

低空传感器畸变参数的抗差严密解法^{* 1}

何海清¹⁾ 黄声享²⁾
(1) 东华理工大学测绘工程学院,南昌 330013)
(2) 武汉大学测绘学院,武汉 430079

摘 要 提出低空传感器畸变参数的抗差严密解法。该方法通过二维 DLT 得到初值,利用 Huber 法约束存在粗差或定位偏差的格网点,采用带有约束条件的迭代选权方法精化初值,实现畸变参数抗差严密解算。畸变参数解算精度比单位权和选权迭代的光束法平差更高,具有更优的抗差和抗干扰性。
关键词 低空传感器;畸变参数;平面格网;二维 DLT;抗差严密解
中图分类号:P246.2 **文献标识码**:A

THE RIGOROUS ROBUST SOLUTION OF LOW-ALTITUDE
SENSOR DISTORTION PARAMETERS

He Haiqing¹⁾ and Huang Shengxiang²⁾
(1) Faculty of Geomatics, East China Institute of Technology, Nanchang 330013)
(2) School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079

Abstract The rigorous robust solution of low-altitude sensor distortion parameters was proposed. Firstly, the initial parameters are obtained by 2D DLT, then the location of reference objects with gross or deviation is restrained by Huber algorithm. Finally, the rigorous solution of sensor distortion parameters is carried out by iterative computation with constrained condition. Experimental results show that the solution is reliable and practical, and the precision is higher than the bundle adjustment with unit weight or selecting weight iteration.
Key words: low-altitude sensor; distortion parameters; planar grid; 2D DLT; robust and rigorous solution

一般情况,相机标定常需要利用某些特定参考对象。在不同的方法中,参考对象也是不同的,主要有3大类:1)精密仪器^[1-2],包括多准直仪、可测角准直仪、精密格网等;2)人造对象^[3-6],包括室内三维控制场、三维立方体、平面格网等;3)自然对象^[7-10],包括恒星、铅垂线、建筑物垂直线 and 灭点。然而,利用固定物理标定场检校较为繁琐。二维平面格网具有制作简便、成本低等特点,是当前低空传感器畸变参数求解过程中使用较多的参考对象。

传感器畸变参数解算方法主要分为两大类:1)计算机视觉方法,包括 Tsai 两步法^[11]、张正友法^[4]等,后者应用较多,但标定精度在 0.35 个像素左右^[4];2)摄影测量方法,包括三维^[12]和二维直接线性变换解法^[5]、自检校法。在以二维平面作为参考对象的传感器检校中,具有代表性的有张永军^[5]提出的平面格网的二维直接线性变换解法。该方法可避免二维直接线性变换参数之间的相关,且利用光束法平差精化相机参数,但未给出权值计算的方法。

* 收稿日期:2014-01-06
基金项目:国家自然科学基金项目(41401526);卫星测绘技术与应用国家测绘地理信息局重点实验室项目(KLAMTA-201404);测绘遥感信息工程国家重点实验室项目((13)重04);江西省数字国土重点实验室开放研究基金项目(DLLJ201402)。
作者简介:何海清,男,1983年生,博士,讲师,主要从事摄影测量与遥感、大地测量数据处理、地理信息科学等研究。E-mail:hyhqing@163.com。

而自检校法把可能存在的系统误差,诸如像主点偏移、镜头畸变等作为待定参数参与区域网空中三角测量整体平差运算,不易把这部分系统误差剔除。文献[13]提出以平面格网作为参考对象且适合无人机载相机标定的方法,但未顾及平面格网点检测有偏差的情况下的相机参数解算,因而在格网点定位有偏差时,可能会影响参数解算精度,甚至造成迭代运算不收敛或解算失败。

本文针对常用的低空传感器畸变参数解算未顾及参考对象存在粗差或偏差等问题,提出抗差严密解法,以平面格网作为参考对象,通过二维 DLT 求解传感器内外方位元素初值,利用 Huber 法约束存在粗差或定位偏差的格网点,然后采用带有约束条件的迭代选权方法精化初值,实现畸变参数的抗差严密解算。

1 二维 DLT

摄影测量中,共线方程表达式为:

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x, y) 、 (x_0, y_0) 、 (X, Y, Z) 、 (X_s, Y_s, Z_s) 分别为像点坐标、像主点坐标、物方空间坐标、摄影中心的物方空间坐标, f 为焦距, (a_i, b_i, c_i) 为旋转矩阵中各参数。

