

文章编号 1004-924X(2018)02-0503-08

野外空间坐标测量中的任意姿态 多目相机快速标定

王向军^{1,2*}, 张佳丽^{1,2}, 刘 峰^{1,2}, 于 潼^{1,2}

- (1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;
2. 天津大学 微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 针对野外复杂地形环境下, 对于多个监测区域进行野外坐标测量的情况, 提出一种利用双目立体视觉原理对相机 3 个姿态角及焦距同时进行现场校准的快速标定方法。该方法对传统的标定方法进行改进, 可用于相机焦距、姿态未知的情况, 对现场环境条件要求低, 避免了传统标定方法中相机架设姿态受限的问题。首先通过选择合适的统一世界坐标系和坐标系旋转顺序, 使标定得到的相机外参与相机姿态角对应。然后通过 GPS 测量得到两个标定点的世界坐标, 将两个标定点的世界坐标和图像坐标代入成像模型, 用最小二乘法解出相机的焦距和姿态角。在现场对其中一个监测区域进行实际测量验证, 结果显示直径 200 m 的圆形监测区域内, 相对误差优于 0.38%。该方法工程应用性强, 灵活度高, 适用性广。

关键词: 双目视觉; 摄像机快速标定; 任意姿态; 大视场; 坐标测量

中图分类号: TP391; TP242.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182602.0503

Rapid calibration for multiple cameras with arbitrary attitude in field space coordinate measurement

WANG Xiang-jun^{1,2*}, ZHANG Jia-li^{1,2}, LIU Feng^{1,2}, YU Tong^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of MOEMS of the Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: xdocuxjw@vip.163.com

Abstract: In view of the complex terrain and the field coordinate measurements in multiple monitoring areas, a rapid calibration method based on the principle of binocular stereo vision for simultaneous calibration of three camera attitude angles and focal length was proposed. This method improved the traditional calibration method, so that it could be used for the situation that the camera focus and attitudes were all unknown, and had low requirement for field environment conditions. It avoided the problem of camera pose limitation in traditional calibration method. First, selected the unified world coordinate system and right coordinate rotation order, so that the calibration parameter equaled the

收稿日期: 2017-06-22; 修订日期: 2017-09-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51575388)

corresponding camera attitude angles. Then, put the pixel coordinates and the world coordinates of two given points into camera imaging model, and the focal length and three attitude angles of the camera was solved by the least square method. The actual measurement and verification of one of the target areas were carried out on the spot. The results show that the relative error in the circular monitoring area of diameter 200 m is better than 0.38%. The method proposed is of high engineering applicability, and high flexibility and wide applicability.

Key words: binocular vision; camera rapid calibration; arbitrary attitude; large field of view; coordinate measurement

1 引言

双目立体视觉测量系统应用广泛,其测量原理为使用双目相机同时对同一目标进行拍摄,根据所产生的视差,对两幅平面图像进行三维重建。相机标定则是利用双目立体视觉原理进行测量的关键,标定精度直接影响系统测量精度。

由于在野外大视场的目标定位测量中,相机需现场安装,相机参数也会发生改变,因此通常采用传统的标定方法。在以往的标定方法中,文献[1]采用小孔成像模型,通过标定点的图像坐标和世界坐标的映射关系,由两个标定点求得相机焦距和相机的水平偏角;文献[2]将成像模型中的参数在精度允许情况下进行了简化,最终仅标定了相机的水平偏角,但对于地形复杂的环境,相机需根据视场中的监测区域调节不同的姿态及焦距,因而其姿态及焦距无法提前获知,因此文献[1]和[2]标定方法并不适用。文献[2-3]均采用已知靶标点建立世界坐标系,在经纬度转换投影的过程中引入误差,并且对于多区域的坐标测量需要建立多个世界坐标系,操作繁琐,计算复杂。此外,文献[4]未将旋转矩阵 \mathbf{R} 分解,现场标定时不能根据标定得到的 \mathbf{R} 矩阵判断标定的正确性。根据现场实际情况,本文提出一种统一世界坐标系的快速标定方法,该方法通过建立 Z_w 轴指向正

