

## 双线阵测绘相机视轴抖动实时测量

翟国芳 于庆盛 王蕴龙 高卫军

### Real-time measurement for boresight vibration of dual line array surveying and mapping cameras

ZHAI Guo-fang, YU Qing-sheng, WANG Yun-long, GAO Wei-jun

引用本文:

翟国芳, 于庆盛, 王蕴龙, 高卫军. 双线阵测绘相机视轴抖动实时测量[J]. *中国光学*, 2023, 16(4): 878–888. doi: 10.37188/CO-2022-0175

ZHAI Guo-fang, YU Qing-sheng, WANG Yun-long, GAO Wei-jun. Real-time measurement for boresight vibration of dual line array surveying and mapping cameras[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 878-888. doi: 10.37188/CO-2022-0175

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO-2022-0175>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 光学卫星在轨动态场景实时匹配方法及试验

On-orbit dynamic scene real-time matching method and experiment of optical satellite  
*中国光学 (中英文)*. 2019, 12(3): 575 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0575>

#### 无人机侦察多目标实时定位技术研究

Multi-targets real-time location technology for UAV reconnaissance  
*中国光学 (中英文)*. 2018, 11(5): 812 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0812>

#### 基于太赫兹量子级联激光器的实时成像研究进展

Progress in real-time imaging based on terahertz quantum-cascade lasers  
*中国光学 (中英文)*. 2017, 10(1): 68 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0068>

#### 光学三维扫描仪光强传递函数的测量和校正

Measurement and calibration of the intensity transform function of the optical 3D profilometry system  
*中国光学 (中英文)*. 2018, 11(1): 123 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0123>

#### 基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统

Interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating  
*中国光学 (中英文)*. 2017, 10(1): 39 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0039>

#### 大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制

Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view  
*中国光学 (中英文)*. 2019, 12(3): 678 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0678>

文章编号 2097-1842(2023)04-0878-11

## 双线阵测绘相机视轴抖动实时测量

翟国芳\*, 于庆盛, 王蕴龙, 高卫军  
(北京空间机电研究所, 北京 100094)

**摘要:** 本文建立了一个航天线阵测绘相机视轴测量模型, 以实现双线阵测绘相机视轴抖动的实时测量。首先, 通过在相机焦平面两端设置激光收发装置, 经由中央棱镜关联, 构建了两台相机之间的夹角参数变化测量模型。接着, 基于双矢量定姿原理推导了计算表达式, 可以实现相机焦距及绕 XYZ 三轴变化量的高精度测量。对计算方法的误差进行了分析, 并通过仿真进行了验证。此外, 还对本文提出方法与工程上常用的简化方法之间的残差进行了仿真, 结果表明, 简化方法仅在很小的测量范围内与本文提出方法一致性良好, 当测量角度范围扩大到 2° 时, 采用本文提出的计算方法才能得到精度为 0.1" 的测量结果。最后, 在热真空环境下进行了试验验证, 结果显示采用该计算方法得到的相机内外参标定精度达 0.1", 结果表明两台相机夹角参数表现出轨道周期性规律, 为后续开展立体测绘任务提供了良好的参考。

**关键词:** 视轴测量; 双矢量定姿; 质心提取精度; 热真空

中图分类号: TH741 文献标志码: A doi: 10.37188/CO-2022-0175

## Real-time measurement for boresight vibration of dual line array surveying and mapping cameras

ZHAI Guo-fang\*, YU Qing-sheng, WANG Yun-long, GAO Wei-jun  
(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China)  
\* Corresponding author, E-mail: zhaigf044@126.com

**Abstract:** In order to realize the real-time measurement of the boresight vibration of the dual line array surveying and mapping camera, a measurement model of the optical axis of the aerospace line array surveying and mapping camera is established. First, by setting up laser transceivers at both ends of the focal plane of the camera, through the central prism correlation, an angle parameter change measurement model for the two cameras is constructed. An optical axis measurement method for multi-line array cameras based on the dual-vector attitude determination principle is proposed. The calculation expression is given and the algorithm error is analyzed, which is verified by simulation. In addition, the residuals of the two algorithms are simulated and the results show that the simplified algorithm is only in good agreement with the dual vector algorithm in a small measurement range but when the detection range is expanded to 2 seconds, the algorithm in this article can be used to obtain 0.1 arc-second. Finally, the algorithm was tested and verified in a thermal vacuum environment, which verified that the calibration accuracy of the internal and external parameters of the cam-

收稿日期: 2022-08-02; 修订日期: 2022-08-26

基金项目: 国家重点研发项目 (No. 2016YFB0500802)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0500802)

era using this algorithm reached 0.1 arc-second. The results showed that the angle parameters of the two cameras exhibited the periodicity of the orbit, which provided good conditions for the subsequent development of stereo surveying and mapping tasks.

**Key words:** optical axis measurement; Dual Vector Attitude Determination(DVAD); centroiding extraction accuracy; thermal vacuum environment

## 1 引言

线阵测绘相机是目前进行光学遥感测绘的重要方法<sup>[1-4]</sup>,具有覆盖面积大、测绘效率高、对平台控制精度及稳定度要求相对较低等优点<sup>[5-8]</sup>。相关文献研究表明,线阵相机之间的视轴夹角和相机内参焦距确定精度是影响遥感测绘精度的两个重要因素<sup>[9-10]</sup>。目前主要通过使用低膨胀系数材料,高精密热控等手段以保证测绘相机内外参的稳定性<sup>[11]</sup>。受轨道空间热环境的影响,典型的卫星轨道,如太阳同步轨道,轨道空间热环境变化剧烈,以及当前卫星平台上热控能力的限制,相机视轴间夹角的抖动角度仍然达到数角秒<sup>[12]</sup>,这对于高精度地形测绘而言显然是不够的。常规的地面标定方法受到天气条件等诸多限制,且实时性差<sup>[13]</sup>,因此亟需发展新的标定手段。

ICESat-1 搭载的 GLAS<sup>[14]</sup> 以及 ICESat-2 搭载的 ATLAS<sup>[15]</sup> 采用参考光,建立了星敏感器和激光测高光路的联系,从而可以确定激光绝对指向。但该参考光路为半光学-半机械形式,即参考光未穿过星敏感器的光学系统,仅依靠机械固连来保证一致性。考虑到星敏感器较小,这一点是可能做到的,但是如果针对线阵测绘相机显然不适用。清华大学尤政课题组<sup>[16]</sup>、同济大学王占山课题组<sup>[17]</sup>对相机夹角的关联设计论证进行了研究,但主要是基于外部机械基准,难以评价内部光学系统导致的视轴变化,不适用于多线阵立体测绘相机。西安电子科技大学王慧课题组<sup>[18]</sup>基于光学自准直原理对航天光学相机几何参数进行了建模仿真,但其只适用于相机视轴空间旋转角较小的情况,有一定的局限性。

本文基于双矢量定姿原理提出了一种新的基于双矢量定姿(Dual Vector Attitude Determination, DVAD)的内外参解算方法,第二节对方法实

