

基于旋转正交性的测绘相机内方位元素标定方法^{*}

远国勤, 丁亚林, 惠守文, 李友一, 李延伟, 赵嘉鑫

(中国科学院航空光学成像与测量重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要: 为了消除实验室内对测绘相机进行内方位元素标定过程中精密转台对标定精度的影响, 提出了基于旋转矩阵正交性的内方位元素标定方法。首先, 根据相机成像模型中的坐标变换分析了旋转矩阵的正交性, 接着, 详细介绍了基于旋转矩阵正交性的内方位元素的标定方法, 并对该标定过程中涉及的参变量矩阵进行了分析计算, 给出该标定方法具体的试验步骤。最后, 采用 Monte-Carlo 算法给出对该标定算法的精度进行了分析。实验室内实际标定结果表明: 采用该标定方法, 在不需精密转台的情况下, 内方位元素中主点的标定精度为 $3\ \mu\text{m}$, 主距的标定精度为 $5\ \mu\text{m}$, 可以满足测绘相机内方位元素的标定精度要求。

关键词: 内方位元素; 成像模型; 旋转矩阵正交性; 测绘相机

中图分类号: V556.5 TD172.1 TP394.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.30 420.20

Calibration method of inner orientation parameters for mapping camera based on orthogonality of orientation matrix

Yuan Guoqin, Ding Yalin, Hui Shouwen, Li Youyi, Li Yanwei, Zhao Jiaxin

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to eliminate the influence of precise rotating platform on the camera calibration accuracy in the inner orientation parameter calibration process of mapping camera in laboratory, an inner orientation parameter calibration method based on the orthogonality of orientation matrix is proposed. Firstly, the orthogonality of the orientation matrix is analyzed according to the coordinate transformation in the camera imaging model. Then, the inner orientation parameter calibration method based on the orthogonality of orientation matrix is described in detail. The variable matrices involved in the calibration process are analyzed and calculated, and the calibration steps are given as well. The accuracy of the proposed calibration method is analyzed using Monte-Carlo algorithm. The actual calibration results show that the principal point accuracy and principal distance accuracy obtained with the proposed method can reach to $3\ \mu\text{m}$ and $5\ \mu\text{m}$ respectively in laboratory environment without using the precise rotating platform, which can meet the inner orientation parameter calibration accuracy requirement of mapping camera.

Keywords: inner orientation parameter; imaging model; orthogonality of orientation matrix; mapping camera

1 引言

遥感测绘相机的内方位元素标定在航空测绘、三维重建、摄影测量、计算机视觉等领域具有重要的作用^[1-5]。精确标定测绘相机主点、主距等内方位元素从而校正像点至正确成像位置^[6-8], 是实现高精度测绘的一个必要条件, 具有测绘

作用的相机在使用前必须经过内方位元素标定^[9-10]。

精密测角法是实验室内常用的一种精确标定航空测绘相机内方位元素的方法。标定原理为物方点光源通过星点板、平行光管、光学镜头后成像在遥感相机焦平面中, 通过高精度精密转台改变并记录平行光线角度, 在 CCD 焦平面中读取并记录像点位置, 根据入射光线角度数据和对应的像点坐标数据, 根据一定的约束条件求解

收稿日期: 2013-05 Received Date: 2013-05

^{*} 基金项目: 国家高分重大专项(民用部分) 航空系统(30-H32A01-9005-12/12) 资助项目

内方位元素。精密测角算法直观简洁,易于实现,但对实验环境要求苛刻,尤其是转台的精度直接对标定精度产生影响,但制作高精度转台却昂贵费时;同时,精密测角算法工作量较大,测点数目较多,标定过程相机需要进行60多次拍照,每次拍照都要进行一次角度测量和位置坐标读取,工作量较大^[11-12]。

针对以上问题,本文提出一种基于旋转矩阵正交性的标定方法。该方法不需要记录成像时刻的转台角度位置,根据成像模型中的旋转矩阵的正交性进行内方位元素解算,从而不需要高精度的转台,标定步骤简单,而且标定精度较高。

