

文章编号: 0253-2239(2010)11-3171-06

大视场时间延迟积分电荷耦合器件相机静态 传递函数自动测试系统

李国宁¹ 刘妍妍² 金龙旭¹ 任建岳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 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 为了解决大视场时间延迟积分(TDI)电荷耦合器件(CCD)相机静态传递函数(TF)测试过程中视场覆盖率不高、测试精度和效率较低等问题,设计了一种全视场静态 TF 自动测试系统。首先,将整个相机视场以 TDI CCD 为单元进行划分,移动转台调整 TDI CCD 对应视场与平行光管的位置关系,计算机接收相机采集的靶标图像,分析靶标图像特征并绘制 TF 变化曲线,根据 TF 变化曲线确定每片 TDI CCD 对应视场的最佳 TF 测试点,建立位置信息库。然后,计算机根据位置信息自动控制转台,分别移动到每片 TDI CCD 对应视场的最佳 TF 测试点,从每片 TDI CCD 第一个像元开始,以固定步长逐渐向最后一个像元移动,一边移动一边测试 TF。最后,绘制大视场 TDI CCD 相机整个视场的静态 TF 曲线。实验结果表明:静态 TF 测试系统覆盖了相机整个视场,测试的静态 TF 平均值为0.2965,和以前测试方法比较,整个视场的静态 TF 平均值提高了 0.02,同时提高了静态 TF 测试的精度和效率。

关键词 成像系统;静态传递函数;传递函数变化曲线;时间延迟积分电荷耦合器件;矩形靶标

中图分类号 TN386.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103011.3171

Automatic Test System for Static Transfer Function of the Big Visual Field Time-Delayed integration Charge Coupled device Camera

Li Guoning¹ Liu Yanyan² Jin Longxu¹ Ren Jianyue¹

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to solve the problems that the coverage rate of visual field is not high and that the test precision and efficiency are lower in the course of testing static transfer function (TF) of the big visual field time-delayed integration (TDI) charge coupled device (CCD) camera, a kind of automatic test system for static TF is designed. First, taking TDI CCD as unit, entire visual field of camera is divided. Then revolving stage is moved and the location relation of TDI CCD is adjusted corresponding visual field and the parallel optical pipe. Computer receives the target mark image acquired by camera, analyses target image feature and draws TF change curves. From these curves, the best TF test points of each slice of TDI CCD corresponding visual field are defined and location information storehouse is established. Then according to location information, the revolving stage is automatically moved to the best TF test point of each slice of TDI CCD corresponding visual field. Beginning from the first pixel of each slice of TDI CCD, it is moved to the last pixel gradually with regular step. When it is moving, it tests TF. Finally, static TF curve of entire visual field of the big visual field TDI CCD camera is drawn. Experimental results indicate that the test system of static TF has covered the entire visual field of camera. The tested average of static TF is 0.2965. Compared with the previous test method, the average of static TF of entire visual field has raised 0.02. At the same time, the test system has also raised test efficiency and test precision of the static TF.

Key words imaging systems; static transfer function(TF); TF change curve; time-delayed integration (TDI) charge coupled device (CCD); rectangular target;

收稿日期: 2009-12-23; 收到修改稿日期: 2010-04-02

基金项目: 国家 863 计划(863-2-5-1-13B)资助课题。

作者简介: 李国宁(1979—),男,博士,助理研究员,主要从事光电成像及图像压缩方面的研究。

E-mail: Lgning@netease.com

1 引 言

现代高分辨率数字遥感相机多采用时间延迟积分(TDI)电荷耦合器件(CCD)推扫成像模式^[1~3],而且正向着大视场、宽覆盖方向发展,当单片 TDI CCD 像元数无法满足系统覆盖宽度要求时,就需要对多片 TDI CCD 进行机械拼接,构成一个组合的 TDI CCD 阵列,使其总像元数满足系统要求。调制传递函数(MTF)是评价这类相机成像质量和应用能力的一个重要指标,它反映了相机对景物中各空间频率分量的响应特性。在完成相机光学、机械和电子学装调、测试等一系列工作后,必须要对整个相机进行静态传递函数(TF)的测试^[4]。

