

文章编号: 0253-2239(2010)02-0382-06

基于光照和帧间预测的空间图像曝光控制算法

焦继超 赵保军 唐林波 孙家敬

(北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081)

摘要 为了解决空间图像中因曝光控制不理想产生的曝光过度和拖尾问题,提出了一种基于光照变化和灵活块划分的空间图像曝光控制算法。该方法考虑大气吸收对光照辐射衰减的影响,得出了光照强度与 CCD 相机曝光时间的关系,推导出相应的空间图像成像模型;对前一幅图像进行分块,分别比较当前块和周围相邻块的灰度均值,判断两者是否进行合并,如果灰度均值差大于阈值,则两块不合并,否则合并。根据块合并后的划分程度预测当前图像的曝光时间。实验结果表明,经过对曝光时间的准确控制,拍摄的天文图像的信噪比(SNR)最高能够提高 2.49 dB。有效地解决了空间图像中曝光过度和拖尾问题,并实现了曝光时间的自适应调节。

关键词 图像处理;曝光控制;光照辐射模型;帧间预测;大气衰减;空间图像拖尾

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0382

Exposure Algorithm for Space Image Based on Light and Inter Prediction

Jiao Jichao Zhao Baojun Tang Linbo Sun Jiajing

(School of Information and Electronic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract To solve the problems of overexposure and tailing which were produced by non-ideal exposure control in the space image, an exposure control algorithm based on illumination change and flexible block segmentation was proposed. First, considering the influence of light radiation attenuation bringing by atmospheric absorption, the relationship between light intensity and exposure time of CCD was derived, and the imaging model of the space image was obtained; Secondly, in order to estimate the exposure condition of the last image, the last image was flexibly segmented, and the gray averages of two adjacent blocks were compared for judging whether the two blocks were combined. If the difference of the gray average is bigger than the threshold, the two blocks are combined, others else they are not. The exposure time can be estimated by the two methods. Experimental results indicate that the SNR of the space images increased with 2.49 dB. This algorithm can effectively inhibit the space image producing tailings and greatly reduce the phenomenon of overexposure.

Key words image processing; exposure control; light radiation model; inter prediction; atmospheric attenuation; tailing in space image

1 引言

目前,地基探测技术是探测跟踪太空碎片的主要方法,它可以实现对绝大部分太空碎片的精确定位和跟踪^[1~3]。与空间目标雷达测量系统比较,光电探测系统具有以下优点:测量精度高、直观性强和

不受地面杂波干扰影响。自 20 世纪 60 年代问世以来,一直是世界各国重点发展的航天测控系统之一。但是由于地基探测系统一般采用高灵敏度的光学 CCD 成像器件,对光子的收集能力特别强,因此工作在光照强度较弱环境下的地基探测系统的 CCD

收稿日期: 2009-03-27; 收到修改稿日期: 2009-04-20

基金项目: 国家 863 计划(2007AA1132)资助课题。

作者简介: 焦继超(1983—),男,博士研究生,主要从事空间目标探测、识别和跟踪方面的研究。

E-mail: jiaojichao@gmail.com

导师简介: 赵保军(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事目标探测、跟踪和图像压缩等方面的研究。

