

文章编号 1004-924X(2011)10-2526-07

# 天文观测 CCD 相机中 Smear 效应的消除

孙瑾秋<sup>1\*</sup>, 周 军<sup>1</sup>, 朱 宇<sup>2</sup>, 张 臻<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 精确制导与控制研究所, 陕西 西安 710072;

2. 西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710129)

**摘要:** 为了有效消除帧转移型相机的 Smear 效应, 针对其成像机理及特性, 提出了一种基于背景估计的适用于序列图像中 Smear 效应的消除方法。该方法通过对含有 Smear 效应的原始图像灰度分布进行统计分析, 自适应判定 Smear 效应的发生位置; 然后, 采用截尾均值滤波(ATMF)技术高精度估计 Smear 效应的强度; 最后, 通过差分的方式消除 Smear 效应。实验结果表明, 该方法在有效保留弱小目标和背景信息的基础上, 可较好地消除图像中的单个或多个 Smear 效应, 提高了图像的视觉质量, 基本满足天文观测相机的观测要求。

**关键词:** 天文观测 CCD 相机; 帧转移; Smear 效应; 截尾均值滤波

**中图分类号:** V447.3; TN386.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111910.2526

## Smear removal of CCD camera in astronomic observation

SUN Jin-qiu<sup>1</sup>, ZHOU Jun<sup>1</sup>, ZHU Yu<sup>2</sup>, ZHANG Zhen<sup>2</sup>

(1. *Institute of Precision Guidance and Control,*

*Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;*

2. *College of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: sunjinqiu@nwpu.edu.cn*

**Abstract:** On the basis of the mechanism of Smear effect and the image characteristics of a frame transfer CCD camera, a Smear removal algorithm which is based on the high precision background estimation is proposed. It can be applied to not only a single picture, but also sequences for imaging systems. This method firstly uses a statistic method to analyze the gray distribution of an original image to get the specific location of Smear effect automatically, then it takes Alpha-trimmed Mean Filter (ATMF) to estimate the intensity of the Smear effect exactly. Finally the difference way is used to eliminate the Smear effect. Experimental results show that this method can effectively eliminate the single or multi-Smear effects, and can ultimately improve the image quality. The proposed method meets the requirements of astronomic observing cameras for Smear removal.

**Key words:** astronomical observation; CCD camera; frame transfer; Smear effect; Alpha-trimmed Mean Filter(ATMF)

收稿日期: 2011-01-11; 修订日期: 2011-02-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60872145); 高等学校科技创新工程重大项目培育资金资助项目(No. 708085)

## 1 引言

Smear 效应是具有电荷转移功能的 CCD 图像传感器特有的噪声,是由拍摄高亮度对象时在 CCD 非积分时间内产生的漏光电荷与 CCD 传输的信号电荷混在一起造成的。在天文观测中,拍摄太阳、月亮、高亮恒星等强光源时,CCD 传感器拍摄的图像中都有可能存在 Smear 效应,其在高亮度的拍摄对象上下方形成一条贯穿整个像面的白色条纹,严重影响了图像的视觉效果,并对空间监测系统的监测性能产生影响,因此,必须采取有效的措施消除 Smear 效应。

通常消除 Smear 效应可以通过在 CCD 芯片成像区添加机械快门<sup>[1-2]</sup>并由控制系统在曝光结束后立刻关闭机械快门抑制曝光来实现;也可采用自动光圈<sup>[3-5]</sup>减小 CCD 芯片靶面上的光强,增加曝光时间来减弱;还可以通过暗像元区域(Optical Black Region, OBR)记录的信息<sup>[6]</sup>,采用图像处理的方式来消除。前两种方式仅能对单帧静态图像进行处理,并且易受到客观条件的限制;基于 OBR 的方式虽然可解决序列图像的 Smear 消除问题,却需要输出的原始图像中含有 OBR 区域的信息,在实际应用中具有一定的局限性。可以看出,现有的算法大多从硬件设备或基于 CCD 相机辅助信息的角度来考虑和去除 Smear 效应,这类方法往往容易受到客观条件的限制。文献[7]提出一种通过图像插值方式消除 Smear 现象的方法,但由于插值方法主要通过邻域灰度信息进行修正,会使得漏光所处条带中的恒星星体变宽,并导致弱目标消失或增加一些虚假信息。因此,本文在避免采用相机辅助信息,并不改变星体形状及弱目标的情况下,提出从图像处理的角度去除 Smear 效应的方法,以使其具有更强的适用性。

