

DEM 和单相机的弹落点坐标测量方法

王向军^{1,2}, 于 潼^{1,2}, 张佳丽^{1,2}, 刘 峰^{1,2}, 王 越^{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: 针对大视场远距离复杂地形条件下的弹落点坐标测量, 提出一种结合数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的单目视觉测量方法。该方法不依赖目标或场景信息, 只需单幅弹落点图像, 即可快速解算出弹落点的三维坐标。首先, 利用图像二维信息求解出相机与弹落点相连的空间直线; 然后, 根据相机与靶心的相对位置确定直线上的搜索起点和搜索步距, 将直线上的搜索点与数字高程地图进行匹配; 最终求解出弹落点的三维坐标。现场试验结果表明: 相机距监测区域大于 500 m, 监测区域视场宽度为 300 m 时, 相对定位误差优于 0.3%。该方法结构简单、成本低、运算速度快, 适用于复杂地形条件下的弹落点坐标测量。

关键词: 单目视觉; DEM; 三维坐标测量; 大视场

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0917005

Coordinate measurement method of bomb falling point based on DEM and single camera

Wang Xiangjun^{1,2}, Yu Tong^{1,2}, Zhang Jiali^{1,2}, Liu Feng^{1,2}, Wang Yue^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. MOEMS Education Ministry Key Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: According to the bomb falling point coordinate measurement of wide field under complex terrain conditions, a monocular vision measurement method combined with digital elevation model(DEM) was proposed. The object or scene information was not relied on in the method. The 3D coordinate of the bomb falling point can quickly be calculated with only one bomb fall image of single camera in the method. Firstly, the two-dimensional information of the image was used to solve the space linear that camera and the bomb falling point were connected; Then, according to the relative position of the camera and the target to determine the search starting point and step on the line, the line search and digital map of elevation were matched; Finally, the 3D coordinates of bombs were solved. Field test results show that when the distance between the camera and monitoring area is more than 500 m, and the width of the field of view is 300 m, the relative positioning error is better than 0.3%. The advantages of simple structure, low cost, fast operation speed, and is applicable to coordinate measurement of bomb falling point under complicated terrain conditions were proved in the method.

Key words: monocular vision; DEM; 3D coordinate measurement; wide field

收稿日期: 2018-04-05; 修订日期: 2018-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(51575388)

作者简介: 王向军(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 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。Email: xdocujw@vip.163.com

0 引言

单目视觉定位按照所用图像数目不同通常可分为基于单帧图像和基于双帧或多帧图像的定位方法^[1]。参考文献[2]中利用步进相机控制目标移动,通过分析多幅图像与图像放大倍数的关系得到深度信息。参考文献[3]则利用图像处理算法检测图像模糊度,得出深度信息进行目标定位,参考文献[4]根据点、线混合特征进行目标定位。参考文献[5]不移动标志物,但需移动相机从不同方向拍摄目标,通过特征点提取和匹配进行目标定位。综上,参考文献[2-5]均依赖于环境或标志信息,不适合应用于复杂的野外环境。

文中构建的空间坐标测量系统针对野外弹落点的坐标测量,根据现场地形在距监测区域500~1 000 m处架设一台千兆网相机,监测区域宽度为300 m,调整相机角度使监测区域基本处于像面中央。测量系统采用传统的相机标定方法,得到相机的内外参数,在此基础上,文中根据大视场复杂环境下弹落点定位的实际情况,提出一种采用单相机成像与数字高程模型(DEM)内插逼近相结合的方法,可实时获得监测点经纬度坐标。

1 系统测量模型

1.1 单相机成像模型

在实际应用中,首先调整相机使监测区域保持在视野中心,同时采用成像质量较高的单反相机镜头,因此镜头畸变可以忽略不计,小孔成像模型基本可以满足测量要求。根据透视矩阵变换建立世界坐标系、相机坐标系及像素坐标系之间的映射关系,如公式(1)所示:

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: (u, v) 表示监测点像素坐标; (u_0, v_0) 表示主点像素坐标; (x_w, y_w, z_w) 表示监测点在世界坐标系下坐标; dx 和 dy 为像元尺寸; f 为相机焦距; ρ 为常数系数; R 为旋转矩阵; T 为平移矩阵。