E-mail: zbj@bit.edu.cn

成像器件,对由空间中的星体发出的光线变化非常敏感,容易发生曝光控制不理想的情况,影响了对太空碎片特别是小型太空碎片的探测跟踪。另一方面,为了拍摄到遥远距离的碎片需要一定的曝光时间,造成较亮星体下方有严重的拖尾。为了解决曝光不理想的问题,可以利用曝光时间和光照强度的关系实现对 CCD 曝光时间的控制^[4],使电视测角仪具有非常好的抗背景干扰能力,但是没有考虑大气对光照辐射的影响,而且抗干扰的能力较弱。基于图像的曝光算法^[5,6]和对比度最大化的曝光算法^[7],都是通过图像亮度和曝光时间的固定关系来获取图像的曝光时间,这种方法实现起来比较简单,但是这些算法的自适应性比较差。而自动曝光算法,例如基于直方图^[8,9]的方法通过寻找图像直方图中最大的两个峰值区域,并依据峰值区域的大小确定它们中像素亮度的加权值,从而计算图像的加权亮度均值,但是对于对比度较大的图像效果不好。分阶段曝光的方法是一次拍下曝光度不同的照片,再选取一张曝光度最好的照片,因此实时性差^[10]。固定分区的方法^[11,12]是把图像分成固定大小的区域,此种方法灵活性较差。另一种适用于大动态范围场景的自动曝光控制算法^[13],是将图像窗口平均分割成 $M \times N$ 个矩形块,实现了对图像曝光时间较为准确的控制,但是不能实现曝光时间随光照环境进行自适应调节的功能。

针对目前曝光控制算法不能有效解决空间图像中曝光过度 and 拖尾的问题,提出了一种新的空间图像自动曝光控制算法。首先根据 CCD 的成像原理,考虑大气对天体辐射的吸收衰减作用,引入了曝光时间调节因子,推导出了曝光时间与光照变化的关系模型;其次通过判断上一幅图像的灰度分布情况,判断其曝光时间是否合理,从而决定是否对当前图像的曝光时间进行调整。通过充分考虑影响空间图像曝光时间的因素,综合上述两种方式得到较为精确的图像曝光时间。

2 光照变化与曝光时间的关系模型

2.1 CCD 成像原理

CCD 是一种固体摄像器件,其工作原理是基于内光电效应在光敏面阵上产生信号电荷,然后进行适当时间的存储,通过时序控制电极电位形成势阱变化完成信号电荷的转移和自扫描,或者通过二维移位寄存器读出信号电荷,并在输出端输出视频电信号^[14,15]。由上可知 CCD 相机属于积分型器件,

输出电信号与光敏面阵上的光照度有关,同时还与照射时间即积分时间 t 有关,对于光敏面积为 A 的 CCD 相机来说,其输出电信号的电流值为

$$I = KE_0 t = KQ, \quad (1)$$

式中 K 为加权因子, E_0 为光敏面的照度, Q 为曝光量。

在一般情况下,可以通过调节光敏面照度来控制 CCD 相机的曝光量,而光敏面照度与进入光学镜头的光照强度有关。在不考虑光照变化的前提下,对于焦距为 f , 直径为 D 的 CCD 相机来说,空间中的星体在其轴上成像后的照度为

$$E_0 = \frac{K\pi L}{4(D/f)^2}, \quad (2)$$

式中 K 为加权因子, L 为成像轴上像点的亮度。

2.2 光照辐射衰减条件下的空间图像成像模型

由(1)式可知,在外界光照不发生变化并且 CCD 输出的电流信号一定的情况下,图像的曝光时间 t_0 是一定的,但是在空间中的星体发出的光线受到地球大气层的影响,时刻发生着变化,在这种情况下,得到的曝光时间为

$$t = t_0(1/\tau_i^b), \quad (3)$$

式中 t_0 是不考虑光照变化时的曝光时间, τ_i^b 为大气透射率,表示地球大气对空间进入地球的光线的吸收程度。

对于空间图像来说,宇宙中星体辐射的能量在到达地球前,因为地球大气的吸收和散射的作用而造成辐射强度减弱,这种现象称为大气衰减。空气分子散射量反比于辐射波长的 4 次方;尘埃、水滴等的散射量大致与波长的 1.3 次方成反比。由上可知,大气消光与大气的成分、辐射的波长以及辐射穿过大气的厚度有关^[16]。光波在大气传输过程中按照指数规律进行衰减,其衰减方程为^[17]