在二维 DLT 中,式(1)可改化为:

$$\begin{cases} x = \frac{h_1 X + h_2 Y + h_3}{h_7 X + h_8 Y + 1} \\ y = \frac{h_4 X + h_5 Y + h_6}{h_7 X + h_8 Y + 1} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\lambda = (a_3 X_s + b_3 Y_s + c_3 Z_s)$,

$$\begin{cases} h_1 = f \frac{a_1}{\lambda} - \frac{a_3}{\lambda} x_0 \\ h_2 = f \frac{b_1}{\lambda} - \frac{b_3}{\lambda} x_0 \end{cases}, \begin{cases} h_4 = f \frac{a_2}{\lambda} - \frac{a_3}{\lambda} y_0 \\ h_5 = f \frac{b_2}{\lambda} - \frac{b_3}{\lambda} y_0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} h_3 = x_0 - \frac{f}{\lambda} (a_1 X_s + b_1 Y_s + c_1 Z_s) \\ h_6 = y_0 - \frac{f}{\lambda} (a_2 X_s + b_2 Y_s + c_2 Z_s) \end{cases}, \begin{cases} h_7 = -\frac{a_3}{\lambda} \\ h_8 = -\frac{b_3}{\lambda} \end{cases}$$

若不考虑镜头畸变影响,相机内方位元素像主点 (x_0, y_0) 和焦距 f 的计算公式为:

$$\begin{aligned} & (-h_1 h_7^2 h_8 - h_1 h_8^3 + h_2 h_7^3 + h_2 h_7 h_8^7) x_0 + (-h_4 h_7^2 h_8 - h_4 h_8^3 + h_5 h_7^3 + h_5 h_7 h_8^7) y_0 + \\ & (-h_1 h_2 h_7^2 + h_1 h_2 h_8^2 + h_1^2 h_7 h_8 - h_2^2 h_7 h_8 - h_4 h_5 h_7^2 + h_4 h_5 h_8^2 + h_4^2 h_7 h_8 - h_5^2 h_7 h_8) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$f = [(-h_1 - h_7 x_0)(h_2 - h_8 x_0) - (h_4 - h_7 y_0)(h_5 - h_8 y_0)] / (h_7 h_8)]^{-1/2} \quad (4)$$

由式(3)可知,像主点 (x_0, y_0) 线性相关,可在主纵线上自由移动,单张图像无法解出唯一的像主点 (x_0, y_0) ,需两张或两张以上不同角度拍摄的平面格网图像才能得出唯一解。由式(3)计算的结果,可通过式(4)解算出焦距。

根据旋转矩阵中 (a_i, b_i, c_i) 之间的关系和正交性,可解算出相机的外方位元素 (ϕ, ω, κ) 旋转角和 (X_s, Y_s, Z_s) 摄影中心物方坐标。

2 畸变参数抗差严密解

考虑镜头畸变 (k_1, k_2, p_1, p_2) 影响时,在通过二维 DLT 解算相机的内方位与外方位元素初值后,代入光束法误差方程:

$$V = B\hat{x} - l \quad (5)$$

$$\hat{x} = (B^T P B)^{-1} B^T P l \quad (6)$$

式(5)中, $V = [v_x, v_y]^T$,

$B =$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial X_s}, \frac{\partial x}{\partial Y_s}, \frac{\partial x}{\partial Z_s}, \frac{\partial x}{\partial \phi}, \frac{\partial x}{\partial \omega}, \frac{\partial x}{\partial \kappa}, \frac{\partial x}{\partial X}, \frac{\partial x}{\partial Y}, \frac{\partial x}{\partial Z}, \frac{\partial x}{\partial f_x}, \frac{\partial x}{\partial f_y}, \\ \frac{\partial x}{\partial x_0}, \frac{\partial x}{\partial y_0}, \frac{\partial x}{\partial k_1}, \frac{\partial x}{\partial k_2}, \frac{\partial x}{\partial p_1}, \frac{\partial x}{\partial p_2}, \\ \frac{\partial y}{\partial X_s}, \frac{\partial y}{\partial Y_s}, \frac{\partial y}{\partial Z_s}, \frac{\partial y}{\partial \phi}, \frac{\partial y}{\partial \omega}, \frac{\partial y}{\partial \kappa}, \frac{\partial y}{\partial X}, \frac{\partial y}{\partial Y}, \frac{\partial y}{\partial Z}, \frac{\partial y}{\partial f_x}, \frac{\partial y}{\partial f_y}, \\ \frac{\partial y}{\partial x_0}, \frac{\partial y}{\partial y_0}, \frac{\partial y}{\partial k_1}, \frac{\partial y}{\partial k_2}, \frac{\partial y}{\partial p_1}, \frac{\partial y}{\partial p_2} \end{bmatrix}$$