本文提出的方法首先在分析 Smear 效应产生机理和图像特性的基础上,通过对含有 Smear 效应的原始图像的列像元进行灰度分布建模,自适应地判定 Smear 效应的发生位置;然后基于截尾均值滤波(Ahpha-trimming Mean Filter, ATMF)技术进行图像背景和含有 Smear 效应图像的信号估计,以获得 Smear 效应的强度信息;最终通过差分的方式消除 Smear 效应,提高 CCD 图像的质量。

## 2 Smear 现象的产生机理

Smear 效应是 CCD 进行光电转移时,由于强光源照射后产生漏光所形成的拖尾现象,它是 CCD 器件的固有特性。

图 1 以一个  $8 \times 8$  的 CCD 连续成像过程详细图解 Smear 效应产生的原理<sup>[8-9]</sup>。在成像过程中,用  $I$  表示感光区域中的像元,  $S$  表示存储区域的像元。如感光区中所示,当强光源照射在 CCD 的某个像元上,电荷积累过程完成后,电荷从感光区向存储区转移,此时,由于感光区仍然暴露在光源中继续感光,而电荷转移时间很短,所以大部分像元由于漏光引起的误差可以忽略不计,但受到强光源照射的像元在电荷转移期间仍然会积累较多电荷,在第一次电荷转移的过程中,受到强光源照射的像元会使其漏光电荷附加到在其之上的像元上,而在下一次的电荷转移过程中,造成整列像元附加上漏光电荷,即产生贯穿整幅图像像面的条纹。

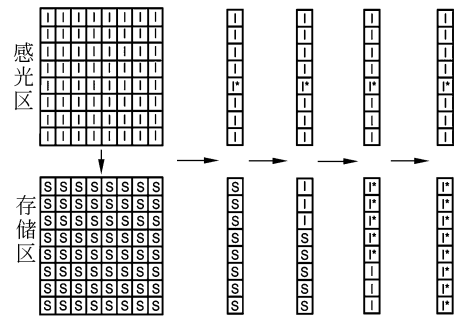


图 1 CCD 图像传感器产生 Smear 效应示意图

Fig. 1 Sketch map for Smear phenomena occurred in CCD imaging sensor

## 3 静止目标 Smear 效应消除原理分析

对于大视场、高帧频的观测相机系统而言,获取的相邻帧图像中,若观测系统和搭载平台静止,则恒星位置基本固定,且恒星在曝光时间周期以及帧转移时间内,光强基本恒定。因此,在 CCD 曝光时间  $t_0$  内,像素点  $(i, j)$  内积累的光子数  $b(i, j)$ ,如公式(1)所示<sup>[10]</sup>:

$$b(i, j) = k \times t_0 \times r(i, j), \quad (1)$$

其中,  $k$  为比例常数,  $r(i, j)$  为辐射强度。

假设光电荷转移一行的时间为  $t_1$ , 则在行转移期间, 因为漏光所产生的 Smear 效应的光子数  $s(i, j)$  为:

$$s(i, j) = k \times \delta \times t_1 \times r(i, j), \quad (2)$$

其中,  $\delta$  表示单位时间内由于电荷转移产生的 Smear 效应的光子数与曝光时间内积累的光子数的比值,  $\delta < 1$ 。

因此, Smear 效应所在列的总电荷  $I_i(j)$  可如式(3)所示:

$$I_i(j) = \sum_{j=1}^n [b(i, j) + s(i, j)] = \sum_{j=1}^n k \times t_0 \times r(i, j) + \sum_{j=1}^n k \times \delta \times t_1 \times r(i, j). \quad (3)$$