$$\eta = \eta_0 \tau_i^b, \quad (4)$$

式中 η_0 为未衰减前的天体光照强度, η 为衰减后的光照强度,大气透射率 τ_i^b 由分子吸收透射率 τ_a 和分子散射及气溶胶散射透射率 τ_s 组成

$$\tau_i^b = \tau_a \tau_s, \quad (5)$$

式中分子吸收透射率为^[18]

$$\tau_a = f(k\omega^*), \quad (6)$$

式中 k 是与波数相关的吸收系数, ω^* 是气体分子的有效吸收量。

分子散射和气溶胶散射透射率为^[15]

$$\tau_s = \exp(-r\Delta L), \quad (7)$$

式中 ΔL 是光线经过的大气路径(km), r 是气溶胶

消光系数。

由上面的公式可以推导出在保持原有曝光时间不变的情况下,空间星体在 CCD 相机成像后的照度为

$$E = \tau^{\downarrow} E_0 = \frac{\tau^{\downarrow} K \pi L}{4(D/F)^2}. \quad (8)$$

由(8)式可知,由于光照强度发生变化,使得在相同时间内进入 CCD 相机的光子数目也发生了变化,从而使拍摄得到的图像中的星体亮度发生了变化,因此为了保持拍摄得到的空间星体的亮度不发生变化,就需要改变 CCD 相机的曝光时间,通过上面的分析可知,在考虑光照变化的条件下,对于焦距为 f ,直径为 D ,光敏面面积为 A 的 CCD 相机来说,可进一步导出空间星体成像后其输出电信号的电流值为

$$I_s = KEt = \frac{K\tau^{\downarrow} \pi L}{4(D/f)^2} t, \quad (9)$$

式中 t 为考虑光照变化条件下相机的曝光时间。

由(9)式可知,在保持 CCD 输出信号电流值 I_s 不变的情况下,大气透射率越低曝光时间就越长,大气透射率越高则曝光时间就越短,或者说外界光照变化越大,对图像曝光时间的影响就越大。

3 基于帧间预测的空间图像曝光时间控制

提出的算法不但考虑到外界环境即光照的变化对 CCD 相机曝光时间的影响,而且把 H. 264 中的帧间预测思想引入了空间图像曝光控制中。即从 CCD 相机拍摄的图像来预测下一幅将要拍摄图像的曝光时间,进一步精确调节空间图像的曝光时间。

3.1 空间图像曝光控制的帧间预测

基于分区的图像曝光算法能够根据不同区域的目标分布情况采用不同的曝光时间,但是这种方法只是对图像进行简单固定的分割,没有考虑图像中目标和背景的实际分布状况,有时把同一个目标分割在不同的区域内,很可能造成同一个目标有不同的曝光时间,因此而影响目标的成像质量。针对这个问题提出了一种适用于空间图像的帧间预测方法。

实验中采用大小为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 或 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 的空间图像,如果按照 H. 264 中的 $16 \text{ pixel} \times 16 \text{ pixel}$ 大小对图像进行初始分割,则一幅空间图像就至少有 64×64 个块,很难满足实际应用中的实时性要求。另一方面,划分的块也不能太

大,如果太大的话就会降低判断曝光时间的准确性,因此初始划分的块大小为 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 。对于分辨率大于 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 的空间图像,为了保持曝光时间预测准确性,初始划分的块大小应保持 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$,此时总块数大于 64×64 ,降低了算法的实时性。在这种情况下,可以通过提高系统的硬件配置保持算法的实时性。

在 H. 264 中,帧间预测中的宏块在满足一定准则的条件下可以继续划分,而本文首先把图像划分为 N 个 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 的子块,然后计算每个块与其相邻块间平均灰度值的差,如图 1 中的中间块 A 与其邻近块 1,求得的差值与阈值 T 相比较,如果大于阈值 T 说明相邻两块间的对比度较大,不应该合并;否则合并相邻两块。其它块进行相同的判断。统计合并后块的个数 N' 与 N 间的比值 β 以估计下一幅图像的曝光时间。