2 旋转矩阵正交性求解内方位元素

2.1 成像模型中的坐标变换关系

航空测绘相机所获取的像片为地面景物的中心投影,航空遥感相机符合如下成像模型^[13]:

$$sm_i = C[R \ T]M_i \quad (1)$$

式中: s 为摄影比例系数常数, $[R \ T]$ 为外方位元素矩阵,代表物空间坐标系至像空间坐标系的旋转及平移变换, M_i 为对应的物方点在物空间坐标系中坐标, m_i 为像平面坐标系中坐标, C 为内方位元素矩阵,一般情况下:

$$C = \begin{bmatrix} f/dx & 0 & u_0 \\ 0 & f/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: u_0, v_0 为主点位置坐标, f 为相机主距, dx, dy 为 x, y 方向像元尺寸。式(1)描述了物方点 M_i 至其共轭像点 m_i 的坐标变换过程。标定过程中如果物方点均位于同一个平面中,可以适当选取物空间坐标系,可以使 $Z = 0$ 。

2.2 旋转矩阵的正交性

式(1)中 R 为关于3个姿态角的 3×3 旋转变换矩阵,为正交矩阵,记 $R = [r_1 \ r_2 \ r_3]$ 则:

$$\begin{cases} r_i \cdot r_j = 0 & i \neq j \\ r_i \cdot r_i = r_j \cdot r_j \end{cases} \quad (3)$$

当标定点均位于一个平面时,式(1)为:

$$sm_i = C[r_1 \ r_2 \ r_3 \ T] \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = C[r_1 \ r_2 \ T] \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

定义单应矩阵 H ,令:

$$H = C[r_1 \ r_2 \ T] = [h^{1T} \ h^{2T} \ h^{3T}]^T \quad (5)$$

根据式(3),可得:

$$\begin{cases} h^{iT} \cdot C^{-T} \cdot C^{-1} \cdot h^j = 0 \\ h^{iT} \cdot C^{-T} \cdot C^{-1} \cdot h^{iT} = h^{jT} \cdot C^{-T} \cdot C^{-1} \cdot h^{jT} \end{cases} \quad i \neq j \quad (6)$$

式中: C^{-T} 表示 $(C^{-1})^T$ 或 $(C^T)^{-1}$ 。

2.3 内方位元素求解原理

令 $C_{inv}^2 = C^{-T} \cdot C^{-1}$ 则:

$$C_{inv}^2 = \begin{bmatrix} 1/\alpha^2 & 0 & -u_0/\alpha^2 \\ 0 & 1/\beta^2 & -v_0/\beta^2 \\ -u_0/\alpha^2 & -v_0/\beta^2 & u_0/\alpha^2 + v_0/\beta^2 + 1 \end{bmatrix} = C_{inv}^{2T}$$

即 C_{inv}^2 是对称矩阵,定义参数 c_{inv}^2 ,令 c_{inv}^2 值如下:

$$c_{inv}^2 = [C_{inv}^{211} \ C_{inv}^{212} \ C_{inv}^{222} \ C_{inv}^{213} \ C_{inv}^{223} \ C_{inv}^{233}]^T$$

记 $h^T = [h^1 h^2 h^3]$ ($i = 1 \ 2 \ 3$)式(6)可展开为:

$$h^{iT} \cdot C_{inv}^2 \cdot h^{iT} = [h^1 h^1 \ h^1 h^2 + h^2 h^1 \ h^2 h^2 \ h^3 h^1 + h^1 h^3 \ h^3 h^2 + h^2 h^3 \ h^3 h^3] \cdot c_{inv}^2 = 0 \quad (7)$$

记:

$$V_{ij} = [h^1 h^1 \ h^1 h^2 + h^2 h^1 \ h^2 h^2 \ h^3 h^1 + h^1 h^3 \ h^3 h^2 + h^2 h^3 \ h^3 h^3]$$

式(7)可以变换为:

$$\begin{bmatrix} V_{12} \\ V_{11} - V_{22} \end{bmatrix} \cdot c_{inv}^2 = 0 \quad (8)$$

简写为 $Vc_{inv}^2 = 0$,当从 n 个角度拍摄同一幅标定物,那么可得到 $2n \times 6$ 的矩阵 V ,当 $n \geq 2$ 时,可以得到超定方程组,进而求的矩阵 C_{inv}^2 的4个内方位元素待求量如下:

$$\begin{aligned} u_0 &= -c_{inv}^{213}/c_{inv}^{211} \quad v_0 = -c_{inv}^{223}/c_{inv}^{222} \\ f &= \sqrt{\frac{c_{inv}^{233} + c_{inv}^{213} + c_{inv}^{223}}{c_{inv}^{211}}} \cdot dx \end{aligned} \quad (9)$$

