

基于面阵 CCD 的时间延时积分模式的空间相机自动对焦

孟希羲 冯华君 徐之海 李 奇 陈跃庭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 空间面阵相机在轨运动会产生运动模糊,影响自动对焦准确率。为解决该问题,提出行间转移面阵 CCD 的时间延时积分(TDI)模式实现去运动模糊。选取行间转移面阵 CCD KAI-1003 作为成像器件,利用可编程逻辑器件(PLD)控制时序信号,匹配 CCD 的行转移速度与目标运动速度,实现去运动模糊。实验表明该成像系统不仅能去运动模糊而且还大幅提高图像信噪比。去运动模糊后,根据较短时间间隔内空间相机拍摄的图像有重叠区域的特点提出一种空间相机自动对焦方法。通过配准算法找出序列图像间的重叠区域,并计算重叠区域的清晰度评价价值,然后根据传递特性将评价价值映射到同一个评价体系中,最后找到最佳对焦位置。实验表明该成像系统对高速运动的目标能够实现自动对焦。

关键词 遥感;自动对焦;图像配准;像移补偿;行间转移面阵 CCD;时间延时积分(TDI)模式

中图分类号 TP79 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1128002

Method to Realize Autofocus of Remote Sensing Camera Based on the TDI Pattern of Interline Transfer Progressive Scan CCD

Meng Xixi Feng Huajun Xu Zhihai Li Qi Chen Yueting

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract The picture captured by the remote sensing camera will be degenerated since the camera constantly rotates around the earth. The degenerated image may decrease the focusing accuracy. In order to solve this problem, a method based on the time delay and integration (TDI) pattern of interline transfer progressive scan CCD is proposed. The interline transfer CCD KAI-1003 is used as the imaging device, and PLD is used to control the driving timing signal for the sake of matching the velocity between CCD and object. In this way, the motion blur can be eliminated. The experimental results show that the imaging system not only eliminates the motion blur but also increases the signal to noise ratio (SNR) of the image. After removing the motion blur, an auto-focusing method of remote sensing camera is also proposed, with the feature that the images have overlapped regions captured in a short time. Firstly, the displacement and the overlapped regions of two adjacent images in the image sequences are calculated using the image registration algorithm. Then a sequence of focusing accuracy values through performing a sharpness evaluation function on the overlapped region of each image is obtained. Finally, according to the transfer characteristic, the evaluation value is mapped in a same evaluation system, and the accurate focus position is found. The experimental results indicate that the imaging system works pretty well for auto-focusing when the object moves in a high speed.

Key words remote sensing; autofocusing; image registration; image motion compensation; interline transfer area array CCD; time delay and integration (TDI) mode

OCIS codes 280.4750; 280.4788; 100.4145; 100.2960

1 引 言

空间相机在发射升空之前,系统是经过精确对焦的,然而由于轨道高空大气压力、温度和湿度都发

生了变化,进入轨道后光学系统焦距将发生变化,变化甚至将延续数年。离焦会使图像的对比度和分辨率下降。为了获取理想的像质,空间相机发射后须

收稿日期: 2011-04-06; **收到修改稿日期**: 2011-06-09

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724006)和国家自然科学基金(60977010)资助课题。

作者简介: 孟希羲(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学图像处理、自动对焦等方面的研究。E-mail: kesi1986@126.com

导师简介: 冯华君(1963—),男,硕士,教授,博士生导师,主要从事成像系统、遥感等方面的研究。

E-mail: fenghj@zju.edu.cn(通信联系人,光学学会会员号:3109049)