在该方法中,将WGS84地心直角坐标系进行平

移,使坐标系原点和相机光心重合,得到的新坐标系作为文中所建立的世界坐标系,则世界坐标系原点就是相机光心,平移矩阵 $T=(0, 0, 0)$ 。已知所有空间点在WGS84地心空间直角坐标系下坐标均可由GPS测得的经纬高 (L, B, H) 转换得到,设空间任一点 Q ,点 Q 在WGS84地心直角坐标系下坐标为 (X, Y, Z) ,相机光心在WGS84地心直角坐标系下坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) ,则点 Q 在世界坐标系下的坐标可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X-X_0 \\ Y-Y_0 \\ Z-Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

旋转矩阵 R 可以分解成3个基本旋转,设旋转过程中,绕 x, y, z 轴的旋转角分别为 α, β, γ ,用3个旋转角表示旋转矩阵 R 如公式(3)所示:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 0 & 1 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.2 测量模型

根据系统实际应用,主点像素坐标 $o(u_0, v_0)$ 在安装前由MATLAB的摄像机标定工具箱Toolbox_calib标定得到,像元尺寸 dx, dy 由相机厂商提供,平移矩阵 $T=(0, 0, 0)$,根据公式(1)~(3),由传统相机标定方法可求得焦距 f 和相机姿态角 (α, β, γ) 。将上述各参数代入公式(1)~(3)得到简化后的世界坐标与像素坐标的转换关系为:

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} \quad (4)$$

矩阵 M 各项分别为:

$$\begin{cases} M_{11} = \alpha_x R_{11} + u_0 R_{31} \\ M_{12} = \alpha_x R_{12} + u_0 R_{32} \\ M_{13} = \alpha_x R_{13} + u_0 R_{33} \\ M_{21} = \alpha_y R_{21} + v_0 R_{31} \\ M_{22} = \alpha_y R_{22} + v_0 R_{32} \\ M_{23} = \alpha_y R_{23} + v_0 R_{33} \\ M_{31} = R_{31} \\ M_{32} = R_{32} \\ M_{33} = R_{33} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\alpha_x=f/dx, \alpha_y=f/dy$ 。化简公式(4)得：

$$\begin{cases} x_w = \frac{[u(M_{23}M_{32}-M_{22}M_{33})+v(M_{12}M_{33}-M_{13}M_{32})+(M_{13}M_{22}-M_{12}M_{23})]z_w}{u(M_{22}M_{31}-M_{21}M_{32})+v(M_{11}M_{32}-M_{12}M_{31})+(M_{12}M_{21}-M_{11}M_{22})} \\ y_w = \frac{[u(M_{23}M_{31}-M_{21}M_{33})+v(M_{11}M_{33}-M_{13}M_{31})+(M_{13}M_{21}-M_{11}M_{23})]z_w}{u(M_{21}M_{32}-M_{22}M_{31})+v(M_{12}M_{31}-M_{11}M_{32})+(M_{11}M_{22}-M_{12}M_{21})} \end{cases} \quad (6)$$

由公式(6)可知,根据任意一点的像素坐标及其在世界坐标系 $o_w-x_wy_wz_w$ 下的 z_w ,即可求得相应的 x_w, y_w 。

基于数字高程模型的定位解算模型如图 1 所示,其中点 A 为靶心,点 B 为弹落点,过点 A 和点 B 的曲线代表坡形地面,则弹落点映射到像平面的直线 OB 与地面的交点 B 即为待求解的弹落点。由于

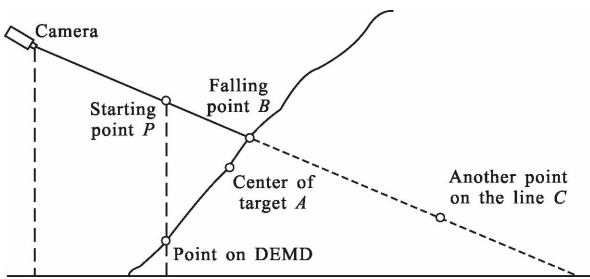


图 1 定位解算模型示意图

Fig.1 Sketch map of positioning calculation model

直线 OB 上所有点均映射到像平面同一点,因此可将直线上的点与地面的数字高程模型进行搜索匹配,最终匹配到真正的弹落点,定位解算步骤如下:

(1) 求解经过相机光心与弹落点的空间直线方程。在世界坐标系 $o_w-x_wy_wz_w$ 下,相机光心为原点 $O(0,0,0)$,设弹落点 B 映射到图像上的坐标为 (u_b, v_b) ,则直线 OB 上所有点在图像上都映射为同一点 (u_b, v_b) 。设该直线上任意一点 $C(x_c, y_c, z_c)$,为简化计算,取 $z_c=500$,将 z_c 代入公式(6)即可求得 x_c, y_c ,则直线 OB 的空间直线方程为:

$$\frac{x_w}{x_c} = \frac{y_w}{y_c} = \frac{z_w}{z_c} \quad (7)$$

(2) 确定搜索起始点 P 的位置。点 A (x_a, y_a, z_a) 为靶心(监测区域中心),为了简化搜索,令 OP 的距离为 OA 距离的一半,则有:

$$\overline{OP} = \frac{1}{2}\overline{OA} = \frac{1}{2}\sqrt{x_a^2 + y_a^2 + z_a^2} \quad (8)$$

由公式(8)所述的直线方程可知,直线 OB 的单位向量为:

$$\vec{e} = \left(\frac{x_c}{\sqrt{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2}}, \frac{y_c}{\sqrt{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2}}, \frac{z_c}{\sqrt{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2}} \right) \quad (9)$$

综上可得搜索起始点 P 的世界坐标为:

$$(x_p, y_p, z_p) = \frac{1}{2}\sqrt{x_a^2 + y_a^2 + z_a^2} * \vec{e} \quad (10)$$

(3) 按照不同方向搜索弹落点。由于搜索起始点可能位于图 1 中 OB 之间或 BC 之间,因此需按照远离相机方向 \overrightarrow{OB} 和靠近相机方向 \overrightarrow{OB} 两个方向进行搜索,两种搜索方法相同,仅搜索方向不同,因此下面只介绍 \overrightarrow{OB} 方向的搜索步骤。

沿直线 \overrightarrow{OB} 进行搜索,搜索步距为数字高程地图最小精度 Δd ,则第 N 次搜索点 P_N 坐标为:

$$(x_N, y_N, z_N) = (x_p, y_p, z_p) + \Delta d * \vec{e} \quad (11)$$

将点 $P_N(x_N, y_N, z_N)$ 转换到 WGS84 地心直角坐标系下的坐标为:

$$(X_N, Y_N, Z_N) = (x_N, y_N, z_N) + (X_0, Y_0, Z_0) \quad (12)$$

将 (X_N, Y_N, Z_N) 代入公式(13)反解出点 P_N 的经纬度坐标 (L_N, B_N, H_N) 。

$$\begin{cases} L = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \\ \tan B = \frac{Z + be_2^2 \sin^3 U}{\sqrt{X^2 + Y^2} - ae_1^2 \cos^3 U} \\ \tan U = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2} * \sqrt{1 - e_1^2}} \\ H = \frac{Z}{\sin B} - N(1 - e_1^2) \end{cases} \quad (13)$$

式中: a 为地球椭球长半轴; b 为椭球短半轴; e_1 为第一偏心率; e_2 为第二偏心率。

如图 1 所示,直线 \overrightarrow{OB} 上每一个搜索点 P 均有一点 D 与之对应,直线 PD 垂直于水平面,点 D 为直线 PD 与地面交点,点 P 与点 D 经纬度相同,高度不同。将 (L_N, B_N) 代入数字高程模型进行搜索匹配,得到点 D_N 的高程 H_{DN} ,首次出现结果 $H_N < H_{DN}$ 时,说明经过了直线与地面的交点,即弹落点 B。此时返回第 N-1 个点,并比较 H_{N-1} 与 H_{DN-1} 的大小。若 $H_{N-1} = H_{DN-1}$,则 $(x_{N-1}, y_{N-1}, z_{N-1})$ 即为弹落点 B 的世界坐标;若 $H_{N-1} > H_{DN-1}$,则说明弹落点 B 位于搜索点 P_{N-1} 和 P_N 之间,需要进行

插值处理,插值过程如图 2 所示。

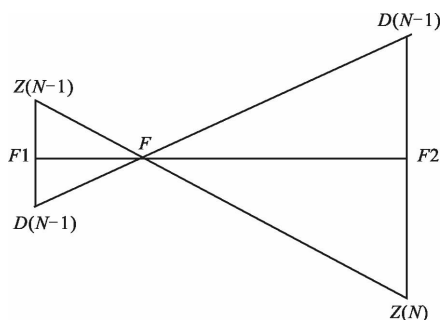


图 2 插值处理示意图

Fig.2 Sketch map of interpolation processing

按照三角形等比例关系,则有:

$$\frac{\overline{Z_{N-1}F}}{\overline{Z_{N-1}D_{N-1}}} = \frac{\overline{Z_{N-1}Z_N}}{\overline{Z_N D_N} + \overline{Z_{N-1}D_{N-1}}} \quad (14)$$

