

文章编号 1004-924X(2018)02-0435-07

检校场标定长焦航测相机参数

王欢^{1,2*}, 周凌¹, 张鑫¹, 高思远¹, 初诞旭³, 乔彦峰¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 杭州电子科技大学 通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:为实现长焦航测相机内参数及畸变参数标定, 提出利用室外检校场对相机进行标定的方法。介绍了该方法由初值到精确值的两步法的求解步骤、计算过程及实验过程。首先通过给定已知特征点位置信息以及不同角度不同位置下拍摄的影像, 通过特征点提取及匹配, 根据像点坐标与世界坐标的线性对应关系, 基于直接线性变换算法建立约束方程求取相机参数初值, 进而通过混合 LMQN(Levenberg-Marquardt 与 Qusai-Newton) 迭代优化加速求解精确值。与精密测角法比无需精密设备的操作及记录, 只需不同位置不同姿态拍摄多张包含精确位置信息的检校场影像即可。最后进行标定实验并对结果分析, 基于检校场的标定方法在参数解算中特征点最大投影误差为 2.471 pixel, 标定参数主点精度为 9.7 μm (< 2 pixel), 主距精度为 4.3 μm (< 1 pixel), 解算相机拍摄位置精度 0.035 m, 满足测绘应用的精度需求。

关键词:长焦航测相机标定; 检校场; 相机参数; 混合 LMQN 算法

中图分类号: TP394.1 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20182602.0435

Calibration parameters of long focal aerial mapping camera by means of calibration field

WANG Huan^{1,2*}, ZHOU Ling¹, ZHANG Xin¹, GAO Si-yuan¹, CHU Ting-xu³, QIAO Yan-feng¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)*

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

Abstract: A two-step method was proposed to estimate parameters of long focal mapping camera by means of calibration field. The direct linear transform formulation (DLT) was used to obtain initial values for the hybrid LMQN iterative speed method by giving the feature points and the images taken from several positions and attitudes, and the whole process of calculating and experiment was described in detail. Compared with precise angle measurement method, operation and recording of accurate equipment are dispensable. It was only needed that images of calibration field with precise position information were taken from several different positions and orientations. The calibration results of experiment based on calibration field method indicate that the maximum re-projection error of fea-

收稿日期: 2017-04-13; 修订日期: 2017-06-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51305421); 国防技术基础科研项目资助项目 (No. JSZL2014130B005); 吉林省科技发展项目青年基金资助项目 (No. 20140520137JH)

ture points is 2.471 pixel, the calibration accuracies of principal point and principal focal distance each 9.7 μm (<2 pixel) and 4.3 μm (<1 pixel), respectively, the calculated position accuracy of the camera is 0.035 m, which meets precision requirements of mapping application.

Key words: focal aerial mapping camera calibration; calibration field; camera parameters; Hybrid LMQN method

1 引言

遥感中,通过可见光相机与合成孔径雷达雷达联合可实现目标定位,影响目标定位精度的重要因素是可见光相机提供的目标点相对于光轴的夹角信息,而夹角信息的计算取决于精确的相机参数。因此相机的精确标定是获取目标精确位置信息的重要步骤。

对于航空测绘相机的标定方法有学者进行了简要地概述^[1],其中传统的精密测角法对于线阵相机标定具有较好的精度^[2],对于面阵相机存在转台水平面与相机相面坐标系不严格平行的问题,赵振庆^[3]提出基于平行光夹角和投影图像点非线性关系的解决方法,该方法依赖于精确的主点预测值,并且与传统测角法一样,对标定所需的设备精度要求高,实验环境(温度、洁净度)要求严格,缺一不可。

基于标定板的方法^[4-5],通过不同角度拍摄多张标定物的影像即可实现相机参数的求解,在室内环境下简单易实现,适用于短焦距的相机标定。对于长焦距的航测相机,近距离标定物成像不清,远距离需要标定板尺寸巨大,实现难度大。刘伟毅^[6]、戴东凯^[7]提出基于已知恒星点坐标的标定方法,该方法易实现,无需制作高精度标定物,但受限于星座知识并且时间窗口较小,通过标定过的相机对星点成像反推三维坐标精度降低,大气折光异常、温度变化等都会影响标定精度。周富强等^[8]提出的线性标定法算法更快、更实用,适用于对精度要求不高的视觉检测相机的快速标定。杨景豪^[9]提出基于线约束的标定方法,适用于精度要求不高的大视场双目测量系统。孔筱芳^[10]利用 GPS 代替靶标实现双目相机标定,其利用的测量型天线定位精度不高、收敛时间较长,并且不同姿态下对 GPS 天线相位中心提取精度无法保证,不适用于高精度需求的长焦航测相机的标定。