现过程进行了重点描述,第三节对方法误差进行了分析,第四节给出了试验验证相关情况,第五节对文章进行了总结。

## 2 测量原理和方法

图1所示为空间多线阵相机内外参在轨标定系统简图。此处,以其中一台相机为例对标定原理进行说明,如下:首先在焦平面两端分别设置激光光束发射和接收装置,从焦平面发出的激光光束穿过整个相机光学系统,然后经由中央棱镜反射,再次穿过光学系统,汇聚在焦平面,所形成的光斑由接收装置 CMOS 图像传感器接收,从而构建了两支测量光路。当相机几何参数发生变化时,测量光线偏转,相应的图像光斑产生平移,通过一定的方法即可解算得到各参数的变化情况。注意到由于两台相机均与中央棱镜相关联,因此联立两台相机的参数就可以获得相机之间的夹角变化关系。

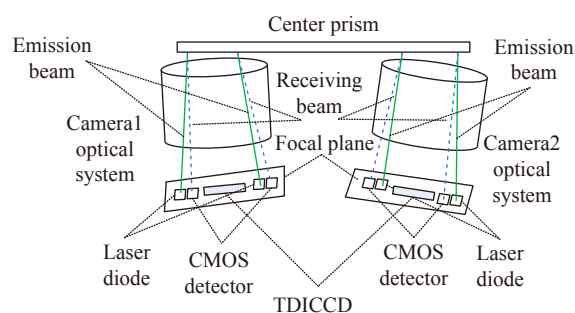


图1 相机内外参数星上测量简图

Fig. 1 Schematic diagram of the on-satellite measurement of the camera's internal and external parameters

### 2.1 数学模型建立

图2所示为单台相机的内外参数标定几何示意图。基于示意图可以建立单台相机的内外参数数学模型。可以建立镜头像方坐标系、镜头物方坐标系、相机坐标系和 CMOS 探测器坐标系,基本参数定义如表1所示。

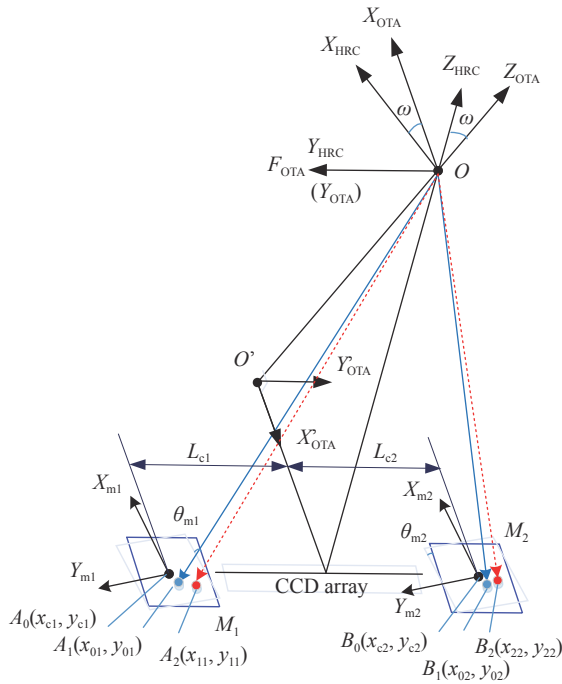


图 2 单台相机内外参数星上测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the on-satellite measurement of internal and external parameters of a single camera

表 1 基本输入参数

Tab. 1 Basic input parameters

符号	定义
$O X_{OTA} Y_{OTA} Z_{OTA}$	镜头物方坐标系, $O$ 为坐标原点,
$O' X'_{OTA} Y'_{OTA} Z'_{OTA}$	镜头像方坐标系, $O'$ 为坐标原点, $O' X'_{OTA}$ 从原点指向 CCD 线阵中心, $O' Z'_{OTA}$ 为视轴方向, 第三轴符合右手定则
$O X_{HRC} Y_{HRC} Z_{HRC}$	相机坐标系, $Z_{HRC}$ 从 CCD 中心指向 $O$ 点, $Y_{HRC}$ 与 $Y_{OTA}$ 方向一致
$M_1 M_2$	焦平面上分置于 CCD 两端的面阵探测器
$\theta_{m1}, \theta_{m2}$	$M_1, M_2$ 探测器转角
$A_0(x_{c1}, y_{c1}), B_0(x_{c2}, y_{c2})$	$M_1, M_2$ 探测器中心点
$A_1(x_{01}, y_{01}), B_1(x_{02}, y_{02})$	$M_1, M_2$ 探测器坐标系下的初始坐标
$A_2(x_{11}, y_{11}), B_2(x_{22}, y_{22})$	$M_1, M_2$ 探测器坐标系下的实测坐标
$F_{OTA}$	相机焦距
$\omega$	离轴角

## 2.2 简化标定方法

将相机光学参数的简化计算公式修正并重写, 如下<sup>[19]</sup>:

$$\Delta f_{\text{simple}} = Kf \cdot \left[ \frac{(y_{11} - y_{01}) \cdot d - (y_{22} - y_{02}) \cdot d}{2} \right] \cdot \frac{F_{OTA}}{L}, \quad (1)$$

$$\Delta \alpha_{\text{simple}} = \arctan \left[ \left( \frac{(y_{11} - y_{01}) \cdot d + (y_{22} - y_{02}) \cdot d}{2} \right) \cdot \frac{\cos^2(\beta)}{2 \cdot F_{OTA}} \right], \quad (2)$$

$$\Delta \beta_{\text{simple}} = \arctan \left[ \left( \frac{(x_{11} - x_{01}) \cdot d + (x_{22} - x_{02}) \cdot d}{2} \right) \cdot \frac{\cos^2(\omega)}{2 \cdot F_{OTA}} \right], \quad (3)$$

$$\Delta \gamma_{\text{simple}} = \arctan \left[ \left( \frac{(x_{11} - x_{01}) \cdot d - (x_{22} - x_{02}) \cdot d}{2} \right) \cdot \frac{1}{L} \right], \quad (4)$$

其中:  $Kf$  为尺度因子, 不同的光学系统取值不一样, 对于像方准远心系统, 由于其接收光束的近似平行特性, 其取值一般小于 1;  $d$  为焦平面两端 CMOS 探测器像元尺寸大小;  $L = L_{c1} + L_{c2}$  为两片 CMOS 探测器件的中心距离;  $\beta$  为图 2 中  $\overrightarrow{OA_0}$ ,  $\overrightarrow{OB_0}$  两个矢量夹角的 1/2;  $\Delta f_{\text{simple}}$ ,  $\Delta \alpha_{\text{simple}}$ ,  $\Delta \beta_{\text{simple}}$ ,  $\Delta \gamma_{\text{simple}}$  分别为相机光学系统焦距变化量, 相机视轴绕 X, Y, Z 轴各自变化量, 其他参数定义见表 1。

## 2.3 双矢量定姿标定方法

上一节简化标定方法主要基于如下思想: 当坐标系绕三轴的转动足够小时, 可以忽略该转序。即

$$\mathbf{M}(\alpha, \beta, \gamma) \approx \mathbf{M}(\beta, \alpha, \gamma) \approx \dots \approx \mathbf{M}(\gamma, \beta, \alpha), \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{M}(\beta, \alpha, \gamma) = \begin{bmatrix} C_\beta C_\gamma - S_\beta S_\alpha S_\gamma & C_\beta S_\gamma + S_\beta S_\alpha C_\gamma & -S_\beta C_\alpha \\ -C_\alpha S_\gamma & C_\alpha C_\gamma & S_\alpha \\ S_\beta C_\gamma + C_\beta S_\alpha S_\gamma & S_\beta S_\gamma - C_\beta S_\alpha C_\gamma & C_\beta C_\alpha \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中  $C_\beta, S_\beta$  表示  $\cos(\beta), \sin(\beta)$ , 其余类似。为便于对比分析, 本文将文献 [18]、文献 [19] 介绍的方法统称为简化方法。但是, 当希望获取更高精度的视轴标定精度时, 上述简化方法存在不足。计算表明, 当视轴绕三轴  $\alpha, \beta, \gamma$  的转角为 2' 时, 由于转序差异导致的角度误差达到 0.1", 显然, 这对于高精度测量是不能接受的。因此, 本文提出一种基于双矢量定姿的视轴测量方法, 流程如图 3 所示, 以弥补简化方法的不足。初始参考点质心采用带阈值的质心算法计算。主要推导过程如下:

获取 CMOS 探测器坐标系下的参考光基准点坐标值  $A_1(x_{01}, y_{01}), B_1(x_{02}, y_{02})$ , 并改写为矢量表达式  $\mathbf{v}_A, \mathbf{v}_B$ ;

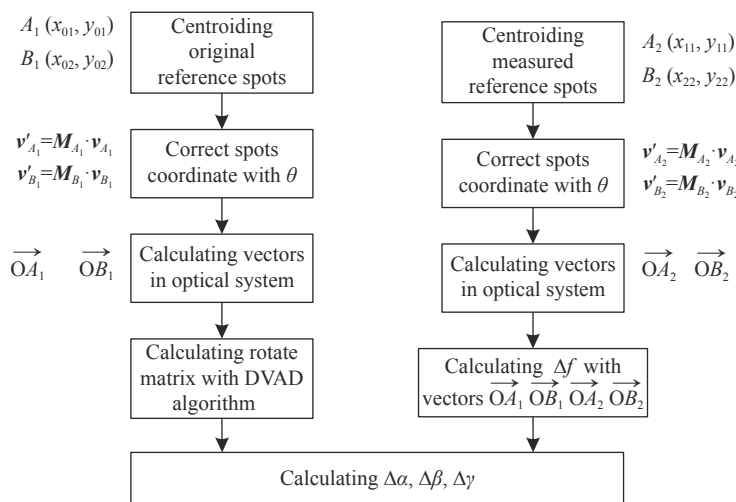


图 3 基于双矢量定姿原理的处理流程

Fig. 3 Processing flow based on the principle of Dual Vector Attitude Determination(DVAD)

$$\mathbf{v}_{A_1} = \begin{bmatrix} x_{01} \\ y_{01} \end{bmatrix}, \mathbf{v}_{B_1} = \begin{bmatrix} x_{02} \\ y_{02} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

根据 CMOS 探测器安装倾斜角  $\theta_{m1}, \theta_{m2}$  计算修正后的矢量  $\mathbf{v}'_{A_1}, \mathbf{v}'_{B_1}$ ;

$$\begin{aligned} \mathbf{v}'_{A_1} &= \mathbf{M}_{A_1} \cdot \mathbf{v}_{A_1} \\ \mathbf{v}'_{B_1} &= \mathbf{M}_{B_1} \cdot \mathbf{v}_{B_1} \end{aligned}, \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{A_1} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_{m1}) & -\sin(\theta_{m1}) \\ \sin(\theta_{m1}) & \cos(\theta_{m1}) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{M}_{B_1} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_{m2}) & -\sin(\theta_{m2}) \\ \sin(\theta_{m2}) & \cos(\theta_{m2}) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (9)$$

因此有:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}'_{A_1} &= \begin{bmatrix} x_{01} \cdot \cos(\theta_{m1}) - y_{01} \cdot \sin(\theta_{m1}) \\ x_{01} \cdot \sin(\theta_{m1}) + y_{01} \cdot \cos(\theta_{m1}) \end{bmatrix} \\ \mathbf{v}'_{B_1} &= \begin{bmatrix} x_{02} \cdot \cos(\theta_{m2}) - y_{02} \cdot \sin(\theta_{m2}) \\ x_{02} \cdot \sin(\theta_{m2}) + y_{02} \cdot \cos(\theta_{m2}) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

根据前述过程以及  $A_0(x_{c1}, y_{c1}), B_0(x_{c2}, y_{c2})$  计算得到  $Ox_{OTA}Y_{OTA}Z_{OTA}$  坐标系下  $\vec{OA}_1, \vec{OB}_1$  矢量;

$$\begin{aligned} \mathbf{v}''_{A_1} &= \begin{bmatrix} x_{c1} + x_{01} \cdot \cos(\theta_{m1}) - y_{01} \cdot \sin(\theta_{m1}) \\ y_{c1} + x_{01} \cdot \sin(\theta_{m1}) + y_{01} \cdot \cos(\theta_{m1}) \\ -F_{OTA} \end{bmatrix} \\ \mathbf{v}''_{B_1} &= \begin{bmatrix} x_{c2} + x_{02} \cdot \cos(\theta_{m2}) - y_{02} \cdot \sin(\theta_{m2}) \\ y_{c2} + x_{02} \cdot \sin(\theta_{m2}) + y_{02} \cdot \cos(\theta_{m2}) \\ -F_{OTA} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (11)$$

根据矢量  $\mathbf{v}''_{A_1}, \mathbf{v}''_{B_1}$  构建在  $Ox_{OTA}Y_{OTA}Z_{OTA}$  坐标系下确定的单位化初始坐标系的转动矩阵  $\mathbf{M}_0$ ;

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{v}''_{A_1} \times \mathbf{v}''_{B_1}}{|\mathbf{v}''_{A_1} \times \mathbf{v}''_{B_1}|} & \frac{\mathbf{v}''_{A_1} + \mathbf{v}''_{B_1}}{|\mathbf{v}''_{A_1} + \mathbf{v}''_{B_1}|} & \frac{\mathbf{v}''_{A_1} \times \mathbf{v}''_{B_1}}{|\mathbf{v}''_{A_1} \times \mathbf{v}''_{B_1}|} \times \frac{\mathbf{v}''_{A_1} + \mathbf{v}''_{B_1}}{|\mathbf{v}''_{A_1} + \mathbf{v}''_{B_1}|} \\ \frac{\mathbf{v}''_{A_1} \times \mathbf{v}''_{B_1}}{|\mathbf{v}''_{A_1} \times \mathbf{v}''_{B_1}|} & \frac{\mathbf{v}''_{A_1} + \mathbf{v}''_{B_1}}{|\mathbf{v}''_{A_1} + \mathbf{v}''_{B_1}|} & \frac{\mathbf{v}''_{A_1} \times \mathbf{v}''_{B_1}}{|\mathbf{v}''_{A_1} \times \mathbf{v}''_{B_1}|} \times \frac{\mathbf{v}''_{A_1} + \mathbf{v}''_{B_1}}{|\mathbf{v}''_{A_1} + \mathbf{v}''_{B_1}|} \\ \frac{\mathbf{v}''_{A_1} \times \mathbf{v}''_{B_1}}{|\mathbf{v}''_{A_1} \times \mathbf{v}''_{B_1}|} & \frac{\mathbf{v}''_{A_1} + \mathbf{v}''_{B_1}}{|\mathbf{v}''_{A_1} + \mathbf{v}''_{B_1}|} & \frac{\mathbf{v}''_{A_1} \times \mathbf{v}''_{B_1}}{|\mathbf{v}''_{A_1} \times \mathbf{v}''_{B_1}|} \times \frac{\mathbf{v}''_{A_1} + \mathbf{v}''_{B_1}}{|\mathbf{v}''_{A_1} + \mathbf{v}''_{B_1}|} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