检查相机的焦面位置,必要时对相机进行在轨调焦。

空间相机自动对焦面临的最大困难在于相机一直处于运动状态,即任意时刻所拍摄的景物都是不同的,直接采用现有的图像处理对焦方法将可能出现误对焦的情况。

针对空间相机的特殊情况,目前最常见的对焦技术是重复拍摄的方法,即卫星对某区域拍摄一幅图像后,等待卫星下次掠过该区域上空时再次拍摄,经过多次这样的拍摄过程后即可得到一组序列图像。然后对序列图像计算清晰度评价,找出最佳对焦位置。该方法虽能实现对焦但是完成一次完整的对焦需要的时间周期长,因此对于如敏捷卫星这种实时性要求高的卫星系统是不适用的。另一种方法是由王昕等^[1]提出的基于功率谱的对焦评价函数,其理论依据是大多数的任意景物在理论上都有大致相同的功率谱^[2]。该方法的优点在于计算简单,但是有较大的局限性,即必须针对同一类景物。如森林、海洋、城市等这些不同类别的景物,它们间的功率谱差异是比较大的,运用功率谱对焦评价函数的方法将出现误对焦。2010年,黄艳等^[3]根据光学离焦成像模型,提出了一种基于微分图像自相关的快速自动对焦方法。该方法模拟实验效果很好,然而对于实际拍摄的图像常常因为噪声等原因造成计算得到弥散斑半径有误。

近来,针对空间相机自动对焦的迫切需要,本课题组经过研究分析提出了一种基于图像配准算法实现空间相机自动对焦的方法^[4],实现空间相机短时间完成对焦的功能。然而空间相机高速运动会产生运动模糊,影响对焦的准确率。本文针对这一问题通过面阵 CCD 的时间延时积分(TDI)模式消去运动模糊,并利用以上提出的对焦方法实现了自动对焦过程。

2 电子式补偿技术去运动模糊

2.1 像移产生的原因

空间相机相对于被观测对象一直处于高速运动状态,造成曝光时间内目标在 CCD 面上所成的像是运动的,这就产生了像移。通过研究像移对空间相机成像的影响发现,空间相机的前向运动造成的像移图像质量影响最大^[5],因此只需重点补偿前向运动引起的像移就可以有效消去像移产生的运动模糊。

空间相机的速高比越大,像移就越大,

$$V' = \frac{V}{H} f'_{\max}, \quad (1)$$

式中 V 为空间相机轨道飞行速度; H 为空间相机轨

道高度; f'_{\max} 为光学系统最大焦距; V' 为相对于空间相机 CCD 面上的像移运动速度。

CCD 每次曝光产生的像移为

$$\Delta l = V' \Delta t, \quad (2)$$

式中 Δt 为空间相机曝光时间。

假设空间相机轨道高度为 500 km,轨道飞行速度为 7627 m/s, CCD 像元尺寸 a 为 12 μm ,光学系统最大焦距为 2 m 时,由

$$T = \frac{H}{V f'_{\max}} a \quad (3)$$

可知,在光照度不高的情况下,曝光时间为 $T = 393 \mu\text{s}$,所得的图像偏暗,无法满足观察需求。此时应当延长曝光时间,但是根据(2)式计算得到的像移 Δl 将会大于 CCD 像元尺寸从而造成图像运动模糊。为了提高图像质量必须进行像移补偿。

2.2 行间转移面阵 CCD 结构简介

行间转移面阵 CCD 完成光电转换后,将光电荷从一行感光区转移到与其对应的一列存储区中(如图 1 所示),然后从存储区一行行的转移到水平寄存器后读出。由于行间转移面阵 CCD 具有与 TDI-CCD 相似的结构,因此可以采用适当的时序控制方法,使面阵 CCD 按照 TDI-CCD 模式工作^[6~8]。

