

## 超大范围视觉测量双相机联合标定和定向方法

王智<sup>1,2</sup>, 董明利<sup>1,2\*</sup>, 孙鹏<sup>1,2</sup>, 刘其林<sup>1,2</sup>, 燕必希<sup>1,2</sup>, 王君<sup>1,2</sup><sup>1</sup>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;<sup>2</sup>北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100192

**摘要** 针对超大范围相机标定和定向的难题,提出了一种双相机联合标定与定向的方法。采用无人机携带长度尺构建大型空间虚拟标定场的方式,两台相机同时采集长度尺两端标志点图像;并利用长度尺空间长度作为约束,建立自标定光束平差模型,解算两相机各自的内方位参数和畸变系数及相机之间的相对方位参数;最后利用重建长度尺的长度进行误差和精度评估。在 40 m×10 m×14 m 的超大范围下,所提方法重建长度尺时的平均长度误差为 0.193 mm,均方根误差为 2.316 mm,相对精度优于 1/20000。实验结果表明,所提方法可在超大范围下方便准确地标定双相机系统的全部参数,具有操作简便、成本低、精度高的优点,具有很强的适用性,为超大范围大尺寸结构视觉测量提供了方法参考和数据依据。

**关键词** 视觉测量; 超大范围; 无人机; 基准长度尺; 光束平差; 相对定向

中图分类号 TH721; TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1415019

## Joint Calibration and Orientation Method of Dual-Camera System for Wide-Range Visual Measurement

Wang Zhi<sup>1,2</sup>, Dong Mingli<sup>1,2\*</sup>, Sun Peng<sup>1,2</sup>, Liu Qilin<sup>1,2</sup>, Yan Bixi<sup>1,2</sup>, Wang Jun<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Beijing Key Laboratory of Measurement and Control of Mechanical and Electrical System, Ministry of Education, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;<sup>2</sup>School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China

**Abstract** Aiming at the issues of camera calibration and orientation in large spatial volumes, a novel joint calibration and orientation method for dual cameras is proposed. In this method, an unmanned aerial vehicle carries a scale ruler to create a spatial virtual calibration field, while two cameras simultaneously take photos of marker points at both ends of the scale ruler. Then, the spatial length of the scale ruler is used as constraint; the self-calibrated bundle adjustment model is developed to calculate the internal azimuth parameters and distortion coefficients of the two cameras and the external azimuth parameters between both cameras. The length of the rebuilt scale ruler is then used to assess the error and accuracy. To validate the proposed method, calibration tests were performed in an outdoor environment with the spatial dimensions of 40 m×10 m×14 m. The results demonstrate that after calibrating the dual cameras using the proposed method, the average length error of the proposed method for reconstructing the scale ruler is 0.193 mm, the root mean square error is 2.316 mm, and the relative accuracy is better than 1/20000. The proposed method can easily and correctly calibrate all the dual-camera system's parameters in a large measurement volume. Furthermore, the proposed method is simple, cost-effective, highly accurate, and has a broad applicability. Moreover, it serves as a reference method and database for the visual assessment of extremely large scale objects.

**Key words** visual measurement; large spatial volume; unmanned aerial vehicle; reference length ruler; bundle adjustment; relative orientation

收稿日期: 2022-04-22; 修回日期: 2022-05-16; 录用日期: 2022-05-19

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)

通信作者: \*dongml@bistu.edu.cn

## 1 引言

近年来,随着航空航天、大型船舶及新能源工业等领域的快速发展,出现了许多超大视场条件下高精度测量的需求,如火箭箭体结构变形测量、船体变形测量及风电叶片形变测量等<sup>[1-7]</sup>。视觉测量具有非接触、多点同时测量、测量视场广、精度高等优点,因此成为大尺寸测量领域的研究热点<sup>[8-10]</sup>。视觉测量技术是以一台或多台相机为传感器,在不同位置和角度对被测物表面的目标成像,通过空间光线交会的原理进行无接触测量,获取被测物体的三维空间信息的方法<sup>[11-13]</sup>。相机标定和定向直接影响着视觉测量系统的测量精度。为了实现高精度的相机标定和定向,一个能够覆盖被测物体的标定场或标定物是至关重要的<sup>[14-15]</sup>。伴随着被测物体体积增加,标定物的加工制作越来越复杂,故在超大范围下精确标定和定向相机是视觉测量的关键和难点。

传统的标定是通过拍摄高精度标定物、标定墙或者标定场来实现的,核心是通过图像与标定物(或标定场)上坐标已知的对应点,利用相机成像模型求解内外参数<sup>[16]</sup>。基于传统相机标定方法,国内外研究人员进行了深入的研究<sup>[17-26]</sup>。文献[27]使用两台相机对飞机碰撞过程中机身结构的载荷、应变、加速度和位移进行测量。相机系统借助尺寸为 14 m×9 m 的网格标定墙进行标定,相机标定精度取决于网格标定墙的精度。由于被测物尺寸大,标定墙的搭建成本高且不稳定,因此该视觉测量系统的精度难以保证。文献[28-29]对直径为 80 m 的大型风电叶片运行轨迹和振动特性进行测量。在停车状态下,系统通过对叶片上布设的回光反射目标点进行多方位成像标定各相机的内、外方位参数和畸变系数。由于无法保证叶片的稳定,标定结果存在误差,在 80 m 的范围下测量精度仅 50 mm (1/1600)。文献[30-32]使用动态视觉测量技术进行大型飞行器的动态测试,采用传统的点阵列自标定方法,从不同位置和角度拍摄点阵列图像,利用光束平差解算相机内外参数。该方法在地面建立了由编码点组成的、覆盖被测旋翼运动空间的稳定点阵列,升降车带动两台相机从不同角度拍摄地面上的点阵列。这种标定方法的标定过程极为复杂,耗时非常长,同时由于缺少高精度的基准空间坐标或者空间长度,标定结果存在较大的系统误差,并且缺少有效的精度评价手段。文献[33]在 24.0 m×36.0 m 的范围下,利用视觉测量技术对火星探测器减速伞的工作状态进行测量和评价。该方法通过建立一些空间坐标已知的控制点阵列解算相机的内外参数。大量控制点布设于起重机、风洞墙壁和风洞顶部,其空间坐标由静态摄影测量仪器测定。该方法由于控制点的布置、测量非常耗时及空间分布受限,导致标定结果和测量结果的精度很低。文献[34-35]为测量飞机地面试验中的运动参数,将多