由式(8)可以看出,求解内方位元素需要首先求解出单应矩阵 H 。

2.4 单应矩阵 H 的求解

由于 $H = A[R \ t]$ 则式(1)可以表述为 $sm = HM$,由于 s 为标量,根据矢量积原理,可以得出式(10)成立:

$$m \times (HM) = 0 \quad (10)$$

$$\text{根据式(5),可得 } HM = \begin{bmatrix} h^{1T} \cdot M \\ h^{2T} \cdot M \\ h^{3T} \cdot M \end{bmatrix}$$

代入式(10)可得:

$$m \times (HM) = \begin{pmatrix} vh^{3T} \cdot M - h^{2T} \cdot M \\ h^{1T} \cdot M - uh^{3T} \cdot M \\ uh^{2T} \cdot M - vh^{1T} \cdot M \end{pmatrix} = 0 \quad (11)$$

注意到 $h^{iT} \cdot M = M^T \cdot h^i$ ($i = 1 \ 2 \ 3$)则式(11)可转化为:

$$\begin{bmatrix} 0^T & -M^T & vM^T \\ -M^T & 0^T & uM^T \\ -vM^T & uM^T & 0^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} h^1 \\ h^2 \\ h^3 \end{pmatrix} = 0 \quad (12)$$

定义系数矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{0}^T & -\mathbf{M}^T & v\mathbf{M}^T \\ \mathbf{M}^T & \mathbf{0}^T & -u\mathbf{M}^T \\ -v\mathbf{M}^T & u\mathbf{M}^T & \mathbf{0}^T \end{bmatrix}$$

值得注意的是, 系数矩阵 A 的第3式可由第1式及第2式得到, 所以式(12) 实际上只有2个独立等式, 即:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0}^T & -\mathbf{M}^T & v\mathbf{M}^T \\ \mathbf{M}^T & \mathbf{0}^T & -u\mathbf{M}^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} h^1 \\ h^2 \\ h^3 \end{pmatrix} = 0 \quad (13)$$

对于含有 n 个标定点的像片, 系数矩阵 A 为已知的、且仅含有物点及像点 $2n \times 9$ 标的矩阵。进而可求解出单应矩阵 H , 根据式(8)、式(9) 即可求解内方位元素中的主点、主距。

3 畸变系数的求解

相机镜头的畸变有径向畸变、偏心畸变、薄棱镜畸变等, 其中径向畸变占据主要因素^[14]。研究文献表明^[15], 考虑到过多的因素的畸变模型不但对于提高精度没有帮助, 而且还可能导致求解的不稳定性^[16]。本文只考虑径向畸变。

设物点 M 的像点 m 在像平面坐标系中理想坐标为 (u_x, μ_y) , 考虑畸变时实际坐标为 (u_{xd}, μ_{yd}) , 则:

$$\begin{aligned} u_x &= u_{xd}(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ u_y &= \mu_{yd}(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: k_1, k_2 为径向畸变系数, $r^2 = x_d^2 + y_d^2$, $x_d = (u_{xd} - u_0)/dx_d$, $y_d = (\mu_{yd} - v_0)/dy_d$ 。即:

$$\begin{bmatrix} (u_{xd} - u_0)r^2 & (u_{xd} - u_0)r^4 \\ (v_{yd} - v_0)r^2 & (v_{yd} - v_0)r^4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_x - u_{xd} \\ v_y - v_{yd} \end{bmatrix} \quad (15)$$

简写为: $D \cdot k = d$

如果相机对 n 个标定物拍摄了 N 幅像片, 那么可得 $N \cdot n$ 个方程, 利用最小二乘原理可以求得:

$$k = (D^T D)^{-1} D^T d \quad (16)$$

4 算法精度分析

根据上述分析, 采用数值解析方法难以解算各参变量影响下的算法精度, 因此, 应用 Monte Carlo 算法, 通过给出相关参数误差概率分布模型计算所需特征的统计值, 进而计算算法精度^[17]。

影响算法精度的因素主要包括物点坐标量测误差、像点坐标提取误差2个部分, 根据实验室内标定设备条件, 分别确定上述2种误差的分布情况和参数特征值, 生成随机数列, 如表1所示。然后根据实验条件及测绘相机的设计特征, 确定一组工作参数名义值, 包括主点、主