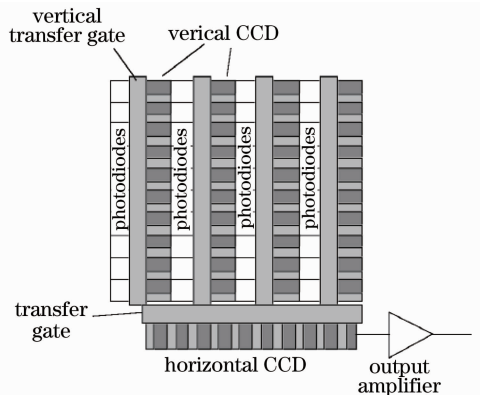


图 1 行间转移面阵 CCD 结构示意图

Fig. 1 Structure of the interline transfer area array CCD

2.3 TDI 模式实现去运动模糊

整个成像系统的硬件结构如图 2 所示,主要由成像电路部件和对焦控制部件组成。成像电路主要包括可编程逻辑器件(PLD)控制器、CCD 成像传感器、时序脉冲发生器和 AD 转换器等,而对焦控制系统主要由图像采集卡、计算机和步进电机的移动控制电路组成。成像器件选取了柯达公司的行间转移面阵 CCD KAI-1003,像素分辨率为 1024 pixel \times 1024 pixel,像元尺寸为 12 μm 。PLD 控制芯片采用的型号是 Altera 公司的 EPF10K30AFC256。

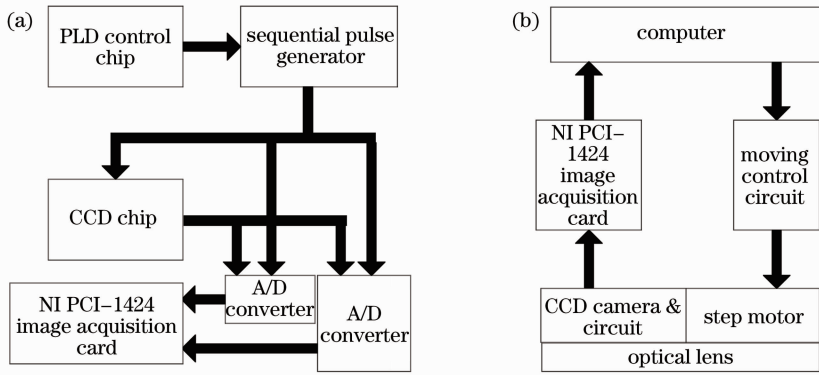


图 2 (a) CCD 成像系统电路结构图; (b) 对焦控制系统结构图

Fig. 2 (a) Circuit structure of CCD imaging system; (b) autofocus control system structure

行间转移面阵 CCD-TDI 模式的实现, 事实上是对电子快门与电荷读取信号的控制, 主要是依靠驱动时序变化实现的。控制 KAI-1003 积分电荷的转移, 主要是设计其垂直转移时钟, 同时考虑控制 CCD 本身的曝光时间。

图 3(a) 表示面阵 CCD 常规曝光转移时序图。而图 3(b) 表示 KAI-1003 行间转移 CCD 在 TDI 模式下的转移时序图。时序控制芯片在提取数据之前会进行 N 次电荷转移从而实现 TDI 电荷转移方

式, 从而补偿运动模糊。

本实验中设定 CCD 积分级数为 $N=20$, 每级曝光时间为 $T=393 \mu s$, 垂直转移时钟、曝光时间按照图 3(b) 所示。在完成设定的曝光积分时间 T 后, 将电荷转移到下一行电荷存储区, 然后进行下一次积分, 直到完成设定积分级数后, 再将图像数据读出。在读出数据阶段曝光产生的电荷, 在下一次 TDI 积分前, 由电子快门清空。