束激光投射到幕布上,以拟合特征平面,进而解算特征平面的法向量,通过法向量和世界坐标系中空间的交点值求解相机的外参数。在 8 m×4 m×4 m 的测量范围内,该方法对姿态参数的测量误差小于 0.14°,对位置参数的测量误差小于 2 mm。该方法的测量过程较为复杂且受激光器的约束,不适用于超大范围测量。

在实际应用中,建造与被测空间大小相匹配的标定物是极为困难的,于是有学者提出了长度尺标定方法。相比于高精度标定物,长度尺具有易于制作、成本低、环境适应性强等优势<sup>[36-39]</sup>。文献[37]通过结合长度尺和红外发光二极管标定相机外方位参数,测量最大误差为 0.18 mm,克服了传统相机标定过程繁琐的缺点,但需要采用光学探针确定被测点的坐标且红外发光二极管严重受被测物体体积及环境光源等影响。文献[39]提出了基于移动基准长度尺的多相机系统全参数同时标定的方法,通过大量仿真与实验,在 12.0 m×8.0 m×4.0 m 的室内测量空间内,该方法的相对精密度达 1/25000。该方法需人手持基准长度尺完成移动和旋转操作,不适用于室外场景。目前尚未有学者在室外几十米测量范围内对长度尺标定方法的可行性和精度进行论证和评估。

针对上述情况,本文提出了一种超大范围双相机系统的高精度联合标定和定向方法,该方法仅使用一根长度尺和一架无人机构建标定场即可完成标定。与以往方法不同的是:利用长度尺构建大型空间虚拟标定场,取代了传统标定场。提出了一种利用空间长度作为约束的双相机系统联合平差模型,该模型能够同时标定相机的内、外方位参数和畸变系数,解决了传统方法视场小、成本高、制作难和布置繁琐等问题,具有更强的灵活性。

## 2 数学模型及方法

长度尺是一种碳纤维尺,两端固定有回光反射点。两个回光反射点之间的长度由高精度仪器(如激光跟踪仪)测量。所提方法采用无人机携带长度尺构建大型空间虚拟标定场的方式标定双相机系统。首先建立了基于相对外方位参数的相机成像模型,采用五点法进行相对外方位参数初值解算,再利用空间距离约束进行相机内外参数最优化平差解算,最后通过重建长度尺的长度进行误差和精度评估。所提方法的流程如图 1 所示。

### 2.1 基于相对外方位参数的相机系统成像模型

通过相机之间的相对位姿对外方位参数进行建模,将世界坐标系建立在左相机的相机坐标系上,使左相机外方位参数的角度和平移量均为零值。这样双相机系统的待求外方位参数将减少为 6 个,消除了外方位参数同空间坐标之间的相关性,保证标定结果的可靠性和精度。基于相对外方位参数的双相机测量系统成像模型如图 2 所示。

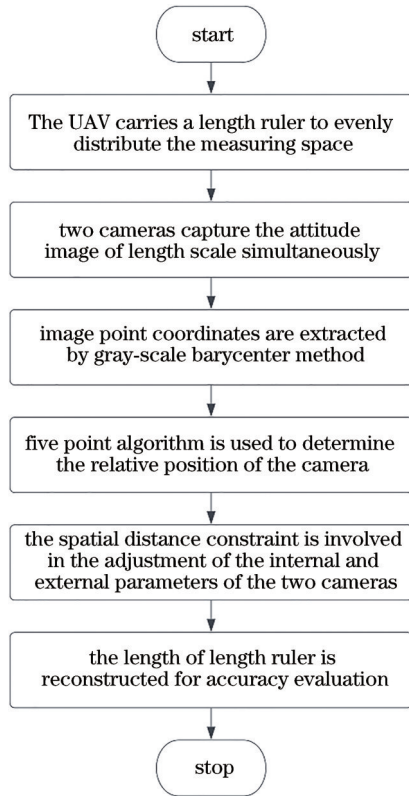


图 1 所提方法的流程

Fig. 1 Flow chart of the proposed method

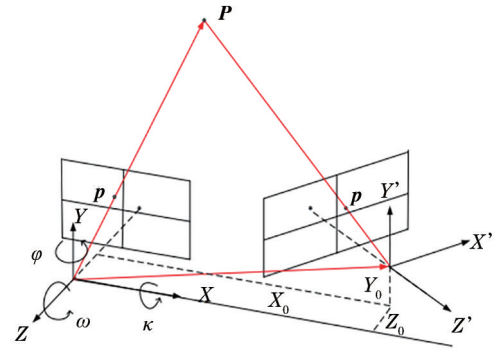


图 2 基于相对外方位参数的双相机测量系统成像模型

Fig. 2 Diagram of dual-camera measurement system based on relative exterior parameters

