

光电经纬仪红外图像自动化分区畸变校正

王方雨, 何 昕, 魏仲慧

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 针对光电经纬仪短焦、大视场红外图像光学、机械、设备组装引入畸变较大的情况, 借助光电经纬仪硬件平台, 设计了自动打点控制、图像采集程序, 并使用了分区修正靶面畸变的算法。试验表明: 分区后, 使用最小二乘法迭代模型系数, 用于后续的精度计算, 可以显著提高全视场测角精度。原有的人工打模型点时间为 3.5 h, 使用伺服自动控制打模型点方法后, 可以在 20 min 内完成。

关键词: 红外图像; 光电经纬仪; 畸变校正; 自动控制

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)10-0796-05

The Divided Zones Correction of the Theodolite Infrared Image

WANG Fang-yu, HE Xin, WEI Zhong-hui

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The position error of the projectile infrared image is taken in by the theodolite with short focal length and wide field and its optical mechanical and installation factor. The article gives the method of partition processing and auto servo control: the image is divided into multiple zones, the least squares method being used to calculate fit approximation parameters of every zone to validate data. The experiment results show that this method can be a substantial increase in the full-field measurement accuracy, and the process can be completed within twenty minutes.

Key words: infrared image, theodolite, distortion, servo auto control

0 引言

光学系统的畸变主要包括径向畸变、偏心畸变、焦平面变形^[1], 其中径向畸变为主要处理的部分。国内大部分的畸变校正方法都是基于对整幅图像处理的, 常用的处理方法有采用畸变模型^[2-3]、样板校正^[4-6]、多项式拟合。本文背景应用平台为光电经纬仪, 有其特殊性, 设备只关注目标成像点的测角指向精度。短焦距、大视场的光电经纬仪设面备提出的测角指向精度指标在 25 s 以内。以焦距 80 mm, 像元尺寸 24 μm , 相机分辨率 640 \times 512, 视场 10.96° \times 8.783° 为例, 像元分辨率为 70 s, 即要求修正后的脱靶位置误差必须在 0.3 个像素以内。仅通过光学方法降低硬件光学系统的畸变后, 靶面边缘处的畸变仍有 3 个像素, 无法满足研制要求。

目前国内光电经纬仪室内的静态测角精度检验方法, 主要是使用高精度的莱卡将固定位置 65° 的平行光管标定出来的结果作检测真值。理论上星点目标

成像在像面内的任何一个位置, 在合成脱靶量后, 目标测量角度值都要与靶标的检测真值一致。

光电经纬仪全视场打若干个点测量 65° 星点目标, 合成脱靶量给出目标测量值方位角 A 、高低角 E 。计算测量值与检测真值的偏离程度, 即是设备测角精度, 一般用均方根差表示, 单位为角秒。

本文借鉴了文献[7]的部分方法, 将靶面分成多个区处理, 在每个分区内使用最小二乘法, 回归迭代 6 个修正系数。并加以改进, 使用了伺服控制系统, 自动控制成像点位置, 提高了定位精度, 分区模型修正点位置选取更加合理、精确。

1 硬件平台

精度检测装置, 主要由电控柜、零度平行光管、65° 平行光管、莱卡、光电经纬仪组成, 如图 1、图 2 所示, 其中零度光管架和 65° 光管架在水平方向上夹角约为 90°。光电经纬仪由轴系结构、伺服系统、导电环、编码器、时统、红外相机、主控计算机、光纤

收稿日期: 2014-07-01; 修订日期: 2014-09-04.