北方向的直角坐标系,避免了文献[2-3]中的投影计算引入的误差,简化了建立世界坐标系的过程;将世界坐标系的建立与 \mathbf{R} 矩阵相结合,使标定得到的 \mathbf{R} 中的 3 个参数与相机姿态对应,便于现场校验;每个双目摄像机系统只需两个靶标点即可快速标定两个相机的 3 个姿态角和焦距。

本文提出的定位方法主要应用在对野外超大空间中多个监测区的位置测量,在 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 范围内存在多个监测区,结合监测区的布局架设多个摄像机,相机互相组合使每个监测区域形成一个双目立体视觉测量系统,每个区域监测范围为直径 200 m 的圆,相机距监测区域中心位置 $400 \sim 2\,000\text{ m}$ 不等。本文通过仿真分析了图像坐标选取和理想主点引入的误差对坐标测量精度的影响,并通过现场实验验证了监测系统的精度。

2 测量原理

2.1 测量模型

相机标定根据使用模型不同可分为线性和非线性标定,其中线性标定采用小孔成像模型,非线性则考虑畸变参数引入非线性优化,由于本文中测量系统在实际应用时,监测点分布在像面中间区域,畸变影响可以忽略不计,因此选用线性小孔成像模型,则监测点的坐标映射关系如下:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_{xy} & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_{xy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{RT} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: (u, v) 代表监测点在像面上的像素坐标, d_{xy} 代表图像的像元尺寸, (u_0, v_0) 为图像中心坐标, (X_w, Y_w, Z_w) 为监测点的世界坐标, Z_c 为常数系数, f 为焦距, \mathbf{T} 代表平移向量,即相机光心在世

界坐标系下的坐标, \mathbf{R} 表示旋转矩阵, \mathbf{R} 将在本小节末详细说明。

式(1)中 (X_w, Y_w, Z_w) 是由 GPS 定位系统测得的经纬度转换而来,首先将监测点经纬度转换

成 WGS-84 地心空间直角坐标系下的坐标,然后再转换成本文建立的世界坐标系下的坐标。

WGS-84 地心空间直角坐标系如图 1 所示,点 O 为地球质心, Z 轴指向协议地球极方向, X 轴指向零子午面和赤道的交点, Y 、 Z 轴和 X 轴构成右手坐标系。令空间任一点 P , GPS 定位系统

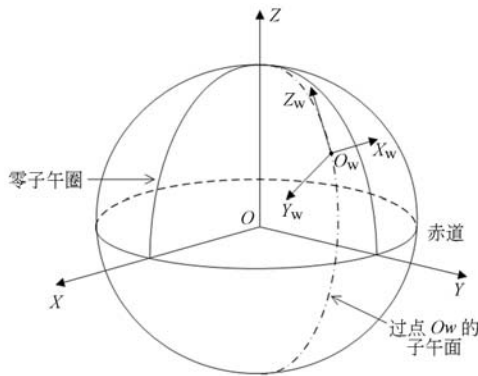


图 1 WGS-84 空间直角坐标系 $O-XYZ$ 与世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 示意图

Fig. 1 Sketch map of WGS-84 space rectangular coordinate system $O-XYZ$ and world coordinate system $O_w-X_wY_wZ_w$

测得其经纬度坐标 (lon, lat, H) , 那么点 P 在 WGS-84 地心空间直角坐标系下的坐标为 (X, Y, Z) , 见式 (2):

$$\begin{cases} X=(N+H) \times \cos (lat) \times \cos (lon) \\ Y=(N+H) \times \cos (lat) \times \sin (lon) \\ Z=(N \times (1-e^2)+H) \times \sin (lat) \end{cases}, \quad (2)$$

其中: N 为该点的卯西圈曲率半径, $N = \sqrt{1-e^2} \times \sin^2(lat)$; e 表示 WGS-84 坐标系对应的第一偏心率, 并且有 $e^2 = (a^2 - b^2) / a^2$, a 表示 WGS-84 坐标系对应的椭球长半径。