图 2 中  $O-XYZ$  是左相机坐标系 (即世界坐标系), 其外方位参数为  $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ;  $O'-X'Y'Z'$  表示右相机坐标系, 其外方位参数为  $[X_0 \ Y_0 \ Z_0 \ \varphi \ \omega \ \kappa]$ ,  $X_0, Y_0, Z_0$  分别为右相机相对于左相机沿  $X, Y, Z$  坐标轴方向的平移量,  $\varphi, \omega, \kappa$  分别表示右相机相对左相机绕  $Y, X, Z$  轴的旋转变角度量。

对于一空间点  $P$ , 它在左右相机图像上的像面点  $p$  的坐标分别为  $[x_l \ y_l]^T$  和  $[x_r \ y_r]^T$ , 其数学模型<sup>[40]</sup>为共线方程:

$$\begin{cases} x_l = -c_l \frac{X}{Z} + x_{pl} - \Delta x_l \\ y_l = -c_l \frac{Y}{Z} + y_{pl} - \Delta y_l \\ x_r = -c_r \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + x_{pr} - \Delta x_r \\ y_r = -c_r \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + y_{pr} - \Delta y_r \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $c_l$  和  $c_r$  分别为左右相机主距;  $[x_{pl} \ y_{pl}]^T$  和  $[x_{pr} \ y_{pr}]^T$  是主点分别在左右像面的位置;  $r_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$  是旋转矩阵中的元素, 由三个方位角确定;  $[\Delta x_l \ \Delta y_l]^T$  和  $[\Delta x_r \ \Delta y_r]^T$  是左右相机像点处的畸变变量。畸变模型包含了三个径向畸变参数  $K_1, K_2, K_3$  以及两个偏心畸变参数  $P_1$  和  $P_2$ 。

### 2.2 五点法相对外方位参数初值解算

采用五点法对相机进行初步相对定向。五点法仅使用五对像面匹配点的坐标求解图像之间的本质矩阵, 通过分解本质矩阵获得两个相机之间的旋转矩阵和平移向量<sup>[41-43]</sup>。但仅使用五点法解得的本质矩阵误差大, 而且大部分解会远离真实值, 因此进一步使用根优化算法<sup>[44]</sup>, 利用所有像面点坐标优化本质矩阵。最后利用相机内参数和求解得到的外方位参数重建空间目标点之间的距离, 选择重建长度误差最小的外方位

参数作为相对外方位参数的最终初值。

### 2.3 空间距离约束的双相机内外参数联合平差方法

在本质矩阵求解过程中, 没有考虑主点位置和畸变参数, 因此得到的相对外方位参数是不精确的, 需要通过光线束平差过程进一步解算并优化所有参数, 提高相机的标定和定向精度。对于一空间点  $i$ , 其左右的共线方程式 (1) 简化表达为

$$\begin{cases} \mathbf{xy}_{li} = f(\mathbf{I}_l \ \mathbf{0} \ \mathbf{X}_i) \\ \mathbf{xy}_{ri} = f(\mathbf{I}_r \ \mathbf{E}_r \ \mathbf{X}_i) \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{xy}$  是像面点坐标向量;  $\mathbf{I}$  是相机参数向量, 包括了主距、主点位置和各项畸变参数;  $\mathbf{E}_r$  是右相机相对于左相机的外方位参数向量, 包括了三个角度和三个平移量;  $\mathbf{X}_i$  是一个空间点的三维坐标向量。对于任意像面点  $i$ , 共线方程线性近似为



$$\begin{cases} \mathbf{v}_{li} + \mathbf{l}_{li} = \mathbf{A}_{li} \boldsymbol{\delta}_l + \mathbf{B}_{li} \dot{\boldsymbol{\delta}} \\ \mathbf{v}_{ri} + \mathbf{l}_{ri} = \mathbf{A}_{ri} \boldsymbol{\delta}_r + \mathbf{B}_{ri} \dot{\boldsymbol{\delta}} \end{cases}, \quad (3)$$

式中： $\mathbf{v}_l$ 和 $\mathbf{v}_r$ 是左右图像点的残余误差； $\mathbf{l}_l$ 和 $\mathbf{l}_r$ 是简化的观测向量，代表像面目标点的测量坐标与利用各参数初值求解得到的坐标之间的差别； $\mathbf{A}$ 表示共线方程 $f(\cdot)$ 对相机的内方位参数、畸变系数和外方位参数求导的雅可比矩阵； $\mathbf{B}$ 表示共线方程 $f(\cdot)$ 对空间点坐标求导的雅可比矩阵； $\boldsymbol{\delta}_l$ 和 $\boldsymbol{\delta}_r$ 分别表示左右相机参数的改正量； $\dot{\boldsymbol{\delta}}$ 为空间点坐标的改正量。

若没有其他约束，双相机系统不具备自标定能力。所提方法将长度尺长度引入光束平差过程，作为空间约束消除未知参数之间的相关性，使得平差过程具有内方位参数自标定能力。 $n$ 个姿态的长度尺能够提供

$2n$ 个空间点，按照式(3)在左右相机的像面上成像。同时，还提供了空间中 $n$ 个点-点距离作为约束条件，其中第 $m$ 个距离描述为

$$s_m = \sqrt{(X_{m1} - X_{m2})^2 + (Y_{m1} - Y_{m2})^2 + (Z_{m1} - Z_{m2})^2}, \quad (4)$$

式中：下标 $m1$ 和 $m2$ 表示第 $m$ 姿态下长度尺上的两个端点。为了使非线性表达式(4)作为约束条件参与光束平差计算过程，需要将其线性化，其线性改正方程为

$$\mathbf{v}_{S_m} + \mathbf{l}_{S_m} = \mathbf{C}_{m1} \dot{\boldsymbol{\delta}}_{m1} + \mathbf{C}_{m2} \dot{\boldsymbol{\delta}}_{m2}, \quad (5)$$