按照相同的处理过程, 建立实测点坐标  $A_2(x_{11}, y_{11}), B_2(x_{22}, y_{22})$  在  $Ox_{OTA}Y_{OTA}Z_{OTA}$  坐标系下的两个矢量确定的坐标系的转动矩阵  $\mathbf{M}_t$ 。

根据  $\mathbf{M}_0, \mathbf{M}_t$  计算初始坐标系相对于  $\mathbf{M}_t$  的旋转矩阵  $\mathbf{M}_{Rot}$ :

$$\mathbf{M}_{Rot} = \mathbf{M}_t \cdot \mathbf{M}_0^T = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} & \mathbf{M}_{13} \\ \mathbf{M}_{21} & \mathbf{M}_{22} & \mathbf{M}_{23} \\ \mathbf{M}_{31} & \mathbf{M}_{32} & \mathbf{M}_{33} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

根据  $\mathbf{M}_{Rot}$  以及  $\omega$  计算相机坐标系  $Ox_{HRC}Y_{HRC}Z_{HRC}$  绕  $X_{HRC}, Y_{HRC}, Z_{HRC}$  三轴的转动量。

$$\begin{bmatrix} \nu_{Rotx} \\ \nu_{Roty} \\ \nu_{Rotz} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} \frac{-\mathbf{M}_{32}}{\mathbf{M}_{33}} \cdot \cos(\omega) + \frac{-\mathbf{M}_{21}}{\mathbf{M}_{11}} \cdot \sin(\omega) \\ \frac{\mathbf{M}_{31}}{\sqrt{1 - (\mathbf{M}_{31})^2}} \\ \frac{-\mathbf{M}_{32}}{\mathbf{M}_{33}} \cdot \sin(\omega) + \frac{-\mathbf{M}_{21}}{\mathbf{M}_{11}} \cdot \cos(\omega) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

焦距变化量  $\delta_f$  的计算公式如下:

$$\delta_f = -\frac{Kf}{2} \cdot \frac{F_{OTA}}{(\mathbf{v}''_{A_1}(2) - \mathbf{v}''_{B_1}(2)) \cdot [(\mathbf{v}''_{A_2}(2) - \mathbf{v}''_{A_1}(2)) - (\mathbf{v}''_{B_2}(2) - \mathbf{v}''_{B_1}(2))]}, \quad (15)$$

其中:  $\mathbf{v}''_{A_2}, \mathbf{v}''_{B_2}$  为实测点  $A_2(x_{11}, y_{11}), B_2(x_{12}, y_{12})$  在



$Ox_{OTA}y_{OTA}z_{OTA}$ 坐标系下的矢量 $\vec{OA}_2, \vec{OB}_2$ ;  $v'_{A_2}$  (2)表示该矢量的第二个元素, 其余变量类似。

### 3 测量方法数值仿真分析

从上述推导过程可知, 航天线阵测绘相机的视轴标定结果受质心提取误差、焦距设计数值以及 CMOS 探测器设计间距影响, 本文采用计算机仿真分析方法, 研究质心提取误差、焦距数值以及 CMOS 探测器设计间距 3 项输入参数对测量方法精度的影响, 同时对本文提出的双矢量法与简化方法计算得到的残差做对比分析。

#### 3.1 质心提取误差影响

由双矢量法的计算公式可知, 获取相机各项几何测量参数误差的解析解非常困难。然而, 注意到如下事实: 设 $\alpha, \beta, \gamma$ 为测量坐标系绕基准坐标系的三轴转角( $XYZ$ 转序), 测量值单次不确定度为 $\delta_\alpha, \delta_\beta, \delta_\gamma$ 时, 公式(13)可改写为:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{Rot}} &= \mathbf{M}_t(\alpha + \delta_\alpha, \beta + \delta_\beta, \gamma + \delta_\gamma) \cdot \\ &\mathbf{M}_0^T\left(\alpha_0 + \frac{\delta_\alpha}{\sqrt{N}}, \beta_0 + \frac{\delta_\beta}{\sqrt{N}}, \gamma_0 + \frac{\delta_\gamma}{\sqrt{N}}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

其中:  $N$ 为 $A_1(x_{01}, y_{01}), B_1(x_{02}, y_{02})$ 的标定测量次数。 $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ 为 $\mathbf{M}_0$ 坐标系绕基准坐标系三轴的转角。注意到, 当上式中 $\alpha, \beta, \gamma$ 与 $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ 相等时, 即可得到误差矩阵 $\mathbf{M}_{\text{err}}$ 如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{err}} &= \mathbf{M}_t(\delta_\alpha, \delta_\beta, \delta_\gamma) \mathbf{M}_t(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0) \cdot \mathbf{M}_0^T(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0) \cdot \\ &\mathbf{M}_0^T\left(\frac{\delta_\alpha}{\sqrt{N}}, \frac{\delta_\beta}{\sqrt{N}}, \frac{\delta_\gamma}{\sqrt{N}}\right) = \\ &\mathbf{M}_t(\delta_\alpha, \delta_\beta, \delta_\gamma) \cdot \mathbf{M}_0^T\left(\frac{\delta_\alpha}{\sqrt{N}}, \frac{\delta_\beta}{\sqrt{N}}, \frac{\delta_\gamma}{\sqrt{N}}\right) \approx \\ &\mathbf{M}_t(\delta_\alpha, \delta_\beta, \delta_\gamma) \end{aligned} \quad (17)$$

其中: 考虑到 $N \geq 100$ , 即参考点初始值误差通过多次测量后可忽略不计。

进一步考虑到 $\delta_\alpha, \delta_\beta, \delta_\gamma$ 为小量, 上式可简化为:

$$\mathbf{M}_{\text{err}} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_\gamma & -\delta_\beta \\ -\delta_\gamma & 1 & \delta_\alpha \\ \delta_\beta & -\delta_\alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

式(17)的意义在于, 当考虑 $\delta_\alpha, \delta_\beta, \delta_\gamma$ 为小量时, 各轴的误差均是独立的, 这与利用简化公式计算的实质是一样的, 因此, 可以用简化公式误差来近似替代双矢量方法的误差。

因此, 根据误差理论, 相机光学参数的误差公式如下:

$$\Delta f \approx 3 \cdot Kf \cdot \frac{\sqrt{2}d}{2} \cdot \frac{F_{\text{OTA}}}{L} \cdot \sigma \quad (19)$$

$$\delta_\alpha \approx 3 \cdot \frac{\sqrt{2}d \cos^2(\beta)}{2 \cdot 2 \cdot F_{\text{OTA}}} \cdot \sigma \approx \frac{3 \sqrt{2}d}{4} \frac{\sigma}{F_{\text{OTA}}} \quad (20)$$

$$\delta_\beta \approx 3 \cdot \frac{\sqrt{2}d \cos^2(\omega)}{2 \cdot 2 \cdot F_{\text{OTA}}} \cdot \sigma \approx \frac{3 \sqrt{2}d}{4} \frac{\sigma}{F_{\text{OTA}}} \quad (21)$$

$$\delta_\gamma \approx 3 \cdot \frac{\sqrt{2}d}{2} \frac{\sigma}{L} \quad (22)$$