基于以上问题,提出应用检校场的长焦高分辨率航测相机标定方法。自由选取适当的距离和位置对检校场进行拍摄,获取影像数据,克服了实验室内空间受限的问题,同时实验过程简单易操作无需任何精密仪器及繁琐的数据记录。对于影像处理,根据目标点图像坐标与世界坐标的线性对应关系求取相机内外参数初值,通过空间后方交会交会原理建立目标函数^[11],对于多参数的优化问题,应用 Levenberg-Marquardt 与 Quasi-Newton 混合(LMQN)的非线性迭代优化算法^[12],提高收敛速度实现快速求解。主要内容包括相机内参数初值求解、畸变参数求解,迭代优化精确求解、结果与结论。

2 参数初值求解

2.1 相机内参数初值求解

相机内参数通过 DLT 算法进行求解,设图像坐标系、像素坐标系及世界坐标系分别为 $s-xyz$, $\sigma-uv$, $O-XYZ$,如图 1 所示。

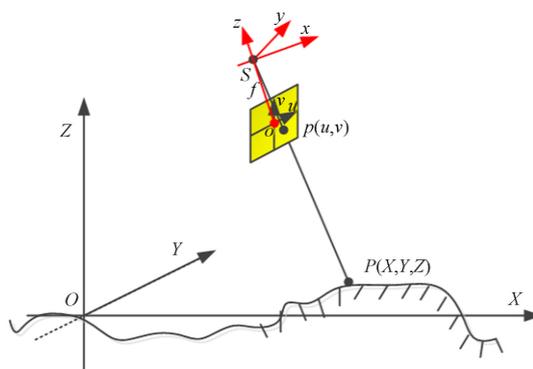


图 1 目标点成像坐标系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of target point imaging coordinate system

根据图像坐标系 (u, v) 和世界坐标系中点 (X, Y, Z) 对应关系:

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: λ 为比例因子, \mathbf{M} 为两坐标系变换矩阵, 由相机内参数矩阵和外参数矩阵组成, 表达式为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & X_C \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & Y_C \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & Z_C \end{bmatrix}.$$

对 \mathbf{M} 以列向量形式表示为 \mathbf{M}' , 则式(1)展开合并可化为:

$$\mathbf{GM}' = 0, \quad (2)$$

式中:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -uX - uY - uZ - u \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & -vX - vY - vZ - v \end{bmatrix}.$$

对于第 n 张影像, $n(n \geq 6)$ 个目标点, 可建立 $2n$ 个方程, 超定方程组 $(2n \times 12)$ 最小二乘解 \mathbf{M}' 为矩阵 $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ 最小特征值所对应的特征向量。

$$\text{则 } \lambda = \sqrt{M_{31}^2 + M_{32}^2 + M_{33}^2}, m = \mathbf{M}/\lambda.$$

从相机坐标系到世界坐标系旋转矩阵, 可按依次照绕 xyz 轴旋转 ω, ϕ, κ 得到, 即:

$$\mathbf{R} = R_z(\kappa)R_y(\phi)R_x(\omega) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

根据旋转矩阵 \mathbf{R} 单位正交性质(单位向量、两两正交)可求得相机内参数以及外参数初值, 结果如下式所示:

$$\begin{cases} u_0 = \frac{1}{\lambda}(m_{11}m_{31} + m_{12}m_{32} + m_{13}m_{33}) \\ v_0 = \frac{1}{\lambda}(m_{21}m_{31} + m_{22}m_{32} + m_{23}m_{33}), \\ \alpha = \sqrt{m_{11}^2 + m_{12}^2 + m_{13}^2 - u_0^2} \\ \beta = \sqrt{m_{21}^2 + m_{22}^2 + m_{23}^2 - v_0^2} \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_p = (u_0 - C_W/2)d \\ y_p = (v_0 - C_H/2)d, \\ f = a \cdot d/1000 \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} X_C & \omega \\ Y_C & \phi \\ Z_C & \kappa \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14} \arcsin r_{32} / \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2} \\ m_{24} \arcsin(-r_{31}) \\ m_{34} \arccos r_{11} / \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: C_W, C_H 分别代表图像宽度及高度, d 为像元尺寸(μm), f 为主距(mm)。

