[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6265: 62652C.
- [6] 肖洪, 成正爱, 郭宏伟, 等. 空间太阳能电站大折展比体展开桁架机构[J]. 机械工程学报, 2020, 56(13): 128-137.
Xiao H, Cheng Z A, Guo H W, et al. Large folding ratio 3D deployable truss mechanism for space solar power station[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(13): 128-137.
- [7] 蒋山平, 杨林华, 许杰, 等. 真空低温环境下卫星天线变形摄影测量技术[J]. 光学技术, 2013, 39(4): 313-317.
Jiang S P, Yang L H, Xu J, et al. Photogrammetric measurement of deformation for satellite antennas in vacuum cryogenic environment[J]. Optical Technique, 2013, 39(4): 313-317.
- [8] Frase S C, Veress A S. Self-calibration of a fixed-frame multiple-camera system[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1980, 11(46): 1439-1445.
- [9] 马开锋. 高低温环境卫星天线形面变形的近景摄影测量与数据处理[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
Ma K F. Close-range photogrammetry and data processing of satellite antenna surface deformation in high and low temperature environment[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2016.
- [10] 王君, 董明利, 李巍, 等. 大视场摄影测量相机的相对定向[J]. 光学技术, 2018, 44(5): 549-554.
Wang J, Dong M L, Li W, et al. Camera relative orientation in large-scale photogrammetry[J]. Optical Technique, 2018, 44(5): 549-554.
- [11] 韩首榜, 董明利, 孙鹏, 等. 遥感卫星外壳摄影测量网络定向方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 200-207.
Han S B, Dong M L, Sun P, et al. Photogrammetric network orientation of remote sensing satellite outer surface[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 200-207.
- [12] Du S H, Yi H, Chen X N, et al. An absolute orientation realization method based on 3d real scene model[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 658: 012020.
- [13] Schairer E T, Kushner L K, Drain B A, et al. Stereo photogrammetry measurements of the position and attitude of a nozzle-plume/shock-wave interaction model in the NASA Ames 9- by 7- ft supersonic wind tunnel [C]//Proceedings of the 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, January 9-13, 2017, Grapevine, Texas. Virginia: AIAA Press, 2017: 1053.
- [14] Schairer E T, Kushner L K, Heineck J T, et al. Measurements of parachute dynamics in the world's largest wind tunnel by stereo photogrammetry[C]//Proceedings of the 2018 Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, June 25-29, 2018, Atlanta, Georgia. Virginia: AIAA Press, 2018: 3802.
- [15] Kukulova Z, Bujnak M, Pajdla T. Polynomial eigenvalue solutions to minimal problems in computer vision[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(7): 1381-1393.
- [16] 丁影, 李浩, 刘亚南, 等. 平面约束的近景影像绝对定向方法及其精度[J]. 测绘科学, 2020, 45(3): 74-80.
Ding Y, Li H, Liu Y N, et al. The method of plane-constrained absolute orientation for close-range images[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(3): 74-80.
- [17] Zhang S, Jia Y, Peng S, et al. Self-calibration of the stereo vision system of the chang'e-4 lunar rover based on the points and lines combined adjustment[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2020, 86(3): 169-176.
- [18] 房建成, 宁晓琳, 田玉龙. 航天器自主天文导航原理与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
Fang J C, Ning X L, Tian Y L. Principle and method of spacecraft autonomous astronomical navigation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [19] 洪然. 基于旋量的星敏传感器姿态确定方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
Hong R. Research on attitude determination method of star sensor based on spinor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [20] Zhai Y, Zeng L, Xiong W. On-orbit calibration of space camera based on stellar image correspondences[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9446: 94460R.