作者简介: 王方雨 (1985-), 男, 助理研究员, 主要研究方向为软件开发、数字图像处理。

通信系统等组成，结构组成图如图3所示。

电控柜可以控制平行光管中星点目标的亮度。主控计算机在时统终端同步信号控制下，向伺服系统发送引导数据，使经纬仪指向预置位置，并控制编码器的数据采集时间点与红外相机图像曝光中心时间点对齐，编码器AE角和图像数据经光纤通信系统回传给主控计算机。

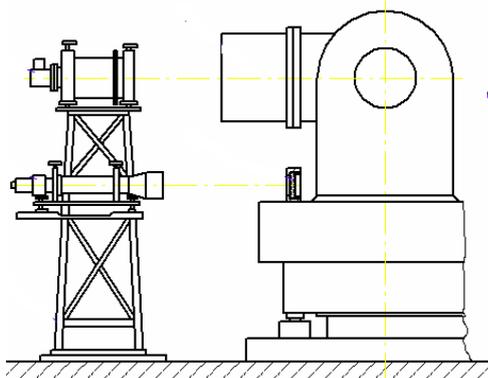


图1 经纬仪零度光管检测示意图

Fig.1 Check diagram of zero degree collimator

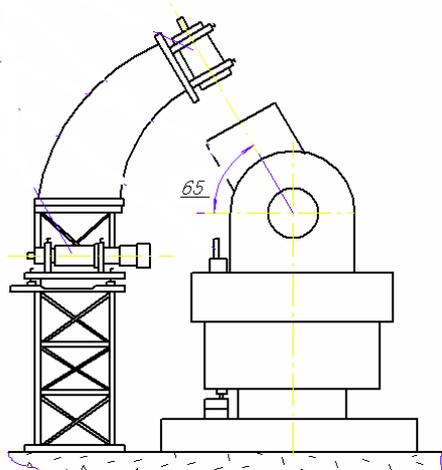


图2 经纬仪65°光管检测示意图

Fig.2 Check diagram of sixty-five degree collimator

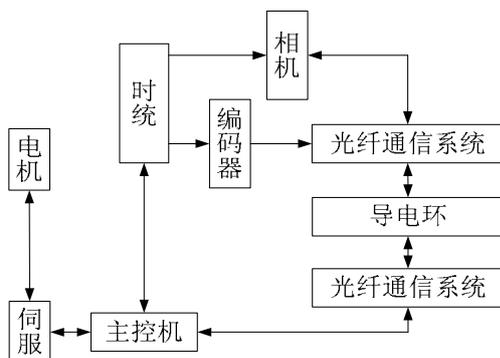


图3 光电经纬仪组成框图

Fig.3 Structure diagram of theodolite

2 分区算法

2.1 脱靶量合成

光电经纬仪编码器给出的角度值为光学系统主光轴的指向，大致为视场十字中心目标的指向，当目标偏离视场十字中心时，目标在图像中的坐标 x, y ，通常称为脱靶量。目标的实际角度使用脱靶量合成公式(1)，具体解释以及本公式的误差分析详见文献[8-9]：

$$\Delta\alpha = \arctan\left(\frac{x}{f \cos \lambda_0 - y \sin \lambda_0}\right)$$

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha \quad (1)$$

$$\lambda = \arctan\left(\frac{(f \sin \lambda_0 + y \cos \lambda_0) \cos \Delta\alpha}{f \cos \lambda_0 - y \sin \lambda_0}\right)$$

式中： α_0 为方位编码器A； λ_0 为高低编码器E； 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； f 是成像系统焦距； x, y 是目标脱靶量。

2.2 分区处理过程

理论像点（修正后的像点位置近似等于此值）和实际像点的对应关系，采用公式(2)：

$$\begin{cases} x_p = k_1 x + k_2 y + k_3 \\ y_p = k_4 x + k_5 y + k_6 \end{cases} \quad (2)$$

式中： (x_p, y_p) 为理论像点； (x, y) 为实际像点； k_1, k_2, k_3 为 x 方向的脱靶量修正系数； k_4, k_5, k_6 为 y 方向的修正系数。