若记  $\lambda$  为 CCD 的光电转换因子, 则有:

$$M(i, j) = \lambda I_i(j), \quad (4)$$

其中,  $M(i, j)$  表示像素  $(i, j)$  的信号强度。将公式(4)代入公式(3)中, 可得:

$$M_i(j) = \sum_{i=1}^n M(i, j) = \lambda \sum_{i=1}^n [b(i, j) + s(i, j)] = \tilde{M}_i(j) + \hat{M}_i(j), \quad (5)$$

其中,  $\tilde{M}$  为无漏光影响的信号强度,  $\hat{M}$  为 Smear 效应信号强度。由式(5)可知, 将同一列所有像元求和, 根据计算出的背景信号强度  $\tilde{M}$ , 即可估计出 Smear 效应的信号强度  $\hat{M}$ 。但由于受杂散光、设备自身噪声等因素影响, 如何有效地估计背景信号的强度成为研究难点。

### 4 静止目标 Smear 效应的修正方法

通过上面的分析可知, 精确地估计出背景信号强度, 即可得到 Smear 效应的漏光强度。因此, 本文将 Smear 效应的消除划分为 3 个步骤, 如图 2 所示。(1) 自适应判定 Smear 效应的发生位置; (2) 估计 Smear 效应的漏光强度, 为消除

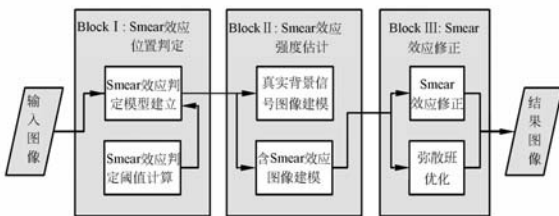


图 2 静止目标 Smear 效应消除流程图  
Fig. 2 Flow chart of Smear removal for still target image

Smear 效应提供依据; (3) 根据漏光强度消除 Smear 效应, 并对发生溢出的星体进行弥散斑优化, 提高图像的可视质量。具体分析如下。

#### 4.1 Smear 产生的位置确定

根据 Smear 效应的特性可知, 它是一条贯穿全图的亮条纹, 因此, 对图像沿 Smear 贯穿方向进行灰度累加求和时, 恒星和背景形成的灰度累加曲线较为平稳, 而 Smear 效应区域在灰度累加曲线中将出现明显的峰值。但若在贯穿方向分布多颗恒星, 则可能在累加曲线中形成小的峰值, 如图 3 所示, 这将对 Smear 效应的位置判定产生影响, 致使判定阈值  $T_h$  成为关键。因此, 本小节将通过建立判定模型计算自适应阈值, 从而精确确定 Smear 效应发生位置。

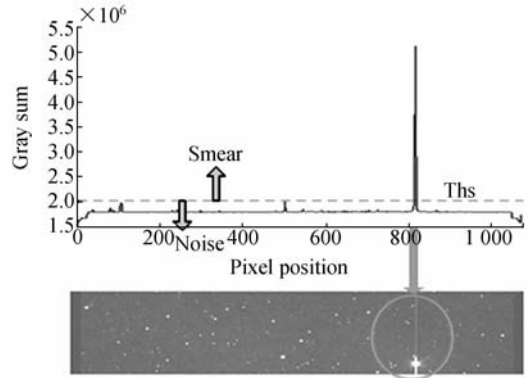


图 3 Smear 效应灰度和分布特性示意图  
Fig. 3 Sketch map for the sum of Smearing column gray distribution

