

文章编号:1001-1595(2011)03-0393-04

灭点误差分布的理论精度评定

李 畅¹, 张祖勋², 张永军²

1. 华中师范大学 城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079

Evaluating the Theoretical Accuracy of Error Distribution of Vanishing Points

LI Chang¹, ZHANG Zuxun², ZHANG Yongjun²

1. College of Urban and Environmental Science, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China; 2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: The related researches of vanishing point have been focusing on its automatic detection and camera calibration for a long time, however there were few researches on its error distribution. Aiming at the closing error issue of lines intersection and the error distribution of vanishing points, we have made in-depth discussions. How to set initial weights for the adjustment solution of single image vanishing points is presented. Furthermore, we propose solving and estimating error distribution of vanishing points based on iteration method with variable weights, cofactor matrix and error ellipse theory. Experimental results reveal the law of error distribution of vanishing points. **Key words:** vanishing point; error distribution; error ellipse; accuracy

摘 要: 长久以来灭点的研究都集中在自动检测和相机检校方面,然而对其本身的误差分布研究并不多。针对直线交会灭点时存在的闭合差问题和灭点的误差分布问题,进行深入探讨。构建单像灭点平差解算的初始选权方案,并提出基于选权迭代法、协因数矩阵和误差椭圆理论来解算和估计灭点误差分布的方法。通过实验揭示灭点误差分布规律。

关键词: 灭点; 误差分布; 误差椭圆; 精度

中图分类号: P232 **文献标识码:** A

基金项目: 国家自然科学基金(41071233; 40671157); 湖北省自然科学基金(2010CDZ005); 华中师范大学中央高校基本科研课题项目(CCNU10A01001)

1 引言

随着数码相机的迅速普及与推广,一种不需要参照物的灭点定标技术得到了广泛应用^[1]。尤其在建筑摄影测量和计算机视觉界对“无穷远点”在“建筑物测量”与它的“三维重建”中的作用均十分重视。

国外,在摄影测量^[2]、机器人^[3]和计算机视觉^[4]等领域对灭点都有深入的研究。国内,文献^[5-6]将传统的点摄影测量与当代的线摄影测量(共面方程)以及无穷远点(灭点)理论综合升华为广义点摄影测量理论,除了在近景摄影测量、工业测量、城市三维建模、变化检测数据更新等方面有广泛的成功应用之外,还将铅垂线对应的灭点(像底点)应用于传统的航空摄影测量中进行大比例尺城区空中三角测量^[7]。

到目前为止,基于灭点的研究工作仍然是以应用为主:如灭点自动检测^[3,8,11,12,14]和基于灭点的相机检校^[1,2,4]方面,虽然也有精度研究,但都是以灭点为桥梁建立直线与相机参数的关系,绕

过灭点探讨相机参数的精度,然而对灭点本身的误差及其对应的误差空间分布研究并不多。故本文将着重探讨灭点误差的分布问题。

2 灭点误差

2.1 直线提取与灭点检测

首先需从影像中提取特征线,然后对直线进行分组解算其对应的灭点。本文的直线提取算法借鉴文献^[9]中的 LSTM 并综合了 Wallis 滤波、Canny算子和基于假设检验的直线特征编组等算法。文献^[10]给出的直线段误差评估方法有一定的局限性,对较长的直线段无法准确地表达误差大小,故建议采用 LSTM 的平差模型进行精度估计。

国内外有大量的研究关于灭点的自动检测^[2,4,11-14]。以上算法皆存在各自不足,综合考虑直线分组、灭点精度的可靠性和计算效率,取长补短,本文提出采用“RANSAC+粗差探测平差”的方法。

