

## TDI-CCD 高分辨率空间相机多功能调焦控制系统

于 涛,宋克非

(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:** 为了提高 TDI-CCD 高分辨率空间相机离焦补偿的可靠性,保证相机的图像质量,提出一种多功能调焦控制系统。首先,详细分析离焦补偿的需求,提出位置闭环、温度闭环、图像闭环和位置开环四种调焦方法;然后,介绍系统的构成及工作原理;最后,对四种调焦方法进行设计和实验验证。实验结果表明:位置闭环调焦控制误差不大于  $1.3\ \mu\text{m}$ ,温度闭环调焦控制误差不大于  $1.4\ \mu\text{m}$ ,图像闭环调焦控制误差不大于  $2.3\ \mu\text{m}$ ,位置开环调焦控制误差不大于  $3.4\ \mu\text{m}$ ,四种调焦方法的控制误差满足系统设计的要求,有效地提高了 TDI-CCD 高分辨率空间相机离焦补偿的可靠性。

**关键字:** 调焦; 多功能; TDI-CCD; 空间相机

中图分类号: V443.5 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)S2-0363-05

## Multi-function focus control system for TDI-CCD high resolution space camera

Yu Tao, Song Kefei

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

**Abstract:** In order to improve the reliability of defocus compensation and guarantee the imaging quality for TDI-CCD high resolution space camera, a multi-function focus control system was proposed. Firstly, the system requirements were analyzed in detail and four focus control methods were proposed and the four focus control methods contained position closed loop, temperature closed loop, image closed loop and position open loop. Secondly, the system composition and work principle were introduced. Finally, the four focus control methods were designed and validated. Experimental results indicated that the error of position closed loop was not more than  $1.3\ \mu\text{m}$ , the error of temperature closed loop was not more than  $1.4\ \mu\text{m}$ , the error of image closed loop was not more than  $2.3\ \mu\text{m}$ , the error of position open loop was not more than  $3.4\ \mu\text{m}$ , the errors of four focus control methods satisfied the requirements of system design and the reliability of defocus compensation was improved effectively.

**Key words:** focus; multi-function; TDI-CCD; space camera

收稿日期: 2013-08-05; 修订日期: 2013-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(60507003)

作者简介: 于涛(1980-),男,助理研究员,硕士,主要从事空间相机控制技术方面的研究。Email: yut@ciomp.ac.cn

## 0 引言

空间相机是空间对地观测的重要手段,在军事侦察、资源勘探和测绘等领域发挥着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。由于空间相机受发射力学环境(如冲击、振动、过载)、在轨运行环境(如压力、温度、微重力等)及相机结构材料稳定性等因素的影响,其光学元件曲率半径、透镜间的空气间隔、镜片间的空气折射率及结构件的实际尺寸发生变化,造成离焦,从而降低了光学系统的整体调制传递函数与成像质量<sup>[2-7]</sup>。长焦距、高分辨率的空间相机为了获得高清晰的地面图像,必须对成像系统的离焦量进行补偿。

由于 TDI-CCD 高分辨率空间相机的图像数据量巨大,受存储、计算、时间、拍摄目标的限制,在轨很难实现有效的基于图像数据的调焦控制,因此对于不同的离焦情况,能够提供多种离焦补偿方法的高可靠性的调焦控制系统,是目前 TDI-CCD 高分辨率空间相机能够获取高质量图像的可靠保障。

针对目前 TDI-CCD 高分辨率空间相机调焦策略单一,如果调焦策略失效,将无法实现相机的离焦补偿,直接影响图像质量。文中提出一种 TDI-CCD 高分辨率空间相机多功能调焦控制系统,提供温度闭环调焦、图像闭环调焦、位置闭环调焦和位置开环调焦四种方法,可以根据不同的情况选择不同的调焦控制策略,经过试验验证,四种调焦控制方法正确,有效提高了相机离焦补偿的可靠性,并且具有一定的通用性。

## 1 离焦补偿的需求分析

对于 TDI-CCD 高分辨率空间相机,在确定相机最佳焦面位置的条件下,可以采用位置闭环控制方法,计算离焦量,控制相机焦面到达预期位置,焦面误差控制较小。

焦面的测量部件是相机离焦补偿的关键部件,如果测量部件失效,会导致相机离焦补偿功能失效,因此应对测量部件进行备份。通常进行闭环控制的测量部件采用编码器,备份的测量部件采用霍尔元件,采用位置开环控制方法。

