

doi:10.3788/gzxb20134206.0742

基于图像熵的高动态范围场景的自动曝光算法

杨作廷^{1,2}, 阮萍¹, 翟波¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:自动曝光控制是通过控制曝光量使图像亮度最优化的过程, 由于图像亮度与曝光值有着直接的关系, 因而图像亮度在自动曝光算法中被广泛应用。虽然熵已用于各种图像处理应用, 但是很少应用在自动曝光中。基于图像熵提出一种新的自动曝光算法, 不同于传统的主要依赖于图像亮度的算法。首先根据图像熵值大小来判断光照条件, 通过图像熵大小的比较, 把图像的各区域划分为感兴趣区域与不感兴趣区域。然后由图像熵值大小采用分配权重方法对不同区域分配权重, 最后进行准确地自动曝光。由于该算法主要基于图像熵值的大小, 所以曝光效果不受图像中对象位置影响, 使得该算法更灵活。实验结果表明, 该算法对高动态范围场景可以准确地检测出各种光照条件, 提高相机系统输出图像的动态范围, 同时还增加了自动曝光的准确性。

关键词:自动曝光控制; 曝光量; 图像亮度; 图像熵; 权重

中图分类号: TN29

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)06-0742-5

Auto-exposure Algorithm for Scenes with High Dynamic Range Based on Image Entropy

YANG Zuo-ting^{1,2}, RUAN Ping¹, ZHAI Bo¹

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Automatic exposure control is a process of optimizing image brightness by controlling the exposure. To achieve auto exposure in digital cameras, image brightness is widely used because of its direct relationship with exposure value. Although entropy has been used in various image processing applications, it has not been used for AE application. A new auto-exposure algorithm was proposed based on the image entropy. The proposed method calculated the entropy of captured images to estimate lighting conditions. By comparing the image entropy and entropy threshold, the images were divided into the regions of interest and regions of no interest. After that, assign different weights to the regions of interest and regions of no interest, so that the overall brightness level was made to carry more information of the regions of interest. At last, the image can get accurate automatic exposure. The algorithm is mainly based on the image entropy, so the exposures are not affected by the location of objects in the image. It can make the algorithm more flexible. The experiment results show that the algorithm can accurately detect high-contrast lighting conditions and improve the dynamic range of output images for a camera system, at the same time the algorithm can also increases the accuracy of auto exposure.

Key words: Automatic exposure control; Exposure value; Image brightness; Image entropy; Weight

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2010AA122201)资助

第一作者: 杨作廷(1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为机载与星载光学传感器测试。Email: zuotingyang@126.com

导师(通讯作者): 阮萍(1967—), 女, 博士, 博导, 主要研究方向为机载与星载光学传感器。Email: ruanp@opt.ac.cn

收稿日期: 2012-01-11; 修回日期: 2012-04-23

0 引言

自动曝光控制是现代相机和摄像机的重要功能之一.通常有两种不同的自动曝光模式,分别为光圈优先式自动曝光和快门优先式自动曝光.此外除了这两种常用曝光模式外还有一种程序式自动曝光,在程序式自动曝光方式下光圈系数和快门时间都可能自动改变.

在普通光照条件下,传统的自动曝光算法通过整幅图像的亮度均值与图像参考亮度的比较进行自动曝光.然而,在诸如逆光或者正面强光等的复杂光照情况下,由于主体与背景的对对比度比较大,用传统的自动曝光算法往往使感兴趣的主体区域曝光不足或者过度曝光.为此,在复杂的光照条件下提出了许多相应的自动曝光算法^[1-6].通过对脸部特征分析,可以确保图像一致和人脸模型的建立^[7].人脸识别在许多数码相机中已开始用来提高自动曝光的性能,一种自适应的图像特征抽取和权重选择的人脸识别方法^[8],可以很好地应用在对人脸部分准确自动曝光,通常这种算法针对人脸部分自动曝光非常可靠有效,但是却不可避免地会受到光照条件和肤色差异的影响^[1].基于对图像固定分区的算法必然使主体的位置受到约束,显然这种方法不够灵活,没有考虑到目标位置的实际位置^[2-3].利用图像直方图分布进行自动曝光,很难区分出是在逆光还是在正面强光的光照条件^[4].利用场景中主体与背景之间的较大亮度对比度,采用主动搜索的过程鉴别主体的自动曝光算法,对场景中目标不只有一个主要目标或主要目标不存在时这种算法将不能很好地工作^[5].