相机靶面分辨率为 640×512 ，将靶面分成 7×5 个区域，每个区域内保证有 8 个以上数据采集点。每个分区内的数据采集点具有最小方差，进行最小二乘法计算每个分区内的 6 个修正系数，公式(2)变形得如下计算公式(3)计算出 x 方向的修正系数 k_1, k_2, k_3 ，公式(4)计算出 y 方向的修正系数 k_4, k_5, k_6 ：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_i \cdot k_1 + \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \cdot k_2 + \sum_{i=1}^n x_i \cdot k_3 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot X_{Li} \\ \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i \cdot k_1 + \sum_{i=1}^n y_i \cdot y_i \cdot k_2 + \sum_{i=1}^n y_i \cdot k_3 = \sum_{i=1}^n y_i \cdot X_{Li} \\ \sum_{i=1}^n 1 \cdot x_i \cdot k_1 + \sum_{i=1}^n 1 \cdot y_i \cdot k_2 + \sum_{i=1}^n 1 \cdot k_3 = \sum_{i=1}^n 1 \cdot X_{Li} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_i \cdot k_4 + \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \cdot k_5 + \sum_{i=1}^n x_i \cdot k_6 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot Y_{Li} \\ \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i \cdot k_4 + \sum_{i=1}^n y_i \cdot y_i \cdot k_5 + \sum_{i=1}^n y_i \cdot k_6 = \sum_{i=1}^n y_i \cdot Y_{Li} \\ \sum_{i=1}^n 1 \cdot x_i \cdot k_4 + \sum_{i=1}^n 1 \cdot y_i \cdot k_5 + \sum_{i=1}^n 1 \cdot k_6 = \sum_{i=1}^n 1 \cdot Y_{Li} \end{cases} \quad (4)$$

得到每个分区的修正系数后,对于验证点,使用公式(2),就可以代入每个分区的修正系数进行脱靶量修正计算。

2.3 分区算法验证

本试验中,拍摄水平零度光管,采集 19×17 个数据模型样本点,如图 4 所示。进行分区、计算,得到每个分区的修正系数,然后对 65°光管拍摄,采集 5×3 个验证点,如图 5 所示,使用水平光管计算出的靶面畸变修正系数,如图 6 所示,修正高角点脱靶量值,得到每个高角验证点的测角值,计算出全部验证点的均方差值。

3 伺服自动控制引导

伺服系统构成包括功率放大器、控制器、力矩电机、编码器。数字引导跟踪时,主控计算机系统将目标的位置信息和速度信息送入伺服控制器,其中速度信息是前馈,引入速度回路,以构成复合控制。伺服控制器按照一定的控制结构和控制算法进行运算,产

	A	B	C	D
1	28.68	31.42	300.0608	355.6006
2	57.4	30.94	299.5114	355.6006
3	85.86	30.45	298.9606	355.6008
4	114.68	30.09	298.4108	355.6008
5	143.4	29.61	297.8608	355.6008
6	171.88	29.06	297.3106	355.6008
7	200.55	28.55	296.7608	355.6008
8	229.23	28.1	296.2108	355.6008
9	257.84	27.83	295.6608	355.6008
10	286.54	27.39	295.1108	355.6006
11	315.13	27.18	294.5611	355.6003
12	343.76	26.85	294.0108	355.6003
13	372.29	26.38	293.4614	355.6003
14	400.99	26.04	292.9106	355.6003
15	429.54	25.54	292.3611	355.6006
16	458.78	25.16	291.8106	355.6003
17	487.44	24.81	291.2603	355.6003
18	515.37	24.24	289.6106	355.6003
19	543.76	23.96	289.0603	355.6003
20	572.66	23.23	289.0608	356.1508
21	601.4	22.52	289.6108	356.1508
22	630.13	21.81	290.1608	356.1508
23	658.86	21.11	290.7111	356.1508
24	687.59	20.41	291.2608	356.1508
25	716.32	19.71	291.8111	356.1508
26	745.05	19.01	292.3606	356.1508
27	773.78	18.31	292.9108	356.1508
28	802.51	17.61	293.4606	356.1508
29	831.24	16.91	294.0108	356.1508
30	860.0	16.21	294.5611	356.1508
31	888.73	15.51	295.1108	356.1508
32	917.46	14.81	295.6608	356.1508
33	946.19	14.11	296.2111	356.1508
34	974.92	13.41	296.7608	356.1508
35	1003.65	12.71	297.3111	356.1508
36	1032.38	12.01	297.8608	356.1508
37	1061.11	11.31	298.4108	356.1508