测试 TDI CCD 相机静态 TF 主要采用矩形输入法,矩形输入法是将矩形靶标放置在平行光管的焦面处,模拟无穷远的景物目标,靶标被积分球的出射光均匀照亮,经平行光管和相机光学系统成像后被焦平面 TDI CCD 阵列捕获,被捕获的图像传给计算机进行 TF 计算。静态 TF 测试过程中,靶标和相机焦平面 TDI CCD 阵列的位置关系非常重要,既要保证矩形靶标的刻线与 TDI CCD 水平方向垂直,又要保证矩形靶标面与相机焦平面平行,如果满足不了这两种位置关系就不能真实测试相机的 TF,

所以每选择一个测试点,就要重新调整这种位置关系;每增加一个测试点,工作量就会增加一倍。由于平行光管视场较小,一次只能测试大视场 TDI CCD 相机的某一局部视场的 TF,测试其它局部视场的 TF 时就需要重新调整位置关系,因此,对于大视场 TDI CCD 相机静态 TF 测试,只选取整个视场中的多个离散测试点,这种测试方法连续性不强,不能覆盖整个视场。

本文针对大视场 TDI CCD 相机,提出一种全视场静态 TF 自动测试系统,保证相机 TF 测试的连续性,使其覆盖相机所有视场,同时提高测试精度和效率。

2 静态 TF 测试系统组成

大视场 TDI CCD 相机静态 TF 自动测试系统组成如图 1 所示,包括积分球、矩形靶标、平行光管、相机光学系统、相机焦平面、相机电子学系统、CCD 图像处理电路、计算机、RS232 总线、转台电机驱动电路、电机、编码器和转台。其中,平行光管包括球面反射镜和平面反射镜,积分球包括硅探测器和照明灯组。

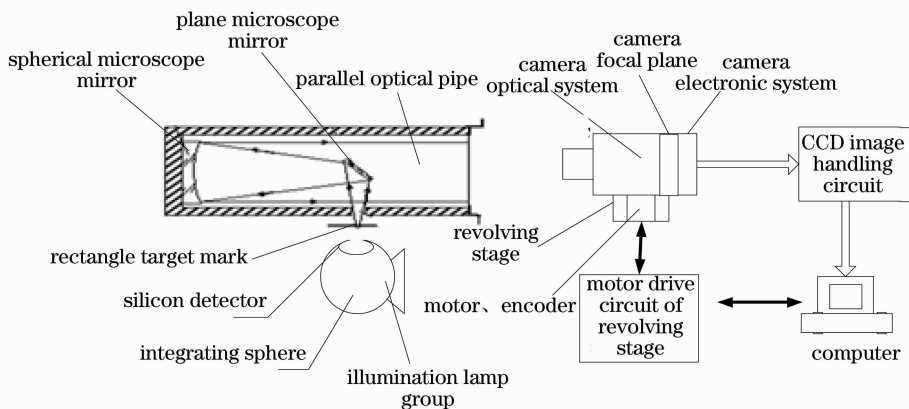


图 1 大视场 TDI CCD 相机静态 TF 自动测试系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of automatic test system for static transfer function of the big visual field TDI CCD camera

将通过积分球出射光照射的具有刻线的矩形靶标放置于平行光管的入口,用来模拟无穷远的景物目标,将被测 TDI CCD 相机通过转台设置在平行光管的出口端,TDI CCD 相机的光轴与平行光管的光轴共轴。相机采集的图像信息通过 CCD 图像处理电路传输给计算机,计算机通过 RS232 总线与转台电机驱动电路通讯,转台电机驱动电路与转台电机和编码器连接,实现转台转动和位置信息读取。

3 大视场 TDI CCD 相机与转台的位置调节关系

相机与平行光管的位置关系及转台转动方向定义如图 2 所示,平行光管出口对应到相机入口处,并且平行光管的光轴与相机光学系统的光轴共轴,相机水平放置在转台上,规定相机光学系统光轴为 X 方向,正 X 方向指向平行光管; Y 方向与 X 方向垂直且与大地平行,正 Y 方向指向相机右侧视场; Z

方向与 X 方向垂直且与大地也垂直,正 Z 方向指向相机顶部; $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 分别以 X, Y, Z 为轴旋转,规定顺时针方向旋转为正方向。转台沿 Y 方向平移保证了相机所有视场均能对应到平行光管的光轴上,即所有视场均能捕捉到靶标图像;沿 Z 方向平移就是为了保证每片 TDI CCD 准确对准靶标;沿 θ_x 方向旋转是保证靶标刻线与 TDI CCD 水平方向垂直;沿 θ_y 方向和 θ_z 方向旋转均是保证相机焦平面与靶标面平行^[5~8]。转台转动的最终目的就是要保证相机焦平面和平行光管中靶标面上的靶标刻线^[9,10]相互垂直。

