

文章编号 1004-924X(2015)10-2902-07

远距离三维坐标测量中双目视觉系统结构参数的优化

王向军^{1,2*}, 卞越新^{1,2}, 刘峰^{1,2}, 吴凡路^{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:针对双目视觉系统对远距离大视场复杂地形环境下目标点三维坐标的测量,研究了优化系统结构,提高双目视觉系统坐标测量精度的方法。分析了系统结构参数对测量精度的影响,通过在监测区域内设置靶标对系统进行标定。测量时,将获取的目标点图像信息代入测量模型进行解算,从而获得目标点的空间三维坐标。仿真分析了系统结构参数中调平传感器精度以及系统布局方式对三维坐标测量精度的影响,得出了其误差影响趋势。在此基础上,提出系统调平传感器精度为 $\pm 0.1^\circ$ 的要求以及系统合理的布局方式,为构建双目视觉测量系统的布局提供参考。对直径200 m的区域进行了监测,结果显示目标点的相对定位误差均小于0.33%,满足系统的精度指标要求,同时使得系统现场架设更加方便快捷,避免了盲目性。

关键词:双目视觉;远距离测量;三维坐标测量;结构参数;精度分析

中图分类号:TP391;TP242.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152310.2902

Optimization of structural parameters of binocular vision system in remote 3-D coordinate measurement

WANG Xiang-jun^{1,2*}, BIAN Yue-xin^{1,2}, LIU Feng^{1,2}, WU Fan-lu^{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: To improve the measurement accuracy of a binocular vision system for target points in remote 3D coordinates, the system structure was optimized, and a high precision coordinate measurement method for the binocular vision system was given. The influence of system structure parameters on the measurement accuracy was analyzed, then the feature target was placed in the monitoring area to calibrate two cameras. In measurement, the image information of obtained feature target was induced into the measuring model to do a calculation and to obtain the space 3D coordinate. The effects of the measuring accuracy of a leveling sensor and the system layout on the 3D coordinate measurement accuracy were analyzed and the error change trends were obtained. It suggests the accuracy of the leveling sensor should be $\pm 0.1^\circ$ and the system layout should be more reasonable, which will pro-

收稿日期:2015-04-17;修订日期:2015-06-06.

基金项目:国家教育部支撑项目(No. 625010110);国家自然科学基金与中国民用航空总局联合研究基金资助项目(No. 61179043)

vide a reference for constructing a excellent binocular vision system. In application to monitoring the area with a diameter of 200 m, the results show that the relative error of the target points is less than 0.33%, which satisfies the system's requirement, and is convenient for system's layout as well as avoids the design blindness.

Key words: binocular stereo vision; remote measurement; 3D coordinate measurement; structural parameter; precision analysis

1 引言

双目立体视觉测量系统是一种基于视觉传感器实现空间目标点坐标信息提取的测量系统,与其它测量系统相比,其具有快速、精准、结构简单、测量非接触等特点,因此被广泛应用于工业检测、地理信息测量等领域^[1-2]。

目前双目视觉理论研究已较为成熟,但实际应用时,由于测量环境不一致、系统结构不同、设备精度受限制等原因,视觉测量系统构建出现困难,因此开展对双目视觉系统测量精度的研究十分必要。目前绝大部分文献中设计的双目测量系统属近距离测量,文献[3-5]对基线距、镜头焦距及光轴夹角与测量精度的关系进行了理论研究,得出光轴正交时系统测量误差最小,并建议设计视觉系统时光轴夹角为 $20\sim 45^\circ$;另外,通过增加标定图像数,选择景深较大、覆盖视场的长焦镜头能有效减小误差。所搭建的实验系统中,两摄像机通过安装架连接,这样两摄像机很容易保证同时水平放置。然而在较为理想的实验环境下的测量精度分析对于野外远距离复杂地形的测量并不完全适用。

文献[6]实现了 $250\text{ m}\times 350\text{ m}$ 的目标点水

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

其中: (u, v) 表示目标点图像坐标, (X_w, Y_w, Z_w) 表示目标大地坐标, \mathbf{R} 表示相机姿态矩阵, \mathbf{C} 表示相机光心相对于大地坐标系原点的平移向量, (u_0, v_0) 表示像平面主点位置, d_{xy} 表示像元物理尺寸, f 表示相机焦距。文献[7]通过在相机上安