$$\hat{x} = [\Delta X_s, \Delta Y_s, \Delta \phi, \Delta \omega, \Delta \kappa, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta f_x, \Delta f_y, \Delta x_0, \Delta y_0, \Delta k_1, \Delta k_2, \Delta p_1, \Delta p_2]^T, l = [l_x, l_y]^T.$$

式(6)中, P 为权矩阵。文献[13]中,采用选权迭代法确定权值,权的函数为:

$$p_i = p_i^0 \cdot F(v_i, \sigma_{v_i}, Q) = p_i^0 \cdot \frac{1}{1 + (a_i |v_i|)^d} \quad (7)$$

其中, $a_i = \frac{1}{1.4 \hat{\sigma}_{v_i}} = \frac{\sqrt{p_i^0}}{1.4 \hat{\sigma}_{\sqrt{p_i^0}} r_i}$, $d = 3.5 + \frac{82}{81 + Q^4}$, $Q = \frac{\hat{\sigma}_0}{\sigma_{\text{先验值}}}$ 。式中, v_i 为第 i 个观测值残差, p_i^0 为第 i 个观测值之先验权, r_i 为第 i 个观测值之多余观测分量, $\hat{\sigma}_0$ 为单位权中误差估值。当平面格网点定位存在粗差时,误差方程迭代收敛较慢甚至失败,可能造成相机畸变参数解算有误。为规避粗差对相机参数解算造成的不利影响,在迭代选权之前,采用稳健估计 Huber 法约束存在定位粗差或偏差的参考对象,其表达式为:

$$v = \begin{cases} |v|, & |v| < \sigma \\ \sqrt{2\sigma(|v| - \sigma^2)}, & |v| \geq \sigma \end{cases} \quad (8)$$

式中, v 为残差, σ 为中误差。式(6)改化为:

$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} + \lambda \text{diag}(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B}))^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$ (9)

式中, λ 为约束计算结果快速收敛参数, diag 为对角矩阵。通过式(8)约束残差后, 利用式(7)迭代选权解算各待求参数值, 其迭代运算过程为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \hat{\mathbf{x}}$$
 (10)

式中, $\mathbf{X} = [X_s, Y_s, Z_s, \phi, \omega, \kappa, X, Y, Z, f_x, f_y, x_0, y_0, k_1, k_2, p_1, p_2]^T$, \mathbf{X}_0 为 \mathbf{X} 的初值。

3 试验结果及分析

为验证本文方法对低空传感器畸变参数解算的

精度、实用性与可靠性, 采用低空摄影常用传感器 Cannon 5D Mark II 进行试验, 其像幅为 $5\,616 \times 3\,744$ 像素, 像元物理大小为 $6.4\,\mu\text{m}$ 。以二维平面格网点作为参考对象, 选取具有代表性的 10 个不同角度拍摄图像提取的存在粗差或定位偏差的格网点进行畸变参数解算, 见图 1。为便于对比分析, 选用单位权光束法平差(方法①)、文献[13]中的方法(方法②)、本文方法(方法③, 经多次试验, λ 取值 2 时, 精度与效率最优)进行试验, 结果见表 1, 同一硬件环境下参数解算时间见表 2。

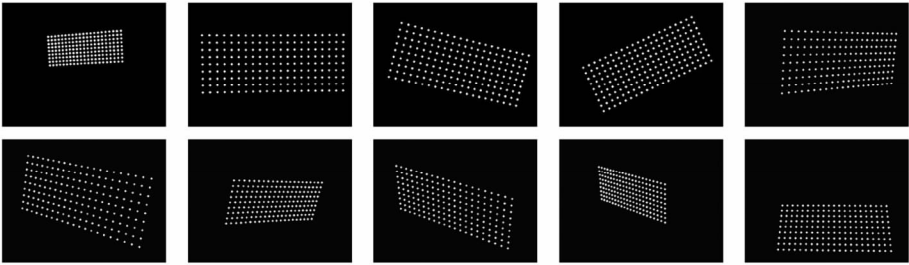


图 1 不同角度格网点
Fig. 1 The grids from difference views

表 1 传感器检校结果对比(单位:像素)