其中 $\sigma$ 为质心提取等效误差。

仿真基本参数如表 2 所示, 本文全部仿真基本输入参数保持一致。

表 2 基本输入参数

Tab. 2 Basic input parameters

参数	数值
像素大小 $d/\mu\text{m}$	10
离轴角 $\omega/^\circ$	6
尺度因子 $Kf$	0.5
$M_1$ 探测器转角 $\theta_{m1}/^\circ$	0
$M_2$ 探测器转角 $\theta_{m2}/^\circ$	0
$M_1$ 初始点坐标 $A_1/\text{pixel}$	(0,0)
$M_2$ 初始点坐标 $B_1/\text{pixel}$	(0,0)
焦距, $F_0/\text{mm}$	6000
$L_{c1}/\text{mm}$	500
$L_{c2}/\text{mm}$	-500
$M_1, M_2$ 探测器像素规模	5120×3840

分析质心提取误差的影响时, 会在仿真光斑中加入高斯噪声, 这里采用蒙特卡洛方法使仿真更接近于实际情况, 并与式(19)~式(22)的计算结果进行对比。仿真结果如图 4~图 5 所示。由图 4 可知, 各测量参数误差与质心提取精度呈线性增大关系; 绕  $Z$  轴的误差明显大于绕  $X, Y$  轴的误差; 绕  $X, Y$  轴误差基本相当。同时需要注意, 为尽可能提高角度测量精度, 控制质心误差很重要。文献 [9]、文献 [10] 指出线阵测绘相机要获得较高的无控定位精度, 视轴之间的相对角度变

化需优于 1”。要达到此精度, 由图 4 可知质心提取误差需优于 0.1 pixel, 因此选取质心提取误差

为 0.1 pixel 进行分析。图 5 给出了当质心提取误差为 0.1pixel 时 1200 次蒙特卡洛分析的结果。

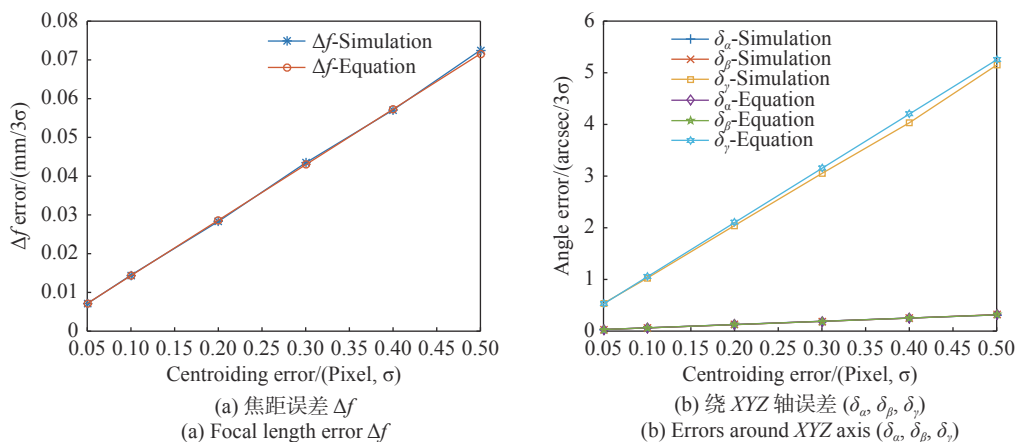


图 4 不同质心提取精度时各内外参数误差

Fig. 4 Errors of internal and external parameters with different centroid extraction accuracy

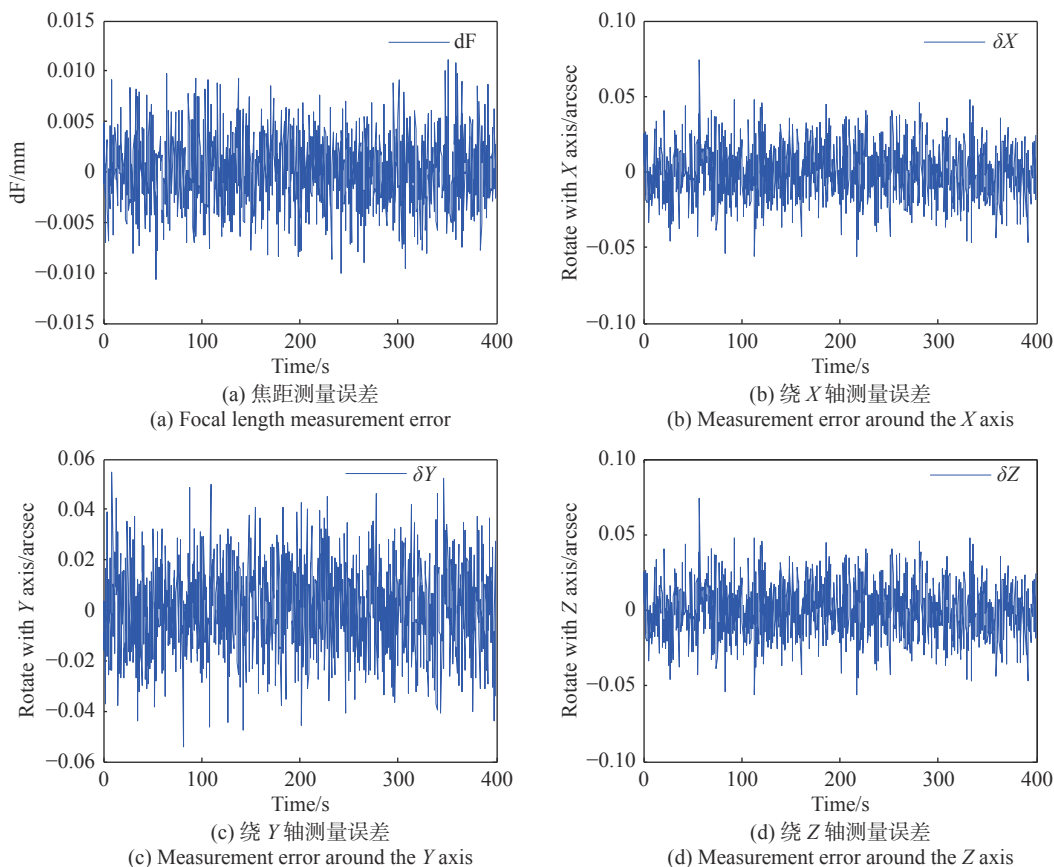


图 5 质心提取精度为 0.1pixel 时各测量参数误差

Fig. 5 Error of each measurement parameter with the centroid extraction accuracy of 0.1 pixel

### 3.2 焦距对测量精度的影响

质心提取误差设为 0.1 pixel, 不同焦距  $F_0$  情况下相机的几何参数精度结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 随着焦距增大,  $\Delta f$  误差线性增大, 而  $\delta\gamma$  无明显变化。这一点从直观上较易于理解。这是因为测量点在 Y 方向的间距没有改

变,结合原理图可知,绕 Z 轴的变化主要与该距离相关; $\delta\alpha$ ,  $\delta\beta$  随着焦距增大呈递减趋势,并具有明显的非线性特点。值得注意的是,当焦距  $F \geq 6$  m 时,可以获得优于 0.1" 的测角精度,这一点非常重要。显然,要获得优于 0.1" 的较高测角精度,光学系统焦距设计值须大于 6 m,这样才能有效指导光学系统的设计工作。