2.2 灭点平差模型及解算

由于噪声的存在,空间平行线在影像上的投

影未必交于一点,即存在闭合差。所谓灭点 V 就是物方空间的一组平行线在像方投影的交点。这就意味着每一条平行线在像方的投影 ij 必然通过该组平行线所对应的灭点,如图 1,由 i, j, V 三点共线可得

$$(y_V - y_i)(x_j - x_i) - (x_V - x_i)(y_j - y_i) = 0 \quad (1)$$

式中, (x_V, y_V) 为灭点 V 的坐标; $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ 分别为点 i 和 j 的坐标。线性化后

$$[(y_j - y_V)v_{xi} + (x_V - x_j)v_{yi} + (y_V - y_i)v_{xj} + (x_i - x_V)v_{yj} + (y_i - y_j)v_x + (x_j - x_i)v_y] + d_0 = 0 \quad (2)$$

式中,

$$d_0 = (y_V - y_i)(x_j - x_i) - (x_V - x_i)(y_j - y_i) |^0$$

根据灭点检测分组后的直线可列矩阵方程

$$\mathbf{A}_{n \times 4n} \mathbf{V}_{4n \times 1} + \mathbf{B}_{n \times 2} \hat{\mathbf{x}}_{2 \times 1} + \mathbf{W}_{n \times 1} = \mathbf{0} \quad (3)$$

式中,观测向量为 $\mathbf{V} = [v_{xi} \ v_{yi} \ v_{xj} \ v_{yj}]^T$;未知数(即灭点)为 $\mathbf{x} = [v_x \ v_y]^T$; \mathbf{A} 为观测系数矩阵; \mathbf{B} 为未知数系数矩阵; \mathbf{W} 为闭合差。此为附有参数的条件平差模型,其解为^[15]

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathbf{x}} &= -\mathbf{N}_{bb}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{N}_{aa}^{-1} \mathbf{W} \\ \mathbf{V} &= -\mathbf{P}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{N}_{aa}^{-1} (\mathbf{W} + \mathbf{B}\hat{\mathbf{x}}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{N}_{aa} = \mathbf{A}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}^T$, $\mathbf{N}_{bb} = \mathbf{B}^T\mathbf{N}_{aa}^{-1}\mathbf{B}$ 在迭代趋近解算时采用选权迭代法^[16]。

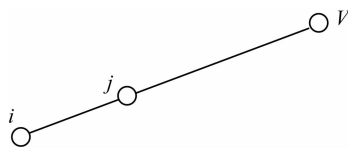


图 1 灭点与直线

Fig. 1 Vanishing point and straight-line

根据灭点的特点,本文提出了一种初始选权的方法,考虑到如下两点:

(1) 与直线间的夹角有关。直线间的夹角趋于 90° 时灭点精度最高,由于最大夹角一般不会出现大于 90° 且趋于 180° 的情况,故仅考虑小夹角,即将影像划分为规则格网,并统计每个格网内包含的直线段数量,显然格网内直线段数量多,表明直线间的夹角小,应该给予一个较小的权

$$p_1 = 1/L_i \quad (5)$$

式中, p_1 表示权; L_i 表示统计的直线数量。

(2) 与直线段长度有关。直线段越长其变化幅度就越小,那么所交灭点的稳健性就越好。所有直线段中最长和最短的分别为 D_{\min}, D_{\max} , 权为

$$p_2 = \frac{D_i - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (6)$$

式中, p_2 表示某条直线段误差方程的权; D_i 为第 i 条直线段的长度。综合考虑式(5)和式(6)初始权为

$$p_i = \frac{1}{L_i} \left(1 + \frac{D_i - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \right) \quad (7)$$

2.3 精度评定

文献[4]提出用一种评价灭点精度的指标,但该估值往往很大且无法准确评价灭点精度,尤其对灭点的点位误差,和任意方向上的位差都无法评定。故本文提出基于误差椭圆评定灭点误差的方法。

由平差中的协因数传播律可知式(3)对应未知参数(灭点)的方差为

$$\left. \begin{aligned} \hat{\sigma}_x^2 &= \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{Q}_{xx} \\ \hat{\sigma}_y^2 &= \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{Q}_{yy} \end{aligned} \right\}, \quad \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{xx} & \mathbf{Q}_{xy} \\ \mathbf{Q}_{yx} & \mathbf{Q}_{yy} \end{bmatrix} = \mathbf{N}_{bb}^{-1} \quad (8)$$