图 4 零度光管部分模型数据

Fig.4 Mode data of zero degree collimator

	A	B	C	D
549.61	134.08	192.7956	63.0739	
433.35	150.13	198.1292	63.0739	
316.57	156.8	203.4622	63.0739	
199.45	153.19	208.7958	63.0739	
83.14	140.07	214.1292	63.0739	
84.47	239.21	214.1292	64.9906	
200.86	252.71	208.7953	64.9906	
318	256.04	203.4622	64.9906	
434.9	249.58	198.1294	64.9906	
550.91	233.31	192.7958	64.9906	
552.46	332.74	192.7958	66.9075	
436.3	349.1	198.1292	66.9075	
319.25	355.54	203.4628	66.9075	
202.33	352.2	208.7958	66.9075	

图 5 高角 65°光管验证点数据

Fig.5 Test data of sixty-five degree collimator

	A	B	C	D	E	F
1	k1	k2	k3	k4	k5	k6
2	0.98859	0.00973	2.08911	-0.01706	0.98527	-1.56842
3	0.98408	0.0102	0.8943	-0.01804	0.98402	-1.34363
4	0.98069	0.01112	0.24045	-0.01254	0.98245	-0.36235
5	0.97994	0.01005	0.44794	-0.01416	0.98672	-1.27062
6	0.98165	0.01517	-0.67893	-0.01265	0.98577	-1.08322
7	0.98225	0.01778	-1.22639	-0.01101	0.98973	-2.06031
8	0.98775	0.01944	-2.81663	-0.00827	0.99076	-2.94108
9	0.98754	0.0118	1.62722	-0.01634	0.98243	-0.79594
10	0.9799	0.01176	-0.00777	-0.01366	0.98003	-0.00545
11	0.97895	0.01401	-0.2505	-0.01479	0.98103	-0.29928
12	0.97899	0.01388	-0.1785	-0.01439	0.98003	-0.0561
13	0.97798	0.0156	-0.1885	-0.01347	0.98154	-0.25981
14	0.98303	0.01336	-0.58196	-0.01288	0.98404	-0.54869
15	0.9849	0.01593	-1.30053	-0.01057	0.985	-1.16101
16	0.98573	0.01256	1.13246	-0.01718	0.98125	-0.86666
17	0.97982	0.01352	-0.09894	-0.0124	0.97998	0.20858
18	0.98183	0.01465	0.14766	-0.01431	0.97876	-0.15687
19	0.97741	0.01248	-0.07003	-0.0122	0.97962	-0.04566
20	0.97908	0.01243	0.01176	-0.01545	0.97998	0.0068
21	0.98336	0.01429	-0.67494	-0.01452	0.98202	0.02862
22	0.98338	0.01275	-0.75413	-0.01221	0.98412	-0.57339
23	0.98478	0.01441	0.93661	-0.01252	0.98094	-0.38325
24	0.98201	0.01573	0.47388	-0.01264	0.98012	0.17284
25	0.97929	0.01523	0.08981	-0.01533	0.98007	-0.13863
26	0.97887	0.0143	-0.03187	-0.01326	0.98078	0.03503
27	0.98119	0.01382	-0.25626	-0.01626	0.98192	0.23816
28	0.98126	0.01392	-0.34588	-0.01497	0.98241	0.26183
29	0.98368	0.01317	-0.8765	-0.01576	0.98376	0.46619
30	0.98518	0.01756	1.41039	-0.01414	0.98349	0.273
31	0.9841	0.01507	0.69784	-0.01117	0.98306	0.93141
32	0.98166	0.01522	0.29682	-0.01227	0.98289	0.66327
33	0.97898	0.01309	-0.23113	-0.01396	0.98354	0.59616
34	0.98026	0.01441	-0.03481	-0.01603	0.98193	0.36135
35	0.98166	0.01213	-0.67331	-0.01663	0.98163	0.368
36	0.98634	0.01177	-1.81628	-0.01803	0.98438	1.31005