式中： $\mathbf{C}$ 表示距离方程式(4)对两个目标端点空间坐标求导的雅可比矩阵； $\dot{\boldsymbol{\delta}}_m$ 为目标点坐标的改正量。

双相机系统对 $n$ 个长度尺姿态成像，包含像点和空间点-点距离约束的扩展误差方程为

$$\mathbf{v} + \mathbf{l} = \mathbf{A} \bar{\boldsymbol{\delta}} \Rightarrow \begin{bmatrix} v_{1,11} \\ v_{1,12} \\ \vdots \\ v_{1,n1} \\ v_{1,n2} \\ v_{2,11} \\ v_{2,12} \\ \vdots \\ v_{2,n1} \\ v_{2,n2} \\ v_{S1} \\ \vdots \\ v_{Sn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{1,11} \\ l_{1,12} \\ \vdots \\ l_{1,n1} \\ l_{1,n2} \\ l_{2,11} \\ l_{2,12} \\ \vdots \\ l_{2,n1} \\ l_{2,n2} \\ l_{S1} \\ \vdots \\ l_{Sn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,11} & 0 & B_{1,11} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ A_{1,12} & 0 & 0 & B_{1,12} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{1,n1} & 0 & 0 & 0 & \dots & B_{1,n1} & 0 \\ A_{1,n2} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & B_{1,n2} \\ 0 & A_{2,11} & B_{2,11} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & A_{2,12} & 0 & B_{2,12} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & A_{2,n1} & 0 & 0 & \dots & B_{2,n1} & 0 \\ 0 & A_{2,n2} & 0 & 0 & \dots & 0 & B_{2,n2} \\ 0 & 0 & C_{11} & C_{12} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & C_{n1} & C_{n2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_{11} \\ \delta_{12} \\ \vdots \\ \delta_{n1} \\ \delta_{n2} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中：下标 $(i_c, jk)$ 表示第 $i_c(i_c = 1, 2)$ 台相机上第 $j(j = 1, 2, \dots, n)$ 个姿态的长度尺上第 $k(k = 1, 2)$ 个端点，例如 $v_{1,11}$ 代表着第1台相机第1个姿态的长度尺上第1个端点的成像点误差。误差方程对应的法方程为

$$\begin{cases} (\mathbf{A}^T \mathbf{P}' \mathbf{A}) \bar{\boldsymbol{\delta}} = \mathbf{A}^T \mathbf{P}' \mathbf{l} \Rightarrow \mathbf{N} \bar{\boldsymbol{\delta}} = \mathbf{W} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{12} \\ \mathbf{N}_{21} & \mathbf{N}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\delta} \\ \dot{\boldsymbol{\delta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{W}_2 \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (7)$$

式中： $\mathbf{P}'$ 是一个对角矩阵，表示图像点和空间距离观测数据权重； $\mathbf{N}$ 为 $(22 + 6n) \times (22 + 6n)$ 的系数矩阵，由于系数矩阵运算量庞大，可以利用误差方程的稀疏性，通过分块矩阵运算解，得到式(7)中的 $\mathbf{N}$ 和 $\mathbf{W}$ 。于是相机参数和长度尺两端点坐标的改正量为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\delta} = (\mathbf{N}_{11} - \mathbf{N}_{12} \mathbf{N}_{22}^{-1} \mathbf{N}_{21})^{-1} (\mathbf{W}_1 - \mathbf{N}_{12} \mathbf{N}_{22}^{-1} \mathbf{W}_2) \\ \dot{\boldsymbol{\delta}} = \mathbf{N}_{22}^{-1} (\mathbf{W}_2 - \mathbf{N}_{21} \boldsymbol{\delta}) \end{cases}. \quad (8)$$

通过迭代的方式不断修正相机参数和长度尺两端目标点坐标的估计值，直至光束平差过程收敛。

### 2.4 误差与精度评估

标定过程结束后，所提方法可以同时提供内部精度和外部精度评价。标定结果的内精度通过所有未知参数的方差-协方差矩阵进行描述<sup>[45]</sup>：

$$\mathbf{C} = \mathbf{S}^2 \mathbf{N}^{-1}, \quad (9)$$

$\mathbf{S}$ 是后验单位权中误差，表达式为

$$S = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P}' \mathbf{v}}{8n - (22 + 6n) + n}}, \quad (10)$$

式中： $\mathbf{v}$ 为改正数向量，对于一个双相机测量系统， $\mathbf{v}$ 的维度为 $8n$ 。

自标定光束平差完成后，可以使用标定结果，通过三角测量计算所有姿态长度尺上反光球的三维空间坐标，并重建各姿态下的长度尺长度。利用长度尺长度对标定结果进行比例缩放和外部精度评价。

全局缩放因子 $K_s$ 的计算公式为

$$K_s = \frac{L}{\bar{L}}, \quad (11)$$

式中： $L$ 是长度尺的标称长度； $\bar{L}$ 是所有重建长度的平均值。缩放后各重建长度的表达式为

$$L'_j = K_s L_{j0} \quad (12)$$

进一步得到长度测量绝对误差的均方根值为

$$E_{\text{RMS}}(L'_j) = \frac{L}{L} E_{\text{RMS}}(L_j), \quad (13)$$

式中:  $E_{\text{RMS}}(L_j)$  表示每个姿态长度尺长度测量结果  $L_j$  的均方根误差。

在视觉测量领域, 测量误差与被测空间体积有关, 一般采用相对精密度评价标定结果。所提方法利用长度测量结果的均方根误差与测量空间体对角线长度  $H$  的比值进行评价:

$$r(L'_j) = \frac{E_{\text{RMS}}(L'_j)}{H}. \quad (14)$$

### 3 实验和结果

所提方法的视觉系统由双相机和计算机组成。两台工业相机 (GE4900, AVT) 的分辨率均为  $4872 \times 3248$  像素, 像元尺寸均为  $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ , 并搭配两个定焦镜头 (Nikkor 20 mm F/2.8D)。计算机通过触发盒实现两台相机的同步采集和闪光灯 (YN 560III) 同步照明。