TDI-CCD 高分辨率空间相机通常具有长焦距、大视场的特点,温度对光学元件的影响较大,因此温

度是相机产生离焦的重要因素。对于不同的平衡温度,可以计算相机的最佳焦面位置,再通过位置闭环调焦方法或开环调焦方法将相机焦面调整到预期位置,因此相机焦面应具备温度闭环控制功能。

如果温度闭环调焦控制方法不能对相机焦面进行正确有效的离焦补偿,为了准确定位相机的焦面位置,需要对相机焦面的控制全程进行扫描,同时采集图像,在地面根据图像定位相机的最佳焦面位置,再通过位置闭环调焦方法或开环调焦方法将相机焦面调整到预期位置,因此相机应具备图像闭环控制焦面的功能。

## 2 系统构成和原理

实现 TDI-CCD 高分辨率空间相机多功能调焦控制系统主要由系统控制器、调焦编码器、调焦电机驱动电路、调焦电机、调焦机构、霍尔元件、成像单元、光学元件和温度传感器组成,结构关系如图 1 所示。有效载荷总体单位负责有效载荷数据处理单元的研制工作,主要功能是将命令和控制参数上行发送给空间相机,将空间相机的图像数据和工程参数下行发送到地面。

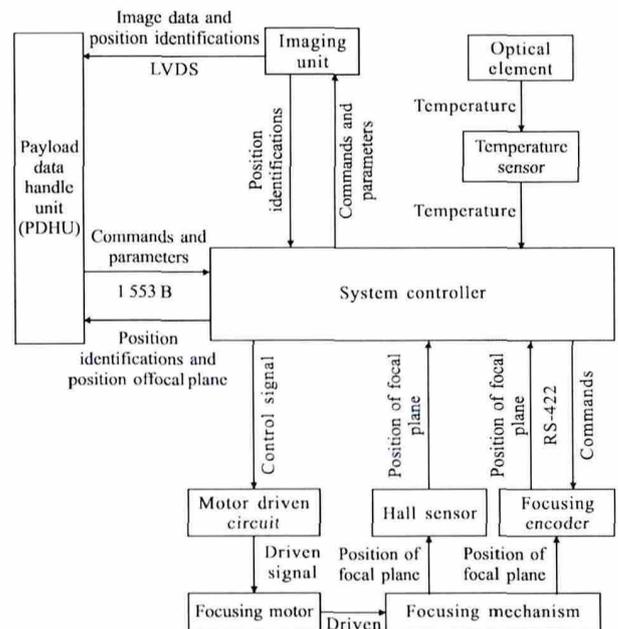


图 1 调焦控制系统框图

Fig.1 Block diagram of focus control system

系统的工作原理:图 1 中,系统控制器通过 1553B 通讯链路接收控制命令和参数,通过 RS-422 串行

通讯链路控制成像单元采集图像数据、计算图像数据位置标识;成像单元通过 LVDS 通讯链路下传图像数据和图像数据位置标识,通过 RS-422 串行通讯链路将图像数据位置标识反馈给系统控制器;系统控制器周期采集光学元件温度,根据温度计算相机的最佳焦面位置;系统控制器通过 RS-422 串行通讯协议与调焦编码器进行通讯,读取相机当前焦面位置;系统控制器通过霍尔元件信号定位相机当前焦面位置;系统控制器根据当前焦面位置和最佳焦面位置计算调焦电机运行步数和运行方向,并控制调焦电机运行;调焦电机驱动调焦机构移动,完成焦面位置的调整。

### 3 系统设计

系统采用步进电机作为调焦机构的驱动元件,控制方式为四相八拍,运行频率为 1kHz;采用 16 位光电轴角编码器作为相机焦面的测量元件;位置闭环控制方法依据相机最佳焦面位置和当前焦面位置进行离焦补偿;温度闭环控制方法依据温度与相机焦面的定标数据对焦面进行离焦补偿;图像闭环控制方法依据图像确定相机最佳焦面位置,进行离焦补偿;位置开环控制方法依据霍尔元件与相机焦面位置的定标数据进行离焦补偿;下面对系统设计的几个关键点进行详细介绍。

#### 3.1 图像质量评价方法

地面仿真实验采用黑白条纹等间隔目标板作为相机拍摄的目标源,评价相机的图像质量采用成像系统的调制传递函数(MTF)。根据公式(1)计算 MTF, MTF 值越大,表征图像质量越好:

$$MTF = \frac{\pi}{4} \times \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