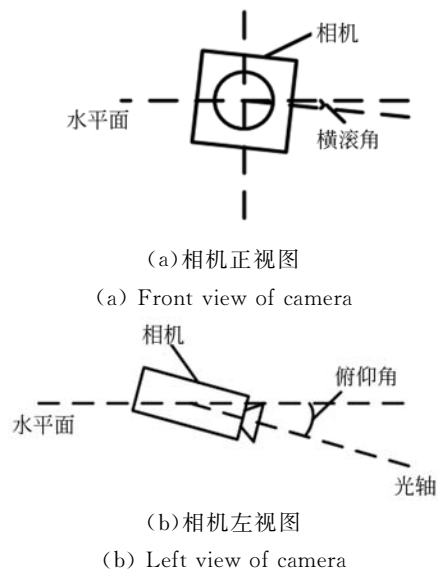
为便于工程应用, 选择便于测量的点(如上位机放置位置附近)作为统一的世界坐标系的原点 O_w , 将坐标系 $O-XYZ$ 经过旋转、平移变换即可得到以点 O_w 为原点的世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 。如图所示, Z_w 轴与过点 O_w 的纬线相切, 指向正北(北极点), Y_w 轴指向地球质心, X_w 轴垂直于 $O_wY_wZ_w$ 平面指向正东。设点 O_w 的经纬度坐标为 $(lono, lato, Ho)$, 点 O_w 在 WGS-84 坐标系下的坐标为 (X_o, Y_o, Z_o) , 由式 (2) 得点 P 在 WGS-84 坐标系下的坐标为 (X, Y, Z) , 则点 P 在 WGS-84 地心空间直角坐标系下坐标为 (X_w, Y_w, Z_w) , 见式 (3)。

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-lato) & \sin(-lato) \\ 0 & -\sin(lato) & \cos(-lato) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(lono+\pi/2) & \sin(lono+\pi/2) & 0 \\ -\sin(lono+\pi/2) & \cos(-lono+\pi/2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X-X_o \\ Y-Y_o \\ Z-Z_o \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}, \quad (4)$$

由于本系统应用于相机以任意姿态放置的测量系统, 无法像文献 [2] 一样对旋转矩阵 \mathbf{R} 进行简化, 因此将 \mathbf{R} 分解成矩阵相乘的形式, 如式 (4) 所示, 3 个矩阵从右至左分别代表坐标系绕 Y_w 、 X_w 和 Z_w 轴旋转。为保证 3 个角度具有物理含义, \mathbf{R} 分解的 3 个矩阵的乘积顺序不可变, 那么式 (4) 中 α 表示绕 Z_w 轴的旋转角, β 表示绕 X_w 轴的旋转角, γ 表示绕 Y_w 轴的旋转角。

图 2 表示相机的 3 个姿态角, 结合本文建立的世界坐标系, 则 α 对应相机的横滚角, β 对应相机的俯仰角, γ 对应相机的偏航角, 在现场标定时, 可用倾角仪及 GPS 定位系统测得相机的姿态角与 α 、 β 、 γ 的标定结果比较, 实时评估标定结果的正确性。

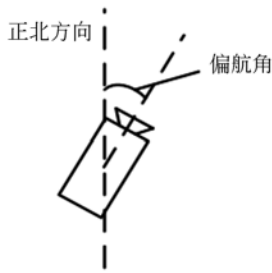


(a) 相机正视图

(a) Front view of camera

(b) 相机左视图

(b) Left view of camera



(c) 相机俯视图

(c) Top view of camera

图 2 相机姿态角示意图

Fig. 2 Sketch map of camera attitude angle

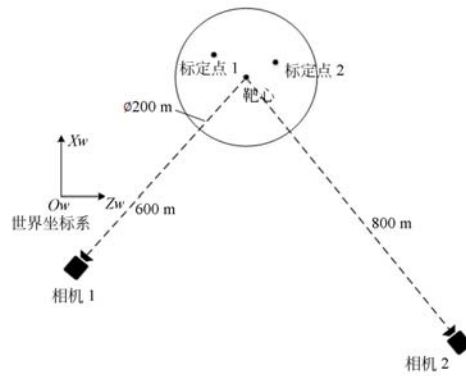


图 3 监测系统平面图

Fig. 3 Monitoring system plan

2.2 标定解算

(1) 标定: 式(1)中的像元尺寸 d_{xy} 由相机厂商提供, 平移向量 \mathbf{T} 由 GPS 测得, (u_0, v_0) 选用相机的理想主点。根据式(2)和式(3), 可将 GPS 测得的两个已知标定点的经纬度坐标 (lon, lat, H) 转换为对应的世界坐标 (X_w, Y_w, Z_w) , 再将其图像坐标 (u, v) 代入式(1), 便可得到 4 个方程。由于该方程组为三角方程(三角函数的自变量中含有未知量), 因此不能直接线性求解, 本文选择在 MATLAB 中用非线性最小二乘法求解相机的焦距 f 和 3 个姿态角 α, β, γ 。

