

文章编号:1007-2780(2017)03-0227-07

靶场光学镜头畸变校正方法研究

于国栋*

(中国白城兵器试验中心,吉林 白城 137001)

摘要:光学镜头畸变是影响靶场光学设备测试精度的一个重要因素,特别是短焦大视场情况下尤为显著。目前采用的修正方法虽然能起到一定的效果,但是其修正后的残留误差依然较大,不容忽视,为了消除其影响,提高设备测角精度,提出了局部区域最小二乘法和分形插值曲面法,并采用上述两种算法对光学镜头畸变校正进行研究。首先,将整个视场($40^{\circ} \times 30^{\circ}$)以网格的方式进行划分,间隔 1° ,利用平行光管精确测量网格点的畸变值。局部区域最小二乘法是将测量点周围 $N \times N$ 网格点的畸变值作为观测值,组成系数矩阵,求取修正函数的系数,进而求出测量点位置的修正值;分形插值曲面法是将视场内所有网格点数据进行插值,获取测量点位置的修正值。算例结果表明:两种算法分别以局部和全局的方式进行校正,测角精度有明显提高,修正后精度可达 $10''$,满足靶场试验的测试要求,对提高终点坐标测量精度起到了积极的作用。

关键词:畸变;短焦大视场;测角精度;局部区域最小二乘;分形插值

中图分类号: TB851+.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173203.0227

Distortion correction method for optical lens of the range

YU Guo-dong

(Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng 137001, China)

Abstract: One of the key factors which influence the accuracy of the optical devices in a range is the distortion of the camera lens, especially when the camera Field of View(FOV) is very wide under the condition of short focal length. To some extent, current calibration methods works well. However, the residual errors are still so large that cannot be neglected. In order to eliminate the effect of these errors and improve the angle measuring accuracy, we propose two algorithms called Local Least Square (LLS) and Fractal Interpolation Surface(FIS) to calibrate the lens. Firstly, the FOV($40^{\circ} \times 30^{\circ}$) is meshed by an interval of 1° and the optical distortion values of the grid points are measured with precise collimator. In addition, the LLS utilize $N \times N$ grid values around the measuring point as observations to fit the calibration function and to find optimal solutions of the parameters of the function. Then the value of the measuring points will be calibrated by this fit function. On the other hand, the main idea of the FIS is to calibrate the measuring points by a fractal interpolation of all values of the grid. The experiments show that both the local optimization of LLS and the global interpolation of FIS can improve the angle measuring accuracy of the optical camera. The accuracy can

收稿日期:2016-11-04;修订日期:2016-12-02.

* 通信联系人, E-mail: day9527@126.com

achieve a magnitude of $10''$ which can well fulfill the testing requirement of the range and have a positive effect on final location positioning.

Key words: distortion; short focus wide-angle; angle measuring accuracy; local least square; fractal interpolation surface

1 引言

测角精度是短焦大视场光学测试设备一项重要技术指标,其精度直接影响设备的测试能力。随着武器装备的快速发展,靶场对测试设备的要求越来越高。

国内一些科研院所,很早已经对光学镜头畸变校正展开了大量的研究。文献[1]对短焦距大视场光学系统的畸变校正进行了研究,并建立了畸变校正的数学模型^[1],文献[2]采用了分区处理的思想,将成像靶面分为多个区,对每一个区域进行线性最小二乘处理得到所需要的参数^[2],文献[3]提出了一种分区修正靶面畸变的算法^[3],文献[4]根据畸变与焦距、成像高度之间对应的变化规律提出一种改进的半球形畸变校正模型^[4]。以上方法能很好的抑制畸变,提高精度,但是采用这些方法进行校正后的残留误差并非满足正态分布,其影响依然可能超出指标要求,不容忽视。

针对这个问题,目前靶场采用的畸变校正方法是用一个复杂函数(针对光学镜头产生畸变的主要因素确定的函数模型)拟合整个视场的畸变。这种方法精度提高有限,仅用一个函数虽然使整体精度提高,但是无法顾及局部区域,另外镜头在加工和安装过程中很难做到与设计要求完全一致,因此,从理论上建立的函数模型可能会产生偏差。

使用理论函数模型进行校正后的残留误差中存在系统误差,这些误差不具有随机性,对测角精度的影响与视场位置相关,在整个视场内的影响是不一致的。采用这种方法进行畸变校正,为使实际曲面与理论曲面更好的拟合,忽略了系统误差的影响,强制抑制精度较差区域,虽然整体精度提高,但是造成整个视场精度不均匀。