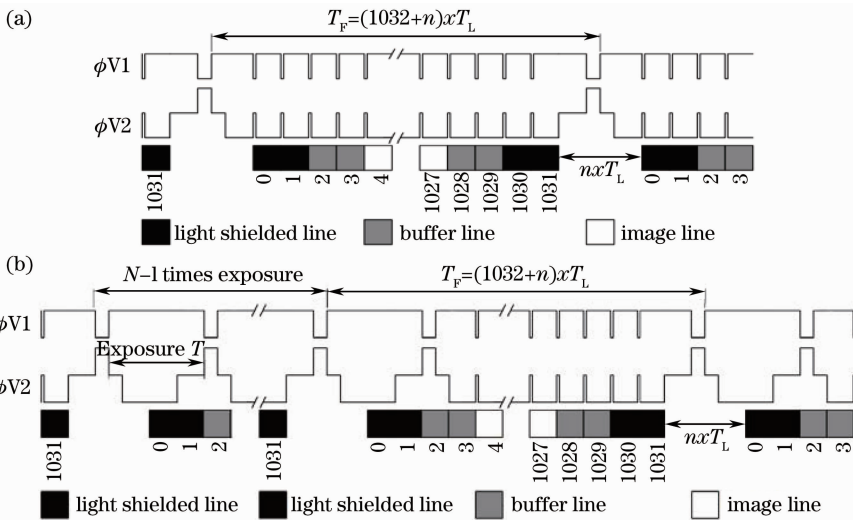


图 3 行间转移面阵 CCD KAI-1003 转移时序图。(a) CCD 常规转移时序图; (b) CCD 的 TDI 模式转移时序图

Fig. 3 Transfer sequence diagram of the interline transfer area array CCD KAI-1003. (a) Normal transfer sequence diagram of CCD; (b) transfer sequence diagram of CCD with the TDI mode

2.4 TDI 模式去运动模糊的实验条件

敏捷卫星的轨道高度 500 km, 其相应轨道飞行速度为 7627 m/s, 光学系统最大焦距为 2 m, CCD 像元尺寸 a 为 $12 \mu m$, 由(3)式得知其每级曝光时间为 $393 \mu s$ 。实验系统以此为基础, 设定 CCD 的每级曝光时间仍为 $393 \mu s$, 像元尺寸为 $12 \mu m$, 而将物距缩小至 0.75 m, 焦距缩至 0.05 m, 则相应的要求轨

道速度等比变为 0.458 m/s。

2.5 TDI 模式去运动模糊的实验结果

完成系统软硬件设计和调试后进行成像实验, 为了模拟空间相机拍摄效果, 将大幅遥感图片作为拍摄目标。实验中将拍摄目标放置在电动平移平台上产生高速运动效果, 实验装置如图 4 所示。实验结果如图 5 所示, 图 5 中(a), (c), (e)三幅图是面阵