图 6 分区计算出的模型系数

Fig.6 Mode parameters data of all zones

生 PWM 控制信号送往电机。通过控制方位和俯仰力矩电机的运转来实现对目标的跟踪测量,它由方位和俯仰两套独立的位置随动系统组成,控制方式采用双闭环控制结构,内环为速度环,外环为位置环,工作原理如图 7。

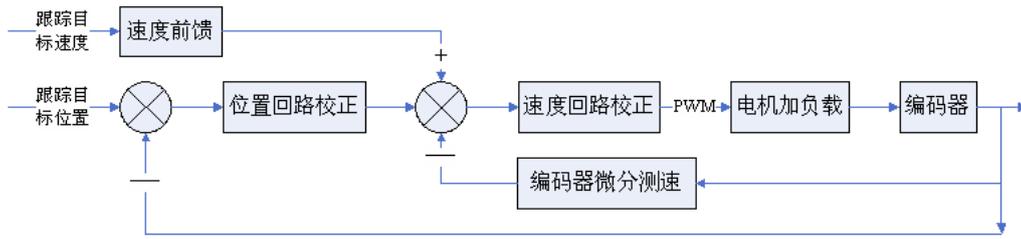


图7 数引跟踪控制框图

Fig.7 Diagram of trace control

对于水平光管的模型点，数据量较大，若逐个位置手动转动经纬仪，再单帧采集、图像提取，人为精力因素会导致某个分区内点分布不均匀、各点位置间隔不统一的情况。而且耗时较长，每台设备的模型点就需要4个多小时。因此设计了伺服系统自动控制打点程序，步骤如下：

- 1) 设定每行与每列要打点的个数；
- 2) 设置好相邻行列点的步长值；
- 3) 图像的左上角点，作为初始点；
- 4) 程序根据设定值，自动控制打点路线，如图8所示，图像点实际位置和图8为倒像关系。

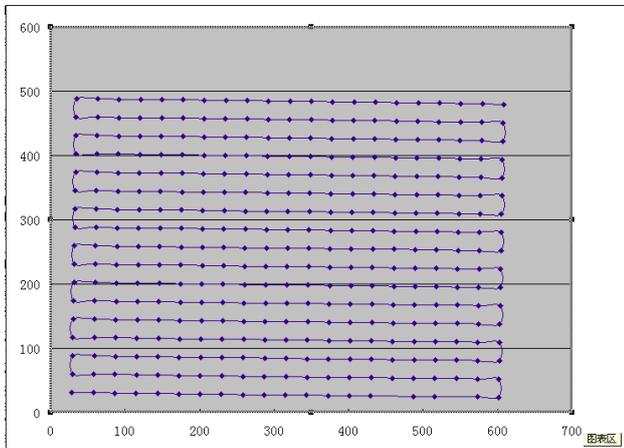


图8 自动打点控制路线图

Fig.8 Route chart of auto control

//走向控制程序如下

```

if (统计个数变量 i <= x 方向分区数 * y 方向分区数)
{
    OnAutoMaxLightOne(); // 图像单帧采集和星点提取
    switch(AdadianNum[DadianGeshu]) // AdadianNum[DadianGeshu] 存储每个位置点的走势