首先, 建立 Smear 效应的判定曲线模型, 如式(6)所示。其次, 计算全局图像的均值和方差, 按公式(7)自适应计算其判定阈值。通过与计算出的阈值  $T_h$  比较即可得到 Smear 效应的发生位置。

$$Col_{sum}(j) = \sum_{i=1}^r f_{i,j}(x, y) \quad i \in [1, r]; j \in [1, c], \quad (6)$$

其中, 图像大小为  $r \times c$ ,  $Col_{sum}(j)$  表示第  $j$  列的灰度和,  $f_{i,j}(x, y)$  表示  $(i, j)$  处的灰度值。

$$T_h = V_{mean} + \alpha \times V_{diff}, \quad (7)$$

其中,  $V_{mean}$  表示输入信号的均值,  $V_{diff}$  表示输入信号的标准差,  $n$  表示输入信号的窗口大小,  $\alpha$  为给定的一个权值,  $T_h$  即为判定阈值。

#### 4.2 Smear 效应估计

在对 Smear 效应位置进行精准定位后, Smear 消除技术的核心即为漏光强度的精确估

计。本节将采用 ATMF 滤波技术进行 Smear 效应漏光强度的精确估计。

含有 Smear 效应的观测图像由背景噪声、恒星和 Smear 效应 3 部分组成,首先对全局图像的有效像元按照灰度值大小进行排序,然后采用 ATMF 技术进行背景噪声强度的估计,如式(8)所示,这样可有效地避免暗像元、CCD 坏点、Smear 效应等引入的背景估计误差。

$$I_{imgmean} = \frac{1}{d} \sum_{k=p-d/2}^{p+d/2} I_s(k), \quad (8)$$

其中,  $p$  表示图像数据中间位置对应的坐标值,  $d$  表示估计背景图像所选取的局部半径大小,  $I_s$  表示经过排序的原始图像数据,  $I_{imgmean}$  为建模得到的全局背景图像。

同样,采用同样的思路进行含 Smear 效应的区域强度估计,得到含有 Smear 效应的背景图像  $I_{imgSmear}$ 。

通过成像机理的分析可知,可直接通过差分方式得到 Smear 效应的强度  $I_{Smear}$ 。

### 4.3 Smear 效应修正

在得到 Smear 效应强度后,去除漏光的影响只需将 Smear 效应的漏光强度消除即可,如公式(9)所示。

$$I_{new} = I_{img} - I_{Smear}, \quad (9)$$

其中,  $I_{new}$  为消除 Smear 效应后的图像。

由于光源强度过大,可能导致弥散斑的溢出现象,致使弥散斑灰度分布不对称。为进一步提高图像的可视质量,采用了图像插值方式。在充分利用溢出像元邻域灰度信息的基础上,对溢出部分进行优化,使得强光源的点状光斑灰度分布近似为高斯分布,如式(10)所示。

$$I_{cor,new}(i,j) = \frac{\omega_l \cdot I_{new}(i,j') + \omega_r \cdot I_{new}(i,j'')}{\omega_l + \omega_r}, \quad (10)$$

$$\omega_l = j'' - j, \quad (11)$$

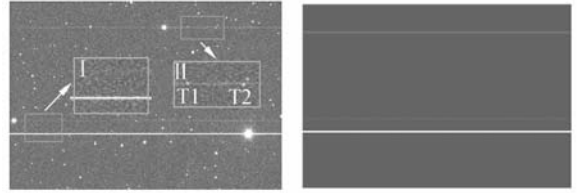
$$\omega_r = j' - j, \quad (12)$$

其中,  $j'$  和  $j''$  表示未产生溢出的左、右侧的最近的列坐标位置,  $\omega_l$  和  $\omega_r$  表示对应的权值,  $I_{cor,new}$  为弥散斑优化后的最终重建结果图像。