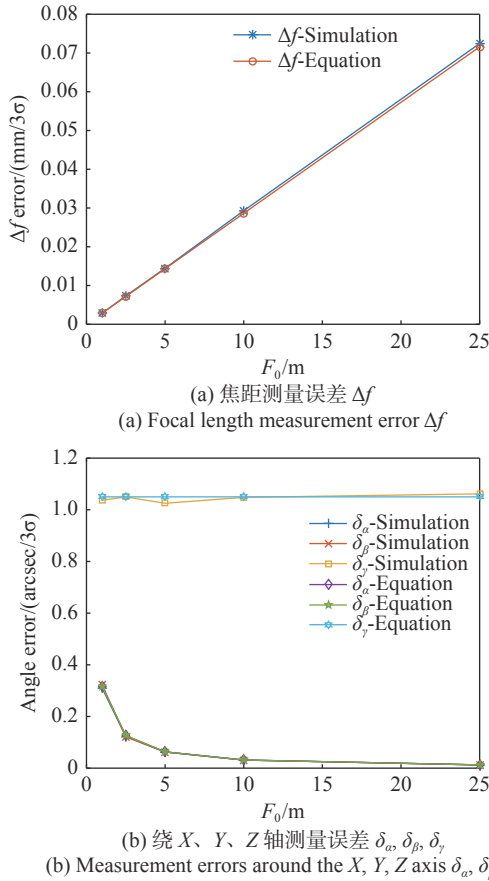


图 6 不同焦距时各测量参数误差

Fig. 6 The errors of each measurement parameter at different focal lengths

### 3.3 CMOS 探测器件间距对测量精度的影响

为便于仿真分析,令图 2 中的  $L_{c1} = L_{c2} = L/2$ ,这并不影响结果分析。CMOS 探测器件不同间距  $L$  情况下的相机几何参数测量精度结果如图 7 所示。

由图 7 可知,随着 CMOS 探测器件间距参数  $L$  的增大,  $\Delta f$  误差非线性递减;  $\delta\gamma$  误差同样也非线性递减。这意味着若想减小  $\delta\gamma$  误差,可通过适当增大 CMOS 探测器件间距参数  $L$  来实现,但实际使用中,  $\delta\gamma$  对图像处理的影响几乎可忽略不计,而  $\delta\alpha$ ,  $\delta\beta$  与  $L$  无关。因此, CMOS 探测器件的

间距参数  $L$  不影响视轴旋转角的测量精度,其设计值取决于 CCD 线阵方向设计值,目前受实际工程限制, CCD 线阵方向长度  $L$  取值一般在 600~1200 mm 之间。

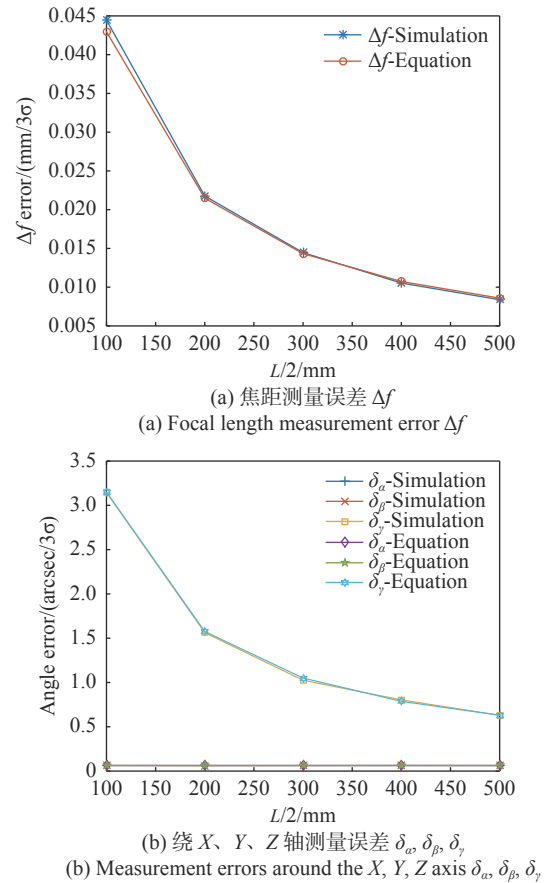


图 7 不同 CMOS 探测器件间距  $L$  时各测量参数误差

Fig. 7 The errors of each measurement parameter at different device spacing  $L$

### 3.4 双矢量法与简化方法残差分析

文献 [18]、文献 [19] 所介绍的简化方法为工程应用常用的方法,但其不适用于转角较大的应用场景。因此,本文主要考察双矢量法与简化方法在测量中的残差。为便于比较,将两种方法计算得到的结果均值做差,即:

$$\begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta\alpha \\ \Delta\beta \\ \Delta\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\Delta f_{\text{DVAD}} - \Delta f_{\text{Simple}}| \\ |\Delta\alpha_{\text{DVAD}} - \Delta\alpha_{\text{Simple}}| \\ |\Delta\beta_{\text{DVAD}} - \Delta\beta_{\text{Simple}}| \\ |\Delta\gamma_{\text{DVAD}} - \Delta\gamma_{\text{Simple}}| \end{bmatrix}, \quad (23)$$

其中:  $\Delta f_{\text{DVAD}}$ ,  $\Delta\alpha_{\text{DVAD}}$ ,  $\Delta\beta_{\text{DVAD}}$ ,  $\Delta\gamma_{\text{DVAD}}$  分别为双矢量定姿方法计算得到的相机内外参变化结果;  $\Delta f_{\text{Simple}}$ ,  $\Delta\alpha_{\text{Simple}}$ ,  $\Delta\beta_{\text{Simple}}$ ,  $\Delta\gamma_{\text{Simple}}$  分别为简化方法



计算得到的相机内外参变化结果。

计算方法与前文类似, 仿真给出了 CMOS 探测器在不同旋转角度和不同测量范围下, 两种方

法计算得到的相机内外参的残差。不失一般性, 令  $\theta_{m1} = -\theta_{m2}$ , 光点质心提取精度为 0.1 pixel。仿真结果如图 8 所示。