```

```

{
    case 1: OnDaaj(); break; // 伺服 x 方向向右 1
    case 3: OnDaa(); break; // 伺服 x 方向向左 3
    case 4: OnDej(); break; // 伺服 y 方向向下 4
    default: break;
}
    统计个数变量 i++;
}
else
{ KillTimer(4); // 打点完毕，停止伺服 }
// 全视场所所有点的走势表，用数组 AdadianNum[DadianGeshu]，存储
for (int i=1; i <= y 方向分区数; i++)
{
    for (int j=1; j <= x 方向分区数; j++)
    {
        if (i%2==0)
        { // 偶数
            AdadianNum[j+(i-1)*m_fenquxge]=1;
            if (j==x 方向分区数)
            {
                AdadianNum[j+(i-1)*m_fenquxge]=4;
            }
        }
        else if (i%2==1)
        { // 奇数
            AdadianNum[j+(i-1)*m_fenquxge]=3;
            if (j==x 方向分区数) // 最末列
            {
                AdadianNum[j+(i-1)*m_fenquxge]=4;
            }
        }
    }
}
}
}

```

4 试验数据

伺服自动控制程序和图像分区处理程序，均采用VC++6.0实现，界面如图9、图10所示。本试验选用的红外相机分辨率为 640×512 ，像元尺寸 $24 \mu\text{m}$ ，焦距 80mm ，视场 $10.96^\circ \times 8.783^\circ$ ，在零度水平光管采集356

个数据点，在 65° 高角选取14个验证点，如图4、图5所示，四列数据分别为脱靶量 x ，脱靶量 y ，方位角 A ，高低角 E ，共分成35个区，未使用本论文的方法，计算测角精度方位 A 为 235.1s ，高低 E 为 140.2s ，使用本算法后的测角精度方位 A 为 19.2s ，高低 E 为 23.1s ，满足设备研制精度要求，并应用到某工程项目中。



图9 伺服自动控制采集星点界面

Fig.9 Software interface of automatic acquisition

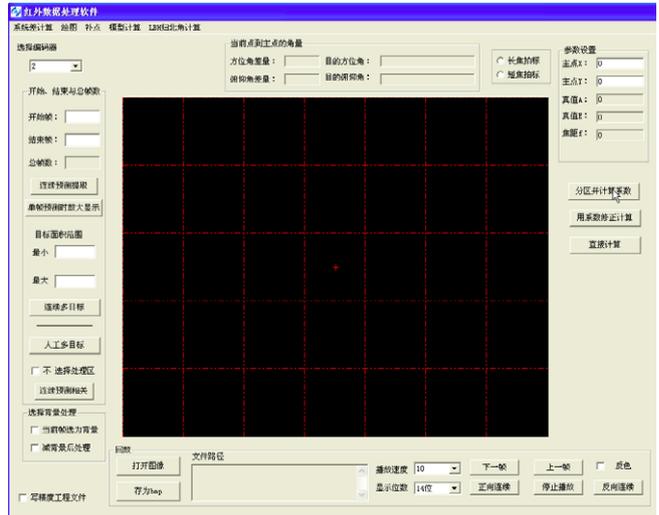


图10 分区修正实现界面

Fig.10 Software interface of mutizone correction

参考文献：

[1] Armin Gruen, Tomas S Huang. *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision*[M]. Berlin: Springer Pub.,2001.
 [2] 韩广良, 宋建中. 一种基于畸变等效曲面的图像畸变校正[J]. 光学技术, 2005, 31(1): 122-124.
 [3] 曾彦. 短焦距摄像机镜头的畸变校正方法[J]. 装备指挥技术学院学报, 2002, 13(2): 53-55.
 [4] 邱志强, 段宏伟, 于起峰, 等. 用摄影不变性纠正鱼镜头畸变[J]. 应用光学, 2003, 24(5): 36-38.

[5] 林子扬, 王继青, 黄乐天, 等. 一种光学成像垂轴几何畸变校正方法[J]. 光学技术, 1998(5): 19-22.
 [6] 姜大志, 孙俊兰, 郁倩, 等. 标准图形法求解相机镜头非线性畸变的研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2001, 31(4): 111-116.
 [7] 王方雨, 何昕, 魏仲慧, 等. 红外高炮弹点目标序列图像自动提取[J]. 红外技术, 2012, 34(11): 640-643.
 [8] 王喜军, 曹旭耀, 王东鹤, 等. 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.
 [9] 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.