(2) 解算: 将标定得到的焦距 f 和 3 个姿态角 α, β, γ 代入式(1), 则可根据已知靶标点的图像坐标求解出该靶标点的世界坐标。

由于本文应用于测量监测点到监测中心的平面距离, 因此以偏心距作为定位精度的判定依据, 设监测中心的世界坐标为 (X_{ow}, Y_{ow}, Z_{ow}) , 则偏心距 $D_w = \sqrt{(X_w - X_{ow})^2 + (Z_w - Z_{ow})^2}$ 。

3 仿真分析和实验验证

3.1 仿真分析

在本文提出的方法中, 由于计算公式中主点直接选用理想主点, 因此监测点的主要测量误差来源有主点像素误差、监测点的像素坐标提取误差以及两个相机的标定结果误差, 而其中两个相机标定结果误差主要由主点像素误差和标定点的像素坐标提取误差产生, 为简化分析, 本文在解算过程中使用监测点的真实像素坐标, 分别分析主点像素误差和标定点的像素坐标提取误差对监测

点位置测量的影响。

结合应用背景, 用 MATLAB 对测量方法进行仿真, 首先设定仿真模型, 如图 3 所示, 监测区域为直径 200 m 的圆, 靶心为圆形监测区域的中心, 相机 1 距靶心 600 m, 相机 2 距靶心 800 m, 由于本系统应用于多个监测区域, 因此选择统一的世界坐标系, 设定靶心距世界坐标系原点 $200\sqrt{2}$ m 的位置, 靶心的世界坐标为 $(200, 0, 200)$ 。

3.1.1 标定像素提取误差分析

在现场标定过程中, 由于标定点的像素坐标由人工提取, 因此存在人眼判别的随机误差, 通常人工提取的像素坐标误差不超过 2 pixel。首先对坐标选取误差进行分析, 标定点的像素坐标提取误差主要影响焦距和三个旋转角的标定结果, 因此设定像素坐标提取误差 $|\delta_p|$ 为 0.5、1、1.5、2 个像素, 分别求解相应的焦距和 3 个旋转角, 结果如图 4 所示。

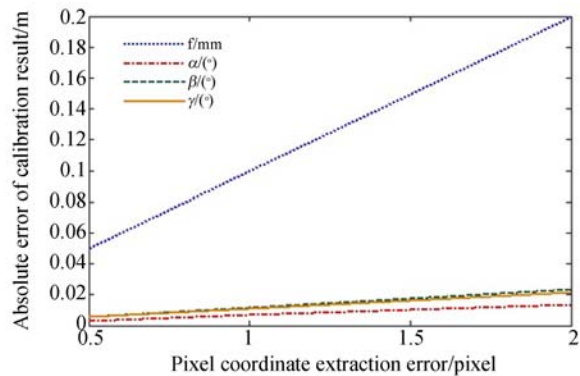


图 4 标定结果误差随标定点像素坐标提取误差的变化
Fig. 4 Error of calibration result varies with pixel coordinates of calibration point

由图4仿真结果可知,焦距 f 和3个姿态角 α 、 β 、 γ 的误差绝对值均随标定点像素坐标提取误差绝对值的增大而增大,其中, f 变化明显,但最大误差为0.2 mm, α 、 β 、 γ 变化相似,最大误差不超过 0.025° 。

由于标定结果误差相对于标定点像素坐标提取误差呈正线性变化,因此设定标定点像素坐标提取误差最大,即 ± 2 pixel,对监测区域内每隔5 m采样点,通过仿真得到采样点的偏心距误差,结果如图5所示。