分形理论是一门描述自然界中许多不规则事物及现象的规律性学科^[5]。自然界中的许多事物不仅具有光滑性,而且也存在着大量分形曲面的实例。光学镜头获取的图像具有明显的分形特征,通过获取分形曲面上的部分数据信息,拟合出

整体形态,获取需要的信息。

本文提出了采用局部最小二乘法 and 分形插值曲面法对光学镜头进行畸变校正,通过对算例进行解算分析,取得了较好的效果。

2 原理

2.1 局部最小二乘法

局部区域最小二乘法,在保证精度的前提下可以有效降低系统误差的影响,该方法需要进行修正函数确定、权阵获取以及最小二乘解算等步骤。

2.1.1 修正函数

修正函数的选取是局部区域最小二乘法的关键,函数选取的准确性直接影响校正的效果。根据光学镜头设计及加工工艺控制方面的资料,基本可以确定修正函数符合二次曲面规律。因此,我们选择如下函数作为修正函数:

$$\Delta\alpha = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f, \quad (1)$$

其中: $\Delta\alpha$ 为角度修正值, x, y 为经纬仪编码器读数, a, b, c, d, e 为修正系数。

2.1.2 权值

采用最小二乘法进行解算的过程中,最重要的环节是权阵的确定。可以看出,参与解算的网格点数据对修正值的影响是不一样的,距离测量点越近影响越大。

如图 1 所示,文章选取测量点周围 4×4 网格

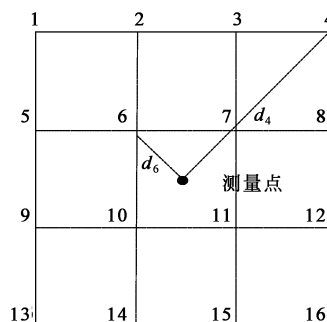


图 1 定权示意图

Fig.1 Sketch map of weight determination

点数据参与解算。每个网格点数据是单独测量的,因此可以假设互不相关,权阵除对角线元素外,其他均为零。

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & p_{16} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

对角线元素的确定原则:根据网格点与测量点之间距离的倒数,即:

$$p_i = \frac{1}{d_i}, \quad (3)$$

其中: p_i 为权阵对角线元素的值, d_i 为网格点与测量点之间距离, i 为网格点序号。

2.1.3 最小二乘法

确定了修正函数和权阵后,可以建立误差方程^[6]:

$$V = A\hat{X} - L, \quad (4)$$

其中 A 为系数矩阵。

$$A = \begin{pmatrix} x_1^2 & y_1^2 & x_1 y_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & y_2^2 & x_2 y_2 & x_2 & y_2 & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{16}^2 & y_{16}^2 & x_{16} y_{16} & x_{16} & y_{16} & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

其中: x_i, y_i 为经纬仪编码器读数, i 为网格点序号。

$\hat{X}$ 为系数列 $[a, b, c, d, e, f]^T$ 。 L 为观测值数据阵。

根据误差方程,在满足 $V^T P V = \min$ 条件下,解法方程,可得到:

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L. \quad (6)$$

2.2 分形插值曲面理论

1986年, Barnsley 首先提出了分形思想,强调自然界局部特征与整体的相似性,从而形成了分形插值曲线的相关理论^[7]。

2.2.1 分形插值曲面的模型建立

基本原理:对于给定的标准网格, $I = [a, b]$, $J = [c, d]$; 设 $D = I \times J$ 为整个视场的覆盖范围。以 $\Delta x, \Delta y$ 为步长,将视场划分为 $N \times M$ 个网格:

$$\begin{aligned} a &= x_0 < x_1 < \cdots < x_N = b \\ c &= y_0 < y_1 < \cdots < y_M = d \end{aligned}.$$

给定每个网格点上的数据 $(x_n, y_m, z_{n,m})$, $n=0, 1, \dots, N, m=0, 1, \dots, M$ 。欲构造二元分形插值函数 $f: D \rightarrow R$, 且满足 $z_{n,m} = f(x_n, y_m)$ 。

令水平方向的压缩变换为:

$$\varphi_n(x) = a_n x + b_n. \quad (7)$$

高低方向的压缩变换为:

$$\psi_n(y) = c_n y + d_n, \quad (8)$$

且满足条件 $\varphi_n(x_0) = x_{n-1}, \varphi_n(x_N) = x_n, \psi_m(y_0) = y_{m-1}, \psi_m(y_M) = y_m$ 可得:

$$\begin{cases} a_n = (x_n - x_{n-1}) / (x_N - x_0) \\ b_n = (x_{n-1} x_N - x_n x_0) / (x_N - x_0) \\ c_m = (y_m - y_{m-1}) / (y_M - y_0) \\ d_m = (y_{m-1} y_M - y_m y_0) / (y_M - y_0) \end{cases}. \quad (9)$$