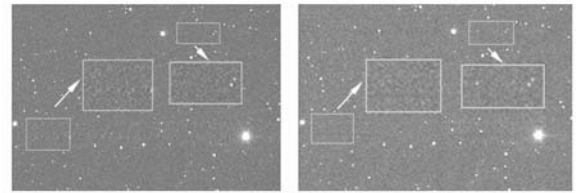
## 5 实验结果及分析

为了验证方法的有效性,对真实试验拍摄的

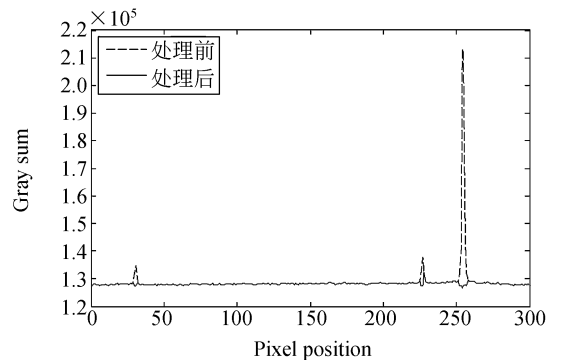
15 组共计 351 幅含有 Smear 效应的数据进行处理。原始数据大小为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ , 灰度等级为 8 bit 的序列图像数据,软件运行环境为 Windows xp sp2,平台为 Matlab R2009a,硬件配



(a) 含有多个 Smear 效应的图像(左)和 Smear 强度(右)  
(a) Multi-Smear original image(left) and Smear intensity(right)



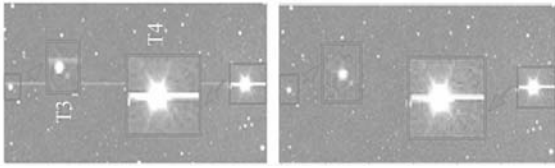
(b) 插值方法(左)和本文(右)消除 Smear 结果图  
(b) Smear removal result by using interpolation method(left) and our method(right)



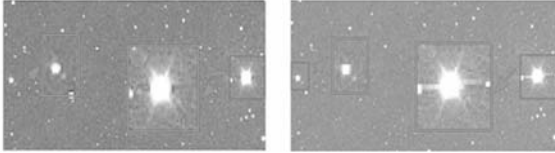
(c) 消除前后列灰度累加对比  
(c) Distribution contrast Smear before and after

图 4 消除含有多个 Smear 效应前后的结果  
Fig. 4 Images before and after Smear removal

置为 Intel 双核 2.4G CPU,1 G 内存。如图 4,5 所示,本文可在较好保留弱小目标和背景信息的基础上,有效消除 Smear 效应,提高图像的视觉质量。这里以定量的方式进一步对图像质量的提高进行分析验证,评价涉及的具体计算指标如下:



(a)原始图像 (b)用本文方法消除 Smear 图  
(a) Original image (b) Smear removal image by proposed method



(c)本文最终结果图 (d)插值结果图  
(c) Final result of saturated removal image (d) Interpolation result image

图 5 消除含有溢出的 Smear 效应的前后结果

Fig. 5 Smear removal results with saturation phenomena

### 5.1 灰度方差

灰度方差反应了背景灰度起伏强度变化情况,灰度方差值越小表明灰度的起伏变化越小,在存在漏光的区域,则表示消除 Smear 效应越完全。具体计算公式如式(13),(14),其中  $I_i$  表示图像的灰度值, $\bar{I}$  表示计算的灰度均值, $\sigma$  即为计算的灰度方差。

$$\bar{I} = \sum_{i=1}^n I_i, \quad (13)$$

$$\sigma = \sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2. \quad (14)$$

### 5.2 KL 距离

KL(Kullback-Leibler)距离表示两个概率分布的相似程度, $KL(p \parallel q) \geq 0$ ,KL 值越小,表示两个分布越接近。在具体消除 Smear 时,KL 值越小,表明 Smear 消除越完全,消除的区域越接近真实背景情况。具体计算公式如式(15),其中  $q(x)$  表示理想背景灰度概率密度分布函数, $p(x)$  表示 Smear 消除处理后的背景灰度概率密度分布函数。

$$KL(p \parallel q) = - \int p(x) \ln \left\{ \frac{q(x)}{p(x)} \right\} dx. \quad (15)$$