则灭点的点位误差为

$$\hat{\sigma}_P^2 = \hat{\sigma}_x^2 + \hat{\sigma}_y^2 = \hat{\sigma}_0^2 (\mathbf{Q}_{xx} + \mathbf{Q}_{yy}) \quad (9)$$

依文献[15]误差椭圆参数计算如下

$$\left. \begin{aligned} E^2 &= \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{Q}_{EE} = \hat{\sigma}_0^2 (\mathbf{Q}_{xx} + \mathbf{Q}_{yy} + K) / 2 \\ F^2 &= \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{Q}_{FF} = \hat{\sigma}_0^2 (\mathbf{Q}_{xx} + \mathbf{Q}_{yy} - K) / 2 \\ K &= \sqrt{(\mathbf{Q}_{xx} - \mathbf{Q}_{yy})^2 + 4\mathbf{Q}_{xy}^2} \\ \tan \varphi_E &= \frac{\mathbf{Q}_{EE} - \mathbf{Q}_{xx}}{\mathbf{Q}_{xy}} = \frac{\mathbf{Q}_{xy}}{\mathbf{Q}_{EE} - \mathbf{Q}_{yy}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, \mathbf{Q}_{EE} 表示灭点在 φ_E 方向上取得位差的极大值; \mathbf{Q}_{FF} 为 φ_E 正交方向的极小值; E 和 F 对应误差椭圆的长轴和短轴。

3 实验分析

实验设备是一个用于工件摄影测量的旋转平台(如图 2),根据 LCD 平面的法线方向与摄像机主光轴方向的夹角定义 θ 角,使用平台每旋转 10° 拍摄生成实验数据。考虑到数据质量,仅选择 $0^\circ \sim 70^\circ$ 的影像做实验。使用 Nikon COOLPIX P5100 相机获取数据,焦距 7.5 mm,像幅为 $4\ 000 \times 3\ 000$ 像素。



图 2 实验设备

Fig. 2 Experimental equipment

实验结果如图 3 (a)和(b)所示。图 3 反映了 θ 在 $0^\circ \sim 70^\circ$ 变化时水平方向 X 和铅垂线方向 Y 对应灭点的点位误差,分析如下:

(1) 灭点解算易受噪声干扰。就外部条件因素而言:① 平台的光照条件;② LCD 镜面反光周

围物体;③ LCD 在侧视角较大时本身就会出现严重失真。

(2) Y 灭点误差随 θ 变化存在明显的不确定性。这是由于物方铅垂线方向直线在像方随 θ 变化不大,总是近似平行,所以只能在非常远处才能交会灭点,故精度差。

(3) X 灭点误差随 θ ($0^\circ \sim 90^\circ$) 增大而减小。这是因为 θ 较小时,物方平行线在像方也几乎平行很难交会出灭点,反之随着 θ 增大,物方平行线越容易交会,灭点的精度也不断提高,但是精度的提高也趋于平缓,原因如下:① 从平差内部因素而言,随着 θ 增大虽然 X 对应的像方直线间的交会角度变大会增加可靠性,但是另一方面像方直线段的长度不断变短从而又会降低参与平差的观测直线段的可靠性;② 就主要外部因素而言,随着 θ 增大 LCD 的失真愈来愈严重,影响了相机获取数据的质量,而且实验表明当 θ 大于 60° 后提取

的直线数量和精度明显降低,所以本实验从侧面说明实验所用的 LCD 观测的视场角在 $\pm 60^\circ$ 以内较为合适,所以本实验没有做 80° 以上数据的实验;③ 由于偶然误差、系统误差和粗差不可能完全消除,故误差也只能趋近于 0。需要说明的是,真实场景中随 θ 增大一般不会出现 LCD 的失真,所以精度应会高于本实验结果。