式中: MTF 为成像系统调制传递函数值;  $I_{\max}$  为最大亮度;  $I_{\min}$  为最小亮度。

#### 3.2 根据图像确定相机最佳焦面位置

由于焦面调整过程中需要采集图像数据和焦面位置,并且计算图像数据位置标识。因此,焦面调整采取连续、匀速的控制方式,图像数据采集过程中以固定周期计算图像数据位置标识和焦面位置。针对 TDI-CCD 高分辨率空间相机,可以将图像数据所在的行定义为图像数据位置标识。

根据公式(1)计算 MTF, MTF 值越大表征图像质

量越好,根据质量最好的图像数据,可以确定相对应的图像数据位置标识,最后根据图像数据位置标识和焦面位置计算相机最佳焦面位置。

#### 3.3 温度与相机焦面的定标

全程扫描相机焦面,并实时采集图像数据,根据图像数据计算 MTF 值, MTF 最大值对应的焦面位置与平衡后的温度作为一组定标数据。在不同的温度平衡条件下,分析相机温度和焦面位置,根据定标数据拟合焦面与温度的关系曲线。

#### 3.4 霍尔元件与相机焦面的定标

霍尔元件和相机焦面的相对位置与机构装调相关,每次相机装调后需要重新定标霍尔元件与相机焦面的相对位置。采用编码器辅助定标的方法,霍尔元件信号转换时的调焦编码器值作为霍尔元件与相机焦面的定标值,焦面在其他位置时以定标值作为参考。

#### 3.5 四种方法的控制误差

位置闭环的控制误差由调焦编码器测量误差和调焦电机控制误差组成。调焦编码器测量误差由调焦编码器精度误差和测量误差组成,两个误差值均为调焦编码器的一个码值。调焦电机控制误差由调焦电机转动误差和调焦电机步数计算误差组成,经过测量,调焦电机的转动误差较小,不大于一步,调焦电机步数计算误差不大于一步。位置闭环的控制误差计算公式可表示为:

$$e_1 = 2K_1 + 2K_2 \quad (2)$$

式中:  $e_1$  为位置闭环的控制误差;  $K_1$  为相机焦面位置变化量与调焦编码器值变化量的转换系数;  $K_2$  为相机焦面位置变化量与调焦电机步数变化量的转换系数。

温度闭环控制需要对温度和相机焦面进行定标,因此会产生定标误差。温度闭环的控制误差由位置闭环的控制误差和上述定标误差之和组成,公式可表示为:

$$e_2 = e_1 + K_3 \quad (3)$$

式中:  $e_2$  为度闭环的控制误差;  $e_1$  为位置闭环的控制误差;  $K_3$  为温度和相机焦面的定标误差。

图像闭环控制过程中,要求图像开始采集与焦面位置开始计算同步,因此会产生图像和焦面位置的同步误差。图像开始采集时,系统控制器通过 RS-422 串行通链路读取调焦编码器值,最大延迟时间为 2 ms,对应调焦电机运行步数为 2。图像闭环的控制误差由位置闭环的控制误差和上述同步误差组成,计算公式可表示为:

$$e_3=e_1+2K_2 \quad (4)$$

式中： $e_3$  为图像闭环的控制误差； $e_1$  为位置闭环的控制误差； $K_2$  同公式(2)。

位置开环的控制误差由调焦电机控制误差和调焦机构误差组成，公式可表示为：

$$e_4=2K_2+K_4 \quad (5)$$

式中： $e_4$  为位置开环的控制误差； $K_2$  同公式(2)； $K_4$  为调焦机构误差。

由于上述误差均为随机误差且相互独立，因此可以通过直接相加计算四种调焦控制方法的总误差。

## 4 实验

将上述四种调焦控制方法应用于某型号 TDI-CCD 高分辨率空间相机，验证四种方法的正确性和有效性。根据系统设计， $K_1$  为  $0.12 \mu\text{m}$ ， $K_2$  为  $0.5 \mu\text{m}$ ， $K_4$  为  $2.4 \mu\text{m}$ 。根据公式(2)计算位置闭环的控制误差为  $1.3 \mu\text{m}$ ，根据公式(2)、(4)计算图像闭环的控制误差为  $2.3 \mu\text{m}$ ，根据公式(5)计算位置开环的控制误差为  $3.4 \mu\text{m}$ 。

### 实验一：

在真空环境和不同平衡温度条件下，全程扫描相机焦面，同时采集图像数据，根据公式(1)计算最佳焦面位置，测量结果见表 1。表 1 的测量数据经过拟合后确定的平衡温度和最佳焦面位置的关系见公式(6)。经计算最大的定标误差  $K_3$  不大于  $0.1 \mu\text{m}$ ，因此温度闭环的控制误差为  $1.4 \mu\text{m}$ 。表 2 中，相机平衡温度为  $14.4 \text{ }^\circ\text{C}$  时，焦面扫描过程中不同焦面位置对应的 MTF 值，表中 MTF 最大值对应的编码器值为相机最佳焦面位置，由于数据较多，表中只列出以 MTF 最大值为中心，间隔  $0.5 \text{ s}$  的部分数据。