Tab. 1 Comparison of sensor calibration results(unit: pixel)

		内方位元素				畸变参数			
		f_x	f_y	x_0	y_0	k_1	k_2	p_1	p_2
①	数值	5 539. 112	5 534. 375	2 820. 957	1 873. 182	$5. 129 \times 10^{-5}$	$-6. 679 \times 10^{-8}$	$-4. 113 \times 10^{-6}$	$-2. 144 \times 10^{-6}$
	中误差	2. 016	1. 737	0. 228	0. 279	$2. 912 \times 10^{-10}$	$4. 481 \times 10^{-9}$	$5. 817 \times 10^{-7}$	$2. 163 \times 10^{-7}$
	反投影								
	中误差	2. 31							
②	数值	5 543. 534	5 539. 190	2 813. 344	1 880. 004	$6. 332 \times 10^{-5}$	$-5. 011 \times 10^{-8}$	$-4. 627 \times 10^{-6}$	$-1. 491 \times 10^{-6}$
	中误差	1. 142	0. 879	0. 956	1. 201	$2. 088 \times 10^{-10}$	$2. 997 \times 10^{-9}$	$5. 544 \times 10^{-7}$	$1. 738 \times 10^{-7}$
	反投影								
	中误差	1. 17							
③	数值	5 546. 562	5 538. 751	2 816. 625	1 878. 322	$6. 165 \times 10^{-5}$	$-5. 271 \times 10^{-8}$	$-4. 533 \times 10^{-6}$	$-1. 612 \times 10^{-6}$
	中误差	0. 316	0. 339	0. 203	0. 207	$1. 342 \times 10^{-10}$	$2. 271 \times 10^{-9}$	$5. 174 \times 10^{-7}$	$1. 442 \times 10^{-7}$
	反投影								
	中误差	0. 20							

表 2 3 种方法解算时间

Tab. 2 Comparison of consuming time with three methods

	①	②	③
耗时/ms	317	209	132

由表 1 易知, 在精化传感器内方位元素(f_x, f_y, x_0, y_0)与畸变参数(k_1, k_2, p_1, p_2)的 3 种方法中, 单位权光束法平差的中误差最大, 文献[13]的方法次之, 本文方法最小。3 种方法中, 格网点坐标反投影中误差分别为 2.31、1.17、0.2 像素。本文方法解算的传感器畸变参数精度最高, 传感器像元纵横比约为 0.998 5, 接近正方形, 焦距标定精度在 0.3 像素

左右, 像主点精度 0.2 像素左右。由表 2 中 3 种方法解算时间对比可知, 方法①采用单位权迭代解算耗时最多; 方法②顾及了粗差, 效率有所提高; 而方法③兼顾粗差与收敛效率, 耗时最短。

4 结 语

在以二维平面格网点作为参考对象的低空传感器畸变参数解算中, 常用的方法未顾及参考对象定位存在粗差或偏差等问题, 难以满足高精度畸变参数解算的需要。本文提出低空传感器畸变参数的抗差严密解法, 通过二维 DLT 得到初值, 利用 Huber 法约束存在粗差或定位偏差的格网点, 然后采用迭

代选权的方法精化初值。试验验证了本文方法的可靠性和实用性,格网点反投影法中误差仅为单位权和选权迭代的光束法平差的 $1/11$ 和 $1/6$ 左右,解算出的畸变参数精度显然更高,具有更优的抗差和抗干扰性。