标定设备由无人机和长度尺构成。无人机选用 PIX 飞控四旋翼无人机, 载重 3 kg。为保证摄影测量精度, 回光反射球在像面上的最小成像面积为  $3 \times 3$  像素, 实验中使用一根特殊设计的碳纤维长度尺, 其两端装配有直径为 50 mm 的球形回光反射目标点, 利用激光跟踪仪测定两回光反射球中心距为 983.197 mm。在一个 40 m (纵向长度)  $\times$  10 m (横向宽度)  $\times$  14 m (高度) 的测量空间内开展标定实验, 以验证所提方法的有效性和标定精度。实验系统现场搭建如图 3 所示。



图 3 系统现场搭建图

Fig. 3 System site construction drawing

在实验系统准备就绪后, 操控无人机携带长度尺飞至测量空间, 为了达到精确标定相机内方位参数和畸变系数的目的, 无人机在测量空间中尽可能均匀分布, 在每个位置上旋转长度尺至不同方向, 以增加像面点观测数据量, 也为光束平差提供多方向的长度约束, 实验示意图如图 4 所示。

在无人机悬停过程中, 两相机同步采集每个姿态下长度尺上的回光反射点图像。当完成长度尺的移动和旋转过程, 回光反射球建立起覆盖测量空间的大型虚拟标定场。完成拍摄后进行图像处理, 并解算相机的内方位参数、畸变系数和相对外方位参数。根据现场效果对相机站位进行调整, 拍摄了共 80 张长度尺图片, 左右相机实拍图片如图 5 所示。在纵深距离为 40 m 时, 回光反射球在图像上的最小成像面积为  $4 \times 4$  像素, 满足大场景户外目标点提取的精度要求。选取 64 张图片用作标定与定向, 16 张非标定位置的图片用作精度评价。

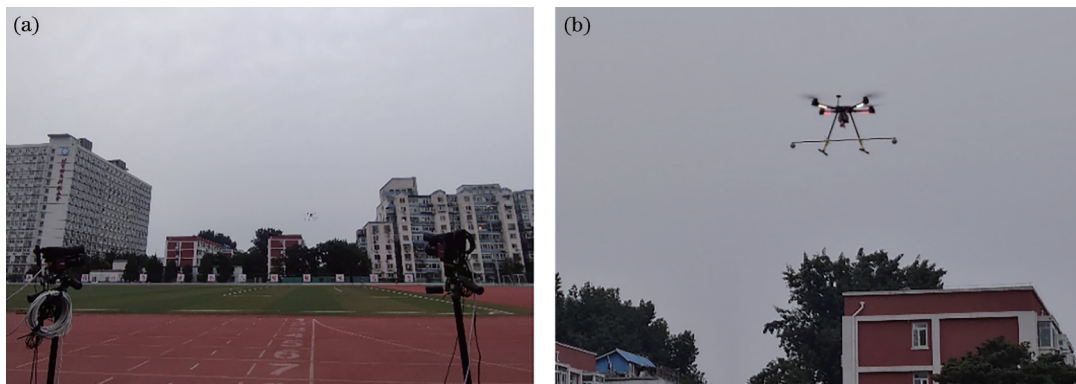


图 4 实验示意图。(a) 实验场地; (b) 无人机姿态

Fig. 4 Diagram of experiment. (a) Experimental site; (b) UAV posture

根据式 (8) 计算两相机的内方位参数、畸变系数和相机之间的相对外方位参数, 再根据式 (9) 计算各参数的后验标准误差。表 1 列出了光束平差优化后的内方位参数及畸变系数的标定结果及后验标准差, 表 2 列出了相对外方位参数的标定结果。

根据上述数据可以发现, 所提方法成功标定了各

相机的内外参数。所提方法通过重建虚拟长度阵列验证相机标定精度, 图 6 为长度尺长度重建图, 显示了在  $40 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 14 \text{ m}$  范围内两台相机与长度尺之间的相对位置, 蓝点处代表相机位置及其坐标轴方向, 渐变线代表长度尺在测量空间的位置, 也表示该空间距离的误差具体分布。

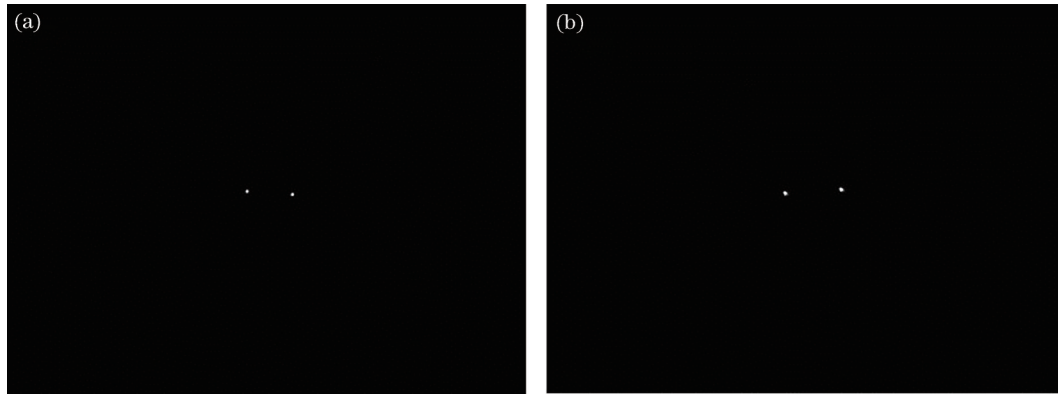


图 5 左右相机实拍图片。(a)左相机;(b)右相机

Fig. 5 Pictures taken by left and right cameras. (a) Left camera; (b) right camera

