

文章编号 1004-924X(2017)07-1961-07

# 野外大视场单相机空间坐标测量系统的快速标定

王向军<sup>1,2\*</sup>, 邓子贤<sup>1,2</sup>, 曹雨<sup>1,2</sup>, 刘峰<sup>1,2</sup>

- (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:**针对靶场现场监测范围大, 相机焦距不固定, 相机空间位置及角度各不相同的情况, 为实现对弹落点空间坐标位置的高精度自动测量, 提出了一种在野外大视场环境下使用的基于单相机空间坐标测量系统的快速标定方法。首先, 在小孔成像模型的基础上, 通过 GPS 测量获得视场内两个标定点及相机在大地坐标系中的坐标; 然后读取标定点的像素坐标, 根据对角相等及最小二乘法实现焦距与旋转矩阵的分步标定; 最后在保证标定精度前提下, 略去主点的标定过程, 确定相机主点为理想主点位置。实验结果表明, 在测试距离 1 km 以外, 对视场宽度为 200 m 的区域进行监测时, 校验点相对定位误差低于 0.25%。该相机标定方法不需要高精度靶标, 操作简单, 适用于野外大视场环境下单相机空间坐标测量系统的快速标定。

**关键词:**单目视觉; 摄像机标定; 快速标定; 野外大视场

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172507.1961

## Fast calibration for single camera space coordinate measuring system with large field of view

WANG Xiang-Jun<sup>1,2\*</sup>, DENG Zi-xian<sup>1,2</sup>, CAO Yu<sup>1,2</sup>, LIU Feng<sup>1,2</sup>

- (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 order to realize the high-precision and automatic measurement of space coordinate position for the bomb falling point in the wildly large field of view, the space coordinate measurement system of the single camera was established. Aiming at the large scope of on-site monitoring for shooting range, flexible focal distance of camera, different spatial position and angle of camera, a fast calibration method which was used in the wildly large field of view was proposed. Firstly, on the basis of the pinhole imaging model, taking advantages of the GPS measurement, two calibration points within the field of view and the coordinate of the camera in the geodetic coordinate system was obtained; and the pixel coordinate of calibration points were read; according to the equality of opposite angles and the least square method, the sub-step calibration of the focal distance and the rotation

收稿日期: 2016-08-12; 修订日期: 2016-10-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51575388)

matrix was realized. On the premise of ensuring the calibration accuracy, the calibration process of the principal point was omitted; and the principle point of the camera was determined to be the ideal position for the principle point. The experimental result shows that beyond 1km of testing distance, at the time of monitoring the area with 200m width of field, the relative calibration error of the check point is lower than 0.25%. The camera calibration method does not need high-precision target, because it is easy to be operated and is applicable to fast calibration for the space coordinate measurement system of the single camera under the environment of the wildly large field of view.

**Key words:** monocular vision; camera calibration; fast calibration; large field of view

## 1 引言

单目视觉相比于双目视觉具有结构简单、成本低、实时性强等特点,广泛应用于机器人、无人机、自动检测设备等领域<sup>[1-4]</sup>。为了获得高精度的测量结果,对相机进行合理的标定是视觉测量系统的关键。目前标定方法中传统标定方法与自标定方法得到了最广泛的研究。传统标定方法事先选取一个标准参照物,通过建立已知标准参照物中的数学关系来求解摄像机参数<sup>[5-7]</sup>。自标定的方法则是利用多幅图像之间的自身关系来求解摄像机参数<sup>[8-9]</sup>。