F 点世界坐标为:

$$(x_F, y_F, z_F) = (x_{N-1}, y_{N-1}, z_{N-1}) + \overline{Z_{N-1}F} * \vec{e} \quad (15)$$

则 (x_F, y_F, z_F) 即为弹落点 B 的世界坐标。

(4) 由公式(1)~(3)求得弹落点 B 的世界坐标即为弹落点 B 的三维坐标,弹落点坐标测量完成。

2 误差分析及结果验证

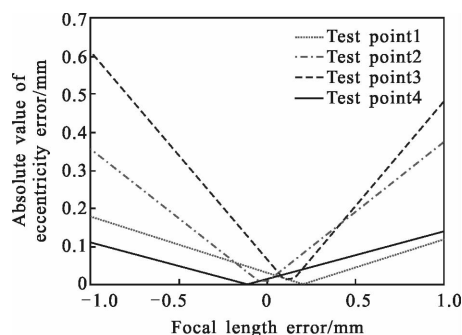
由第 2 节内容可知,在解算过程中,对解算结果产生影响的因素主要包括:相机焦距误差,相机主点像素误差,弹落点像素坐标提取误差。采用控制变量法分别分析上述各误差单独对解算结果的影响,在分析过程中,由于文中应用于弹落点的定位测量,因此将偏心距(弹落点与靶心的空间距离)作为解算精度的评价依据,通过比较各参数对偏心距解算的影响进行误差分析,对文中提出的解算模型进行评价。现场使用的相机分辨率为 1360×1024,单反镜头焦距在 30~70 mm 之间变化,相机视野中心与监测区域中心基本重合。为了简化分析过程,结合现场实际情况,文中设定仿真模型,取焦距 $f=30$ mm,相机距监测中心 800 m,监测视场宽度约为 300 m,利用 MATLAB 分别相机焦距误差、相机主点像素误差、弹落点像素坐标误差的影响进行分析。

2.1 解算模型误差分析

2.1.1 相机焦距误差

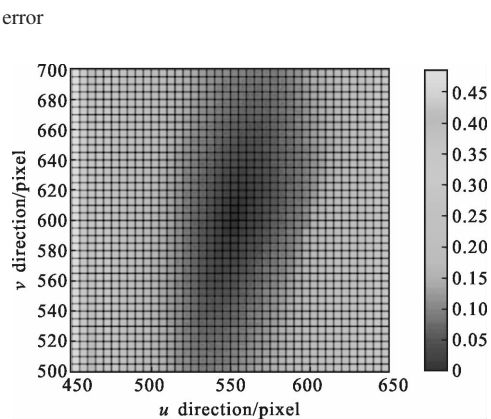
由文中可知,相机焦距 f 由标定得到,现场的测

量结果显示,标定得到的焦距会与实际的真实值相差正负 1 mm。为分析焦距误差的变化对偏心距解算影响的规律,将监测区域均分为 4 个象限,选择 4 个象限的中心点作为测试点,4 个象限中心点的像素坐标分别为 (600,550)、(600,650)、(500,650)、(500,550),利用 MATLAB 分别仿真相机焦距误差在 1 mm 内的变化对 4 个测试点偏心距解算的影响,结果如图 3(a)所示。



(a) 测试点的偏心距误差随焦距误差的变化

(a) Eccentricity error of the test point varies with the focal length error



(b) 监测区域偏心距误差分布

(b) Monitoring the error distribution of regional eccentricity

图 3 焦距误差分析结果

Fig.3 Results of focal length error analysis

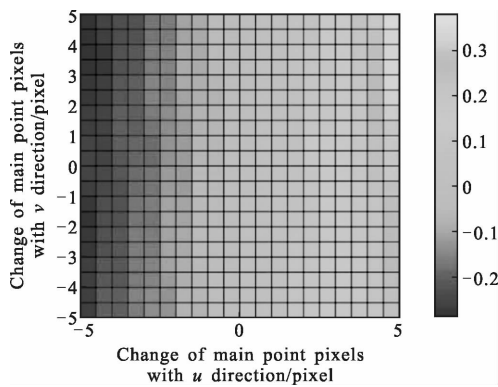
由图 3(a)可知,各测试点的偏心距误差绝对值基本关于焦距误差为 0 的位置对称,即随着焦距误差绝对值的增大,各测试点的偏心距误差绝对值均随之增大。因此,设定焦距误差为最大值 1 mm,仿真分析整个监测区域的偏心距误差分布,如图 3(b)所示。