2.2 畸变参数求解

在航测应用领域中对相机参数精度要求较

高, 在获取相机内参数初值后还需计算镜头畸变参数。畸变表达式如下:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2\bar{x} \cdot \bar{y} \\ \Delta y &= \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + \\ &\quad 2p_1\bar{x} \cdot \bar{y} + a_1\bar{x} + a_2\bar{y} \end{aligned}, \quad (7)$$

式中: \bar{x}, \bar{y} 为观测值与主点位置差值(mm), $\Delta x, \Delta y$ 为畸变值(mm), k_1, k_2, k_3 代表径向畸变参数, p_1, p_2 代表切向畸变参数, a_1, a_2 代表传感器内变形参数。

对式(7), 通过最小二乘法求得畸变参数初值:

$$\mathbf{k} = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{d}, \quad (8)$$

式中:

$$\begin{aligned} \mathbf{k} &= [k_1 k_2 k_3 p_1 p_2 a_1 a_2]^T \\ \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} \bar{x}r^2 & \bar{x}r^4 & \bar{x}r^6 & r^2 + 2\bar{x}^2 & 2\bar{x} \cdot \bar{y} & 0 & 0 \\ r^2 & r^4 & r^6 & 2\bar{x} \cdot \bar{y} & r^2 + 2\bar{y}^2 & \bar{x} & \bar{y} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

由式(5)、(6)、(8)可求解相机内参数及畸变参数初值 Ψ^0 、每张影像的外参数 γ_i 。

其中:

$$\begin{aligned} \Psi^0 &= (k_1^0, k_2^0, k_3^0, p_1^0, p_2^0, a_1^0, a_2^0, x_p^0, y_p^0, f^0), \\ \gamma_i &= (X_{C,i}, Y_{C,i}, Z_{C,i}, \omega_i, \phi_i, \kappa_i), i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned}$$

3 精确求解

在获取相机内参数及畸变参数初值后, 为获取更精确的结果, 采用非线性迭代算法对结果进行优化。

首先, 由多像空间后方交会原理:

$$\begin{cases} x = -f \frac{r_{11}(X - X_C) + r_{12}(Y - Y_C) + r_{13}(Z - Z_C)}{r_{31}(X - X_C) + r_{32}(Y - Y_C) + r_{33}(Z - Z_C)} \\ y = -f \frac{r_{21}(X - X_C) + r_{22}(Y - Y_C) + r_{23}(Z - Z_C)}{r_{31}(X - X_C) + r_{32}(Y - Y_C) + r_{33}(Z - Z_C)} \end{cases}, \quad (9)$$

式中: (x, y) 代表像点坐标理论值(mm), f 为主距数值(mm), $(X, Y, Z), (X_C, Y_C, Z_C)$ 分别代表目标点与相机光心在世界坐标系中的坐标。

引入畸变参数并移项处理, 则式(9)化为:

$$\begin{cases} (x' - x_p + \Delta x)[r_{31}(X - X_C) + r_{32}(Y - Y_C) + r_{33}(Z - Z_C)] \\ \quad + f[r_{11}(X - X_C) + r_{12}(Y - Y_C) + r_{13}(Z - Z_C)] = 0 \\ (y' - y_p + \Delta y)[r_{31}(X - X_C) + r_{32}(Y - Y_C) + r_{33}(Z - Z_C)] \\ \quad + f[r_{21}(X - X_C) + r_{22}(Y - Y_C) + r_{23}(Z - Z_C)] = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

将式(10)表示为以下形式的目标函数:

$$\Theta(\xi) = \begin{cases} F_l(\xi) = (x_j' + \Delta x_i - x_p)(x_j - x_{C,i}) \cdot \hat{r}_{3,i} + \\ \quad f(x_j - x_{C,i}) \cdot \hat{r}_{1,i} = 0 \\ G_l(\xi) = (y_j' + \Delta y_i - y_p)(x_j - x_{C,i}) \cdot \hat{r}_{3,i} + \\ \quad f(x_j - x_{C,i}) \cdot \hat{r}_{2,i} = 0 \end{cases}, \quad (11)$$