现有大视场的标定方法一般使用多个靶标或要求较多的特征点<sup>[10-13]</sup>,在复杂地形的应用环境下无法满足其使用需求。文献[14]中使用的方法虽简单易行,但仅适用于视野开阔、监测视场无明显变化的情形。本文构建的单相机空间坐标测量系统由多个 CCD 相机组成,相机距

$$Z_c \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: $(u_0, v_0)$ 为主点像素坐标; $d_x, d_y$ 为像素方向上的物理尺寸; $f$ 为相机焦距; $(u, v)$ 为物体在图像坐标系下坐标; $X_w, Y_w, Z_w$ 为物体在世界坐标系下坐标; $\mathbf{R}$ 为正交旋转矩阵,表示相机坐标系与世界坐标系的旋转关系; $\mathbf{T}$ 为平移矩阵,表示相机坐标系与世界坐标系的平移关系。

本系统选取的世界坐标系的坐标轴方向与 WGS84 地心空间直角坐标系坐标轴方向一致,选择相机光心  $o$  为世界坐标系原点,则式(1)中物体

离监测区域中心大于 1 km,监测区域宽度大于 200 m,适用于地形起伏多变的山区环境。在保证测量精度的前提下,本文提出一种基于 GPS 的快速标定方法,通过获得视场中任意两个已知标定点及相机在大地坐标系中的坐标,即可完成相机内参与外参的标定过程。本文还通过 Matlab 对此模型进行了误差分析,根据分析结果进一步简化了标定过程。最后结合现场的实测数据,对该方法的精度进行了验证。

## 2 相机标定原理

### 2.1 相机成像模型

考虑到现场环境下监测距离远大于相机焦距,同时使用单反相机长焦镜头成像,且成像区域集中在视场中心进而镜头畸变可忽略不计等情况,在此选择小孔成像模型作为理想的成像模型。利用透射矩阵变换建立世界坐标系与像素坐标系之间的线性变换关系<sup>[15]</sup>,如式(1)所示:

在世界坐标系下坐标与平移矩阵可分别表示为:

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{T} = (0, 0, 0), \quad (3)$$

其中 $(X, Y, Z)$ 为物体在 WGS84 地心空间直角坐标系下坐标; $(X_o, Y_o, Z_o)$ 为相机光心在 WGS84 地心空间直角坐标系下坐标,由大地经纬度 $(L, B)$ 和大地高 $(H)$ 转换得到<sup>[16-17]</sup>。将式(2)和式(3)带入式(1)化简可得:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x \mathbf{R}_{11} + u_0 \mathbf{R}_{31} & \alpha_x \mathbf{R}_{12} + u_0 \mathbf{R}_{32} & \alpha_x \mathbf{R}_{13} + u_0 \mathbf{R}_{33} \\ \alpha_y \mathbf{R}_{21} + v_0 \mathbf{R}_{31} & \alpha_y \mathbf{R}_{22} + v_0 \mathbf{R}_{32} & \alpha_y \mathbf{R}_{23} + v_0 \mathbf{R}_{33} \\ \mathbf{R}_{31} & \mathbf{R}_{32} & \mathbf{R}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中:  $\alpha_x = f/d_x, \alpha_y = f/d_y$ 。旋转矩阵  $\mathbf{R}$  可以分解成绕  $x$  轴的旋转角  $w$ , 绕  $y$  轴的旋转角  $p$  和绕  $z$  轴的旋转角  $k$ , 用三个旋转角表示旋转矩阵  $\mathbf{R}$  各项如式(5)。

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{11} = \cos p \cos k \\ \mathbf{R}_{21} = \sin w \sin p \cos k - \cos w \sin k \\ \mathbf{R}_{31} = \cos w \sin p \cos k + \sin w \sin k \\ \mathbf{R}_{12} = \cos p \sin k \\ \mathbf{R}_{22} = \sin w \sin p \sin k + \cos w \cos k. \\ \mathbf{R}_{32} = \cos w \sin p \sin k - \sin w \cos k \\ \mathbf{R}_{13} = -\sin p \\ \mathbf{R}_{23} = \sin w \cos p \\ \mathbf{R}_{33} = \cos w \cos p \end{cases} \quad (5)$$