装调平传感器使相机光轴与大地水平面平行,外参 \mathbf{R} 中未知姿态角理论上只有水平自转角。使用测距传感器确定相机的平移向量 \mathbf{C} 。经简化后,成像模型对应的目标点大地坐标与图像坐标的关系表示:

2 系统测量模型及标定方法

结合测量系统的应用实际环境,本文选用摄像机透视成像模型作为系统的测量模型^[7],同时使用高成像质量单反相机,故不考虑镜头畸变。根据摄像机透视成像模型,目标点大地坐标与图像坐标的关系如下:

$$\begin{cases} f \cos \alpha \cdot X_w + f \sin \alpha \cdot Z_w - f(\cos \alpha \cdot S_x + \sin \alpha \cdot S_z) = \rho(u - u_0) d_{xy} \\ f Y_w - f S_y = \rho(v - v_0) d_{xy} \\ -\sin \alpha \cdot X_w + \cos \alpha \cdot Z_w + \sin \alpha \cdot S_x - \cos \alpha \cdot S_z = \rho \end{cases}, \quad (2)$$

式中: (S_x, S_y, S_z) 表示成像模型中的 C^T 。由该式可知,除相机焦距 f 和自转角 α (相机光轴水平旋转角)以外,其它参数均已知。文献[7]对这两个未知参数的标定采用如下方法:在监测区域中设置两个靶标作为已知点,其大地坐标分别表示为 $(X_{w_i}, Y_{w_i}, Z_{w_i}) (i=1, 2)$, 对应的像面横坐标为 $u_i (i=1,$

2), 根据公式(2)即可求解出相机的两个内外参。

测量时,获取目标点在两相机像面上的纵横坐标 $(u_i, v_i) (i=1, 2)$, 同时令 $x_i = (u_i - u_{0i}) d_{xyi}$, $y_i = (v_i - v_{0i}) d_{xyi} (i=1, 2)$, 相机 1、2 的旋转矩阵 R 中的正余弦分别用 $a_i, b_i (i=1 \sim 4)$ 表示。将上述参量带入成像模型式(2), 得式(3):

$$\begin{cases} (f_1 a_1 + x_1 a_3) X_W + (f_1 a_2 - x_1 a_4) Z_W = (f_1 a_1 + x_1 a_3) S_{x1} + (f_1 a_2 - x_1 a_4) S_{z1} \\ y_1 a_3 X_W - f_1 Y_W + y_1 a_4 Z_W = y_1 a_3 S_{x1} - f_1 S_{y1} + y_1 a_4 S_{z1} \\ (f_2 b_1 + x_2 b_3) X_W + (f_2 b_2 - x_2 b_4) Z_W = (f_2 b_1 + x_2 b_3) S_{x2} + (f_2 b_2 - x_2 b_4) S_{z2} \\ y_2 b_3 X_W - f_2 Y_W + y_2 b_4 Z_W = y_2 b_3 S_{x2} - f_2 S_{y2} + y_2 b_4 S_{z2} \end{cases}, \quad (3)$$

使用最小二乘方法,求解目标点的三维坐标 (X_W, Y_W, Z_W) , 其表示为 $M = (A^T A)^{-1} B$ 。其中 A 为方程组(3)的系数矩阵, B 为常数向量。

(3)测量系统的布局方式,即两个靶标和两个相机的位置关系,对测量误差存在影响。

3 三维坐标测量误差仿真分析

通过上述 3 个方面的分析,综合考虑系统精度要求。在进行误差分析时为了更直观地表明相机的横滚角和俯仰角误差与测量误差的关系,不考虑中间量(系统标定误差)对测量的影响,直接分析相机横滚角和俯仰角对测量误差的影响。针对系统布局方式对测量误差的影响,首先分析系统布局对部分测试点的测量误差影响,再根据这些测试点的测量误差趋势分析监测区域内所有测试点的误差趋势。最后综合仿真结果,给出系统的布局原则。