令函数 z 方向的压缩变换为:

$$F_{n,m}(x, y, z) = e_{n,m} X + f_{n,m} y + g_{n,m} x y + \delta_{n,m} z + k_{n,m}, \quad (10)$$

其中 $\delta_{n,m}$ 为自由参数,其决定分形插值曲面的粗糙程度,满足 $0 < \delta_{n,m} < 1$,称为垂直比例因子。

由公式 7、8 可得:

$$\begin{cases} g_{n,m} = (z_{n-1,m-1} - z_{n-1,m} - z_{n,m-1} + z_{n,m} - \delta_{n,m}(z_{0,0} - z_{N,0} - z_{0,M} + z_{N,M})) / (x_0 y_0 - x_N y_0 - x_0 y_M + x_N y_M) \\ e_{n,m} = (z_{n-1,m-1} - z_{n,m-1} - \delta_{n,m}(z_{0,0} - z_{N,0}) - g_{n,m}(x_0 y_0 - x_N y_0)) / (x_0 - x_N) \\ f_{n,m} = (z_{n-1,m-1} - z_{n-1,m} - \delta_{n,m}(z_{0,0} - z_{0,M}) - g_{n,m}(x_0 y_0 - x_0 y_M)) / (y_0 - y_M) \\ k_{n,m} = z_{n,m} - e_{n-1,m} x_N - f_{n,m} y_M - \delta_{n,m} z_{N,M} - g_{n,m} x_N y_M \end{cases}. \quad (11)$$

令 $W_{n,m}(x, y, z) = (\varphi_n(x), \psi_n(y), F_{n,m}(x, y, z))$, 即可求出加密后的畸变值^[8]。

分形插值曲面模型的本质:将整体区域的变

化特征反映到局部区域,使得网格点处的畸变值变化趋势与整体变化趋势相一致^[9]。

3 算例分析

3.1 数据与实验

文章选用某型炸点坐标测量系统的光电经纬仪对文章的两种畸变校正方法进行验证。首先将整个视场区域通过网格的方式进行划分,网格间隔为 1° ,利用 5 m 平行光管测量网格点处的畸变值,将所有的畸变值以矩阵的形式存储。

使用平行光管测量畸变值的具体步骤如下:在平行光管一侧用恒光源照明,作为仪器的无穷远目标,调整经纬仪,使相机光轴与平行光管重叠,即当十字丝中心瞄准光源目标时,编码器读数方位角为 0° ,垂直角 90° 。然后将光源放置在网格点处,采用脱靶测量的方式对其进行测量。(所谓“脱靶”,即把光源放在视场中任意位置,用设备相机采集图像,图像中的坐标 x, y ,即称为脱靶量^[10]。)将 x, y 代入如下公式得到目标相对经纬仪的方位角和高低角^[2]:

$$\begin{cases} \Delta\alpha = \arctan\left(\frac{x}{f\cos\lambda_0 - y\sin\lambda_0}\right) \\ \alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha \\ \lambda = \arctan\left(\frac{(f\sin\lambda_0 + y\cos\lambda_0)\cos\Delta\alpha}{f\cos\lambda_0 - y\sin\lambda_0}\right) \end{cases}, \quad (12)$$

其中 α_0 为编码器方位角读数, λ_0 为编码器高低角读数, f 为相机焦距, α 为目标相对经纬仪的方位角, λ 为目标相对经纬仪的高低角。

由于经纬仪精度是设备测角精度的 40 倍,可假设经纬仪测量的角度为真值。通过如下公式可得镜头的畸变值。

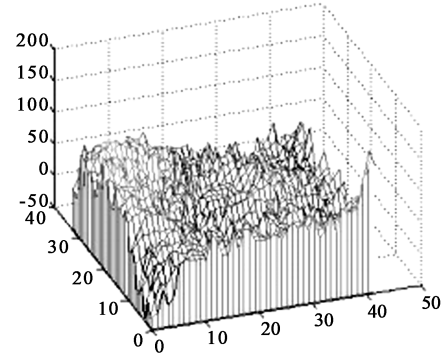
$$\begin{cases} \Delta\alpha_i = \alpha_i \\ \Delta\lambda_i = 90^\circ - \lambda_i \end{cases}, \quad (13)$$

其中: $\Delta\alpha_i$ 为镜头水平方向的畸变值, $\Delta\lambda_i$ 为镜头垂直方向的畸变值, α_i 为目标相对经纬仪的方位角, λ_i 为目标相对经纬仪的高低角, i 为网格点序号。