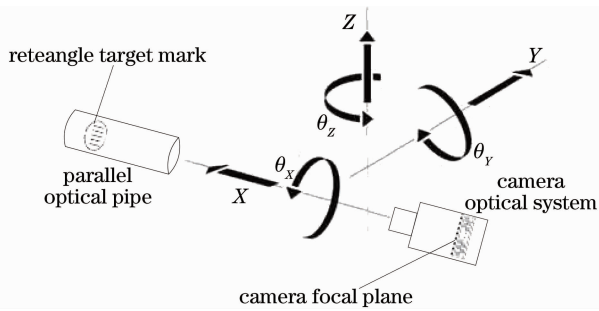


图 2 相机与平行光管的位置关系及转台转动方向示意图

Fig. 2 Sketch of the location relation of camera and parallel optical pipe and revolving stage turn direction

4 静态 TF 测试方法

大视场 TDI CCD 相机静态 TF 具体测试方法如下:

1) 开启积分球的照明灯组,点亮积分球,均匀照亮高对比度矩形靶标^[4]。矩形靶标经过平行光管与相机光学系统成像后被焦平面 TDI CCD 阵列捕获,计算机接收靶标图像并分析靶标图像特征,实时计算静态 TF;

2) 划分相机视场:由于相机焦平面是由多片 TDI CCD 拼接组成而且每片 TDI CCD 拼接位置不同,要想实现相机整个视场 TF 的精确测量,可以将相机整个视场以 TDI CCD 为单元进行划分,确定每片 TDI CCD 对应视场和平行光管的相对位置关系,找到每片 TDI CCD 对应视场的最佳 TF 测试点,提高 TF 测试精度;

3) 搜索第一片 TDI CCD 对应视场的最佳 TF 测试点即转台位置信息。搜索过程就是调整靶标和相机焦平面 TDI CCD 阵列的位置关系,既要保证矩形靶标的刻线与 TDI CCD 水平方向垂直,又要保证矩形靶标面与相机焦平面平行;

4) 转台沿 Y 方向平移使第一片 TDI CCD 第一

个像元在 Y 方向捕捉到靶标图像的起始刻线,沿 Y 方向平移过程中实时计算并绘制 TF 变化曲线,理想的 TF 变化曲线如图 3 所示,横坐标表示转台位置,纵坐标表示 TF 值,曲线最高点对应的横坐标值即转台位置就是这个方向上的最佳 TF 测试点。测试后将转台平移到 Y 方向上的最佳 TF 测试点;

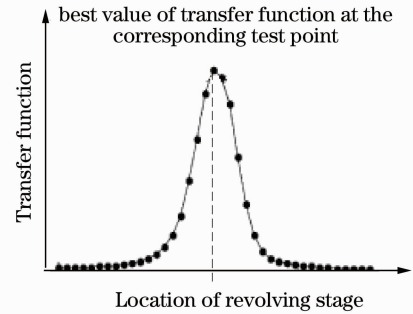


图 3 TF 变化曲线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of transfer function change curve

5) 转台沿 Z 方向平移使第一片 TDI CCD 在 Z 方向准确对准矩形靶标,平移过程中实时计算并绘制 Z 方向的 TF 变化曲线,测试后将转台平移到 Z 方向上的最佳 TF 测试点;

6) 转台沿 θ_x 方向旋转使矩形靶标的刻线与第一片 TDI CCD 水平方向垂直,旋转过程中实时计算并绘制 TF 变化曲线,测试后将转台旋转到 θ_x 方向上的最佳 TF 测试点;

7) 转台沿 θ_y 方向和 θ_z 方向旋转使相机焦平面与矩形靶标面平行,旋转过程中实时计算并绘制 TF 变化曲线,测试后将转台旋转到 θ_y 方向和 θ_z 方向上的最佳 TF 测试点;

8) 将第一片 TDI CCD 在 $Y, Z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ 五个方向的最佳 TF 测试点存储到位置信息库中。搜索其它 TDI CCD 最佳 TF 测试点的过程和第一片 TDI CCD 一样,重复步骤 4)~7),分别将各自最佳 TF 测试点存储到位置信息库中;