式中: $l = m_{i-1} + j$, $m_0 = 0$ 代表 n 张影像中所有特征点的数量; $j = 1, 2, \dots, m_i$ 代表第张影像中特征点的数量; $i = 1, 2, \dots, n$ 代表影像序号; $\xi = \xi(x_{C,i}, \Phi_1, \chi_{C,2}, \Phi_2, \dots, x_{C,n}, \Phi_n, \Psi)^T$, 代表由影像外参数及内参数组成的向量; $\chi_{C,i} = (X_{C,i}, Y_{C,i}, Z_{C,i})$ 代表影像位置参数; $\Phi_i(\omega_i, \phi_i, \kappa_i)$ 代表影像姿态参数; $\Psi = (k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, a_1, a_2, x_p, y_p, f)$ 代表相机内参数; $\chi_i = (X_i, Y_i, Z_i)$, 代表目标点的三维世界坐标。

在非线性方程组的解法中, Levenberg-Marquardt(LM)算法在 $\Theta(\xi) = 0$ 的情况下属于较快速的二次收敛, 在 $\Theta(\xi) \neq 0$ 情况下处于慢速的线性收敛, 而 Quasi-Newton(QN)算法在此种情况下属于超线性收敛, 速度优于线性收敛。因此提出基于 LMQN 的混合迭代方法优化相机标定目标函数(式(10))。

根据 DLT 算法给定初值, 首先通过 LM 进行迭代计算, 同时进行机制判断, 如果目标函数导数的无穷范数小于目标函数值的 0.02 倍, 即 $\|\Theta'(\xi_{lm})\|_{\infty} < 0.02 \cdot \Theta(\xi_{lm})$, 此时迭代处于较慢的线性收敛, 则由 LM 算法跳转至 QN 算法, 并以 LM 当前迭代结果作为 QN 迭代初值进行后续计算; 在 QN 迭代中, 如果目标函数导数的无穷范数大于目标函数值, 即 $\|\Theta'(\xi_{qn})\|_{\infty} > \Theta(\xi_{qn})$, 此时迭代速度慢于二次收敛, 则跳转回 LM 算法; 整个迭代过程中, 两次迭代值之差满足设定的阈值, 即 $\|\xi_{i+1} - \xi_i\| < \epsilon$ 时, 输出结果 ξ_{i+1} , 迭代结束。

LM 算法:

(1) 通过 DLT 算法计算初值 ξ_0 , 取 $\mu = 2$, 设定迭代阈值 ϵ ;

(2) 通过式 $(\Theta'(\xi)^T \Theta'(\xi) + \mu I) h_{lm} = -\Theta'(\xi)$ 计算迭代修正值 h_{lm} ;

(3) 确定下一步迭代数值: $\xi_{lm} = \xi_0 + h_{lm}$;

(4) 如果 $\|\xi_{lm} - \xi_0\| < \epsilon$, 则输出 ξ_{lm} , 迭代停止;

(5) 如果 $\|\Theta'(\xi_{lm})\|_{\infty} < 0.02 \cdot \Theta(\xi_{lm})$, 则跳转至 QN 算法继续迭代;

(6) 其他情况下, 继续在 LM 算法中迭代计算, 直至收敛。

QN 算法:

(1) 获取 LM 当前迭代结果 ξ_{lm} 作为初值, 设 $B = I$;

(2) 通过式 $Bh_{qn} = -\Theta'(\xi_{lm})$ 计算迭代修正值 h_{qn} ;

(3) 确定下一步迭代数值: $\xi_{qn} = \xi_{lm} + h_{qn}$;

(4) 如果 $\|\xi_{qn} - \xi_{lm}\| < \epsilon$, 则输出 ξ_{qn} , 迭代停止;

(5) 如果 $\|\Theta'(\xi_{qn})\|_{\infty} > \Theta(\xi_{qn})$, 则跳转至 LM 算法继续迭代;

(6) 其他情况下, 继续在 QN 算法中迭代计算, 直至收敛。

4 实验与结果

4.1 标定实验

标定相机基本参数: 型号为飞思 iXU150 航测相机; 像元尺寸为 $5.3 \mu\text{m}$; 分辨率为 8208×6280 ; 焦距为 150 mm;