由图5的仿真结果可以看出,由像素坐标提取误差引起的监测区域偏心距误差最大值为0.84 m,监测区域中心附近误差较小,整体上采样点距中心距离越大,其偏心距误差越大;当偏心距相等时,采样点的偏心距误差随该点到相机的距离的增大而增大。

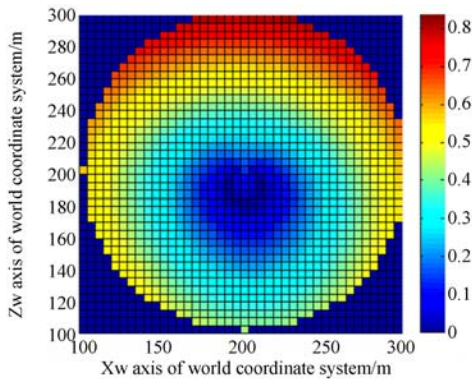


图5 监测区域偏心距误差分布

Fig.5 Eccentricity error distribution in monitoring area

3.1.2 主点误差分析

理想情况下,相机的主点为像平面的中心,但相机的生产工艺以及现场装配过程中的人为因素常常导致相机光轴偏移,主点位置发生变化,经过对20个相机抽样测量发现,相机主点像素误差在 ± 50 pixel以内,由于主点像素误差存在于标定和解算的全过程,因此直接用MATLAB对测量系统标定和解算全过程进行仿真,首先设定主点像素误差分别为 ± 10 、 ± 20 、 ± 30 、 ± 40 、 ± 50 pixel时,计算整个监测区域的所有采样点偏心距误差的最大值,结果如图6:

从图6的直线可以看出,主点像素误差增大,对应监测区域内偏心距误差的最大值也随之增大,取最大主点像素误差 n 个像素,对整个监测区域

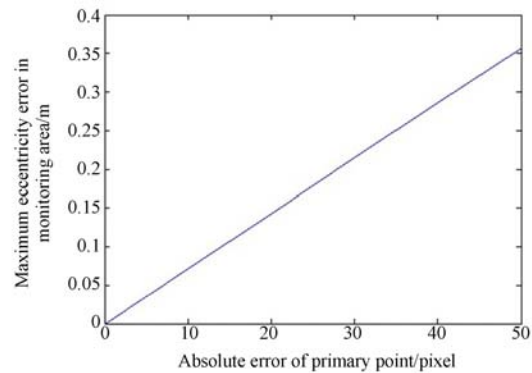


图6 监测区域最大偏心距误差随主点像素误差的变化

Fig.6 Variation of maximum eccentricity error with main point error in monitoring area

进行仿真分析,结果如图7所示。

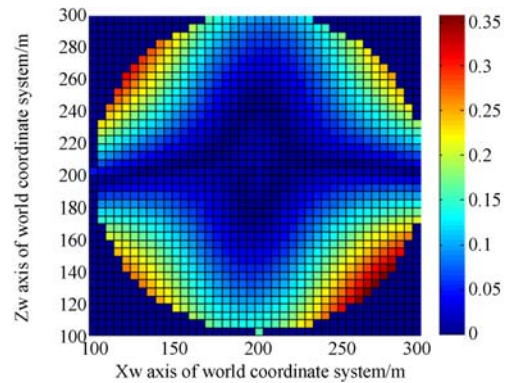


图7 主点像素误差为 ± 50 个像素时监测区域误差分布

Fig.7 Error distribution of monitoring area when main point error is ± 50 pixels

由图7的仿真结果可知,由主点像素误差引起的偏心距误差最大值为0.36 m,监测区域边缘部分误差相对较大,中心大部分区域偏心距误差小于0.1 m。

3.1.3 误差合成

由上文可知,由像素坐标提取误差引起的监测区域各点偏心距极限误差 $|\delta_1| \leq 0.84$ m,由主点像素误差引起的监测区域各点偏心距极限误差 $|\delta_2| \leq 0.36$ m,由于像素坐标提取误差和主点像素误差之间线性无关,且像素坐标提取误差引起的偏心距误差最大处在监测区域 Z_w 轴方向最远处,主点像素误差引起的偏心距误差最大处在 $X_w Z_w$ 平面四个象限的边缘,则两个误差导致的偏心距总误差 $\delta_w \leq \delta_1 + \delta_2 = 1.2$ m,相对误差小于1.2%。