CCD 常规模式拍摄高速运动物体得到的模糊图, (b),(d),(f)三幅图是面阵 CCD 在 TDI 模式下拍摄的清晰图,可见去模糊效果是很好的。同时从

图 5 的实验结果可见[尤其是对比(e)与(f)],说明面阵 CCD-TDI 模式不仅可以去运动模糊而且能提高图像信噪比。

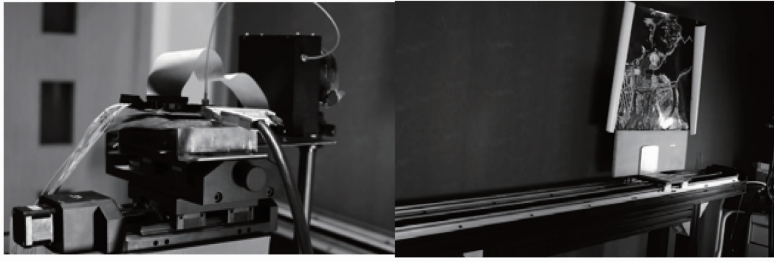


图 4 实验装置图

Fig. 4 Photo of experimental setup

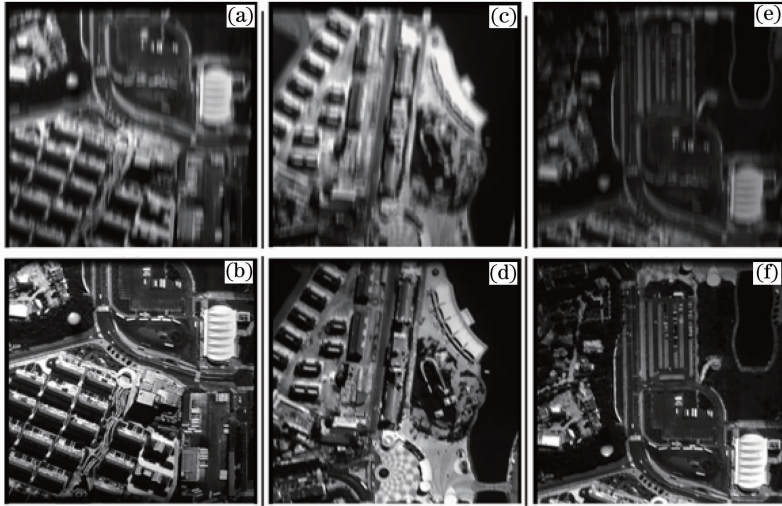


图 5 面阵 CCD 的 TDI 模式去运动模糊结果图。上三幅图(a)、(c)、(e)为 CCD 常规模式拍摄的图像; 下三幅图(b)、(d)、(f)为 CCD 的 TDI 模式拍摄的图像

Fig. 5 Deblurred images captured with TDI mode of area array CCD. Top three images (a)、(c)、(e) are captured by CCD with normal mode; bottom three images (b)、(d)、(f) are captured by CCD with TDI mode

接下来从客观上分析图像的成像质量。本文采用了常用的灰度平均梯度法(GMG)与拉普拉斯评价算法(Laplacian evaluation algorithm)对三组图

进行评价,评价价值越大,表示清晰度越好,图像质量越高。相应的对比情况如表 1 所示。客观评价显示 TDI 模式拍摄的去模糊图质量有明显提高。

表 1 CCD 的 TDI 模式拍摄的去模糊图与 CCD 常规模式拍摄的模糊图的客观评价

Table 1 Quality evaluations of the deblurred images captured by CCD with TDI mode and the blurred images captured by CCD with normal mode

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Mode	Normal mode	TDI mode	Normal mode	TDI mode	Normal mode	TDI mode
GMG	6.2760	11.6850	4.8521	7.6383	3.7929	7.4812
Laplacian	22.1001	49.3509	13.9731	26.9959	15.4644	28.5398

3 自动对焦

3.1 自动对焦方法原理

本文采用的自动对焦方法^[4]是基于空间相机短时间间断拍摄的两幅图像有重叠区域的特点提出的。相邻两幅图像间的重叠区域有相同的景物且具有可

比性,因此对于两幅图像的重叠区域是可以采用现有的数字图像清晰度评价函数计算的。其基本思路是:

1) 空间光学相机在轨调焦过程中每调焦一次对地拍摄一幅图像,如图 6 所示,数次拍摄得到序列图像;

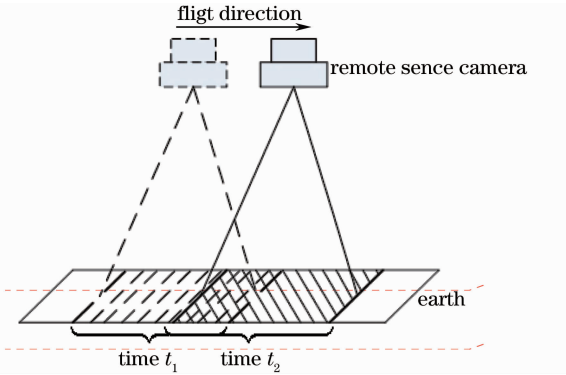


图 6 空间相机拍摄示意图

Fig. 6 Schematic diagram of capturing images from remote sensing camera

2) 通过配准算法(相位相关法^[9,10]、互相关算法^[11,12])计算出序列图像中每两幅相邻图像间的位移量和重叠区域。其过程如图 7 所示:1、2、3 为三幅相邻的序列图像,利用配准算法获取相邻图像 1、