表 1 光束平差后内方位参数和畸变系数的标定结果

Table 1 Calibration results of interior parameters and distortion coefficient after bundle adjustment

Parameter	Left camera		Right camera		
	Calibration result	Standard deviation	Calibration result	Standard deviation	
Interior parameter	$c$ /mm	20.985	$3.361 \times 10^{-4}$	21.126	$3.761 \times 10^{-4}$
	$x_0$ /mm	-0.115	$5.857 \times 10^{-4}$	-0.147	$5.780 \times 10^{-4}$
	$y_0$ /mm	0.269	$8.491 \times 10^{-4}$	0.395	$8.023 \times 10^{-4}$
Distortion coefficient	$K_1$ /mm <sup>-2</sup>	$1.652 \times 10^{-4}$	$4.140 \times 10^{-7}$	$1.391 \times 10^{-4}$	$5.166 \times 10^{-7}$
	$K_2$ /mm <sup>-4</sup>	$-8.164 \times 10^{-7}$	$3.705 \times 10^{-9}$	$-3.577 \times 10^{-7}$	$3.739 \times 10^{-9}$
	$K_3$ /mm <sup>-6</sup>	$3.539 \times 10^{-9}$	$2.513 \times 10^{-10}$	$-1.743 \times 10^{-9}$	$1.471 \times 10^{-10}$
	$P_1$ /mm <sup>-1</sup>	$-9.387 \times 10^{-6}$	$4.431 \times 10^{-6}$	$2.838 \times 10^{-6}$	$1.557 \times 10^{-6}$
	$P_2$ /mm <sup>-1</sup>	$6.263 \times 10^{-6}$	$1.721 \times 10^{-6}$	$2.158 \times 10^{-6}$	$1.156 \times 10^{-6}$

表 2 两台相机相对外方位参数的标定结果

Table 2 Calibration results of relative exterior parameters of two cameras

Relative exterior parameter	Bundle adjustment determination	Standard deviation
$X_0$ /mm	-10337.656	0.635
$Y_0$ /mm	-0.015	0.085
$Z_0$ /mm	-703.309	0.521
$\varphi$ /( $^\circ$ )	-25.927	$3.732 \times 10^{-5}$
$\omega$ /( $^\circ$ )	$8.972 \times 10^{-3}$	$1.081 \times 10^{-4}$
$\kappa$ /( $^\circ$ )	$-8.552 \times 10^{-3}$	$3.586 \times 10^{-5}$

表 3 展示了经过三维重建得到的长度误差统计结果。重建长度的平均值为 983.391 mm, 平均误差为 0.193 mm, 均方根误差为 2.316 mm, 相对精密度优于 1/20000。图 7 为长度尺重建误差的直方图, 可见长度重建误差呈现明显的正态分布, 表明标定结果没有系统误差。表 4 展示了 16 张非标定位置的左右图片(共 8 个姿态)重建空间距离及误差, 非标定位置的平均重建空间距离为 983.039 mm, 平均误差为 0.158 mm, 说明所提方法在大视场的场景下有较高的标定精度。

从实验结果与精度分析中可以发现, 所提方法具有很高的可靠性和准确度, 可以方便、精确地在超大范围下同时标定双相机系统的全部参数。

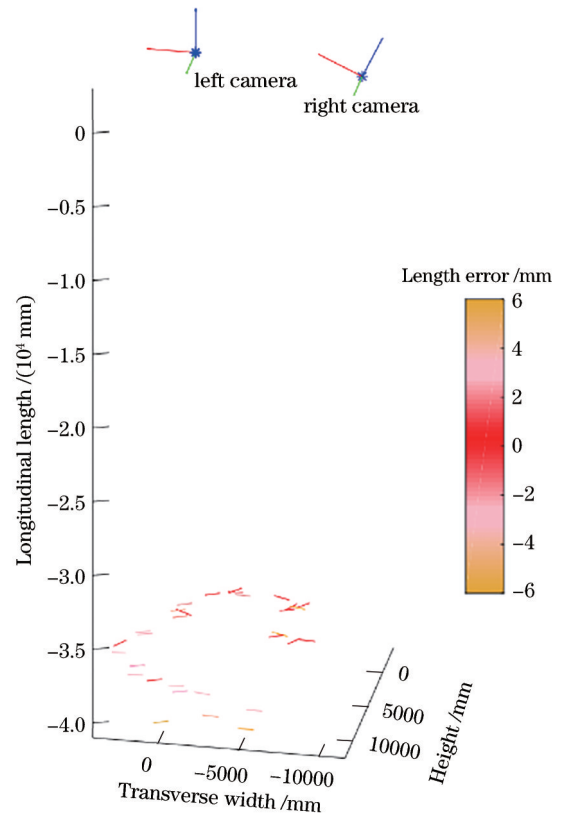


图 6 长度尺长度重建图

Fig. 6 Reconstruction of scale ruler in 3D space



表 3 重建长度的平均误差、均方根误差和最大误差  
Table 3 Average error, root mean square error, and maximum error of the reconstructed length