灭点误差椭圆的参数见表 1,参数 φ_E 意义与文献[15]表示误差椭圆的长轴与 x 轴的夹角不同,本文表示与 y 轴的夹角。 V_X 、 V_Y 分别表示 X 和 Y 方向灭点的坐标,可以从表中看出随着 θ 增大,X 灭点交会的坐标不仅越来越远,而且误差椭圆长轴和短轴长度先急速减少再趋于平缓, φ_E 也逐渐稳定。Y 灭点交会的坐标通常很远,而且误差椭圆长轴的长度很大,说明该方向灭点可靠性极低。实验还表明采用式(7)作为初始权还可以减少平差迭代次数,加速平差的收敛。

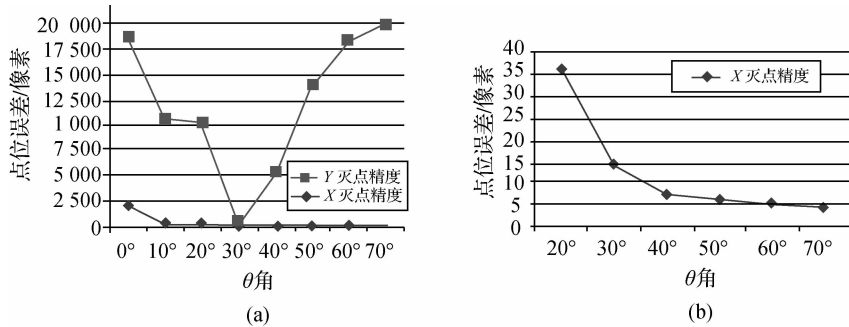


图 3 灭点误差随 θ 角变化的曲线
Fig. 3 The curve of vanishing points error with changed θ angle

表 1 灭点误差椭圆参数

Tab. 1 The parameters of error ellipse of vanishing points

像素

顺时针	灭点坐标: $V(x, y)$	E	F	φ_E	$\hat{\sigma}_0$
0°	$V_X:(5\ 414\ 814.4, -136\ 300.1)$	8 135.5	14.5	178.6°	0.27
	$V_Y:(93\ 079.0, 3\ 718\ 193.2)$	12 632.4	23.9	88.6°	0.34
10°	$V_X:(583\ 658.4, -49\ 965.8)$	640.7	2.9	175.1°	0.38
	$V_Y:(190\ 253.5, 2\ 277\ 737.0)$	5 519.6	16.2	85.2°	0.33
20°	$V_X:(-182\ 578.1, 9\ 875.2)$	56.2	0.9	174.9°	0.37
	$V_Y:(1\ 883.6, 19\ 809.8)$	9 876.7	22.0	84.1°	27.31
30°	$V_X:(-97\ 500.2, 6\ 669.9)$	20.1	0.6	174.6°	0.37
	$V_Y:(8\ 055.1, 5\ 697.2)$	1 926.0	19.1	83.8°	13.82
40°	$V_X:(-5\ 670.5, 691.1)$	13.8	0.6	174.3°	3.56
	$V_Y:(171.3, 1\ 108.4)$	838.0	12.7	83.2°	5.79
50°	$V_X:(-4\ 214.0, 569.2)$	7.7	0.5	174.0°	3.06
	$V_Y:(529.1, 667.3)$	601.3	3.8	83.0°	1.38
60°	$V_X:(-2\ 751.6, 438.1)$	5.4	0.5	175.0°	3.96
	$V_Y:(-34\ 175.1, -263\ 260.2)$	9 827.0	6.2	82.7°	0.29
70°	$V_X:(-1\ 951.4, 362.9)$	4.8	0.5	174.9°	3.98
	$V_Y:(-1\ 277\ 913.8, -178\ 134.6)$	15 329.4	11.3	82.4°	0.55

4 结语与展望

本文探讨了直线提取的精度问题,从像方直线与灭点平差模型中导出了灭点误差椭圆参数计算方法,构建了误差方程初始权分配方案。并通过模拟实验,分析并讨论了直线提取精度和灭点误差分布。虽然可以通过调整拍摄角度提高灭点解算精度,但通常最佳拍摄角度不易获得,所以基于灭点解算影像方位元素的可靠性问题并未真正解决,尤其是基于单像解算影像内方位元素和外方位角元素的可靠方法以及对空中三角测量提供初值的收敛性仍需进一步探究,这是后续研究的重点。