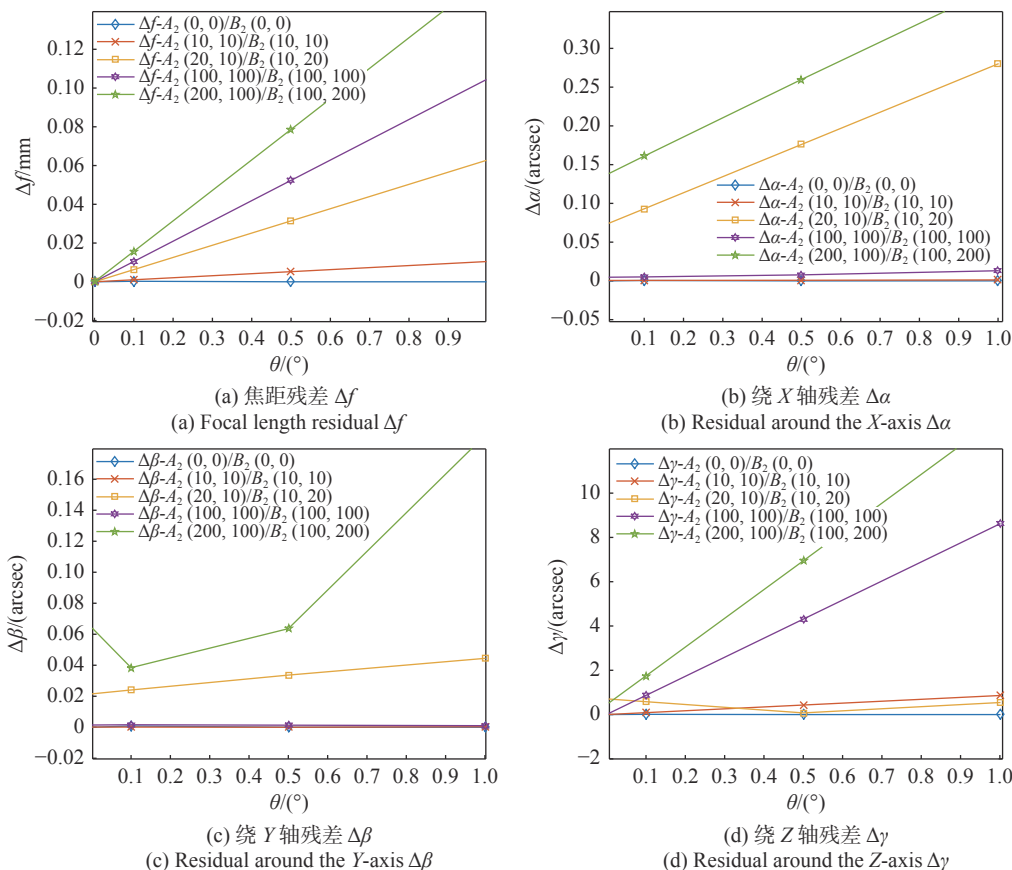


图 8 双矢量方法和简化方法计算得到的内外参残差

Fig. 8 Internal and external parameter residuals calculated by DVAD and simplified algorithm

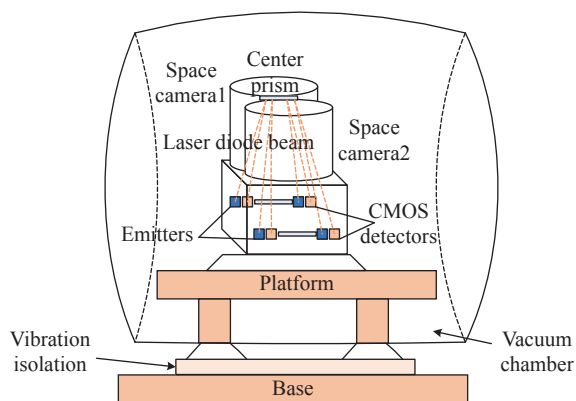
由图 8(a)可知, 随着探测范围的增大和 CMOS 探测器件倾斜角的增大(当前工艺水平可以确保倾斜角在 0.1°以内)。在此情况下, 两种方法对  $\Delta f$  的测量精度均优于 0.02 mm, 远小于相机半焦深(本文为 0.1 mm)。由图 8(b)可知, 当探测范围增大时,  $\Delta\alpha$  随之增大, 值得注意的是, 即便倾斜角为 0, 当测量范围达到 200 像素时, 两种方法得到的  $\Delta\alpha$  系统差也都超过了 0.1", 远大于测量随机误差。分析认为原因在于简化方法忽略了坐标轴转序引起的残余误差, 而当测量精度要求较高时, 这种残余误差的影响不可忽略。进一步的, 这也提示我们若想获得高精度的测量结果, 宜采用双矢量方法进行计算。 $\Delta\beta$  的变化趋势与  $\Delta\alpha$  基本一致, 原因也类似, 在此不赘述, 结果见图 8(c)。由图 8(d)可知,  $\Delta\gamma$  也随着测量范围的增大而增大,

当考虑工艺水平时, 两种方法的系统差小于 2", 精度足够满足工程使用。综上分析, 本文提出的双矢量方法更具有普适性。

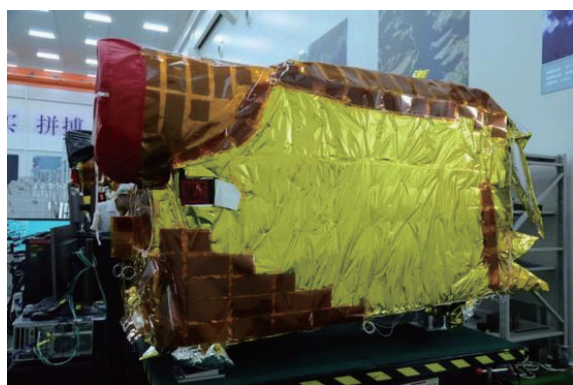
### 4 测量试验与结果

为了验证双矢量定姿方法在星上测量的可行性, 本文针对某两线阵测绘相机搭建了真空试验系统, 整个真空罐置于隔振平台上, 从而隔离了地面大气和振动的影响<sup>[20]</sup>, 测试系统示意图如图 9 所示。

试验模拟了两个工况, 一个是稳态工况, 外热流环境保持恒定, 此时用于系统内部自标定。第二个工况为瞬态工况, 该工况下模拟了太阳同步轨道空间外热流环境, 用于考察空间环境变化时



(a) 真空实验系统示意图  
(a) Schematic diagram of the vacuum test system



(b) 相机实物图  
(b) The picture of cameras

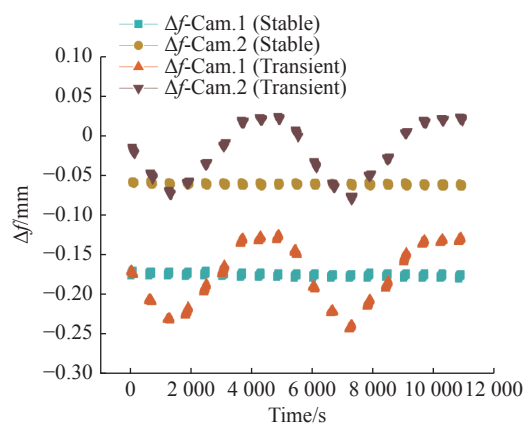
图 9 相机内外参数标定真空试验系统示意图及相机实物图

Fig. 9 Schematic diagram of vacuum test system for internal and external parameter calibration and the picture of cameras

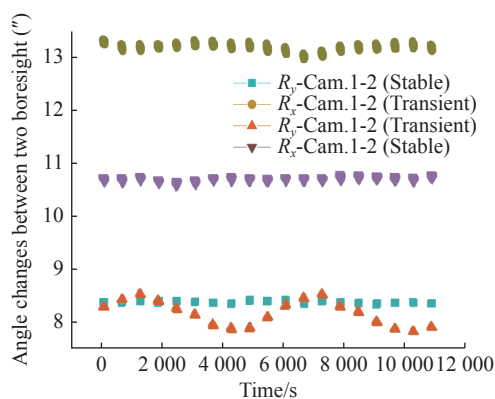
相机几何参数的变化情况。模拟试验依据宇航产品部组件热真空试验行业标准进行,真空试验系统的真空度不低于  $5 \times 10^{-5}$  Pa,真空环境温度在  $-65^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$  区间,连续可调。试验过程中,相机温控系统处于工作状态,稳态工况和瞬态工况下的相机工作温度分别为  $20^\circ\text{C} \pm 0.2^\circ\text{C}$  和  $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 。试验时,按照等间隔连续测量两个循环,累计 19 次测量,每次测试时间为 1 min 左右,结果如图 10 所示。