3.2 实验验证

为验证仿真结果的正确性和标定方案的可行性,本文在现场进行实验验证,世界坐标系原点统一选择上位机所在位置,监测区为直径 200 m 的圆形区域,两个相机分别距监测中心 632 m 和 574 m,两相机的分辨率均为 $1\ 360 \times 1\ 024$,现场取监测区域内若干点,其中任意两点为标定点,其余点为验证点,分别用文献[1]中传统标定方法和本文所述标定方法进行标定,两种标定方法下验证点偏心距的解算结果与 GPS 测量的偏心距真值如表 1 所示。由表 1 可知,经现场实地验证,本文所述方法测得监测区域偏心距最大误差为

0.51 m,相对误差优于 0.38%,且偏心距测量误差随验证点到监测中心距离的增大而增大,与仿真分析结论相符;与文献[1]相比,本文所述方法偏心距测量精度明显更高。

为进一步验证本文所述标定方法的快速性和重复性,分别用本文方法和文献[1]标定方法在该监测区域取若干组标定点进行多次标定,记录其定位精度,结果如表 2 所示。由表 2 可知,采用本文所述标定方法进行标定,坐标定位精度具有良好的重复性,并且同等条件下,本文方法标定过程用时在 40 min 以内,明显小于传统标定方法用时,使野外标定更方便快捷。

表 1 现场验证数据与真值比较

Tab.1 Comparison of field validation data with true values

(m)

验证点序号	偏心距真值 (GPS 测量)	本文标定方法 测量结果	传统标定方法 测量结果	本文标定方法测量偏差		传统标定方法测量偏差	
				绝对误差	相对误差	绝对误差	相对误差
1	12.37	12.36	12.62	-0.01	0.15%	0.25	2.02%
2	14.11	14.06	13.74	-0.05	0.35%	-0.37	2.6%
3	19.09	19.12	19.38	0.03	0.16%	0.29	1.52%
4	22.89	22.85	23.22	-0.04	0.20%	0.33	1.44%
5	26.77	26.69	26.6	-0.08	0.30%	-0.17	0.64%
6	40.83	40.96	40.32	-0.13	0.31%	-0.51	1.25%
7	60.14	59.99	59.61	-0.15	0.25%	-0.53	0.88%
8	63.12	62.96	62.4	-0.26	0.25%	-0.72	1.14%
9	98.54	98.19	97.85	-0.35	0.36%	-0.69	0.7%
10	134.70	134.19	133.85	-0.51	0.38%	-0.85	0.63%
平均值	49.256	49.137	48.959	-0.119	0.24%	-0.297	1.28%

表 2 本文标定方法与传统标定方法对比

Tab.2 The calibration method in this paper compares with the traditional calibration method

标定组	偏心距真值 (GPS 测量)/m	本文标定方法		传统标定方法	
		偏心距测量结果/m	标定过程用时/min	偏心距测量结果/m	标定过程用时/min
1	29.76	29.63	27	29.52	95
2	33.79	33.55	32	33.52	124
3	32.49	32.32	36	32.3	112
4	28.91	28.76	21	28.68	83
5	35.43	35.24	37	35.12	96

4 结 论

本文提出了一种超大空间复杂地形环境下,对任意姿态相机的简易快速标定,现场只需测量两个标定点的 GPS 坐标及其对应的图像坐标即

可对相机的焦距和 3 个姿态角进行快速标定,本文提出方法简单易行,不需要精确标定靶标,适用于复杂环境下对任意姿态相机的标定,具有普遍性意义。本文根据现场应用情况,提出将世界坐标系的建立与坐标系旋转顺序相结合,R 分解的 3 个矩阵的乘积顺序不可更改,则标定的旋转角

等于相机自身的姿态角,不仅使现场标定校验方便,也可为标定运算提供初始值,提高计算精度。

本文模拟现场情况,用 MATLAB 对模型进行仿真分析,分别分析了标定点图像坐标提取误差和主点像素误差对偏心距测量的影响。利用本文所述方法对现场的某个监测区域进行实际测量,测量结果显示偏心距最大误差为 0.51 m,偏