参考文献:

- [1] XIE Wenhan, ZHANG Zuxun. Camera Calibration Based on Vanishing Points of Multi-image [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004, 33(4): 335-340. (谢文寒, 张祖勋. 基于多像灭点的相机定标 [J]. 测绘学报, 2004, 33(4): 335-340.)
- [2] VAN DEN HEUVEL F A. Automation in Architectural Photogrammetry: Line-photogrammetry for the Reconstruction from Single and Multiple Images[D]. Delft: Delft University of Technology, 2003.
- [3] SCHUSTER R, ANSARI N, BANIHASHEMI A. Steering a Robot with Vanishing Points [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(4): 491-498.
- [4] CAPRILE B, TORRE V. Using Vanishing Points for Camera Calibration [J]. International Journal of Computer Vision, 1990, 4(2): 127-140.
- [5] ZHANG Zuxun, ZHANG Jianqing. Generalized Point Photogrammetry and Its Application[C]//Proceedings of the 20th ISPRS Congress Commission. Istanbul: ISPRS, 2004.
- [6] ZHANG Zuxun, ZHANG Yongjun, ZHANG Jianqing, et al. Photogrammetric Modeling of Linear Features with Generalized Point Photogrammetry [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2008, 74(9): 1119-1127.
- [7] ZHANG Zuxun, ZHANG Yong. Study of the Vertical Lines Supported Aerial Triangulation over Urban Areas [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(8): 659-662. (张祖勋, 张勇. 城区铅垂线辅助空中三角测量研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2007, 32(8): 659-662.)
- [8] KALANTARI M, JUNG F, GUEDON J. Precise, Automatic and Fast Method for Vanishing Point Detection[J]. The Photogrammetric Record, 2009, 24(127): 246-263.
- [9] ZHANG Yongjun. Three Dimensional Reconstruction and Visual Inspection of Industrial Sheetmetal Parts with Image Sequences [D]. Wuhan: Wuhan University, 2002. (张永军. 基于序列图像的工业钣金件三维重建与视觉检测[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.)
- [10] TAYLOR C J, KRIEGMAN D J. Structure and Motion from Line Segments in Multiple Images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(11): 1021-1032.
- [11] SHUFELT J A. Performance Evaluation and Analysis of Vanishing Point Detection Techniques[C]//Proceedings of ARPA Image Understanding Workshop. Palm Springs: Morgan Kaufmann Publishers, 1996: 1113-1132.
- [12] KANG Zhizhong, ZHANG Liqiang, ZLATANOVA S, et al. An Automatic Mosaicking Method for Building Facade Texture Mapping Using a Monocular Close-range Image Sequence [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(3): 282-293.
- [13] SCHAFFALITZKY F, ZISSERMAN A. Planar Grouping for Automatic Vanishing Lines and Points[J]. Image and Vision Computing, 2000, 18(9): 647-658.
- [14] ALMANSA A, DESOLNEUX A, VAMECH S. Vanishing Points Detection without Any a Priori Information [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25 (4): 502-507.
- [15] Subject Group of Survey Adjustment, School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University. Error Theory and Foundation of Surveying Adjustment [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. (武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.)
- [16] LI Deren, YUAN Xiuxiao. Error Processing and Reliability Theory [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. (李德仁, 袁修孝. 误差处理与可靠性理论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.)

(责任编辑:雷秀丽)

收稿日期: 2010-12-19

修回日期: 2011-03-30

第一作者简介: 李畅(1982—),男,博士,讲师,从事数字摄影测量与计算机视觉、遥感模式识别的教学和研究。

First author: LI Chang(1982—), male, PhD, lecturer, mainly engaged in the research of digital photogrammetry and computer vision, remote sensing pattern recognition.

E-mail: lcshaka@126.com, lichang@mail.ccnu.edu.cn