### 5.3 目标信噪比

消除 Smear 的关键是能否在保留图像原有信息及弱小目标的基础上,有效地消除漏光的影

响。目标信噪比表示了目标相对于背景的强弱程度,SNR 越大,表明目标越明显。这里采用计算目标信噪比(SNR)的方式来衡量本文方法对经过漏光区域的弱小目标的保留情况。具体计算公式如式(16),其中  $T$  表示目标区域的灰度均值, $B$  表示背景区域的灰度均值, $\sigma_B$  表示背景区域的灰度标准差。

$$SNR = \frac{|T - B|}{\sigma_B}. \quad (16)$$

### 5.4 形状圆度

形状圆度表示目标与圆形的近似程度,其值越接近于 1,表明该目标的形状越接近圆形。恒星的理想成像模型为高斯分布的圆形,但当出现溢出情况时,高亮恒星的形状将发生变化,因此,为进一步提高视觉质量,消除 Smear 处理后的恒星形状越接近圆形,则视觉质量越好。形状圆度的具体计算公式如式(17),其中  $A$  表示目标的面积, $C$  表示目标的周长。

$$\epsilon = \frac{4\pi A}{C^2}, \quad (17)$$

如表 1 中的评价结果所示,插值方式和本文基于统计估计的方法都可以消除 Smear 效应,而本文的方法在去除 Smear 效应的同时,不会导致漏光区域附近的恒星星体变宽和穿过漏光区域中的弱目标消失。因此,本文方法可在保留弱小目标及背景信息的基础上,有效地消除 Smear 效应。

表 1 消除 Smear 效应量化评价结果

Tab. 1 Evaluated results of Smear removal

评价方法 消除方法	区域 I		区域 II		$T_3$	$T_4$
	灰度 方差	KL 距离	SNR $T_1$	SNR $T_2$	$\epsilon$ $T_3$	$\epsilon$ $T_4$
未处理	8.55	0.75	5.65	15.18	1.11	0.32
插值方法	3.69	0.17	0	16.01	1.39	0.93
本文方法	3.94	0.15	6.15	16.65	0.96	1.17

## 6 结 论

本文提出了一种适合于消除序列图像中 Smear 效应的方法。该方法首先对含有 Smear 效应的原始图像灰度分布进行统计分析,自适应判定 Smear 效应的精确发生位置;然后采用 ATMF

滤波技术高精度地估计出 Smear 效应的漏光强度;最终通过差分的方式消除 CCD 相机获取的观测图像中的 Smear 效应。通过对大量真实数据进行定性和定量的分析验证,结果显示,该方法可