参 考 文 献

- Clarke T A. The development of camera calibration methods and models[J]. Photogrammetric Record,1998,16(9):51-66.
- 冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002. (Feng Wenhao. Close-range photogrammetry[M]. Wuhan:Wuhan University Press,2002)
- Keith F, Anthon V, Ndimi B. An inexpensive automatic and accurate camera calibration method[C]. Thirteenth Annual South African Workshop on Pattern Recognition, PRASA, 2002.
- Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2000,22(11):1 330-1 334.
- 张永军,张祖勋,张剑清. 利用二维 DLT 及光束法平差进行数字摄影机标定[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2002,27(6):566-571. (Zhang Yongjun, Zhang Zuxun, Zhang Jianqing. Camera calibration using 2D_DLT and bundle adjustment with planar scenes[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(6):566-571)
- 詹总谦. 基于纯平液晶显示器的相机标定方法与应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2006. (Zhan Zongqian. Research on camera calibration based on completely flat liquid crystal display[D]. Wuhan:Wuhan University,2006)
- Brown. Close-range camera calibration[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,1971,37(8):855-866.
- Heuvel D. Exterior orientation using coplanar parallel lines[C]. 10th Scandinavian Conference on Image Analysis, Lappeenranta,1997.
- Cipolla R, Boyer E. 3D model acquisition from uncalibrated images[C]. IAPR Workshop on Machine Vision Applications, Japan,1998.
- Wu Q. A three-stage system for camera calibration[C]. Multispectral Image Processing and Pattern Recognition, Wuhan,2001.
- Roger T Y. Versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation,1987,3(4):323-344.
- Abdel-Aziz Y I. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry[C]. Close-Range Photogrammetry,1971.
- 何海清,黄声享. 一种稳健估计的无人机机载相机标定法[J]. 测绘通报,2013(2):99-102. (He Haiqing, Huang Shengxiang. A method of UAVs airborne camera calibration based on robust estimation[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2013(2):99-102)
- (上接第121页)
- 杨元喜. 抗差估计理论及其在大地测量中的应用[D]. 武汉:中国科学院测量与地球物理研究所,1991. (Yang Yuanxi. The theory and application in geodetic surveying of robust estimating[D]. Wuhan:Institute of Geodesy and Geophysics, CAS,1991)
- 杨元喜. 抗差估计理论及其应用[M]. 北京:八一出版社,1993. (Yang Yuanxi. The theory and application of robust estimating[M]. Beijing:Bayi Press,1993)
- 周江文,黄幼才,杨元喜,等. 抗差最小二乘法[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1997. (Zhou Jiangwen, Huang Youcai, Yang Yuanxi, et al. Robust least squares[M]. Wuhan:Publishing House of Huazhong University of Science and Technology,1997)
- 周江文,杨元喜,欧吉坤,等. 抗差估计论文集[M]. 北京:测绘出版社,1992. (Zhou Jiangwen, Yang Yuanxi, Ou Jikun, et al. Corpus of robust estimating[M]. Beijing:Surveying and Mapping Press,1992)
- 杨世清,余学祥,吕伟才. 粗差估计型抗差估计[J]. 武汉测绘科技大学学报,1998,23(1):10-13. (Yang Shiqing, Yu Xuexiang, Lv Weicai. Robust estimation with the estimator of outliers[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping,1998,23(1):10-13)
- Yang Yuanxi. Robust estimation for dependent observations[J]. Manuscripta Geodaetica,1994,19:10-217.
- 刘经南,姚宜斌,施闯. 基于等价方差-协方差阵的稳健最小二乘估计理论研究[J]. 测绘科学,2000,25(3):15-18. (Liu Jingnan, Yao Yibin, Shi Chuang. Theory research on robustified least squares estimation based on equivalent variance covariance[J]. Science of Surveying and Mapping,2000,25(3):15-18)
- 王潜心,徐天河,许国昌. 粗差检测与抗差估计相结合的方法在动态相对定位中的应用[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011,36(4):476-480. (Wang Qianxin, Xu Tianhe, Xu Guochang. Application of combining method of outlier detection and robust estimation to GPS kinematic relative position[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2011,36(4):476-480)
- 韦博成,鲁国斌,史建清. 统计诊断引论[M]. 南京:东南大学出版社,1991. (Wei Bocheng, Lu Guobin, Shi Jianqing. Introduction to statistical diagnostics[M]. Nanjing:Publishing House of Dongnan University,1991)
- 李新娜. 多个粗差探测的 Bayes 方法与应用[D]. 郑州:信息工程大学,2008. (Li Xinna. Bayesian methods and application for multiple gross errors detections[D]. Zhengzhou:Information Engineering University,2008)
- 杨元喜. 自适应动态导航定位[M]. 北京:测绘出版社,2006. (Yang Yuanxi. Adaptive navigation and kinematic positioning[M]. Beijing:Surveying and Mapping Press,2006)