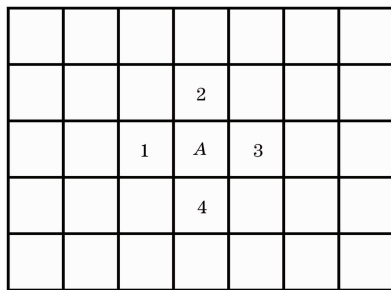


图 1 空间图像划分示意图

Fig. 1 Space image partition

空间图像中背景和目标在灰度值上区分不是很大,其空间图像直方图如图 2 所示。因此,如果 β 小于阈值 T_β , 则说明图像中各块间的对比度较大,图像曝光不足,可以通过判断参数 β 来调节下一幅图像的曝光时间;否则保持当前曝光时间不变。

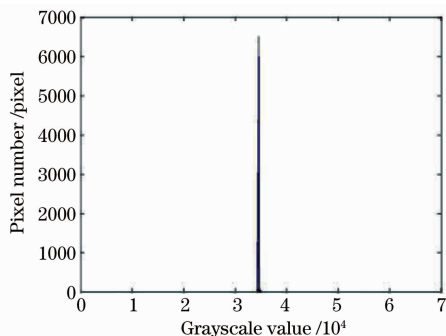


图 2 空间图像直方图

Fig. 2 Histogram of a space image

3.2 空间图像曝光算法中帧间预测的步骤

对于一组由天文 CCD 相机拍摄得到的图像 I , 通过帧间预测来下一幅图像曝光时间的具体步骤如

下:

1) 对于图像 I_1 , 划分为 N 组大小为 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 的子块, 如图 1 所示, 其中 N 为块的个数;

2) 计算每个块灰度值的均值 G_i , 其中 $i < N$;

3) 计算与相邻块平均灰度值的差, 如果有 $|G_i - G_{i-1}| < T$, 则合并两个块; 否则两个块不合并, 每个块和其周围相邻的块做同样的处理, 其中 T 为一固定常数;

4) 统计合并后的图像含有的块个数为 N' , 计算参数 β , 并且 $\beta = N'/N$;

5) 判断 β 与阈值 T_β 间的关系, 如果 $\beta > T_\beta$, 此时下一幅图像的曝光时间为 $t_f = t/\beta$; 否则, 曝光时间保持不变。其中 T_β 一般取 $0.75 \sim 0.9$ 之间, t 为在考虑光照辐射衰减条件下的曝光时间。