由图 10 可知,当相机处于稳态工况时,相机几何参数的测量结果为白噪声,验证了测量系统内部的稳定性。相机夹角变化在一轨内呈现明显的正弦函数特性,这与周期性外热流的加载规律基本一致。一轨内相机的夹角变化约为  $1''$  左右,而测量精度经计算达到  $0.1''$ ,表明通过搭建相机几何参数星上测量系统,相机间的夹角确定精度可达到  $0.1''$ ,相比于传统方法提高了一个数量级,

且两轨的数据一致性良好,验证了测试系统的稳定性。



(a) 焦距标定  $\Delta f$   
(a) Focal length calibration  $\Delta f$



(b) 绕 X、Y 轴角度标定  
(b) Angle calibration around X, Y axis

图 10 热真空环境下相机内外参在连续 2 个循环内的标定结果

Fig. 10 Internal and external parameter calibration results in a thermal vacuum in 2 circles

## 5 结 论

本文提出了一种基于双矢量定姿原理的相机内外参星上测量方法,它克服了简化方法在高精度标定中的不足。对新方法的误差进行了分析,给出了近似表达式,并通过仿真进行验证。此外,还对两种方法的残差进行了仿真,结果表明:简化方法仅在很小的测量范围内与 DVAD 方法一致性良好,探测范围扩大时,采用新方法才能得到更准确的参数标定结果。最后,搭建了试验验证系统,验证了采用该方法标定后,相机内外参标定精度可达到  $0.1''$ 。此外,还得到了两台相机间俯仰方向的夹角变化规律,可以指导后续测绘任务开

展。受地面试验条件限制,很难模拟重力释放导致的形变对本文测试方法的影响,在本文技术实际应用于在轨任务后,获取详尽的数据可进一步分析支撑理论分析。

#### 参考文献:

- [1] GLEYZES J P, MEYGRET A, FRATTER C, *et al.*. SPOT5: system overview and image ground segment[C]. *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477)*, IEEE, 2003, 1: 300-302.
- [2] SUBRAHMANYAM D, KURIAKOSE S A, KUMAR P, *et al.*. Design and development of the Cartosat payload for IRS P5 mission[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6405: 640517.
- [3] SHIMODA H. Overview of Japanese Earth observation programs[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8176: 81760E.
- [4] WANG J R, WANG R X, HU X, *et al.*. The on-orbit calibration of geometric parameters of the Tian-Hui 1 (TH-1) satellite[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 124: 144-151.
- [5] XIE J F, TANG H ZH, DOU X H, *et al.*. On-orbit calibration of domestic APS star tracker[C]. *2014 Third International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSIA)*, IEEE, 2014: 239-242.
- [6] XIE J F, WANG X. A robust autonomous star identification algorithm for ZY3 satellite[C]. *2012 First International Conference on Agro- Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, IEEE, 2012: 1-4.
- [7] WEI X G, ZHANG G J, FAN Q Y, *et al.*. Star sensor calibration based on integrated modelling with intrinsic and extrinsic parameters[J]. *Measurement*, 2014, 55: 117-125.
- [8] XIONG K, WEI X G, ZHANG G J, *et al.*. High-accuracy star sensor calibration based on intrinsic and extrinsic parameter decoupling[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(3): 034112.
- [9] 王建荣, 王任享, 胡莘. 三线阵影像外方位元素平滑方程自适应光束法平差[J]. *测绘学报*, 2018, 47(7): 968-972.  
WANG J R, WANG R X, HU X. Self-adaption bundle adjustment of three-line array image with smoothing equation of exterior orientation elements[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(7): 968-972. (in Chinese)
- [10] 王任享, 王建荣, 胡莘. 光学卫星摄影无控定位精度分析[J]. *测绘学报*, 2017, 46(3): 332-337.  
WANG R X, WANG J R, HU X. Analysis of location accuracy without ground control points of optical satellite imagery[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(3): 332-337. (in Chinese)
- [11] 黎明, 吴清文, 江帆, 等. 三线阵立体测绘相机热控系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6): 1367-1373.  
LI M, WU Q W, JIANG F, *et al.*. Design of thermal control system for three-linear array mapping cameras[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(6): 1367-1373. (in Chinese)
- [12] 高洪涛, 罗文波, 史海涛, 等. 资源三号卫星结构稳定性设计与实现[J]. *航天器工程*, 2016, 25(6): 18-24.  
GAO H T, LUO W B, SHI H T, *et al.*. Structural stability design and implementation of ZY-3 satellite[J]. *Spacecraft Engineering*, 2016, 25(6): 18-24. (in Chinese)
- [13] 高卫军, 孙立, 王长杰, 等. “资源三号”高分辨率立体测绘卫星三线阵相机设计与验证[J]. *航天返回与遥感*, 2012, 33(3): 25-34.  
GAO W J, SUN L, WANG CH J, *et al.*. Design and verification of three-line array camera for ZY-3 high resolution stereo mapping satellite[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(3): 25-34. (in Chinese)
- [14] BAE S, WEBB C, SCHUTZ B. GLAS PAD calibration using laser reference sensor data[C]. *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit*, 2004: 1-10.
- [15] EVANS T. Optical development system life cycle for the ICESat-2 ATLAS instrument[C]. *2014 IEEE Aerospace Conference*, 2014: 1-12.
- [16] 尤政, 王翀, 邢飞, 等. 空间遥感智能载荷及其关键技术[J]. *航天返回与遥感*, 2013, 34(1): 35-43.  
YOU ZH, WANG CH, XING F, *et al.*. Key technologies of smart optical payload in space remote sensing[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(1): 35-43. (in Chinese)
- [17] 来颖, 沈正祥, 王占山, 等. 基于菲涅尔双棱镜的在轨小角度测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(3): 0317002.  
LAI Y, SHEN ZH X, WANG ZH SH, *et al.*. Measurement method of in-orbit small angle based on Fresnel biprism[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0317002. (in Chinese)
- [18] 王慧, 刘薇, 于建冬, 等. 航天光学相机几何参数星上监测技术[J]. *光子学报*, 2018, 47(10): 1012001.  
WANG H, LIU W, YU J D, *et al.*. Geometric parameters monitoring technology for space optical camera[J]. *Acta*

- Photonica Sinica*, 2018, 47(10): 1012001. (in Chinese)
- [19] 高凌雁, 王伟之. 基于全光学路径的遥感相机视轴监测方法研究[J]. 光学技术, 2019, 45(1): 44-48.  
GAO L Y, WANG W ZH. Research on space camera bore-sight monitor by a full-optical route[J]. *Optical Technique*, 2019, 45(1): 44-48. (in Chinese)
- [20] 温中凯, 张庆君, 李爽, 等. 空间光电跟瞄系统多光轴平行性标校研究[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 625-633.  
WEN ZH K, ZHANG Q J, LI SH, *et al.*. Multi-optical axis parallelism calibration of space photoelectric tracking and aiming system[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 625-633. (in Chinese)

作者简介:



翟国芳(1984—), 男, 山西晋中人, 硕士, 高级工程师, 2011年于北京航空航天大学获得硕士学位, 主要从事空间光学仪器方面的研究。E-mail: zhaigf044@126.com