检校场介绍:

(1) 直径 60 mm 黑色钛合金圆形标志点, 均匀贴于墙体表面, 数量大于 2 000, 如图 2;

(2) 标志点位置通过全站仪精确测量, 误差 $\leq 5 \text{ mm}$ 。



图 2 检校场全貌

Fig. 2 Profile of calibration field

实验步骤:

(1) 在标定前, 将焦距调整至无穷远处, 并采用胶圈进行固定, 防止焦距发生改变;

(2) 标定场前方选取 6 个点位(楼顶 3 个位置, 地面 3 个位置), 每个点位以不同姿态拍摄 12

张影像(共 72 张,部分影像如图 4);

(3) 影像格式由 IIQ 转换为 TIF 格式;

(4) 提取影像中目标点质心坐标(亚像素精度);

(5) 影像中目标点与三维目标点进行匹配,并序号标记,如图 3;

(6) 建立二维图像点与三维世界坐标点关系,通过 DLT 算法计算相机内外参数初值;

(7) 引入畸变参数,通过内参数初值求解各畸变参数初值;

(8) 通过 LMQN 混合算法进行迭代求解,直至收敛,得出内参数及畸变参数精确数值。

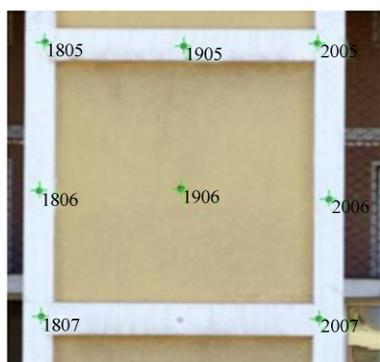


图 3 特征点提取及编号

Fig. 3 Extraction and numbered of feature points

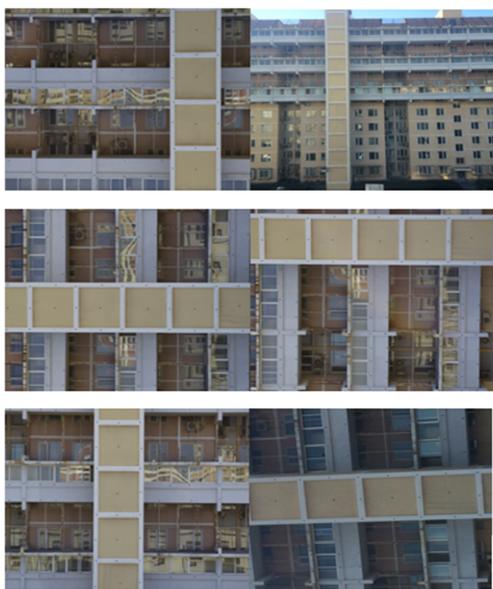


图 4 不同位置不同姿态下检校场影像

Fig. 4 Images of calibration field taken from different positions and orientations

4.2 实验结果

相机标定参数结果如表 1 所示,通过对 72 张影像进行特征点提取及匹配,建立影像上特征点二维坐标与三维坐标点的线性关系,通过 DLT 算法求解相机内参数及畸变参数初值。标定参数中焦距数值最大,标定的误差同样最大,对于 150 mm 镜头的标定迭代阈值设置为 $\epsilon=0.01$ mm,通过 LMQN 混合算法迭代到第 8(LM 迭代算法需要 11 次)次时, $|f^8 - f^7| = 8.562 \times 10^{-3} \leq \epsilon$ 。由于计算初值所用影像特征点数量多、靶面覆盖全,由表 1 可以看出初值与精确值相差较少,因此较少的迭代步数就实现了收敛,相机内参数精度达微米量级,畸变参数精度高于 $\times 10^{-6}$ 量级。