从上述步骤中可以发现, 曝光时间 t_f 是在根据前一帧图像的曝光程度后, 调节光照变化条件下获得的。

4 算法实现流程图

综合前面的论述, 可以得到天文图像的曝光控制算法流程图, 如图 3 所示。

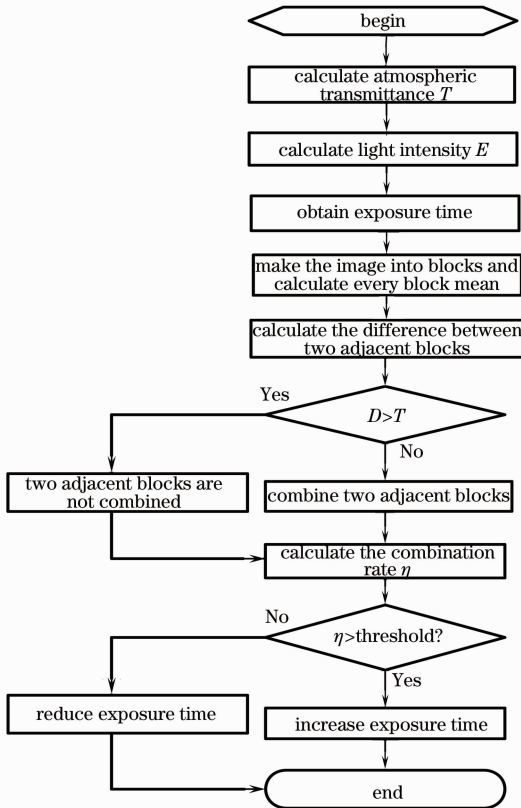


图 3 算法实现流程图

Fig. 3 Flow chart of algorithm implementation

5 实验结果及分析

基于以下平台实现: 采用某型号天文 CCD 相机采集的空间图像, 算法的具体实施采用 CPU P4 2.0, 1 G 内存的计算机, 通过 CCD 相机采集外界光照变化的数据, 通过编写的软件对本算法进行了实验验证和结果输出。

图 4 是没有采用本算法前拍摄的图, 从图 4(a) 中可以明显看出图像中较亮星体在垂直方向具有明显拖尾现象, 并且噪声比较明显, 甚至掩盖了一些目标星体, 这对后期的空间图像的目标检测造成了很大困难; 从图 4(b) 中可以看出, 图像的亮线要比图 4(a) 减弱一些, 并且噪声也没有那么严重, 但是图像左下方区域出现了严重的过度曝光现象。

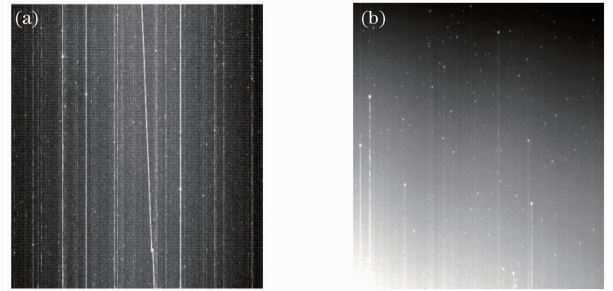


图 4 空间图像。(a) 含有拖尾; (b) 过度曝光现象

Fig. 4 Original images. (a) space images with tailing;

(b) overexposure space image

采用实地拍摄的分率为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 的空间图像作为验证本算法的数据来源。首先通过 CCD 相机获得实际条件下的光照变化数据, 作为图像曝光的光照变化的数据来源, 并带入光照变化与曝光时间的关系模型中, 获得空间图像的曝光时间和像素的灰度值; 其次为了获得更为精确的曝光时间, 采用帧间预测的方法对当前图像曝光时间进行估计。通过上述两个过程可以实现空间图像曝光时间的准确调节。

通过大量的实验发现, 在光照强度发生变化的情况下, 判断图像中分割块是否合并的阈值 T_β 取 $0.75 \sim 0.9$ 时, 能够在抑制噪声拖尾和调节曝光度方面获得最佳效果。图 5 中的 6 幅图是图 4(b) 分别在 T_β 取不同值时得到的。

当 $T_\beta = 0.7$ 时, 图像灰度分布范围比较广, 区域间的对比度明显, 噪声和拖尾比较明显; $T_\beta = 0.75$ 和 $T_\beta = 0.81$ 时, 图 5(c) 中图像灰度分布相对较小, 拖尾也相对减少很多, 噪声得到抑制, 图 5(d) 中过度曝光现象基本消失; $T_\beta = 0.87$ 和 $T_\beta = 0.9$ 时, 图像灰度值集中在一个较窄的范围内, 但是拖尾相

对增加一些,噪声和过度曝光现象也在一定程度上出现;在 $T_\beta = 0.95$ 时图像灰度值分布在特别窄的区间内,这是由于 CCD 相机长时间曝光造成的,从