Mean error /mm	RMSE /mm	Maximum error /mm
0.193	2.316	5.483

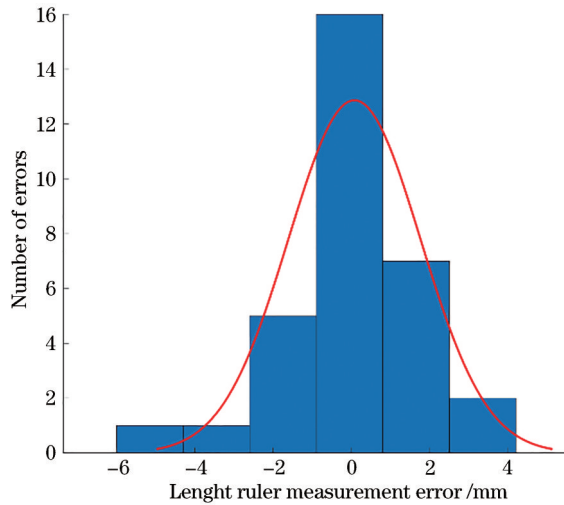


图 7 长度尺重建误差的直方图

Fig. 7 Histogram of reconstruction error of scale ruler

表 4 重建非标定位置空间距离及误差

Table 4 Reconstructed space distance and error of uncalibrated position

Serial number	Reconstructed spatial distance /mm	Error /mm
1	983.670	0.473
2	983.159	-0.038
3	983.249	0.052
4	983.475	0.278
5	983.216	0.019
6	982.168	-1.029
7	983.165	-0.032
8	982.207	-0.99

## 4 结 论

提出了一种超大范围下双相机联合标定与定向的方法。该方法首先借助携带长度尺的无人机建立了由回光反射点组成的、覆盖被测空间的大型虚拟标定场。其次建立基于长度尺距离约束的大型光束平差方程模型,对两相机各自的内外参数及长度尺两端回光反射点的空间坐标进行最优化解算,实现双相机视觉测量系统的现场联合标定与定向。最后利用重建虚拟长度阵列进行现场精度评估。该方法在 40 m(纵向长度)×10 m(横向宽度)×14 m(高度)的超大范围下可以精确标定双相机系统的全部参数,证明所提方法具有可行性,为超大视场下视觉测量系统的标定提供参考。所提方法的相对精密度能达 1/20000,在视场范

围增大的同时能够保证精度,为超大视场下工件测量提供理论支撑。所提方法适用于超大范围的场景,操作方便、标定快捷、标定精度高,克服了传统标定墙制作成本高、耗时长和标定场布置繁琐等缺陷。所提方法也可以通过改变回光反射球的大小,扩展应用于不同尺寸的测量任务,克服视场的限制。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Z, Zhou Y, Liu H Y, et al. Visual measurement of water level under complex illumination conditions[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4141.
- [2] Yang J H, Liu W, Liu Y, et al. Calibration of binocular vision measurement system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 300-338.
- [3] 王诚鑫, 王巍, 周星宇, 等. 一种基于激光跟踪仪与关节臂测量机的大尺寸工件组合测量方法[J]. *应用激光*, 2020, 40(3): 503-506.  
Wang C X, Wang W, Zhou X Y, et al. Combined measuring method for large components based on laser tracker and articulated arm measuring machine[J]. *Applied Laser*, 2020, 40(3): 503-506.
- [4] 章平, 常晏宁, 王皓. 基于全站仪的大尺寸测量场数据融合技术[J]. *机械设计与研究*, 2019, 35(3): 140-144, 149.  
Zhang P, Chang Y N, Wang H. Research on data fusion technology in large scale measurement field based on total station[J]. *Machine Design & Research*, 2019, 35(3): 140-144, 149.
- [5] Liu G H, Liu X Y, Feng Q Y. 3D shape measurement of objects with high dynamic range of surface reflectivity[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(23): 4557-4565.
- [6] Zhao P, Wang N H. Precise perimeter measurement for 3D object with a binocular stereo vision measurement system[J]. *Optik*, 2010, 121(10): 953-957.
- [7] 吴荣, 刘依, 周建民. 数字图像相关用于测量风电叶片全场变形[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(11): 258-264.  
Wu R, Liu Y, Zhou J M. Full-field deformation measurement of wind turbine blades using digital image correlation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(11): 258-264.
- [8] 杨雪荣, 张湘伟, 成思源, 等. 视觉测量中的相机标定方法进展研究[J]. *机械设计与制造*, 2009(3): 259-261.  
Yang X R, Zhang X W, Cheng S Y, et al. Progress on camera calibration methods in visual measurement[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009(3): 259-261.
- [9] 黄鹏程, 江剑宇, 杨波. 双目立体视觉的研究现状及进展[J]. *光学仪器*, 2018, 40(4): 81-86.  
Huang P C, Jiang J Y, Yang B. Research status and progress of binocular stereo vision[J]. *Optical Instruments*, 2018, 40(4): 81-86.
- [10] 王子昂, 黄富瑜, 刘秉琦, 等. 大视场摄像机标定方法研究进展[J]. *半导体光电*, 2019, 40(3): 303-308.  
Wang Z A, Huang F Y, Liu B Q, et al. Research progress of calibration method for large field cameras[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2019, 40(3): 303-308.