表 1 相机标定内参数及畸变参数

Tab. 1 Intrinsic and distorted parameters of the camera

参数	初值	精确值	精度
f/mm	1.4637×10^2	1.4639×10^2	9.7319×10^{-3}
x_p/mm	0.27463	0.27555	4.3053×10^{-3}
y_p/mm	0.041176	0.040671	3.3942×10^{-3}
k_1	-1.1179×10^{-5}	-1.1177×10^{-5}	4.4985×10^{-8}
k_2	1.9323×10^{-9}	1.9235×10^{-9}	1.3702×10^{-10}
k_3	-1.5118×10^{-7}	-1.5038×10^{-12}	1.2654×10^{-13}
p_1	-8.1061×10^{-7}	-8.1256×10^{-7}	7.5784×10^{-8}
p_2	-4.2490×10^{-6}	-4.2276×10^{-6}	6.2035×10^{-8}
a_1	1.1533×10^{-6}	1.2759×10^{-6}	1.7485×10^{-6}
a_2	3.8589×10^{-5}	3.8587×10^{-5}	1.6657×10^{-6}

由表 1 可以看出,相机主距标定结果为 146.39 mm,精度为 $9.7 \mu\text{m}$ (小于任务指标 $85 \mu\text{m}$),与标称焦距 150 mm 相差 3.61 mm,与调焦至无穷远直接相关,参照飞思厂家标定结果 147.5 ± 2.5 mm,该标定结果正确。主点标定精度 $4.3 \mu\text{m} (< 1 \text{ pixel})$,相对几何中心偏移量分别为: $\Delta u = 52 \text{ pixel}$ (宽视场), $\Delta v = 8 \text{ pixel}$ (窄视场)。

根据标定相机参数,将三维坐标点投影至图像上,各影像特征点重投影误差均值如图 5 所示。

标定解算中共处理 72 张影像,非重复特征点数 1990 个,特征点投影误差均值 $\Delta u = 2.063 \text{ pixel}$, $\Delta v = 1.553 \text{ pixel}$,最大误差为 $\Delta u = 2.471 \text{ pixel}$, $\text{RMSE} = 2.0691$ 。在拍摄距离 60 m 的条件下,单个像元对应空间实际尺寸为 2 mm,实现了特征点对相面的全覆盖,保证了标定参数的精准性。

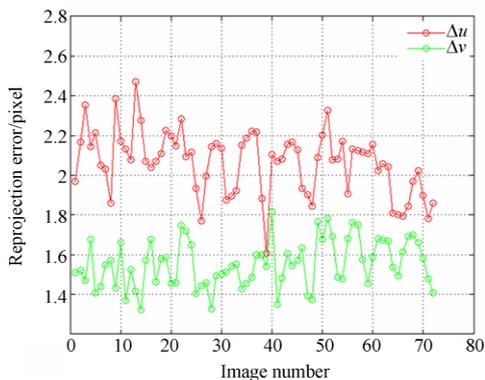


图 5 特征点重投影误差

Fig. 5 Re-projection error of feature points

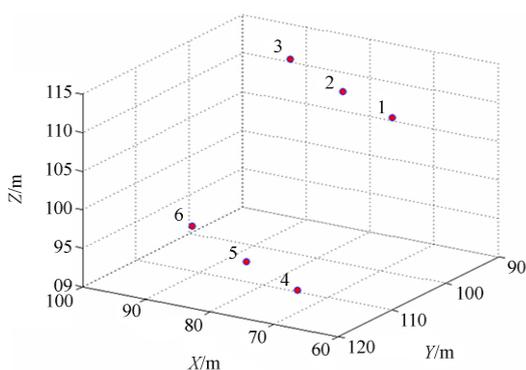


图 6 解算相机拍摄位置

Fig. 6 Calculated positions of camera

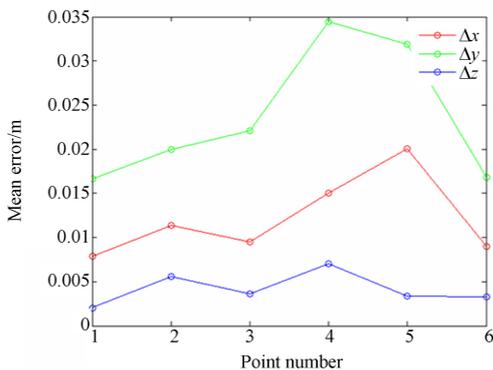


图 7 位置解算均误差

Fig. 7 Mean error of calculated positions

参考文献:

- [1] 惠守文. 航空测绘相机几何标定方法[J]. 红外, 2013, 34(9): 13-18.
HUI S W. Geometric calibration of airborne mapping camera[J]. *Infrared*, 2013, 34(9): 13-18. (in Chinese)