2 的重叠区域(阴影部分)及相邻图像 2、3 的重叠区域(阴影部分);

3) 对重叠部分图像预处理,如维纳滤波、亮度归一化^[13],然后进行图像清晰度评价(能量梯度法^[14])计算,得到以两幅相邻图像为一组的若干组图像清晰度评价值;

4) 按照每相邻两组图像具有一个相同的图像清晰度评价值,将若干组图像的评价值传递映射到同一个评价体系,以最大的评价值所对应的图像作为准确对焦位置。图 8 用于说明传递映射的原理:点 A、b 分别为相邻图像 1、2 重叠区域的清晰度评价值,点 B、c 分别为相邻图像 2、3 重叠区域的清晰度评价值,b 与 B 同属于图像 2 因此可认为具有相同的评价值(其值不同是因为 b 与 B 选择的区域不同),为求简便,可采用评价值 B 代替 b 点的值,然后对点 c 利用映射公式 $C = c \times B/b$ 得到映射后的评价值 C。



图 7 序列图像间重叠区域示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the overlapped regions between the sequential image

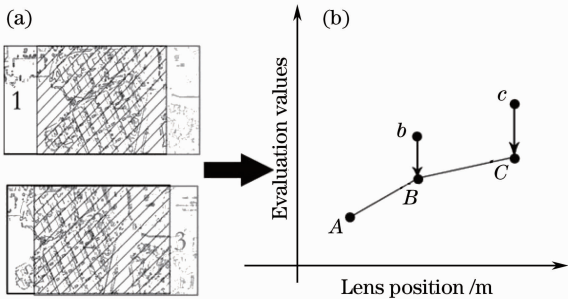


图 8 图像清晰度评价值传递映射的原理图

Fig. 8 Principle of transfer mapping of image definition evaluation values

3.2 自动对焦实验系统设计

自动对焦硬件系统如图 2(b)所示,首先由 PLD 控制 CCD 成像传感器实现 TDI 模式采集去运动模糊图像,然后将图像数据转化成 16 位精度的数字信号经图像采集卡传给计算机,计算机根据提出的自

动对焦法对采集的图像分析处理,最后根据得出的对焦信息控制步进电机系统完成对焦。本实验搜索最佳对焦位置的算法类似于爬山法。实验装置如图 4 所示。左图为步进电机对焦控制系统及 CCD 相机成像系统,右图为电动平移台。

3.3 自动对焦实验结果

实验开始时,将 CCD 相机的对焦状态初始化为离焦状态。开启对焦程序,点击 Grab 按钮采集视频,点击 Start-Focus 按钮启动自动对焦。自动对焦过程中采集的序列图像如图 9 所示,图 9 中每两幅相邻图像间都有一定的位移量与不同的离焦量。表 2 第 2 列描述了所拍摄图像序列间的位移量,通过位移量可计算出图像间的重叠区域,经过以上提到的方法进行计算后可获得统一的清晰度评价值(表 2 第 3 列),将这一系列清晰度评价值画在图上即可得到图像清晰度评价值变化曲线,如图 10 所示,当

检测到第一次极大值位置后说明最佳对焦位置在该对焦位置附近,改变电机转动方向缩小转动步长,当第二次检测到极大值时说明该位置就是最佳对焦位置。从图 10 可见,程序通过类似爬山法的算法最终找到了最佳对焦的位置,即清晰度评价最大的位

置[图 9 中显示为拍摄图(k)的位置],平均耗时 10 s。对焦的时间影响因素在于步进电机驱动相机移动的速度、算法运行速度、离焦程度等方面,其中起决定因素的是步进电机转动速度。如果选用高速步进电机将能大幅提高对焦速度。