经过上述分析可以看出,相机的未定参数包括相机内部参数主点像素坐标  $(u_0, v_0)$  和相机焦距  $f$ , 以及相机的外部参数旋转角  $(w, p, k)$ 。在保证标定精度的前提下,根据系统应用环境将相机主点确定为理想主点位置,因此本文算法的标定参数为焦距  $f$  与旋转角度  $(w, p, k)$ 。

### 2.2 相机焦距与旋转矩阵的快速标定

图 1 给出了标定原理示意图,视场中两个标定分别为  $M_1(x_1, y_1, z_1)$  和  $M_2(x_2, y_2, z_2)$ , 相

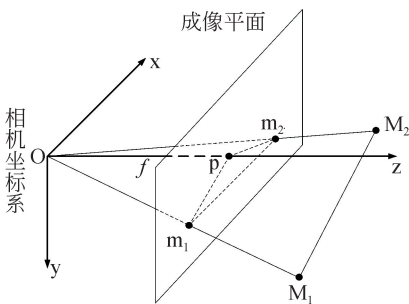


图 1 标定原理示意图

Fig. 1 Calibration principle schematic diagram

$$\begin{cases} (\mathbf{R}_{31} X_w + \mathbf{R}_{32} Y_w + \mathbf{R}_{33} Z_w) u = (\alpha_x \mathbf{R}_{11} + u_0 \mathbf{R}_{31}) X_w + (\alpha_x \mathbf{R}_{12} + u_0 \mathbf{R}_{32}) Y_w + (\alpha_x \mathbf{R}_{13} + u_0 \mathbf{R}_{33}) Z_w \\ (\mathbf{R}_{31} X_w + \mathbf{R}_{32} Y_w + \mathbf{R}_{33} Z_w) v = (\alpha_y \mathbf{R}_{21} + v_0 \mathbf{R}_{31}) X_w + (\alpha_y \mathbf{R}_{22} + v_0 \mathbf{R}_{32}) Y_w + (\alpha_y \mathbf{R}_{23} + v_0 \mathbf{R}_{33}) Z_w \end{cases} \quad (15)$$

将旋转矩阵带入式(15)后,该式中仅包含旋转角  $(w, p, k)$  3 个未知数,将两个标定点的世界坐标与像素坐标分别代入可以得到四个方程,利用非线性最小二乘法即可求得  $(w, p, k)$  的最优解。

机光心为  $o(0, 0, 0)$ 。两个标定点的空间坐标可由 GPS 基站直接读出;两个标定投影到成像平面后分别为  $m_1(u_1, v_1)$  和  $m_2(u_2, v_2)$ , 像素坐标由图像直接读出;相机主点为  $p(u_0, v_0)$ , 像素坐标由实验室提前测量得到。

如图 1 所示,在三角形  $m_1 o m_2$  中,根据余弦公式可知:

$$\cos(\angle m_1 o m_2) = \frac{om_1^2 + om_2^2 - m_1 m_2^2}{2 om_1 om_2}. \quad (6)$$

又已知光轴  $op$  垂直于成像平面,则有:

$$om_1 = \sqrt{f^2 + pm_1^2}, om_2 = \sqrt{f^2 + pm_2^2}. \quad (7)$$

根据标定点的像素坐标及像面的物理尺寸,可求出:

$$m_1 m_2 = \sqrt{(u_2 - u_1)^2 d_x^2 + (v_2 - v_1)^2 d_y^2}, \quad (8)$$

$$pm_1 = \sqrt{(u_1 - u_0)^2 d_x^2 + (v_1 - v_0)^2 d_y^2}, \quad (9)$$

$$pm_2 = \sqrt{(u_2 - u_0)^2 d_x^2 + (v_2 - v_0)^2 d_y^2}. \quad (10)$$

将式(7)~式(10)带入式(6)中,即可将  $\cos(\angle m_1 o m_2)$  表示出来。同理可得:

$$\cos(\angle M_1 o M_2) = \frac{oM_1^2 + oM_2^2 - M_1 M_2^2}{2 oM_1 oM_2}, \quad (11)$$