距、畸变、拍照方位、标定点坐标等, 然后将上述数据带入标定模型, 计算实际的算法精度。

表1 误差项及其参数值

Table 1 Definitions and values of error items

名称	误差分布	误差量(3σ)
物点坐标量测误差	正态分布	0.002 mm
像点坐标提取误差	正态分布	0.35 μm

仿真过程中工作参数名义值如下: 标定物设定为12个标定点, 拍照方位设定为等间隔10个角度, 内方位元素参数值根据测绘相机设计特征确定, 共获取10张仿真相片。为了考察物点坐标量测误差与标定精度的关系, 12个标定点分别加入从0.001 mm至0.005 mm的高斯噪声, 每个噪声值均进行100次独立试验, 得到标定精度如图1和2所示, 其中, 横坐标表示所加的高斯噪声值, 纵坐标表示标定精度。

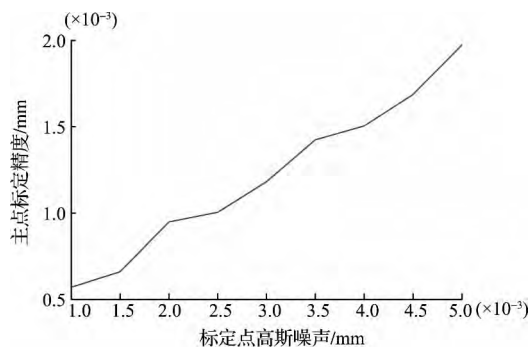


图1 标定物噪声对主点标定精度的影响

Fig. 1 Effect of the noise of the calibration object on the principal point accuracy

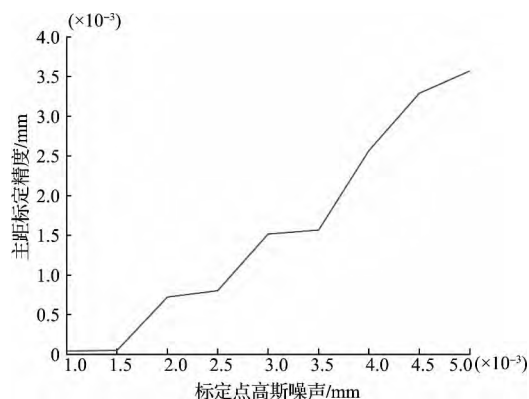


图2 标定物噪声对主距标定精度的影响

Fig. 2 Effect of the noise of the calibration object on the principal distance accuracy

由图1、2可以看出, 主点、主距的标定精度大致与标定物点精度成线性关系, 提高标定物的测量精度可以提高内方位元素的标定精度。

采用相同的方法,120个像点坐标加入噪声,得到像点质心坐标提取误差与标定精度的关系如图3和图4所示,图中横坐标表示对像点坐标提取加入的高斯噪声值,纵坐标表示标定精度。

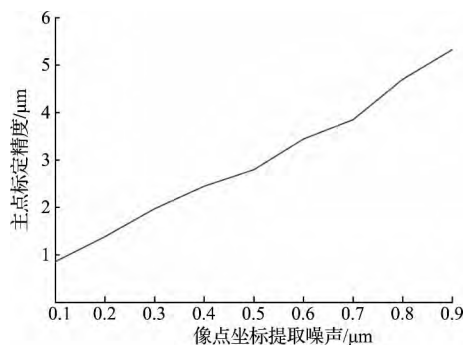


图3 像点质心提取噪声对主点标定精度的影响

Fig. 3 Effect of the noise of the image point centroid locating on the principal point accuracy

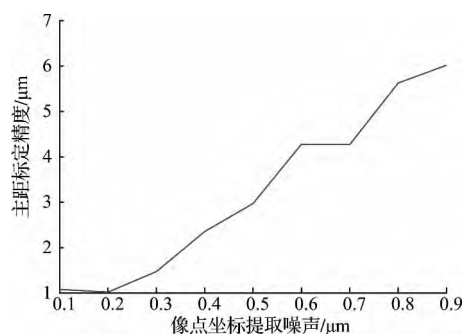


图4 像点质心提取误差对主距标定精度的影响

Fig. 4 Effect of the noise of the image point centroid locating on the principal distance accuracy

根据文献[18-19],采用灰度内插细分算法,像点坐标的提取精度可以达到1/20像元,相机探测器尺寸为7 μm时,像点坐标提取精度为0.35 μm,根据图3、4,此时主点、主距标定精度分别可为2.2 μm和3.82 μm。

综合考虑物点、像点提出噪声对算法精度的影响,根据现有实验设备条件,对上述12个标定数据及120个像点数据加入表1所示的噪声,应用Monte Carlo算法进行100次独立仿真实验,统计计算结果如表2所示。