图 5(f)中可以发现拖尾和噪声大量出现,过度曝光现象也比较严重。

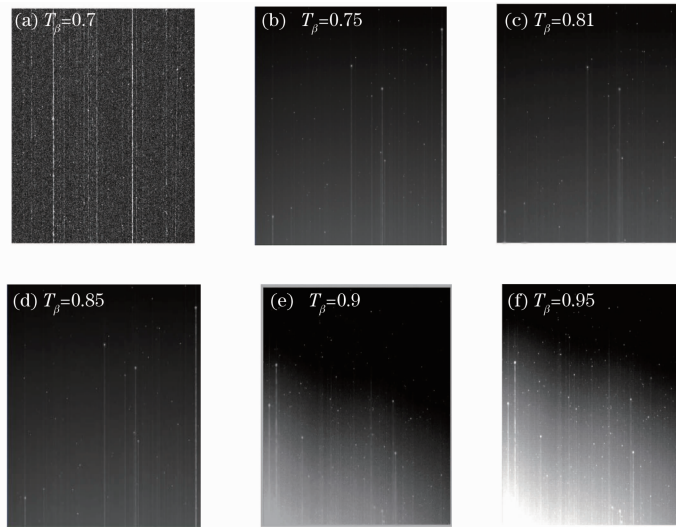


图 5 T_β 取不同值时的结果示意图

Fig. 5 Results with different T_β

通过图 5 可以看出,图像中的拖尾得到明显的抑制,原来图像中拖尾的亮度明显降低,较为暗弱的拖尾基本消失,同时过度曝光现象也几乎不存在。同时,当 T_β 取较大值时,图像中的拖尾要比 T_β 取较小值时的明显,但是拍摄到的暗弱星体也相对多一些。表 1 列出了未采用本文算法的空间图像图 4(b)和采用本算法图 5(a)~(e)的曝光时间、处理时间和相邻帧间的时间间隔,需要说明的是由于每帧图像划分的块数不同,造成不同相邻帧的时间间隔是不一样的,但是不会影响算法的实时性,整个曝光控制系统的处理速度为 4 frame/s,其中包括空间图像的采集时间。表 2 列出了图 4(b)和图 5(a)~(e)中每幅图像的 SNR 及采用本算法后空间图像 SNR 变化百分比。

表 1 空间图像的曝光时间、处理时间和相邻帧的时间间隔

Table 1 Exposure time and processing time and adjacent frames interval of the space images

Image	Exposure Time/ms	Processing Time/ms	Interval Time/ms
Fig. 4(b)	110	—	—
Fig. 5(a)	89	91	—
Fig. 5(b)	92	88	260
Fig. 5(c)	93	87	240
Fig. 5(d)	97	83	237
Fig. 5(e)	105	75	228

表 2 采用本文算法前后及采用不同 T_β 时空间图像的 SNR
Table 2 SNR of the space-image before and after using the algorithm and different T_β

Image	SNR /dB	Δ SNR /%
Fig. 4(b)	24.21	0
Fig. 5(a)	24.46	1.45
Fig. 5(b)	25.24	4.25
Fig. 5(c)	26.70	10.28
Fig. 5(d)	26.25	8.43
Fig. 5(e)	26.76	2.27

从表 2 中可以看出,在采用本算法并且 T_β 取适当值时,空间图像的 SNR 最高能够提高 10.28%,最低也能够提高 1.45%。

6 结 论

提出的曝光时间控制算法由两部分构成,首先考虑天体辐射经过大气衰减后引起光照强度变化的问题,导出了光照变化和曝光时间的关系,获得了在此条件下的空间图像成像模型;其次该算法利用 H. 264 帧间预测的思想,对前一幅图像进行块划分后比较相邻块间的平均灰度值,决定相邻块是否需要合并,根据合并后的划分情况分析前一幅图像的曝光程度,从而对当前图像的曝光时间进行估计。

采用实际拍摄的空间图像对所提出的算法进行

了实验和验证。实验结果表明,本算法对图像的曝光时间预测较为精确,处理后的 SNR 平均增加 1.262 dB,最高增加 2.49 dB。实现了曝光时间随光照变化的自适应调节,有效地解决了天文图像过度曝光和拖尾的问题。