在有效保留弱小目标和背景原始信息的基础上,较好地消除图像中存在的单个、多个 Smear 效应,提高了图像的视觉质量,可满足天文观测相机的观测要求。

## 参考文献:

- [1] KAO W CH, HONG CH M, LIN SH Y. Automatic sensor and mechanical shutter calibration for digital still cameras[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2005, 51(4): 1060-1066.
- [2] 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2164-2171.  
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2164-2171. (in Chinese)
- [3] 李同海, 张德联, 赵新亮. 行间转移型 CCD 相机的 Smear 现象研究[J]. *科学技术与工程*, 2008, 8(14): 3924-3927.  
LI T H, ZHANG D L, ZHAO X L. Research of the Interline-Transfer-CCD Camera's Smear Phenomenon [J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, 8(14): 3924-3927. (in Chinese)
- [4] 韩采芹, 柳忠彬. 科学级帧转移型 CCD 相机拖影问题的处理[J]. *科学技术与工程*, 2009, 9(15): 4336-4339.  
HAN C Q, LIU ZH B. Disposal of Smearing in Scientific Grade Frame-transfer Type CCD Camera[J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(15): 4336-4339. (in Chinese)
- [5] 王海涌, 申功勋. 基于电子快门实现 CCD 曝光量无级调节技术[J]. *光电工程*, 2006, 33(8): 136-139.
- WANG H Y, SHEN G X. Technology of stepless adjustment to CCD exposure based on electronic shutter[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(8): 136-139. (in Chinese)
- [6] TOSHIHICO Y, KAZUYUKI K. Digital camera comprising smear removal function, U. S. Patent 123828, Nov. 2006.
- [7] YOUNG S H, EUNCHEOL C, MOON G K. Smear Removal Algorithm Using the Optical Black Region for CCD Imaging Sensors[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(4): 2287-2293.
- [8] 米本和也著, 陈蓉庭等译. CCD/CMOS 图像传感器的基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
CHEN RONGTING etc. TRANSLATION. *The basis of CCD/CMOS Image Sensors and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [9] 高建伟, 姚睿, 张艳宁. 一种帧转移型 CCD 传感器 Smear 效应消除方法[J]. *中国体视学与图像分析*, 2010, 15(4): 436-439.  
GAO J W, YAO R, ZHANG Y N. Smear removal algorithm for frame transfer CCD sensors[J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2010, 15(4): 436-439. (in Chinese)
- [10] DAVID D. Image smear noise in CCDs[J]. *SPIE, Spaceborne Sensors III*, 2006, 6220: 622002-1 - 622002-38.

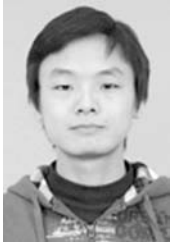
## 作者简介:



孙瑾秋(1980—),女,陕西西安人,博士,讲师,2009年于西北工业大学获得博士学位,主要从事空间目标图像处理方面的研究。E-mail: sunjinqui@nwpu.edu.cn



周军(1966—),男,江苏常州人,教授,博士生导师,1993年于西北工业大学获得博士学位,1995年在中国空间技术研究院502所第一站博士后出站,1997年在西北工业大学航天学院第二站博士后出站,主要从事航天器控制与仿真技术、先进控制理论及应用领域的研究。E-mail:zhoujun@nwpu.edu.cn



朱 宇(1986—),男,山东菏泽人,博士研究生,2008年于西北工业大学获得学士学位,主要从事序列图像超分辨重建和空间图像复原重建的研究。E-mail: zhu\_yu000@163.com



张 臻(1987—),四川达州人,博士研究生,2010年于西北工业大学获得学士学位,主要研究领域为空间图像处理,模式识别。zhangzhen@mail.nwpu.edu.cn

● 下期预告

## 高速大扫描范围原子力显微镜系统设计

殷伯华,陈代谢,林云生,初明璋,韩 立

(中国科学院 电工研究所微纳加工研究部,北京 100190)

针对目前高速扫描型原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)主要是为生物检测而设计的局限性,为了同时获得高的扫描速度和大的扫描范围,提出了一种新颖的高速原子力显微镜结构设计方案。根据 AFM 大范围扫描的需求特点,选择在压电陶瓷致动器驱动的柔性铰链结构的位移台基础上,构建了 AFM 大范围扫描器。使原子力显微镜在  $x$ - $y$  扫描方向的运动范围达到了  $100\ \mu\text{m}$ 。通过傅立叶频谱分析方法,计算获得了 AFM 扫描器常用的三角波驱动信号和正弦波驱动信号的高次谐波特性及其对 AFM 高速扫描成像的影响程度。为了消除在扫描运动过程中的机械自激震荡,提出了正弦波信号作为高速扫描的驱动信号,行扫速度达到  $50\ \text{line/s}$ 。在正弦波驱动的基础上提出了一种基于位置采样的图像获取方法,有效地减小了 AFM 扫描器的非线性误差造成的图像畸变现象。