其中:

$$M_1 M_2 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}. \quad (12)$$

又因为相机光心  $o$  同时也是世界坐标系原点,所以则有:

$$oM_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}, \quad (13)$$

$$oM_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}. \quad (14)$$

根据空间几何关系可知:

$$\cos(\angle m_1 O m_2) = \cos(\angle M_1 O M_2).$$

将式(6)与式(11)联立即可直接求出焦距  $f$ 。

解得焦距后,将其带入化简后的式(4),如下:

至此,相机标定中所有内外参均标定完成。该方法只需通过 GPS 现场测量相机光心所在位置、视场内两个标定位置以及标定点的图像坐标即可完成标定。

### 3 标定误差分析及结果验证

由第二节内容可知,在标定过程中,主点像素坐标误差、相机光心位置误差、标定点像素坐标误差和标定点位置误差都会对标定结果产生影响。在对这些参数所造成的影响进行误差分析的过程中,将待测点与监测中心的偏心距作为理想值,通过比较各参数对偏心距的影响进行定位误差分析,最终对本文提出的标定方法进行评价。

实验现场使用像素为  $1\ 360 \times 1\ 024$  的 CCD 相机,镜头为焦距在  $50 \sim 70\text{ mm}$  之间的变焦镜头。为简化分析过程,取焦距  $f=70\text{ mm}$ ,相机与监测中心距离  $L=1.5\text{ km}$ ,监测视场宽度约为  $200\text{ m}$ ,对以上各参数的影响进行分析。

#### 3.1 标定误差分析

##### 3.1.1 主点像素坐标误差

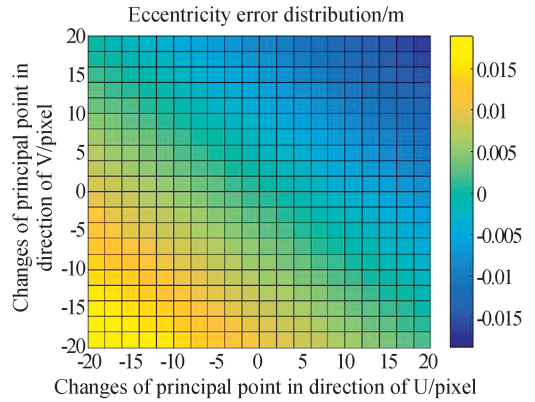
在现场标定前,需要提前测量相机主点的像素坐标,但随着焦距的变化,相机主点像素坐标会与预测值产生偏差。现场的测量结果显示,主点坐标会在正负 20 个像素以内变化,利用 Matlab 分析其误差结果如图 2 所示,其中(a)图表示距离监测中心最远角点的偏心距误差随主点像素坐标误差的变化,(b)图表示主点像素坐标误差固定为 20 个像素时,监测视场内各点由主点像素误差引起的偏心距误差分布结果。

由图 2(a)可以看出,偏心距的误差随主点误差的增加而增加,图 2(b)显示偏心距最大误差存在于监测视场角点处,绝对误差低于  $0.025\text{ m}$ ,相对定位误差不超过  $0.015\%$ ,主点像素坐标的变化对标定结果的影响可以忽略不计,在现场标定时直接使用理想主点像素坐标进行后续的标定计算。

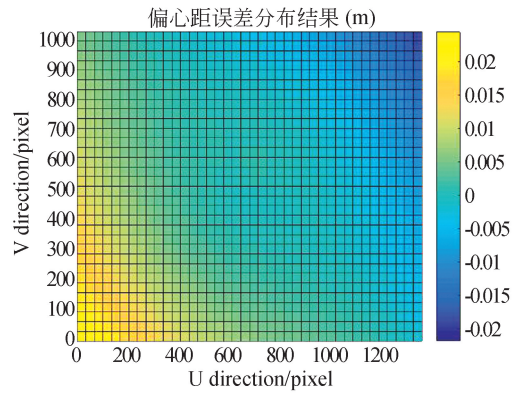
##### 3.1.2 相机光心位置误差

相机光心位置是由 GPS 测量得到的,现场测量时,将设备置于相机正上方进行测量,在得到的 GPS 数据基础上减去高度差。这种测量方法会产生厘米级的误差,在此利用 Matlab 分析相机沿坐标轴三个方向同时偏差正负  $10\text{ cm}$  时对偏心距测量结果的影响,如图 3 所示。