以视场中心(方位角为 0° ,垂直角为 90°)为原点建立像面坐标系,视场范围为: $-21^\circ < x < 21^\circ, 74^\circ < x < 106^\circ$,畸变值矩阵为 33 行 42 列。图 2(a)(b)分别为网格点水平方向和垂直方向的

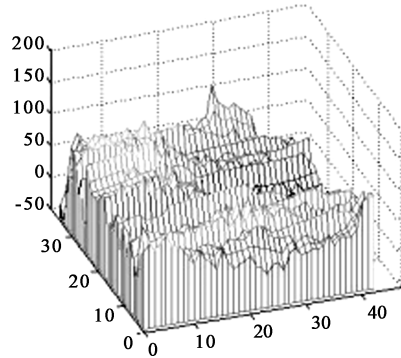
畸变值三维示意图。

关于视场边缘的网格点,采用局部最小二乘法可能存在问题,目前,我们采用线性外推的方式建立虚拟网格点处理此类问题,这里不做详细介绍。



(a) 畸变值曲面(水平)

(a) surface of distortion value map(horizontal)



(b) 畸变值曲面(垂直)

(b) surface of distortion value map(vertical)

图 2 畸变值曲面图

Fig.2 Surface of distortion value map

3.2 结果与分析

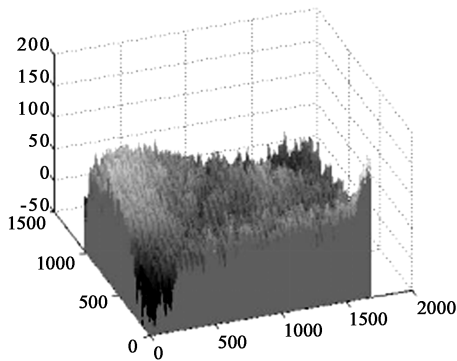
按照 3.1 小节介绍的方法,使用平行光管在视场内随机测量 20 个点的畸变值,分别采用局部区域最小二乘法 and 分形插值曲面法对上述 20 个位置进行校正,得到对应的修正值,结果如表 1 所示。

图 3(a)(b)分别为用分形插值曲面法对水平方向和垂直方向的畸变值矩阵进行插值得到的分形曲面,压缩比 $\delta_{n,m}$ 等于 0.2,不难看出插值后的曲面更加细致。

表 1 畸变校正结果

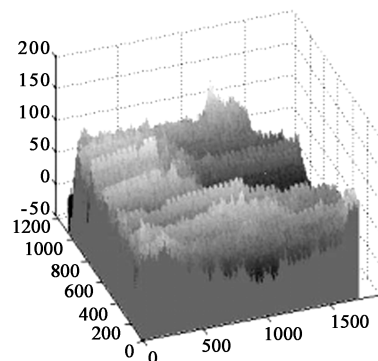
Tab.1 Calibration results of lens distortion

序号	编码器读数		畸变值		局部最小二乘法 修正值		分形插值曲面法 修正值	
	方位角 (度)	垂直角 (度)	水平方向 (秒)	垂直方向 (秒)	水平方向 (秒)	垂直方向 (秒)	水平方向 (秒)	垂直方向 (秒)
1	14.861	8.356	30	30	29	37	22	27
2	15.228	6.715	29	27	32	36	27	33
3	15.423	4.958	30	17	37	13	29	24
4	12.631	4.3	9	16	17	13	13	22
5	11.506	3.952	3	13	13	7	15	9
6	10.68	5.329	-6	16	-14	26	-2	24
7	10.3	6.565	0	21	-5	33	4	30
8	9.487	7.653	1	22	-3	32	-6	26
9	9.486	8.545	-1	29	-6	44	-7	33
10	9.903	9.177	2	28	-4	36	6	31
11	10.305	10.172	13	30	12	24	13	18
12	11.171	11.303	17	39	18	39	23	31
13	11.903	9.604	19	27	15	23	25	29
14	12.826	10.226	21	42	14	43	17	37
15	11.399	9.277	23	27	28	28	24	30
16	10.641	8.014	9	14	10	12	14	18
17	9.829	7.48	8	10	10	8	3	12
18	10.936	8.079	7	16	4	13	13	21
19	12.038	8.651	14	26	9	36	20	29
20	7.323	11.361	-1	29	-3	31	-5	35
残差					$\delta_x = \pm 5.25, \delta_y = \pm 7.23$			
均方差					$\delta_x = \pm 5.57, \delta_y = \pm 5.93$			