由公式(3)可知,目标点的坐标测量误差来源包括目标点图像坐标提取误差、两相机的内外参标定误差。而相机的内外参标定误差来源为两靶标的图像坐标提取误差、两靶标的相对位置测量误差以及忽略的两个相机俯仰角和横滚角。文献[7]在分析两个靶标的摆放位置对系统标定误差的影响时,只考虑了单一相机的位置摆放情况,同时只分析了标定误差较小情况下的平面二维坐标的测量误差;文献[8]为简化标定方法,重点分析了相机焦距误差对平面偏距测量误差的影响。对于忽略的相机俯仰角和横滚角对测量的影响均没有给出具体的误差分析。在上述文献的基础上,本文从以下 3 个方面对三维坐标测量误差进行分析。

3.1 系统结构参数对部分测试点测量误差的影响

(1)依实际应用需求,系统的测量值为空间点的三维坐标而不只是平面二维坐标信息。评定系统测量精度的准则为式(4):

3.1.1 模型参数

$$\Delta D = \sqrt{(X_W - x_w)^2 + (Y_W - y_w)^2 + (Z_W - z_w)^2}, \quad (4)$$

结合实际测量环境,设定监测区域为 $\Phi 200$ m 的圆形区域,对应的环境示意图(俯视图)如图 1 所示。其中,监测区域中心为大地坐标系原点 O_W ,

其中: (X_W, Y_W, Z_W) 是系统测得的空间点三维坐标, (x_w, y_w, z_w) 是用高精度仪器测得的空间点三维坐标值,设定该值为真值。

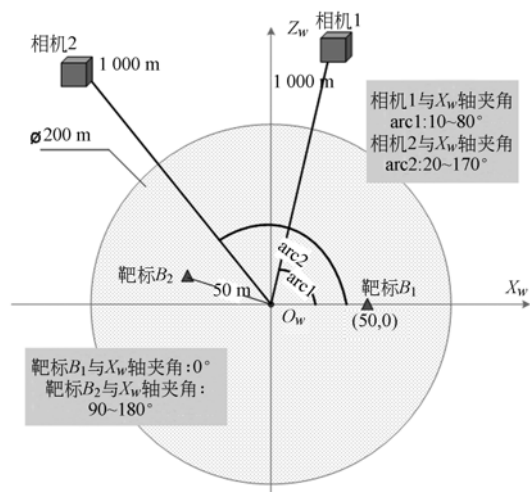


图 1 测量系统俯视图

Fig. 1 Top view of measurement system

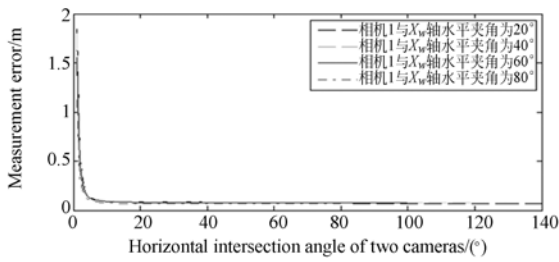
(2)模型建立时认为相机的两个姿态角(横滚角和俯仰角)为零,而在实际使用时由于两个相机距离较远,野外架设相机时不能保证两相机的两个姿态角全为零,此时,需要对这两个实际存在的姿态角进行分析,给出调平传感器的精度要求。

以靶标 B_1 和 O_w 的连线为 X_w 轴, Y_w 轴垂直指向大地水平面。

3.1.2 相机布局方式与部分测试点测量误差的关系

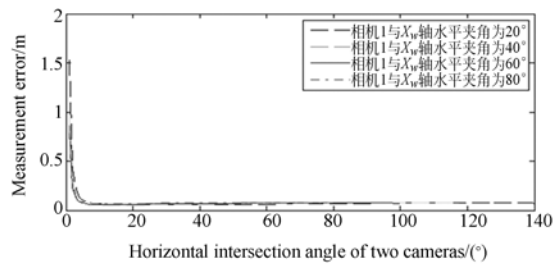
由于圆形监测区域面积较大, 优先选择均匀覆盖监测区域中四象限特征的测试点, 这里分别选取 $(50, 2, 50)$, $(-50, 2, 50)$, $(-50, 2, -50)$, $(50, 2, -50)$ 作为观察对象(因为观察对象为测量误差与布局方式的关系, 而不是每种布局方式