由图 3 可知,当相机位置沿三个坐标轴同步变化正负  $10\text{ cm}$  时,偏心距误差小于  $0.15\text{ m}$ ,相



(a) 偏心距误差随主点像素误差变化分布  
(a) Eccentricity error distribution with principal point pixel error



(b) 监测区域偏心距误差分布  
(b) Eccentricity error distribution in monitoring area

图 2 主点坐标像素误差分析结果

Fig. 2 Results of principal point coordinate pixel error analysis

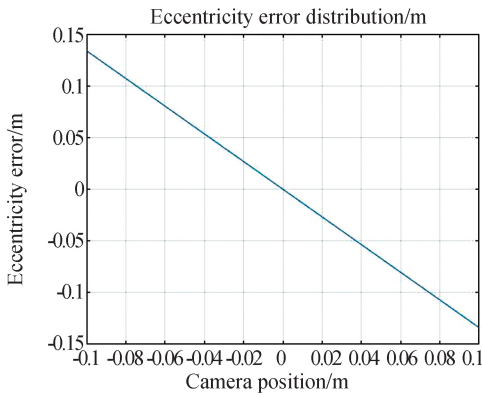
对定位误差不超过  $0.1\%$ 。

##### 3.1.3 标定点像素坐标误差

在标定过程中,需要在相机图像上提取标定点的像素坐标,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,一般像素误差可控制在两个像素以内,在这里对像素提取误差正负两个像素进行分析,Matlab 误差分析结果如图 4 所示。

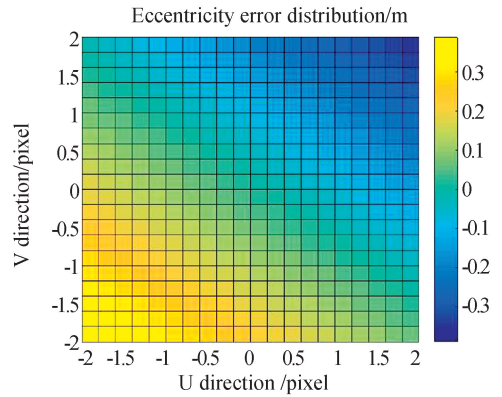
从仿真结果可以看出,相比于前两项,由像素提取误差引起的偏心距误差较大,但误差最大处仍低于  $0.4\text{ m}$ ,相对定位误差不超过  $0.2\%$ 。

除此之外,标定点世界坐标位置由 GPS 直接测量得到,在现场使用的南方测绘公司 S86 灵锐系列双频实时差分定位(RTK)的 GPS 测量



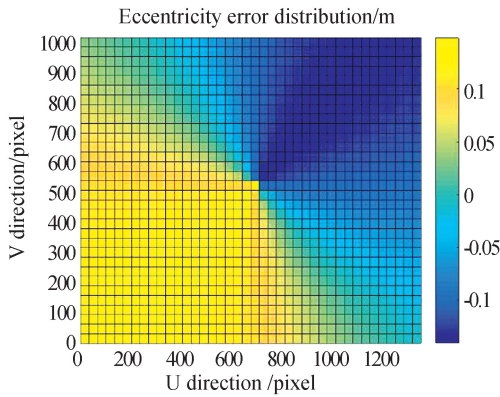
(a) 偏心距误差随相机光心位置误差变化分布

(a) Eccentricity error distribution with camera optical center position error



(a) 偏心距误差随标定像素坐标误差变化分布

(a) Eccentricity error distribution with calibration point pixel coordinates error