(a) 分形插值曲面(水平)

(a) fractal interpolation surface(horizontal)



(b) 分形插值曲面(垂直)

(b) fractal interpolation surface(vertical)

图 3 分形插值曲面图

Fig.3 Fractal interpolation surface

通过两种算法得到修正值,采用如下公式分别计算他们的残差均方差^[12]。

$$m_a = \sqrt{\frac{[vv]}{n}}, \quad (13)$$

其中 v 是两种算法修正值与畸变值之差, n 为数据个数。

最后,根据验证数据,我们可以得出如下两点结论:

(1)两种算法均能有效提高测量精度,原设备测角精度指标为 $40''$,经过新方法校正后,残留误差小于 $10''$ 。

(2)两种算法相比于传统方法,不但考虑提高整个视场的精度,对于局部区域的精度提高依然

有效。

4 结 论

本文针对目前靶场采用的光学镜头畸变校正方法存在的问题,提出了局部区域最小二乘法和分形插值曲面法,并详细的介绍了两种方法的基本原理和解算方法。最后通过算例验证了两种算法的正确性。实验结果表明:两种算法均可使测角精度明显提高,修正后的精度可达 $10''$,满足靶场试验的测试要求。另外,本文分析的内容针对短焦大视场光学镜头,对于其他光学镜头的畸变校正也同样具有一定的参考价值。

参 考 文 献:

- [1] 王虎,苗兴华,惠彬.短焦矩大视场光学系统的畸变校正[J].光子学报,2001,30(11):1409-1412.
WANG H, MIAO X H, HUI B. The distortion correct of short focus wide-angle optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(11): 1409-1412. (in Chinese)
- [2] 王喜军,曹旭耀,王东鹤.用分区处理方法对短焦红外经纬仪像点位置的修正[J].光电工程,2013,40(10):48-53.
WANG X J, CAO X Y, WANG D H. Correcting the position of target in the short focal length theodolite with the method of dividing the image into different regions [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(10): 48-53. (in Chinese)
- [3] 王方雨,何昕,魏仲慧.光电经纬仪红外图像自动化分区畸变校正[J].红外技术,2014,36(10):796-800.
WANG F Y, HE X, WEI Z H. The divided zones correction of the theodolite infrared image [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(10): 796-800. (in Chinese)
- [4] 杨秋慧,玉昊昕,李陶深,等.一种大视场镜头的畸变校正方法[J].计算机应用与软件,2015,32(9):136-140.
YANG Q H, YU H X, LI T S, *et al.* A distortion correction method for large field-of-view lens [J]. *Computer Applications and Software*, 2015, 32(9): 136-140. (in Chinese)
- [5] 戴光智,孙宏伟,杨欧.分形插值及其应用研究[J].现代计算机,2010(9):4-5,20.
DAI G Z, SUN H W, YANG O. Research on fractal interpolation and its application [J]. *Modern Computer*, 2010 (9): 4-5, 20. (in Chinese)
- [6] 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.
LI D R, YUAN X X. *Error Processing and Reliability Theory* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. (in Chinese)
- [7] BARNSLEY M F, DEMKO S. Iterated function systems and the global construction of fractals [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1985, 399(1817): 243-275.
- [8] 孙洪泉.分形插值曲面的 MATLAB 程序[J].苏州科技学院学报:工程技术版,2006,19(4):18-21,38.
SUN H Q. A practical MATLAB program of fractal interpolated surface [J]. *Journal of University of Science and Technology of Suzhou: Engineering and Technology*, 2006, 19(4): 18-21, 38. (in Chinese)
- [9] 孙文,吴晓平,王庆宾.分形插值曲面及其在重力场格网加密中的应用[J].武汉大学学报·信息科学版,2016,41(3):331-335.
SUN W, WU X P, WANG Q B. Fractal Interpolating curve surface and its application in gravity anomaly gridding process [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 41(3): 331-335. (in Chinese)
- [10] 赵学颜,李迎春.靶场光学测量[M].北京:装备指挥技术学院出版,2001.
ZHAO X Y, LI Y C. *Optical Measurement of Range* [M]. Beijing: Academy of Equipment Command, 2001. (in Chinese)

Chinese)

[11] 李庆扬.数值分析[M].武汉:华中科技大学出版社,2003.

LI Q Y. *Numerical Analysis* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2003. (in Chinese)

作者简介:于国栋(1982—),男,辽宁大连人,硕士,工程师,2013年于武汉大学获得硕士学位,主要从事弹道终点坐标测试方面的研究。E-mail: daya9527@126.com