图 3(b)显示出偏心距误差最大位于监测区域边缘,且与监测中心距离越远,偏心距误差越大。整个监测区域内,偏心距误差绝对值最大为 0.5 m,相对

误差优于 0.16%。

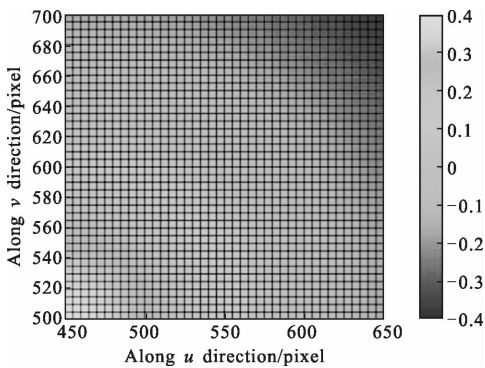
2.1.2 相机主点像素误差

在现场测试之前,需要提前测得到相机的主点坐标,但是在现场安装和调整的过程中,相机主点坐标会有 ± 5 个像素的变化,从而产生误差。利用 MATLAB 分析主点像素误差结果如图 4 所示,其中图 4(a)表示监测区域边缘最远角点的偏心距随主点像素坐标误差的变化,图 4(b)表示主点像素坐标误差固定为 5 个像素时,主点像素坐标误差导致的监测区域偏心距误差分布。



(a) 偏心距误差随主点像素坐标误差变化分布

(a) Eccentricity error varies with the pixel coordinate error of the primary point



(b) 监测区域偏心距误差分布

(b) Monitoring the error distribution of regional eccentricity

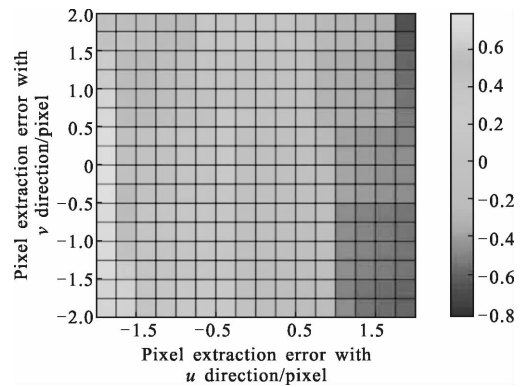
图 4 主点像素坐标误差分析结果

Fig.4 Pixel coordinate error analysis results of main points

图 4(a)的仿真结果显示,随着主点像素坐标误差增大,偏心距误差也随之增大。图 4(b)显示偏心距误差最大值为 0.4 m,存在于监测区域边缘,监测区域偏心距相对误差不大于 0.15%。

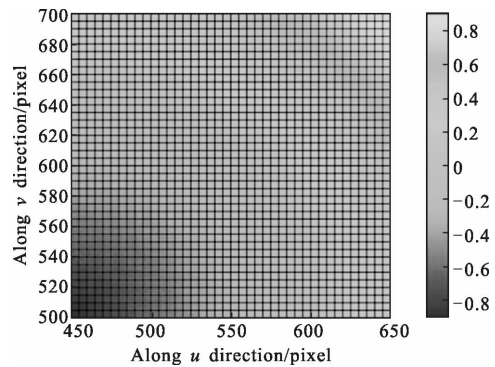
2.1.3 解算像素坐标误差

在解算偏心距过程中,需要在图像上提取弹落点的像素坐标,现场采用人工读取像素坐标的方式,可能会造成像素提取的误差,一般像素坐标误差在正负两个像素以内,对像素坐标误差进行仿真分析,结果如图 5 所示。其中图 5(a)表示监测区域边缘最远角点的偏心距随提取的像素坐标误差的变化,图 5(b)表示提取的像素坐标误差固定为 2 个像素时,像素坐标误差导致的监测区域偏心距误差分布。



(a) 偏心距误差随像素坐标提取误差

(a) Error of eccentricity error is extracted with pixel coordinate



(b) 监测区域偏心距误差分布

(b) Monitoring the error distribution of regional eccentricity

图 5 像素坐标提取误差分析结果

Fig.5 Pixel coordinate extraction error analysis results

从图 5(a)所示的仿真结果看,像素提取误差为 ± 2 pixel时,偏心距误差绝对值不大于 0.8m。图 5(b)显示距监测区域中心越远,偏心距误差越大,偏心距误差最大为 0.9 m,相对误差小于 0.6%。