表2 精度仿真结果

Table 2 The accuracy simulation result

名称	均值/设定值	方差
u_0 精度	0.3 μm /0	0.003 μm
v_0 精度	0.5 μm /0	0.003 μm
主点精度	—	4.2 μm
f 精度	140.004/140.00	0.006 μm

5 实验

根据待标定测绘相机的设计指标,已知的参数如下:

- 1) CCD 像素尺寸 $dx = dy = 7 \mu\text{m}$;
- 2) 像点质心在像平面坐标系中坐标值 $m_i(u_i, v_i)$;
- 3) 物方坐标系中物点 M_i 坐标 $M_i(X_i, Y_i, Z_i)^T$ 。

待求解参数:

- 1) 相机的主点 (u_0, v_0) ;
- 2) 相机的主距 f ;
- 3) 相机的径向畸变系数 k 。

实验步骤如下:

- 1) 将待标定相机固定在转台上,对通过平行光管、含有 n 个星点的星点板(标定物)进行成像,如图5所示;
- 2) 转动转台,在待标定相机的视场范围内,让待标定的相机以不同的 N 个角度对星点板成像;
- 3) 获取星点在各张相片中的坐标值;
- 4) 根据星点板中各星点的坐标值及步骤3的数据,根据式(13)计算 N 个角度的系数矩阵 A 及 N 个单应矩阵 H 。
- 5) 根据式(8)、式(9)求解内方位元素,根据式(16)求解畸变系数。

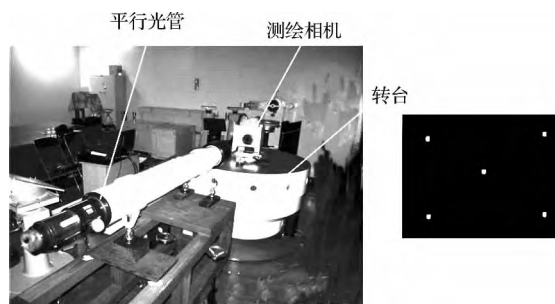


图5 标定装置及像点像片(局部)

Fig. 5 Facility for calibration and points image (local part)

将文中提出的标定算法与精密测角法(实验中转台精度为0.5 s)进行了比较,如表3所示,表中均方根误差表示实际量测的物点坐标与计算所得的物点坐标间的误差的均方根。

表3 2种标定方法的标定精度

Table 3 The calibration accuracies of

		two calibration methods			μm
方法		精度			均方根误差
		u_0	v_0	f	
精密测角法		3.7	2.8	5.2	3.4
本文方法		4.2	3.5	5.4	4.2

由表3可以看出,文中提出的标定方法与精密测角

法精度相当,但不需要高精度的转台,主点、主距的标定结果满足使用要求。

6 结 论

本文介绍了一种基于旋转矩阵正交性的测绘相机内方位元素标定方法,并给出了详细的实验步骤,对影响该方法标定精度的因素进行了分析。相比于传统的实验室内精密测角法,提出的方法不需要高精度的实验转台且实验步骤相对简单,数据稳定,实验结果表明,不需要精密转台的条件,提出的方法主点、主距标定精度可以满足使用要求。