参 考 文 献

- 1 Li Dongyuan. The foreign ground based electro-optic detecting system to the space[J]. *Electro-optic Warfare & Radar Passive Countermeasures*, 2003, **69**(1): 9~11
李东源. 国外的地基对空间目标光电探测系统浅析[J]. *光电对抗与无源干扰*, 2003, **69**(1): 9~11
- 2 Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1178~1182
张己化,姚东升,谈斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1178~1182
- 3 Dong Jihui, Hu Qiquan. Analysis of working distance of CCD gaze imaging tracking system in space[J]. *Chinese J. of Lasers*, 2008, **35**(2): 173~177
董吉辉,胡企铨. 空间 CCD 凝视成像跟踪系统的作用距离分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 173~177
- 4 S. Shimizu, T. Kondo, T. Kohashi. A new algorithm for exposure control based on fuzzy logic for video cameras[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1992, **38**(3): 617~623
- 5 P. Sterner, M. Kachelrieb. Automatic exposure control (AEC) for dual energy computed tomography (DECT) [J]. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2007, **6**(11): 4367~4372
- 6 Cao Zhaoliang, Mu Quanquan, Hu Lifa *et al.*. Design on liquid crystal adaptive optical system for 600 mm telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1147~1150
曹召良,穆全全,胡立发等. 600 mm 望远镜液晶自适应系统成像光路设计[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1147~1150
- 7 C. Y. Chen, C. Y. Tseng, C. H. Huang. Combinational AE-AF system with Fuzzy climbing search servo[C]. *SPIE*, 2006, **6069**: 107~114
- 8 J. Q. Li, H. Hau, R. Velarde *et al.*. Exposure preferences for digital still imaging: a psychophysical study [C]. *SPIE*, 2008, **6817**: 68170U-1~68170-8
- 9 Yang Haitao, Chang Yilin, Wang Jing *et al.*. A new automatic exposure algorithm for video cameras using luminance histogram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 841~847
杨海涛,常义林,王静等. 一种基于亮度直方图的自动曝光控制方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 841~847
- 10 D. Gutierrez, S. Schmidt, A. Denys. Performance evaluation of CT-Automatic exposure control devices [C]. *SPIE*, 2007, **65151**: 65151P-1~65151P-8
- 11 Zhang Chunhua, Chen Biao, Zhou Xiao. Small target trace acquisition algorithm for sequence star images with moving background[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, **16**(3): 524~530
张春华,陈标,周晓. 运动背景星空图像中小目标的运动轨迹提取算法[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(3): 524~530
- 12 M. Murakami, N. Honda. An exposure control system of video cameras based on fuzzy logic using color information [C]. *Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on. New Orleans, USA; IEEE*, 1996; 2181~2187
- 13 Liang Jiayi, Hong Ziliang. Auto-exposure algorithm for scenes with large dynamic range [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(5): 89~92
梁佳毅,洪志良. 适用于大动态范围场景的自动曝光控制算法[J]. *光电工程*, 2008, **35**(5): 89~92
- 14 Bai Yanzhu, Jin Weiqi. Photoelectric Imaging Principle and Technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006
白延柱,金伟其. *光电成像原理与技术*[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2006
- 15 He Weiji, Chen Qian, Qu Huiming *et al.*. Charge multiplication of CCD based on electrons multiplication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1161~1166
何伟基,陈钱,屈惠明. 电子倍增 CCD 的电荷倍增特性研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1161~1166
- 16 V. Korpelainen, A. Lassila. Acoustic method for determination of the effective temperature and refractive index of air inaccurate length interferometry[J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(10): 2400~2409
- 17 Xue Fengting, Gao Sili, Yu Yang. Space target real-time rendering technology for ground-based IR detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(Supplement): 421~424
薛丰廷,高思莉,于洋. 地基空间目标红外视景仿真[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(增): 421~424
- 18 Kim Dukjin, D. R. Lyzenga. Efficient model-based estimation of atmospheric transmittance and ocean wind vectors from WindsSt data[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on.*, 2008, **46**(8): 2288~2297