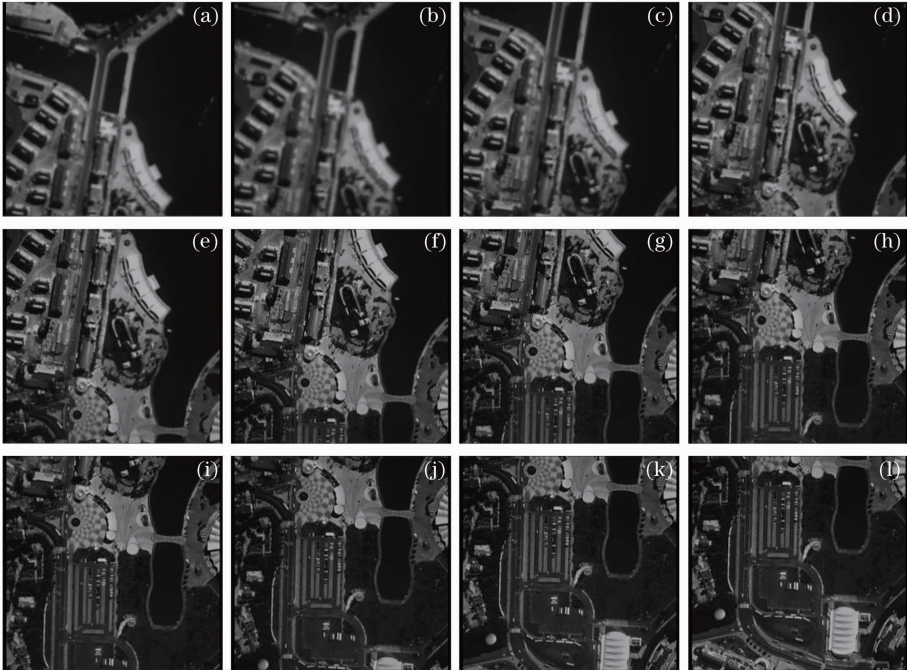


图 9 对焦过程中采集的十二幅序列图像

Fig. 9 Twelve sequential images in the focusing process

表 2 图像序列间的位移量和映射到同一评价体系后的图像清晰度评价

Table 2 Displacement value between image sequences and the evaluation values of images which has been unified in a merit system

Image serial number	Horizontal displacement with the prior image /pixel	Modified evaluation value
a	—	2.1881
b	53	2.4048
c	78	2.7160
d	75	3.2592
e	75	3.8900
f	78	6.1896 ^①
g	74	5.4643 ^②
h	74	5.8448
i	59	6.1245
j	62	6.2442
k	62	6.3100 ^③
l	59	6.2504 ^④

① 第一次极大值;

② 第一次拐点;

③ 第二次极大值(最佳对焦位置);

④ 第二次拐点

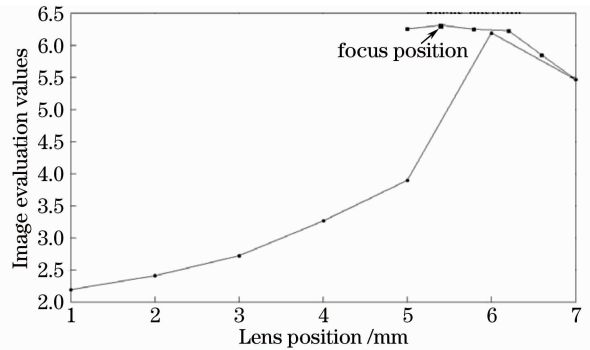


图 10 对焦过程图像清晰度评价曲线

Fig. 10 Curve for image definition evaluation values in the focusing process

4 结 论

针对空间相机自动对焦的迫切需要,提出了基于行间转移面阵 CCD 的 TDI 模式实现空间相机自动对焦方法,并运用该方法进行了模拟实验。详细分析了行间转移面阵 CCD 的 TDI 模式消除空间相机运动模糊的原理及方法,介绍了运动目标实现自动对焦的方法及其实现过程。实验证明本文方法能