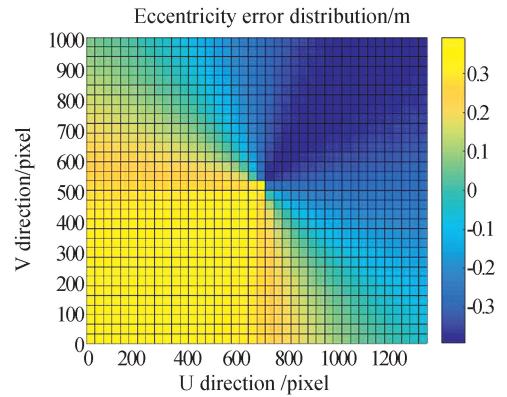


(b) 监测区域偏心距误差分布

(b) Eccentricity error distribution in monitoring area

图 3 相机光心位置误差分析结果

Fig. 3 Results of camera optical center position error analysis



(b) 监测区域偏心距误差分布

(b) Eccentricity error distribution in monitoring area

图 4 标定像素坐标误差分析结果

Fig. 4 Results of calibration point pixel coordinates error analysis

接收机,在静态测量情况下,其平面定位误差不超过 5 mm,RTK 平面定位误差不超过 1 cm,由此引起的坐标定位误差不超过 0.01 m,在此忽略不计。

综上所述可以看出,该快速标定方法在各误差影响因素允许误差范围内能够满足单相机空间坐标测量系统的精度要求。

### 3.2 现场测试实验结果

经过上述仿真误差分析验证了快速标定方法的可行性后,现场通过多次实验对该标定方法的精度进行了进一步验证。实验现场采集了多个相机的测量结果,每个相机焦距、监测中心点距离各不相同,解算结果与 GPS 测量结果比较如表 1 所示。

表 1 现场实测数据及误差

Tab. 1 Experiment data and error (m)

序号	焦距 标定 结果	监测 中心 距离	快速标定 方法测量 结果	GPS 测 量结果	测量 误差
1	0.052 6	1 209.3	1.7	1.7	0
2	0.052 6	1 209.3	6.2	6.4	-0.2
3	0.052 6	1 209.3	11.5	11.6	-0.1
4	0.052 6	1 209.3	20.2	20.5	-0.3
5	0.052 6	1 209.3	38.2	38.0	0.2
6	0.052 6	1 209.3	61.5	61.7	-0.2
7	0.069 9	1 596.7	16.9	16.8	0.1

续表

8	0.069 9	1 596.7	47.5	47.7	-0.2
9	0.069 9	1 596.7	86.6	87.0	-0.4
10	0.069 9	1 596.7	118.4	118.7	-0.3
11	0.069 9	1 596.7	151.7	151.3	0.4
12	0.069 9	1 596.7	248.2	247.8	0.4

由表 1 可知,在使用本文提出的快速标定方法的情况下,监测区域内偏心距绝对误差不超过 0.5 m,相对误差不超过量程的 0.25%,快速标定方法的正确性及准确度均得到了验证。

#### 参考文献:

- [1] 赵连军. 基于目标特征的单目视觉位置姿态测量技术研究[D]. 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2014.  
ZHAO L J. *Research on Mono-vision Pose Measurement based on Features of Target* [D]. Institute of Optics and Electronics Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [2] 蔡鸣, 孙秀霞, 徐嵩, 等. 视觉技术辅助的无人机自主着陆组合导航研究[J]. 应用光学, 2015 (3): 343-350.  
CAI M, SUN X X, XU S, *et al.*. Vision/INS integrated navigation for UAV autonomous landing [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015 (3): 343-350. (in Chinese)
- [3] 苑晶, 刘钢墩, 孙沁璇. 激光与单目视觉融合的移动机器人运动目标跟踪[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(2): 196-204.  
YUAN J, LIU G D, SUN Q X. Moving target tracking of mobile robots with fusion of laser scanner and monocular camera [J]. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(2): 196-204. (in Chinese)
- [4] 马晓东, 蒋明, 柯善浩, 等. 基于 opencv 的单目视觉测量系统的研究[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(12): 3943-3945.  
MA X D, JIANG M, KE SH H, *et al.*. Research on Mono-cular Vision Measurement System Based on OpenCV [J]. *Computer Measurement & Control*, 2015, 23(12): 3943-3945. (in Chinese)
- [5] Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C]//*Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Rec-*