对应的具体测量误差大小, 因此未选择边缘测试点)。设定两个相机存在 0.1° 的横滚角和俯仰角, 系统标定时两靶标的位置为: $B_1(50, 2, 0)$, $B_2(-50, 2, 0)$ 。相机布局方式如下: 相机 1 按与监测中心连线和 X_w 轴水平夹角分别为 $20, 40, 60, 80^\circ$ 4 种角度情况下, 对应每个相机 1 的摆放角度, 使两相机的水平交会角按 $1\sim 150^\circ, 1\sim 130^\circ, 1\sim 110^\circ, 1\sim 90^\circ$ 4 种方式变化。理论仿真结果如下图所示。



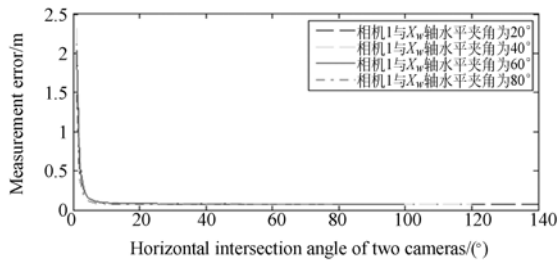
(a) 测试点为 $(50, 2, 50)$

(a) Test points at $(50, 2, 50)$



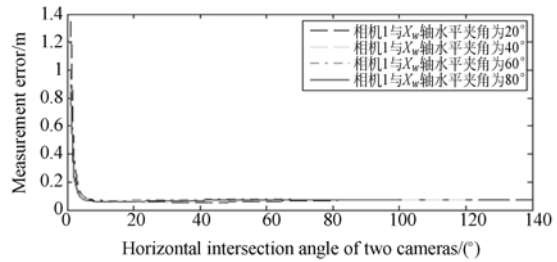
(b) 测试点为 $(-50, 2, 50)$

(b) Test points at $(-50, 2, 50)$



(c) 测试点为 $(-50, 2, -50)$

(c) Test points at $(-50, 2, -50)$



(d) 测试点为 $(50, 2, -50)$

(d) Test points at $(50, 2, -50)$

图 2 4 个测试点的测量误差随相机布局方式的变化趋势

Fig. 2 Trends of measurement errors of four characteristic point changes with camera layouts

表 1 4 测试点测量误差为最小值时两相机的水平交会角

Tab. 1 Horizontal intersection angle of two cameras when measurement error in four different test points is minimum ($^\circ$)

相机 1 与 X_w 轴的水平夹角	两相机的水平交会角			
	测试点 $(50, 50)$	测试点 $(-50, 50)$	测试点 $(-50, -50)$	测试点 $(50, -50)$
20	96	41	98	41
40	85	15	86	14
60	73	12	74	12
80	65	11	66	11

由仿真结果知两相机的水平交会角小于 10° 时, 4 测试点测量误差受相机水平交会角的影响大。同时由表 1 数据可知, 随着相机 1 与 X_w 轴

水平夹角增大, 测量误差最小值对应的两相机交会角逐渐变小, 且象限 1, 3 测试点对应的相机水平交会角比象限 2, 4 测试点对应的相机水平交会角大。结合实际应用环境, 系统布局时两相机夹角应避免 10° 以内, 且相机 1 与轴夹角越大, 两相机水平交会角越小。

3.1.3 靶标布局方式与测试点测量误差关系

选择监测区域里象限 1 测试点 $(50, 2, 50)$ 的测量误差值作为观察对象。设定两个相机存在 0.1° 的横滚角和俯仰角。靶标 1 位置固定为 $B_1(50, 2, 0)$, 靶标 2 的位置按照与 X_w 间的夹角分别为 $180, 160, 120^\circ$ 布置。对应每种靶标布置的方式, 相机的布局方式按 3.1.2 节的方式架设。