- [11] 董方新, 蔡军, 解杨敏. 立体视觉和三维激光系统的联合标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2589-2596.  
Dong F X, Cai J, Xie Y M. Joint calibration method for stereo vision system and 3D laser system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2589-2596.
- [12] 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.
- [13] Bi S L, Gu Y G, Zhai C, et al. Camera calibration method in specific bands for the near-infrared dynamic navigator[J]. Optical Engineering, 2019, 58(9): 094107.
- [14] 施佳豪, 王庆, 冯悠扬. 基于三维标定板的相机标定方法[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(6): 48-51.  
Shi J H, Wang Q, Feng Y Y. Camera calibration method based on 3D calibration plate[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(6): 48-51.
- [15] Sun J H, Zhang Y, Cheng X Q. A high precision 3D reconstruction method for bend tube axis based on binocular stereo vision[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2292-2304.
- [16] 胡春生, 闫小鹏, 魏红星, 等. 基于立体视觉的目标检测与轨迹预测研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(3): 50-65.  
Hu C S, Yan X P, Wei H X, et al. Survey of target detection and trajectory prediction based on stereo vision [J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(3): 50-65.
- [17] Zou W H, Li S G. Calibration of nonoverlapping in-vehicle cameras with laser pointers[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(3): 1348-1359.
- [18] Kang J H, Wu B, Wang Y C. Calibration method of 1D laser rangefinder for large-scale 3D measurement under harsh environment[J]. IEICE Electronics Express, 2020, 17(8): 20200071.
- [19] Feng W W, Su Z L, Han Y S, et al. Inertial measurement unit aided extrinsic parameters calibration for stereo vision systems[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 134(10): 106252.
- [20] Alispach C, Borkowski J, Cadoux F R, et al. Large scale characterization and calibration strategy of a SiPM-based camera for gamma-ray astronomy[J]. Journal of Instrumentation, 2020, 15(11): P11010.
- [21] Bao F Q, Ii W C, Iii Q Z, et al. The compensation of deformation measurement in large field of view based on digital speckle pattern interferometry[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11343: 113430G.
- [22] Wang Z Y, Zhang Z J, Zhao Y. High-precision measurement of tiny difference frequency via weak value amplification[J]. The European Physical Journal D, 2021, 75(9): 238.
- [23] Genovese K, Chi Y X, Pan B. Stereo-camera calibration for large-scale DIC measurements with active phase targets and planar mirrors[J]. Optics Express, 2019, 27(6): 9040-9053.
- [24] Zhang X, Xu Y Z, Li H C, et al. Flexible method for accurate calibration of large-scale vision metrology system based on virtual 3-D targets and laser tracker[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(6): 172988141989351.
- [25] Xiao Z T, Li Y R, Geng L, et al. Measurement of large steel plates based on linear scan structured light scanning [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10621: 1062111.
- [26] Xu Z Y, Wang Y, Yang C. Multi-camera global calibration for large-scale measurement based on plane mirror[J]. Optik, 2015, 126(23): 4149-4154.
- [27] Littell J D. Experimental photogrammetric techniques used on five full-scale aircraft crash tests[M]. Washington, D. C.: National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 2016.
- [28] Ozbek M, Rixen D J, Erne O, et al. Feasibility of monitoring large wind turbines using photogrammetry[J]. Energy, 2010, 35(12): 4802-4811.
- [29] Ozbek M, Meng F Z, Rixen D J. Challenges in testing and monitoring the in-operation vibration characteristics of wind turbines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 41(1/2): 649-666.
- [30] Lundstrom T, Baqersad J, Niezrecki C. Monitoring the dynamics of a helicopter main rotor with high-speed stereophotogrammetry[J]. Experimental Techniques, 2016, 40(3): 907-919.
- [31] Littell J D. Large field photogrammetry techniques in aircraft and spacecraft impact testing[M]//Proulx T. Dynamic behavior of materials. New York: Springer, 2011: 55-67.
- [32] Vassilakos G J, Hardy R C. Sand impact tests of a half-scale crew module test article[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2014, 27(3): 442-455.
- [33] 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]//2018 Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, June 25-29, 2018, Atlanta, Georgia. Reston: AIAA Press, 2018: 3802.
- [34] Cui J S, Li Y H, Huo J, et al. A measurement method of motion parameters in aircraft ground tests using computer vision[J]. Measurement, 2021, 174: 108985.
- [35] Zhao F D, Tamaki T, Kurita T, et al. Marker-based non-overlapping camera calibration methods with additional support camera views[J]. Image and Vision Computing, 2018, 70: 46-54.
- [36] Lazdinas R, Jurevicius M, Vekteris V, et al. An analysis of the optical system of a length measurement comparator [J]. Mechanics, 2020, 26(6): 518-525.
- [37] 徐巧玉, 叶东, 车仁生. 基于光学参考棒的立体视觉测量系统现场标定技术[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 81-86.  
Xu Q Y, Ye D, Che R S. On-line calibration of stereo vision measurement system based on optical reference bar



- [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(1): 81-86.
- [38] Alonso I L, Gorostidi J Z, Garate A M, et al. In-process portable photogrammetry using optical targets for large scale industrial metrology[J]. *DYNA*, 2021, 96(1): 35-39.
- [39] Sun P, Lu N G, Dong M L, et al. Simultaneous all-parameters calibration and assessment of a stereo camera pair using a scale bar[J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3964.
- [40] 徐丁天, 李海峰, 徐良. 基于人眼跟踪的 360° 悬浮显示系统及其畸变校正方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0922002.  
Xu D T, Li H F, Xu L. 360° floating display system based on human eye tracking and its distortion correction method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0922002.
- [41] 黎荆梅, 范永祥, 王宁, 等. 航空推扫式外拼接成像系统子视场相对定向方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(18): 1811001.  
Li J M, Fan Y X, Wang N, et al. Relative orientation method for airborne pushbroom combined imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1811001.
- [42] 林嘉睿, 俞吉洙, 杨凌辉, 等. 分布式测量系统的分级几何约束定向方法[J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0904001.  
Lin J R, Yu J Z, Yang L H, et al. Orientation method of distributed measurement system based on hierarchical geometric constraints[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0904001.
- [43] 张征宇, 朱龙, 黄叙辉, 等. 基于前方交会的 5 点相对定向[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0115001.  
Zhang Z Y, Zhu L, Huang X H, et al. Five-point relative orientation based on forward intersection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0115001.
- [44] Hartley R, Li H D. An efficient hidden variable approach to minimal-case camera motion estimation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(12): 2303-2314.
- [45] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2004.  
Fei Y T. *Error theory and data processing*[M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2004.