2.2 误差合成

由 2.1 节可知,由相机焦距误差、相机主点像素

误差和解算像素坐标误差单独引起的监测区域各点偏心距极限误差分别为 δ_1 、 δ_2 和 δ_3 ，并且有 $|\delta_1| \leq 0.5\text{m}$ ， $|\delta_2| \leq 0.4\text{m}$ ， $|\delta_3| \leq 0.9\text{m}$ ，由于各误差均为随机误差，且互相之间线性无关，则由误差合成原理可知 3 个误差导致的偏心距总误差 $\delta_w^2 \leq \delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2$ ，即 $\delta_w \leq 1.1\text{m}$ 。

2.3 现场测试结果

为验证文中提出的弹落点坐标测量方法的可行性和可靠性，在现场选择 3 个不同的靶区进行实验验证，每个靶区地形不同，其用于测量的相机的焦距、相机距靶心的距离均不相同，各相机距其监测区域中心的距离在 500~1 200 m 范围内。现场监测相机选用嘉恒图像千兆网工业相机。弹落点图像如图 6 所示，针对 3 个不同靶区，以 GPS 直接测量弹落点到靶心的空间直线距离作为真值，文中解算方法的定位解算结果真值对比如表 1 所示。由表 1 可知，使用文中提出的弹落点坐标测量方法进行定位解算，监测区域内偏心距误差绝对值最大为 0.56 m，相对误差优于 0.3%，验证了文中方法的准确性。



图 6 现场弹落点图像

Fig.6 Image of the falling point at the scene

表 1 现场实测数据及误差(单位:m)

Tab.1 Field measurement data and error (Unit:m)

Distance from camera to target	Offset measurements	Real offset	Offset error	Relative error
631.99	11.82	11.80	0.02	0.17%
631.99	40.37	40.32	0.05	0.12%
631.99	141.48	141.81	-0.33	0.23%
573.43	26.58	26.55	0.03	0.11%
573.43	73.92	73.71	0.21	0.28%
573.43	94.56	94.75	-0.19	0.20%
1 209.34	65.88	66.01	-0.13	0.20%
1 209.34	101.35	101.66	-0.31	0.30%

3 结论

文中提出一种结合 DEM 的单目视觉测量方法，该方法利用摄像机成像模型与数字高程模型内插逼近的方法得到弹落点的深度信息，只需要单台相机即可对弹落点进行定位测量，并且不需要移动相机位置或者对多幅图像进行处理，具有操作方法简单、运算速度快、适用范围广的优点。文中根据现场情况对所提出的定位测量方法进行了仿真分析，并在现场多个靶区进行试验验证，现场测试数据表明，在视场宽度为 300 m 的监测范围内，偏心距测量相对误差优于 0.3%，证实文中提出的定位解算方法满足弹落点坐标解算要求。

参考文献:

- [1] Scaramuzza D, Fraundorfer F, Siegwart R. Real-time monocular visual odometry for on-road vehicles with 1-point RANSAC [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE Press, 2009: 488-494.
- [2] Zhang Chunjin, Ji Shujuan, Fan Xiaoning. Study on distance measurement based on monocular vision technique [J]. *Journal of Shandong University of Science & Technology*, 2007, 26(4): 65-68. (in Chinese)
张纯金, 纪淑娟, 范晓宁. 基于单目视觉的距离测量研究 [J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 26(4): 65-68.
- [3] Huang Guiping, Li Guangyun, Wang Baofeng, et al. Evolution for monocular vision measurement [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, 25(4): 314-317. (in Chinese)
- [4] Liu Chang, Zhu Feng, Xia Renbo. Monocular pose determination from coplanar two points and one line features [J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29 (8): 3145-3147. (in Chinese)
刘昶, 朱枫, 夏仁波. 基于共面二点一线特征的单目视觉定位[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(8): 3145-3147.
- [5] Cheng Qing, Wei Lisheng, Gan Quan. Research of target positioning algorithm based on monocular vision[J]. *Journal of Anhui Polytechnic University*, 2017, 32(2): 37-42. (in Chinese)
程庆, 魏利胜, 甘泉. 基于单目视觉的目标定位算法研究 [J]. *安徽工程大学学报*, 2017(2): 37-42.