理论仿真误差结果如图 3 所示。

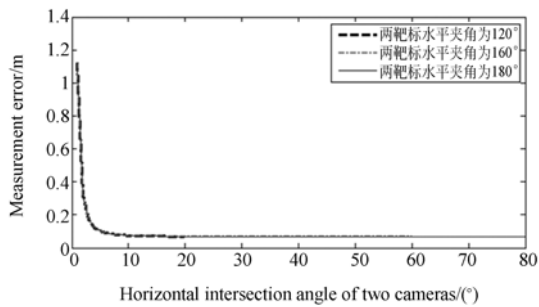


图 3 不同的靶标布局方式下测试点(50,2,50)的测量误差变化趋势

Fig. 3 Trend of measurement error of point (50, 2, 50) with different target layouts

由仿真结果可知,两靶标具有不同水平夹角时,测试点测量误差曲线基本重合。这表明测试点测量误差与靶标的布局方式基本无关,同时结合实际应用环境,两靶标的布局夹角选择为 $120^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 。

3.2 系统结构参数对所有测试点测量误差的影响

根据 3.1 节选择监测区域中 4 个测试点分析靶标、相机布局方式对测量误差的影响趋势,在此基础上分析监测区域内所有点的三维坐标测量误差变化趋势。

3.2.1 理论 1 仿真误差结果及数据分析

结合实际应用环境,仿真时设定两相机水平交会角为 $10^{\circ} \sim 90^{\circ}$,仿真间隔为 20° ,相机 1 与 X_w 轴的夹角设定为 $10^{\circ} \sim 160^{\circ}$,仿真间隔为 10° ,同时根据 3.1.3 节分析,两靶标的夹角固定为 180° 。设定监测区域为 $\Phi 200$ m 的圆形区域,相机俯仰角和横滚角误差值仍为 $\pm 0.1^{\circ}$,以 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的栅格划分监测区域,取栅格角点为测试点。

记录每种系统布局方式下监测区域中所有测试点测量误差的最大值 $\text{Max}(\Delta D)$,图 4 为不同的系统布局方式下 $\text{Max}(\Delta D)$ 的变化趋势。

由仿真结果可知:

(1)两相机水平交会角相同时,测量误差最大值 $\text{Max}(\Delta D)$ 关于相机 1 与 X_w 轴的水平夹角对称,比如两相机水平交会角为 50° 时, $\text{Max}(\Delta D)$ 关于相机 1 与 X_w 轴以 65° 水平夹角对称,且交会角越大,对称角越小。

(2)两相机水平交会角为 $10^{\circ} \sim 50^{\circ}$, $\text{Max}(\Delta D)$ 为凹型曲线;交会角为 90° 时, $\text{Max}(\Delta D)$ 为凸型曲线;交会角为 70° 时, $\text{Max}(\Delta D)$ 呈先减小后增大的

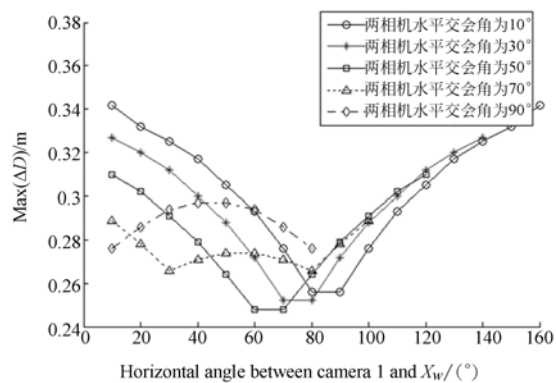


图 4 不同的系统布局方式下监测区域内测试点误差最大值变化趋势

Fig. 4 Trends of maximum errors of all points with different system layouts

对称分布趋势。

(3)不同的相机水平交会角对应的测量误差最大值的最小值满足, $50^{\circ} < 30^{\circ} < 10^{\circ} < 70^{\circ} < 90^{\circ}$,且相机 1 与 X_w 夹角为 65° ,两相机交会角为 50° 的布局方式最优。

3.2.2 系统布局原则

根据前面的分析可知,应采用如下两个准则来构建系统布局方式:

(1)由 3.1 节分析可知,不同的靶标布局方式对测量误差影响很小,结合实际应用环境,选择两个靶标布置在两个相机的外侧,且夹角大小为 $120^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 。