## 4 结 论

为了实现对野外大视场中单相机空间坐标测量系统的快速标定,本文对模型进行了分析,将标定参数简化到四个,整个标定过程仅需对相机及空间中两个已知点的空间坐标进行测量。此标定方法操作简单,仿真结果与现场的实验数据证实了该方法满足标定及解算精度的要求,视场范围内各点相对定位误差均不超过测量满量程的 0.25%,适用于野外大视场环境下单相机空间坐标测量系统的快速标定。

- ognition*, 1986. 1986.
- [6] Tsai R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323-344.
- [7] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2000, 22 ( 11 ): 1330-1334.
- [8] Maybank S J, Faugeras O D. A theory of self-calibration of a moving camera[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1992, 8(2): 123-151.
- [9] Faugeras O D, Luong Q T, Maybank S J. Camera self-calibration: Theory and experiments[C]//*European conference on computer vision. Springer Berlin Heidelberg*, 1992: 321-334.
- [10] 蒯杨柳, 文贡坚, 回丙伟, 等. 利用多个小棋盘的大视场相机标定方法[J]. 测绘通报, (7): 39-43, 54.  
Kuai Y L, Wen G J, Hui B W, *et al.*. Large-scale Scene Calibration Method Utilizing Multiple Chessboards [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (7): 39-43, 54. (in Chinese)
- [11] 杨宁, 霍炬, 杨明, 等. 基于小尺寸靶标组合的大视场摄像机标定方法[J]. 光电子. 激光, 2013, 8: 024.  
YANG N, HUO J, YANG M, *et al.*. A calibration method of camera with large field-of-view based on spliced small targets [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, 8: 024. (in Chinese)
- [12] 胡浩, 梁晋, 唐正宗, 等. 大视场多像机视频测量

- 系统的全局标定[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 369-378.
- HU H, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Global calibration for multi-camera videogrammetric system with large-scale field-of-view [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 369-378. (in Chinese)
- [13] 孙军华, 吴子彦, 刘谦哲, 等. 大视场双目视觉传感器的现场标定[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 633.
- SUN J H, WU Z Y, LIU Q ZH, *et al.*. Field calibration of stereo vision sensor with large FOV [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 633. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 舒娜. 摄像机标定方法的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- SHU N. *Research on camera calibration method* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [16] 祁立学, 张萍, 杨玲. 地心直角坐标到大地坐标常用转换算法的分析与比较[J]. *战术导弹技术*, 2006(2): 37-41.
- QI L X, ZHANG P, YANG L. The Analysis and Comparison of Transformation Methods from Earth Rectangular Coordinate to Geodetic Coordinate [J]. *Tactical Missile Technology*, 2006(2): 37-41. (in Chinese)
- [17] 崔永俊. 空间直角坐标与大地坐标之间的变换方法研究[J]. *华北工学院学报*, 2003, 24(1): 73-75.
- CUI Y J. Study on the Transformation Methods Between Rectangular Space Coordinate and Geodetic Coordinate [J]. *Journal of North China Institute of Technology*, 2003, 24(1): 73-75. (in Chinese)

## 作者简介:



邓子贤(1992—),男,内蒙古满洲里人,博士研究生,2009年于天津大学获得工学与管理学学士学位,现从事计算机视觉及影像测量方面的研究。E-mail: dengzixian1992@163.com

## 导师简介:



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: xdocujw@vip.163.com

(本栏目编辑:秦 思)