9) 建立好位置信息库后,就可以进行全视场自动测试相机静态 TF。计算机先从位置信息库调出第一片 TDI CCD 最佳 TF 测试点的转台位置信息,将此位置信息发给转台电机驱动电路,按照位置信息控制电机转动,使转台达到预定位置,计算机确认到达位置后开始计算 TF。相机从第一片 TDI CCD 第一个像元开始,以固定步长沿 Y 方向移动,每移动一次就计算一次 TF。固定步长是靶标图像占有 TDI CCD 的像元数,大约为几百个像元宽度,TDI CCD 采集到的原始靶标图像及放大后的靶标图像

如图 4 所示。测完第一片 TDI CCD 对应视场的 TF 后,再从位置信息库中调出第二片 TDI CCD 的最佳 TF 测试点,控制转台移动到此位置,测试方法同上,直到测试完最后一片 TDI CCD 对应视场的 TF 即完成整个视场的 TF 测试。这种方法实现了大视场 TDI CCD 相机整个视场静态 TF 的自动测试,并提高了工作效率;

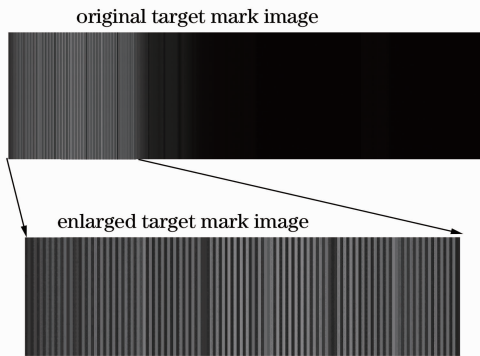


图 4 原始靶标图像及放大后的靶标图像
Fig. 4 Original target mark image and enlarged target mark image

10)根据在所有 TDI CCD 对应视场测试到的静态 TF 值,绘制大视场 TDI CCD 相机整个视场的静态 TF 曲线^[11]。

5 实验结果

被测大视场 TDI CCD 相机:视场为 15°,焦平

面采用 15 片 TDI CCD 机械交错拼接,TDI CCD 器件的有效像元数目是 2048,像元大小为 13 μm × 13 μm,拼接时使有效像元互相搭接,没有重合像元^[12]。拼接部件的总有效像元达到 30720 个,实际焦平面长度达到 400 mm。

转台在 Y 方向行程是 ±300 mm,在 Z 方向行程是 ±60 mm,在 θ_x, θ_y 和 θ_z 方向最大旋转角度是 ±5°。转台电机均采用步进电机,型号为 STP-42D3016,步距角为 1.8°,Y 方向和 Z 方向电机驱动器细分数为 20,Y 方向和 Z 方向分辨率分别为 0.15 mm 和 0.05 mm, θ_x, θ_y 和 θ_z 三个方向角分辨率为 0.036°。转台在 Y 方向和 Z 方向编码器采用 RGH40-G 光栅尺,在 θ_x, θ_y 和 θ_z 三个方向编码器均采用雷尼公司的增量式编码器 RGH20(圆光栅),这两种编码器均为 16 位编码器。

搜索第一片 TDI CCD 最佳 TF 测试点,转台分别沿 Y,Z, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 五个方向转动,同时实时记录相机 TF 值,绘制五个方向的 TF 变化曲线,如图 5 所示,每个点的 TF 值均是测试 100 次 TF 的平均值。转台在 Y 方向 -179.75 处 TF 值最大,即位置最佳;在 Z 方向 -32.6 处 TF 值最大;在 θ_x 方向 1.04 处 TF 值最大;在 θ_y 方向 0.78 处 TF 值最大;在 θ_z 方向 0.612 处 TF 值最大。因此,第一片 TDI CCD 最佳 TF 测试点(Y,Z, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$)为(-179.75, -32.6,1.04,0.78,0.612)。