(2)由图 4 的仿真结果可知,测量误差平均值 $\overline{\text{Max}(\Delta D_i)}$ 为 0.291 m,所以这里选择测量误差小于 0.291 m 的 5 种相机布局方式(两相机水平交会角用 A 表示,相机 1 与 X_w 轴的水平夹角用 B 表示)

(a)若 $10^{\circ} \leq A \leq 20^{\circ}$, B 应满足 $70^{\circ} \leq B \leq 100^{\circ}$,并且 B 越接近 85° ,测量误差越小。

(b)若 $20^{\circ} \leq A \leq 40^{\circ}$, B 应满足 $50^{\circ} \leq B \leq 100^{\circ}$,并且 B 越接近 75° ,测量误差越小。

(c)若 $40^{\circ} \leq A \leq 60^{\circ}$, B 应满足 $30^{\circ} \leq B \leq 100^{\circ}$,并且 B 越接近 65° ,测量误差越小。

(d)若 $60^{\circ} \leq A \leq 80^{\circ}$, B 应满足 $10^{\circ} \leq B \leq 100^{\circ}$,并且 B 越接近 30° 或 80° ,测量误差越小。

(e)若 $80^{\circ} \leq A \leq 90^{\circ}$, B 应满足 $10^{\circ} \leq B \leq 80^{\circ}$,并且 B 越接近 10° 或 80° ,测量误差越小。

在这 5 种优化布局方式下,(c)为最优布局方式。

3.3 相机横滚角和俯仰角对测量误差的影响

3.1~3.2 节分析的系统布局方式对测量误差的影响是基于系统误差参数为相机横滚角和俯仰角的情况。这里根据系统的布局原则,选择 5 组合理相机布局方式,分析相机横滚角和俯仰角对测量误差的影响。设定两相机俯仰和横滚角分别为 1, 0.5, 0.1, 0.05°, 对应的每种仿真姿态角,按照 3.2.2 节 5 种优化的相机布局方式进行仿真。

表 2 不同相机横滚角和俯仰角下监测区域内测试点误差的最大值

Fig. 2 Maximum errors of all characteristic points with different pitches and rolls for camera (m)

相机 1 与 X _w 两相机的水平轴夹角/(°)		相机俯仰角和横滚角大小/(°)			
轴夹角/(°)	交会角/(°)	1	0.5	0.1	0.05
80	10	4.887	1.279	0.256	0.128
70	30	2.522	1.261	0.252	0.126
60	50	2.481	1.240	0.248	0.124
30	70	2.658	1.329	0.266	0.133
10	90	2.764	1.382	0.276	0.138

系统的定位误差要求为 $\sigma \leq 2$ m, 按照等作用原则分配误差, 则 $D_1 = D_2 = \dots = D_n = \sigma / \sqrt{n}$, 系统中还包括其他参数误差: 测试点像素提取误差、靶标测站距离测量误差、镜头的畸变、像主点的位置

误差、像元尺寸误差。这里设定 $n=5$, 所以相机俯仰角和横滚角对测量误差的影响不能超过 $\Delta D \leq 0.9$ m, 故系统中使用的调平传感器的精度应满足 $\pm 0.1^\circ$ 。

4 测量实验与精度验证

为了验证上述理论分析的可行性, 通过多次实地实验对系统测量精度进行验证, 每次实验均按照系统结构设计的指导原则进行。表 3 是某小型野外测试现场针对两种常用系统布局方式, 对 $\Phi 200$ m 的圆形监测区域进行弹落点坐标测量实验的结果。其中两相机分辨率均为 $1\ 600 \times 800$, 两相机焦距 $f_1 = 24.950$ mm, $f_2 = 24.835$ mm, 横滚角均为 0.08° , 俯仰角分别为 0.06° 和 0.05° 。实验 1 系统布局方式为: 相机 1 与 X_w 轴夹角为 50° , 相机 2 与 X_w 轴夹角为 70° ; 实验 2 布局方式为: 相机 1 与 X_w 轴夹角为 60° , 相机 2 与 X_w 轴夹角为 90° 。两次实验中, 两靶标与 X_w 轴夹角 (B) 均为 $B_1 = 0^\circ, B_2 = 193.9^\circ$ 。选取监测区域中的不同位置利用 TNT 爆破对系统坐标解算精度进行验证。(注: 使用的 GPS 距离测量精度为 ± 2 cm)。