心距平均误差 $\overline{D_w} = -0.119$ m,平均相对误差为

$$0.24\%, \text{偏心距标准差 } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = 0.24 \text{ m,}$$

满足现场的测量要求。将该方法与传统标定方法进行比较,结果显示本文所述方法定位精度更高,且标定用时明显缩短,具有快速性和准确性。

参考文献:

- [1] 王向军,韩双来. 弹落点坐标测量系统的快速校准方法及精度分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 686-690.
WANG X J, HAN SH L. A high speed camera calibration method in coordinate measurement of bomb-fall and its precision analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 686-690. (in Chinese)
- [2] 王向军,王晶,刘峰,等. 野外大视场双目视觉物体定位监测系统的单参数快速标定[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2664-2670.
WANG X J, WANG J, LIU F, et al.. Fast calibration for binocular vision measuring system with a large field[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2664-2670. (in Chinese)
- [3] 王向军,卞越新,刘峰,等. 远距离三维坐标测量中双目视觉系统结构参数的优化[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2902-2908.
WANG X J, BIAN Y X, LIU F, et al.. Optimization of structural parameters binocular vision system in remote 3-D coordinate measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2902-2908. (in Chinese)
- [4] 孔筱芳,陈钱,顾国华,等. GPS 双目摄像机标定及空间坐标重建[J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 485-492.
KONG X F, CHEN Q, GU G H, et al.. GPS-based binocular camera calibration and space coordinate reconstruction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2): 485-492. (in Chinese)
- [5] 邱茂林,马颂德,李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43-55.
QIU M L, MA S D, LI Y. Overview of camera of camera calibration for computer vision[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(1): 43-55. (in Chinese)
- [6] 王剑,王宇胜,刘峰,等. 一种用于大场景双目视觉系统摄像机的标定方法[J]. 中国民航大学学报, 2016, 34(3): 1-5.
WANG J, WANG Y SH, LIU F, et al.. Camera parameters calibration method based on binocular vision system in wide field[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2016, 34(3): 1-5. (in Chinese)
- [7] 杨巍. 基于双目立体视觉的三维信息快速大尺度测量系统[J]. 电子设计工程, 2017, 25(6): 190-193.
YANG W. Three dimensional fast and large scale information measurement system based on binocular stereo vision[J]. *Electronic Design Engineering*, 2017, 25(6): 190-193. (in Chinese)
- [8] 黄玉强,叶磊. 基于双目视觉的目标测距[J]. 汽车实用技术, 2017(2): 148-151.
HUANG Y Q, YE L. Range-measuring of Target based on Binocular stereo vision[J]. *Automobile Applied Technology*, 2017(2): 148-151. (in Chinese)
- [9] 张超,韩成,杨华民,等. 基于位姿约束的大视场双目视觉标定算法[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 197-206.
ZHANG CH, HAN CH, YANG H M, et al.. Large field and binocular vision calibration algorithm based on position and orientation constraints [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 197-206. (in Chinese)
- [10] 杨景豪,刘巍,刘阳,等. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 300-308.
YANG J H, LIU W, LIU Y, et al.. Calibration of binocular vision measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 300-308. (in Chinese)
- [11] 刘佳. 最小二乘法基本思想及其应用[J]. 科技视界, 2016(22): 186-187.
LIU J. The basic idea of least square method and its application[J]. *Science & Technology Vision*, 2016(22): 186-187. (in Chinese)
- [12] 王向军,韩双来. 弹落点坐标测量系统的快速校准方法及精度分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13

(6): 686-690.

WANG X J, HAN SH L. A high speed camera calibration method in coordinate measurement of bomb-fall and its precision analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 686-690. (in Chinese)

[13] TSAI R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology u-

sing off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323-344.

[14] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.

作者简介:



王向军(1955—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,主要从事精密测试技术与仪器、光电探测与传感技术、影像与视觉测量方面的研究。E-mail: xdocuxjw@vip.163.com



于 潼(1992—),男,天津人,硕士,2015年于天津大学获得学士学位,现为天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士,现从事计算机视觉及影像测量方面的研究。E-mail: yu-tong670544250@hotmail.com