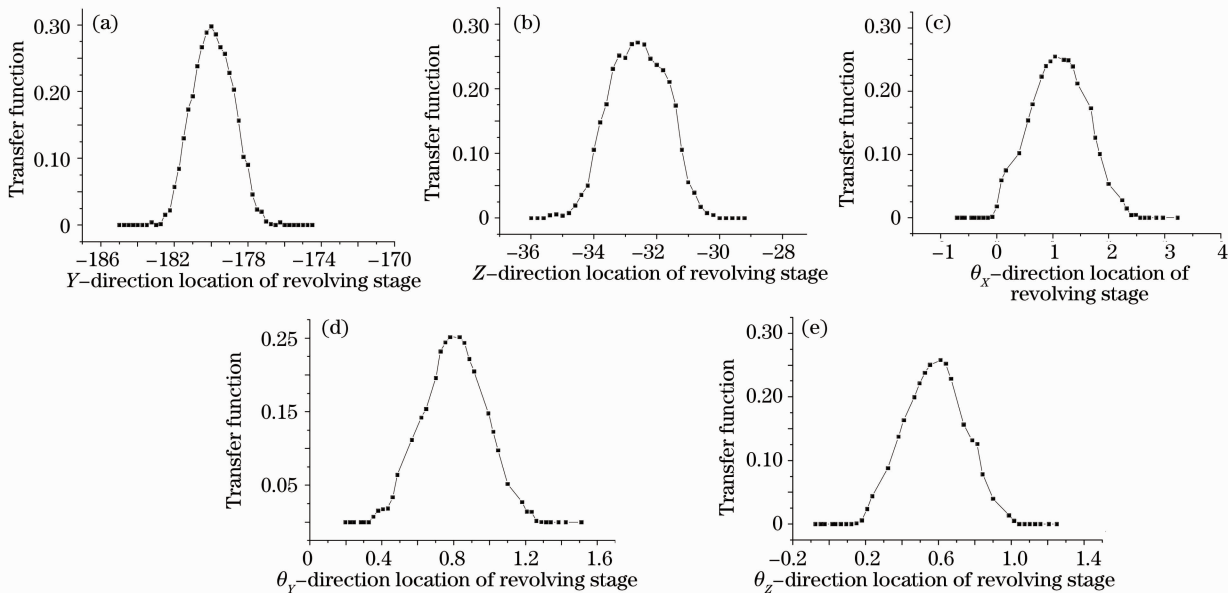


图 5 转台五个方向的 TF 变化曲线.(a)Y 方向;(b)Z 方向;(c) θ_x 方向;(d) θ_y 方向;(e) θ_z 方向

Fig. 5 Transfer function change curves of revolving stage in 5 directions. (a) Y direction; (b) Z direction; (c) θ_x direction; (d) θ_y direction; (e) θ_z direction

同样方法,搜索第二片 TDI CCD 至最后一片 TDI CCD 最佳 TF 测试点,表 1 列出每片 TDI CCD 对应视场的最佳 TF 测试点。

表 1 每片 TDI CCD 对应视场的最佳 TF 测试点

Table 1 Best transfer function test points of each slice of TDI CCD corresponding visual field

| | Y/mm | Z/mm | $\theta_x/(\circ)$ | $\theta_y/(\circ)$ | $\theta_z/(\circ)$ |
|----------|---------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1st CCD | -179.75 | -32.6 | 1.040 | 0.78 | 0.612 |
| 2nd CCD | -149.75 | -22.1 | 1.076 | 0.78 | 0.576 |
| 3rd CCD | -119.75 | -32.6 | 1.112 | 0.78 | 0.540 |
| 4th CCD | -89.75 | -22.1 | 1.148 | 0.78 | 0.504 |
| 5th CCD | -59.75 | -32.6 | 1.184 | 0.78 | 0.468 |
| 6th CCD | -29.75 | -22.1 | 1.220 | 0.78 | 0.432 |
| 7th CCD | 0.25 | -32.6 | 1.256 | 0.78 | 0.396 |
| 8th CCD | 30.25 | -22.1 | 1.292 | 0.78 | 0.360 |
| 9th CCD | 60.25 | -32.6 | 1.328 | 0.78 | 0.324 |
| 10th CCD | 90.25 | -22.1 | 1.364 | 0.78 | 0.288 |
| 11th CCD | 120.25 | -32.6 | 1.400 | 0.78 | 0.252 |
| 12th CCD | 150.25 | -22.1 | 1.436 | 0.78 | 0.216 |
| 13th CCD | 180.25 | -32.6 | 1.472 | 0.78 | 0.180 |
| 14th CCD | 210.25 | -22.1 | 1.508 | 0.78 | 0.144 |
| 15th CCD | 240.25 | -32.6 | 1.544 | 0.78 | 0.108 |