表 3 两次外场实验实测数据及误差统计

Tab. 3 Measured data and error statistics of two field experiments (m)

序号	GPS 测量目标点与中心距离	实验 1				实验 2			
		X _w 测量误差 δX_w	Y _w 测量误差 δY_w	Z _w 测量误差 δZ_w	合成误差 ΔD	X _w 测量误差 δX_w	Y _w 测量误差 δY_w	Z _w 测量误差 δZ_w	合成误差 ΔD
1	0	-0.16	0	-0.07	0.17	0.00	0	0.01	0.01
2	36.658	-0.42	0.59	0.03	0.72	-0.10	0.51	-0.26	0.58
3	47.999	-0.04	-0.75	-0.11	0.76	0.00	-0.68	0.23	0.72
4	48.906	-0.05	-0.72	-0.30	0.78	-0.07	-0.70	-0.18	0.73
5	59.107	0.09	-0.77	-0.41	0.88	0.08	-0.65	-0.11	0.67

本次实验系统的结构设计并不是最优的, 但是由实验数据可知, (1) 系统的调平精度为 0.1° , 相机交会角为 20° 时测量误差 ΔD 的平均值为 0.66 m, 两相机交会角为 30° 时测量误差 ΔD 的平均值为 0.54 m, 相对误差均不超过 0.33% ; (2) 对比实验 1 与实验 2 的结果, 可知实验 2 的系统布局方式优于实验 1, 与 3.2 节仿真结果一致。

综上所述, 该系统已经满足了设计指标要求, 验证了系统结构设计原则的可行性。

5 结 论

为实现远距离大视场复杂地形环境下目标点三维坐标的测量, 本文通过加入目标点的图像纵

向坐标信息,利用最小二乘方法解算目标点的三维坐标。分析了不同的系统布局方式下,两个相机存在一定的横滚角和俯仰角时对空间点三维坐标测量误差的影响,给出了系统结构设计的优化

方法。现场实验及实际的工程应用已经证实该系统结构设计原则能够满足测量精度 $\sigma \leq 2$ m 的要求,具有实用性。

参考文献:

- [1] DI S, LIN H, DU R. Two-dimensional(2D) displacement measurement of moving objects using a new MEMS binocular vision system[J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, 58(10):694-699.
- [2] SUN W, CHEN L, HU B, *et al.*. Binocular vision-based position determination algorithm and system [C]. 2012 *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environment Monitoring (CDCIEM)*, 2012:170-173.
- [3] GUO Y B, YAO YU, DI X G. Research on structural parameter optimization of binocular vision measuring system for parallel mechanism[C]. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2006:1131-1135.
- [4] 赵萍,李永奎,田素博,等. 双目视觉测量系统结构参数理论与试验研究 [J]. *机械设计*, 2013, 30(2): 64-68.
ZHAO P, LI Y K, TIAN S B, *et al.*. Theoretical and experimental research on structural parameters of binocular vision measuring system [J]. *Journal of Machine Design*, 2013, 30(2):64-68. (in Chinese)
- [5] 肖志涛,张文寅,耿磊,等. 双目视觉系统测量精度分析[J]. *光电工程*, 2014, 41(2):6-11.
XIAO ZH T, ZHANG W Y, GENG L, *et al.*. Accuracy analysis of binocular vision system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(2):6-11. (in Chinese)
- [6] 刘美莲,蔡慧敏. 目标落点的视觉测量方法研究 [J]. *应用光学*, 2011, 32(5):949-954.
LIU M L, CAI H M. Vision measurement for impact point [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(5):949-954. (in Chinese)
- [7] 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 [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)
- [8] 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 system with a large field [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2664-2670. (in Chinese)

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、微小型光机电系统方面的研究。E-mail: xdocujw@vip.163.com



卞越新(1991—),女,江苏盐城人,硕士研究生,2013年于长春理工大学获得学士学位,主要从事双目立体视觉测量方面的研究。E-mail: talia_bian@163.com