够有效地消去由空间相机高速运动产生的运动模糊并提高图像的信噪比,同时还能在较短时间内完成自动对焦。本方法可应用于现有的卫星系统、航拍系统上,尤其如敏捷卫星这种对于实时性要求比较高的卫星系统。

参 考 文 献

- 1 Wang Xin, Wang Haixia, Xu Shuyan. Study and realization of automatic focusing algorithm for remote-sensing camera based on power spectrum[J]. *Chinese J. Electron. Devices*, 2007, **30**(3): 980~983
王 昕,王海霞,徐抒岩. 基于功率谱的遥感相机自动调焦算法研究与实现[J]. *电子器件*, 2007, **30**(3): 980~983
- 2 B. N. Norman, H. B. Brian. Objective image quality measure derived from digital image power spectra [J]. *Opt. Engng.*, 1992, **31**(4): 813~825
- 3 Huang Yan, Xu Qiaoyu, Ye Dong. Auto-focus method based on autocorrelation of derivative image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3435~3439
黄 艳,徐巧玉,叶 东. 基于微分图像自相关的自动对焦法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3435~3439
- 4 Xixi Meng, Huajun Feng, Zhihai Xu *et al.*. A method of autofocus for remote sensing camera [C]. *SPIE*, 2010, **7813**: 78130L
- 5 Wang Dong, Pan Weijun, Li Tao. Design of image motion compensation in electronics for frame transfer array CCD [J]. *Spacecraft Recover & Remote Sensing*, 2009, **30**(3): 42~49
王 栋,潘卫军,李 涛. 帧转移 CCD 电子像移补偿设计[J]. *航天返回与遥感*, 2009, **30**(3): 42~49
- 6 Gaylord Olson. Image motion compensation with frame transfer CCDs [C]. *SPIE*, 2002, **4567**: 153~160
- 7 Liu Guanglin, Yang Shihong, Wu Qinzhang. An image motion compensation method based on multiphase CCD [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(7): 947~951
刘光林,杨世洪,吴钦章. 一种基于 CCD 多电极结构的电子像移补偿方法[J]. *光电子激光*, 2008, **19**(7): 947~951
- 8 Zhou Huaide, Liu Haiying, Xu Dong *et al.*. Study of TDI pattern for interline transfer progressive scan CCD [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2008, **16**(9): 1629~1634
周怀得,刘海英,徐 东等. 行间转移面阵 CCD 的 TDI 工作方式研究[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1629~1634
- 9 Wu Sifu, Fu Yuzhuo, Deng Hongmei. Real time imaging matching system based on phase only correlation [J]. *Computer Simulation*, 2005, **22**(11): 84~86
吴四夫,付宇卓,邓红梅. 基于相位相关算法的实时图像匹配系统[J]. *计算机仿真*, 2005, **22**(11): 84~86
- 10 C. Kuglin, D. Hines. The phase correlation image alignment method [C]. New York: IEEE Conference on Cybernetics and Society, 1975. 163~165
- 11 Gan Yali, Tu Dan, Li Guohui. Cross-correlation image registration approach based on gradient preprocessing in frequency domain [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, **43**(6): 24~26
- 12 Lei Ming, Zhang Guangjun. Image orientation algorithm with subpixel accuracy based on correlative matching method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(5): 108~113
雷 鸣,张广军. 基于互相关的图像匹配亚像素定位[J]. *光电工程*, 2008, **35**(5): 108~113
- 13 Li Qi, Feng Huajun, Xu Zhihai. Image pre-processing techniques for auto focusing [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(9): 66~68
李 奇,冯华君,徐之海. 面向自动对焦的图像预处理技术[J]. *光电工程*, 2004, **31**(9): 66~68
- 14 Li Qi, Feng Huajun, Xu Zhihai *et al.*. Digital image sharpness evaluation function [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6): 736~738
李 奇,冯华君,徐之海等. 数字图象清晰度评价函数研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(6): 736~738

栏目编辑:何卓铭