找到每片 TDI CCD 最佳传函测试点后,相机从第一片 TDI CCD 第一个像元开始,以固定步长沿 Y 方向移动,每移动一次就计算一次 TF。这里固定步长是靶标图像占有 TDI CCD 的像元数,大约为 600 个像元宽度,由于每片 TDI CCD 的有效像元数是 2048,因此,测量每片 TDI CCD 对应视场的静态 TF 需要移动四个步长,相邻步长所得到的靶标图像要有一定的重叠率^[7],这样才能保证相机整个视场静态 TF 的连续性。同样方法,测量其它 TDI CCD 对应视场的静态 TF,最终绘制大视场 TDI CCD 相机整个视场的静态 TF 曲线,以前方法和本文方法测试的全视场静态 TF 曲线如图 6 所示,横

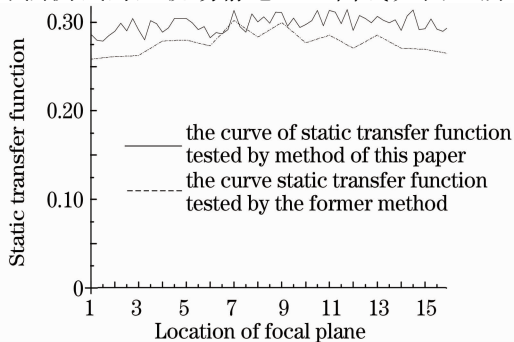


图 6 以前方法和本文方法测试的全视场静态 TF 曲线

Fig. 6 Static transfer function curve of the entire visual field tested using the method of the former and this paper

坐标表示以 TDI CCD 为单元划分的相机视场,纵坐标表示静态 TF 值,虚线表示以前方法测试的静态 TF 曲线(根据离散测试点拟合后的曲线),静态 TF 平均值为 0.2763,实线表示本文方法测试的静态 TF 曲线,静态 TF 平均值^[8]为 0.2965,比以前方法测试的静态 TF 平均值提高了 0.02。

6 测量误差分析

相机静态 TF 测试受周围环境(气流、温度等)影响比较大,在测试过程中静态 TF 值会随时间有一定的变化,因此,必须对测试结果进行足够多次的测量并做误差分析^[13]。对于测量误差常用标准偏差来估计,标准偏差越小,说明测量的可靠性就越高,反之,测量的可靠性就越低。标准偏差公式为

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

式中 n 为测试次数, x_i 为第 i 次测试结果, \bar{x} 为 n 次测试结果的平均值。

每片 TDI CCD 对应视场静态 TF 的测试过程持续 5 min,记录 5 min 内的测试结果,这些测试结果的平均值作为该片 TDI CCD 对应视场的静态 TF 值^[14],测试过程中环境因素使测试结果不断变换,引起了测量误差,由上式可以计算出每片 TDI CCD 对应视场静态 TF 的测量误差,如表 2 所示。

表 2 每片 TDI CCD 对应视场静态传函的测量误差
Table 2 Measure error of static transfer function of each slice of TDI CCD corresponding visual field

| Channel | Standard deviation |
|----------|--------------------|
| 1st CCD | 0.0057 |
| 2nd CCD | 0.0068 |
| 3rd CCD | 0.0048 |
| 4th CCD | 0.0063 |
| 5th CCD | 0.0047 |
| 6th CCD | 0.0059 |
| 7th CCD | 0.0062 |
| 8th CCD | 0.0053 |
| 9th CCD | 0.0062 |
| 10th CCD | 0.0049 |
| 11th CCD | 0.0064 |
| 12th CCD | 0.0062 |
| 13th CCD | 0.0054 |
| 14th CCD | 0.0071 |
| 15th CCD | 0.0049 |

7 结 论

提出了一种适用于大视场 TDI CCD 相机的静态 TF 自动测试方法,将整个相机视场以 TDI CCD 为单元进行划分,每片 TDI CCD 都有独立的最佳 TF 测试点,解决了由焦平面 TDI CCD 拼接引起的 TF 测试误差问题^[15],提高了测试准确度。通过计算机分析 TDI CCD 采集的靶标图像特征和 TF 变化曲线,自动控制转台带动相机转动,在每个方向搜索最佳 TF 测试点,建立位置信息库,减少了人工调整环节。静态 TF 测试覆盖了相机所有视场,测试的静态 TF 平均值为 0.2965,和原来测试方法比较,整个视场的静态 TF 平均值提高了 0.02,同时提高了测试精度和效率。