参考文献

- [1] 张旭东,李文龙,胡良梅,等. 基于PMD相机的特征跟踪位姿测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(7): 640-646.
ZHANG X D, LI W L, HU L M, et al. Characteristic tracking position and attitude measurement method based on PMD camera[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument 2013 27(7): 640-646.
- [2] 刘伟毅,丁亚林,贾继强,等. 借助于星点标定相机的内方位元素[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2086-2093.
LIU W Y, DING Y L, JIA J Q, et al. Calibration of inner orientation elements for camera by means of star points[J]. Opto-Electronic Engineering 2010 18(9): 2086-2093.
- [3] 崔继文,刘雪明,谭久彬. 超精密级二维工作台的自标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1960-1966.
CUI J W, LIU X M, TAN J B. Self-calibration for 2-D ultra-precision stage[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012 20(9): 1960-1966.
- [4] 杨幸芳,黄玉美,高峰,等. 用于摄像机标定的棋盘图像角点检测新算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1109-1113.
YANG X F, HUANG Y M, GAO F, et al. New corner detection algorithm of chessboard image for camera calibration[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5): 1109-1113.
- [5] 于唤唤,张宏伟,张晓杰,等. 触针式光电三维微位移测量系统设计及标定[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(7): 616-623.
YU H H, ZHANG H W, ZHANG X J, et al. Design and calibration of three-dimensional micro-displacement measuring system with photoelectric stylus[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument 2012 26(7): 616-623.
- [6] 张浩鹏,王宗义,吴攀超. 摄像机标定的棋盘格模板的改进和自动识别[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(5): 1102-1109.
ZHANG H P, WANG Z Y, WU P CH. Checker pattern improvement and fully-automatic identification for camera calibration[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(5): 1102-1109.
- [7] 贺科学,李树涛. 基于两垂直相交线段的摄像机快速标定算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1696-1702.
HE K X, LI SH T. Fast camera calibration algorithm based on two perpendicular line segments[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8): 1696-1702.
- [8] 胡桂廷,陈向东. 基于两灭点法的摄像机标定方法研究[J]. 电子测量技术, 2012, 35(7): 37-39, 54.
HU G T, CHEN X D. Camera calibration method based on two vanishing points[J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(7): 37-39, 54.
- [9] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for High accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses[J]. IEEE RA, 1987, 3(4): 323-344.
- [10] 远国勤,丁亚林,惠守文,等. 前向像移补偿下航空测绘相机畸变的纠正方法[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1111001-1-1111001-4.
YUAN G Q, DING Y L, HUI SH W, et al. A method for distortion correction of airborne mapping camera with forward image displacement compensation[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1111001-1-1111001-4.
- [11] 远国勤,丁亚林,惠守文,等. 基于精密测角法的测绘相机分组渐进标定算法[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0112005-1-0112005-6.
YUAN G Q, DING Y L, HUI SH W, et al. Grouped approach algorithm for mapping camera calibration based on method of exact measuring angle[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0112005-1-0112005-6.
- [12] 陈爱华,高诚辉,何炳蔚. 基于正交消失点对的摄像机标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(1): 161-166.
CHEN AI H, GAO CH H, HE B W. Camera calibration method based on orthogonal vanishing point pair[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(1): 161-166.
- [13] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple view geometry in computer vision[M]. 2nd ed. Cambridge University Press, 2003.
- [14] LENZ R K, TSAI R Y. Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3D machine vision metrology[J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., 1988, PAMI-10: 713-720.
- [15] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., 2000, PAMI-22: 1330-1334.

- [16] 胡小平, 左富勇, 谢珂. 微装配机器人手眼标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1521-1526.
HU X P, ZUO F Y, XIE K. Research on hand-eye calibration method for micro-assembly robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(7): 1521-1526.
- [17] 李延伟, 远国勤. 面阵彩色航空遥感相机前向像移补偿机构精度分析[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(11): 2439-2443.
LI Y W, YUAN G Q. Accuracy analysis of forward image displacement compensation device for aerial scan color CCD camera[J]. Opt. Precision Eng., 2012, 20(11): 2439-2443.
- [18] 魏新国, 徐佳, 张广军. 星敏感器质心定位的 S 曲线误差补偿[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(4): 849-857.
WEI X G, XU J, ZHANG G J. S-curve error compensation of centroiding location for star sensors[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 21(4): 849-857.
- [19] 陈济棠, 徐杜, 蒋永平, 等. 计算机三维视觉测量中相机标定的圆形校正方法[J], 电子测量技术, 2011, 34(3): 95-98.
CHEN J T, XU D, JIANG Y P, et al. Circle calibration method for camera used in 3D measurement based on computer vision[J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(3): 95-98.

作者简介



E-mail: yuanguoqin@139.com

Yuan Guoqin received his B. Sc. degree in 2005 and M. Sc. degree in 2007 both from Jilin University; received his Ph. D. degree in 2012 from CIOMP. Now, he is an assistant researcher in CIOMP. His main research interests include mechanical structure design of aerial camera and mapping camera calibration.



远国勤, 分别于 2005 和 2007 年在吉林大学获得学士和硕士学位, 2012 年于中国科学院长春光机所获得博士学位, 现为中国科学院长春光机所助理研究员, 主要研究方向为航空相机结构设计、测绘相机几何标定等。

丁亚林, 1987 年于吉林工业大学获学士学位, 1994 年于东北大学获硕士学位, 现为中国科学院长春光机所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为航空遥感相机。

E-mail: dingyl1964@sohu.com

Ding Yalin received his B. Sc. degree in 1987 from Jilin University of Technology, received his M. Sc. degree in 1994 from Northeastern University; now, he is a research fellow and Ph. D. supervisor in CIOMP. His main research direction is aerial remote sensing camera.