根据检校场影像、控制点坐标进行拍摄位置解算, 6 个点位置示意图如图 6 所示。相机 XYZ 三个维度上拍摄位置解算均误差见图 7。

由图 6、图 7 可以看出, 通过影像信息与控制点信息可以计算出相机拍摄位置, 并且每一个点位坐标 3 个维度上位置误差最大值 ≤ 0.035 m, 充分验证了相机标定参数的精确性。

5 结 论

本文提出基于检校场的长焦航测相机标定方法, 该实验方法中标定场景贴近相机真实使用环境。在标定过程中, 首先在不同角度不同位置下拍摄检校场影像信息, 通过特征点提取及匹配建立像点坐标与世界坐标的线性对应关系, 基于直接线性变换算法建立约束方程求取相机内参数初值, 引入相机畸变参数并基于最小二乘进行参数求解, 进而通过混合 LMQN (Levenberg-Marquardt 与 Qusai-Newton) 迭代优化算法对初值加速迭代, 求解精确值。与精密测角法比无需精密设备的操作及记录, 只需不同位置不同姿态拍摄多张包含精确位置信息的检校场影像即可。从标定结果可以看出, 在解算中特征点的最大重投影误差为 2.471 pixel, 标定参数主点精度 $9.7 \mu\text{m}$ (< 2 pixel), 主距精度 $4.3 \mu\text{m}$ (< 1 pixel), 解算相机拍摄平面位置精度小于 0.035 m, 精度满足测绘应用中目标精确位置计算的需求。

下一步工作将进行相机的实际挂飞试验, 用标定的参数对地面目标进行相对定位解算, 通过目标定位精度进一步验证标定参数的准确程度。

- [2] 吴国栋, 韩冰, 何煦. 精密测角法的线阵 CCD 相机几何参数实验室标定方法[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(10): 1628-1632.
WU G D, HAN B, HE X. Calibration of geometric parameters of line-array CCD camera based on extract measuring angle in lab[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1628-1632. (in Chinese)

- [3] 赵振庆, 叶东, 张鑫, 等. 改进的精密测角法标定面阵摄像机参数[J]. 光学精密工程, 2016, 24(7): 1592-1599.
ZHAO ZH Q, YE D, ZHANG X, *et al.*. Calibration of area-array camera parameters based on improved exact measuring angle method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1592-1599. (in Chinese)
- [4] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [5] 陈刚, 车仁生, 叶东, 等. 一种基于立体模板的双目视觉传感器现场标定方法[J]. 光学精密工程, 2004, 12(6): 626-631.
Cheng G, CHE R SH, YE D, *et al.*. Stereo vision sensor field calibration method based on volume template[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 626-631. (in Chinese)
- [6] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2086-2093. (in Chinese)
- [7] 戴东凯, 王省书, 胡春生, 等. 基于天文观测的相机标定及姿态测量技术研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 312005.
DAI D K, WANG SH SH, HU CH SH, *et al.*. Camera calibration and attitude measurement technology based on astronomical observation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 312005. (in Chinese)
- [8] 周富强, 郝继贵, 杨学友, 等. CCD 摄像机快速标定技术[J]. 光学精密工程, 2000, 8(1): 96-100.
ZHOU F Q, ZHU J G, YANG X Y, *et al.*. A high speed CCD camera calibration technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(1): 96-100. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 王冬, 冯文灏, 卢秀山, 等. 基于多片空间后方交会的 CCD 相机检校[J]. 测绘科学, 2006, 31(4): 64-67.
WANG D, FENG W Y, LU X SH, *et al.*. CCD camera calibration based on space resection with multi-images[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(4): 64-67. (in Chinese)
- [12] MADSEN K, NIELSEN H B, TINGLEFF O. *Methods for non-linear least squares problems* [M]. 2nd ed. Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark.

作者简介:



王欢(1987—),男,吉林长春人,助理研究员,2013年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事图像配准及相机标定方面的研究。E-mail: wanghuan_ciomp@163.com



乔彦峰(1962—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1985年于南京工学院(现东南大学)获得学士学位,主要从事光电测量与控制方面的研究。E-mail: YanfengQiao@ciomp.ac.cn