参 考 文 献

- 1 Li Chaohui, Wang Zhaoxun, Wu Keyong. Optical assembly of CCD focal plane for space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(3): 213~216
李朝辉,王肇勋,武克用.空间相机 CCD 焦平面的光学拼接[J].*光学精密工程*, 2000, **8**(3): 213~216
- 2 Xu Qiaoyu, Ye Dong, Che Rensheng. On-line calibration of stereo vision measurement system based on optical reference bar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 81~86
徐巧玉,叶东,车仁生.基于光学参考棒的立体视觉测量系统现场标定技术[J].*光学学报*, 2008, **28**(1): 81~86
- 3 Zhou Wang. Study on enhancing dynamic range of CCD image based on digital micro-mirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 638~642
周望.基于数字微镜器件技术提高面阵 CCD 相机动态范围的研究[J].*光学学报*, 2009, **29**(3): 638~642
- 4 Li Hongzhuang, Han Changyuan, Ma Dongmei. Assessment method of modulation transfer function of on-orbit space optical remote sensor using neural network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 631~637
李宏壮,韩昌元,马冬梅.航天光学遥感器在轨调制传递函数神经网络评价方法[J].*光学学报*, 2007, **27**(4): 631~637
- 5 Qian Yixian, Liang Wei, Gao Xiaodong. Numerical analysis of dynamic modulation transfer function for high-resolution aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 192~196
钱义先,梁伟,高晓东.高分辨率航空相机动态调制传递函数数值分析[J].*光学学报*, 2009, **29**(1): 192~196
- 6 Feng Zhiwei, Cheng Haobo, Song Qian *et al.*. Modulation transfer function measurement of electron multiplying CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1710~1716
冯志伟,程灏波,宋谦等.电子倍增电荷耦合器件的调制传递函数测量[J].*光学学报*, 2008, **28**(9): 1710~1716
- 7 Guo Yue, Liu Xiaopeng, Yang Hua. MTF analysis for CCD[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2004, **25**(3): 25~28
郭悦,刘晓鹏,杨桦.CCD 的调制传递函数(MTF)分析[J].*航天返回与遥感*, 2004, **25**(3): 25~28
- 8 B. M. Lambert, J. M. Harbold. Experimental methods for measurement of the modulation transfer function (MTF) for time-delay-and-integrate (TDI) charge coupled device (CCD) image sensors[C]. *SPIE*, 2009, **7405**: 75~83
- 9 Lu Jin, Chen Weimin, Cen Junbo. Effect of distance on modulation transfer function of imaging sensor using rectangle template contact method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1021~1026
鲁进,陈伟民,岑军波.间距对图像传感器调制传递函数矩形模板接触测量的影响[J].*光学学报*, 2006, **26**(7): 1021~1026
- 10 Mao Xianfu, Su Xianyu, Liu Yuankun *et al.*. Analysis on optical coordinate measurement based on phase target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2452~2457
毛先富,苏显渝,刘元坤等.基于相位标靶的光学坐标测量方法[J].*光学学报*, 2009, **29**(9): 2452~2457
- 11 Xue Mingqiu, Shen Weimin. Optical Design of Light Weight and Compact High Resolution TDI CCD camera[M]. Beijing: Science Press, 2005. 158~163
薛鸣球,沈为民.轻小型高分辨率 TDI CCD 相机的光学设计[M].北京:科学出版社, 2005. 158~163
- 12 P. Magnan, M. Estrieau, G. Rolland *et al.*. Theoretical evaluation of MTF and charge collection efficiency in CCD and CMOS image sensors[C]. *SPIE*, 2009, **7427**: 23~34
- 13 Ren Jianyue, Sun Bin, Zhang Xingxiang *et al.*. Precision measurement of TDI CCD interleaving assembly [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(10): 1852~1857
任建岳,孙斌,张星祥等.TDI CCD 交错拼接的精度检测[J].*光学精密工程*, 2008, **16**(10): 1852~1857
- 14 Fei Yetai. Error Theory and Data Processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2007. 68~70
费业泰.误差理论与数据处理[M].北京:机械工业出版社, 2007. 68~70
- 15 Han Changyuan. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(11): 2164~2172
韩昌元.高分辨力空间相机的光学系统设计[J].*光学精密工程*, 2008, **16**(11): 2164~2172