表 1 温度测量结果

Tab.1 Measuring result of temperature

No.	Equilibrium temperature	Encoder value of best focal plane
1	4.3	36 059
2	9.8	36 172
3	14.4	36 312
4	19.9	36 433

$$A=24.5T+35\ 948 \quad (6)$$

式中： $A$  为最佳焦面位置对应编码器值； $T$  为相机平衡温度。

表 2 焦面测量结果

Tab.2 Measuring result of focal plane

No.	MTF	Encoder value of focal plane
1	0.154	30 079
2	0.182	32 156
3	0.215	34 232
4	0.242	36 312
5	0.210	38 389
6	0.179	40 463
7	0.151	42 541

### 实验二：

在相机焦面的两个边界各放置一个霍尔元件，首先将相机焦面调整到全量程的中间位置，此时霍尔元件无效；然后控制焦面分别调整到焦面的两个边界，当霍尔元件有效后，停止焦面调整，记录焦面停止调整后的调焦编码器值，作为霍尔元件与相机焦面的定标数据。经过测量两个边界出的定标数据分别为 17 180 和 48 356。

### 实验三：

验证四种焦面调整方法的正确性，针对温度闭环和图像闭环两种调焦控制方法，如果最佳焦面位置确定后，对焦面调整的过程与位置闭环控制方法相同。位置开环控制方法需要确定霍尔元件位置，通过霍尔元件定位当前相机焦面位置，然后根据相机最佳焦面位置控制焦面调整。经过实验验证四种调焦控制方法的误差满足要求。

## 5 结论

文中提出一种 TDI-CCD 高分辨率空间相机多功能调焦控制系统，系统能够实现四种调焦控制方法，有效地提高了 TDI-CCD 高分辨率空间相机离焦补偿的可靠性，经过实验验证：四种调焦控制方法的控制误差满足要求，四种方法正确有效，并且具有一定的通用性。

## 参考文献:

- [1] Lv Huangyi, Liu Yang, Guo Yongfei. Computation of overlapping pixels of mechanical assembly CCD focal planes in remote sensing cameras [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(5): 1041-1047. (in Chinese)  
吕恒毅, 刘杨, 郭永飞. 遥感相机焦面 CCD 机械拼接中重叠像元数的确定[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 1041-1047.
- [2] Liu Lei, Cao Guohua. Double cam focusing mechanism of space camera with wide field and long-focal-plane [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(9): 1939-1944. (in Chinese)  
刘磊, 曹国华. 大视场长焦面光学遥感器双凸轮式焦面调焦机构[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9): 1939-1944.
- [3] Wang Dejiang, Li Wenming, Xu Yongseng, et al. A fast auto-focusing technique for the TDI-CCD panoramic aerial camera [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(8): 1452-1457. (in Chinese)  
王德江, 李文明, 许永森, 等. TDI-CCD 全景航空相机快速自动检调焦方法[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(8): 1452-1457.
- [4] Guo Jiang, Sun Jiming, Shao Mingdong, et al. Calculation of focal length for off-axis TMA aerospace mapping camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(8): 1754-1758. (in Chinese)  
郭疆, 孙继明, 邵明东, 等. 离轴三反航天测绘相机焦距的计算[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1754-1758.
- [5] Lv Huanyi, Liu Yang, Xue Xucheng, et al. Intelligent focusing method for the remote sensing cameras[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1261-1265. (in Chinese)  
吕恒毅, 刘杨, 薛旭成, 等. 遥感相机的智能调焦方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1261-1265.
- [6] Lu Zhenghua, Guo Yongfei, Li Yunfei, et al. Realization of auto-focus on APRC using CCD stitching [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1559-1566. (in Chinese)  
卢振华, 郭永飞, 李云飞, 等. 利用 CCD 拼接实现推扫式遥感相机的自动调焦 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1559-1566.
- [7] Lu Zhenghua, Guo Yongfei, Li Hongfa, et al. Auto-focus using LSF in aerial push-broom remote-sensing camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1808-1814. (in Chinese)  
卢振华, 郭永飞, 李洪法, 等. 利用 LSF 实现推扫式遥感相机的自动调焦[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1808-1814.