上面的自动曝光算法在很大程度上都提高了相机的自动曝光性能,然而大多数自动曝光算法是基于图像亮度来实现自动曝光的.虽然熵已经应用在各种各样的图像处理应用^[9],但是由于图像熵与曝光值的关系一直没有确定,所以还没有充分应用在自动曝光算法中^[10].最近的研究表明,当图像曝光值改变时图像熵也随着改变,当图像曝光达到最佳时图像熵值将会达到最大,这对于研究自动曝光提出了一种新的数学模型及理论基础^[10],为此本文从图像熵与曝光值的关系出发,提出了一种新颖的自动曝光算法.

1 采用图像熵对不同光照条件检测

光照条件一般可分为正常光照和高对比度光照,由于在不同光照条件下得到的图像其熵值不同,所以可根据图像熵大小进行光照条件的判断.

“熵”在信息论中是一个非常重要的概念,它是不确定性的一种度量.设集合 X 中各事件出现的概率用 n 维概率矢量 $\mathbf{P} = (P_1, P_2, \dots, P_n)$ 来表示,且满足 $0 \leq P_i \leq 1$,则熵函数的定义为

$$H(p) = H(p_1, \dots, p_n) = -\sum_{i=1}^n p_i \log(p_i) \quad (1)$$

处于不同位置的像素有着不同的灰度,像素灰度用 X_i 表示,其中 $i=1, 2, \dots, k$; k 表示图像的灰度级数; P_i 为各灰度级出现的概率,则图像熵为

$$E = \sum_{i=1}^k p_i \log\left(\frac{1}{p_i}\right) = p_1 \log\left(\frac{1}{p_1}\right) + \dots + p_k \log\left(\frac{1}{p_k}\right) \quad (2)$$

对于一幅 $m \times n$ 大小的图像,如果所有的灰度分布均匀,那么此时计算得到的图像熵为它的最大值.在这种情况下,所有的灰度级出现的概率是相同的,即

$$p_1 = p_2 = \dots = p_k = \frac{mn/k}{mn} = \frac{1}{k} \quad (3)$$

因此,图像的最大图像熵值为

$$E_{\max} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{k} \log(k) = \log(k) \quad (4)$$

在 256 灰度级下,计算图像熵的最大值为 $E_{\max} = \log(256) = 8$.由上式计算得到的最大图像熵是在一个理想的情况下得出的,显然在一个真实的场景中直方图几乎不会在所有的灰度级中均匀分布.对于一个给定的场景,随着曝光值的不同,图像熵也会改变.对于在不同曝光值下取得的图像,当其中图像熵 E 达到最大,即 $D_i = E_{\max} - E$ 达到最小时,曝光达到最佳,图像中所含信息最多.

根据人类视觉系统的特性,人们总是力图最大化地从图像中获取信息.基于此视觉机制,图像中包含丰富灰度级的高复杂度区域为主体即感兴趣区域 (Regions Of Interests, ROI),相反,包含少量灰度级的低复杂度区域则为不感兴趣区域 (Regions Of No Interests, RONI).实际上对图像的准确曝光就是对图像中感兴趣区域的准确曝光.对给定的场景,通过计算比较拍摄图像的图像熵差异 D_i 与其阈值 D_{th} ,即根据图像熵阈值 $E_{th} = E_{\max} - D_{th}$ 判断光照条件.在正常光照条件下,由于得到的图像其灰度分布相对均匀,其图像熵值 $E > E_{th}$,如图 1(a) 所示.当场



(a) Normal-lighting $E=7.52$

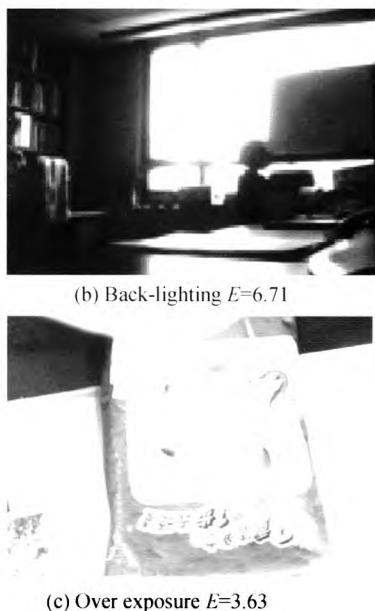


图 1 不同光照条件下图像

Fig. 1 The images of the different light conditions

景的动态范围大于光电传感器的动态范围时,比如在逆光或高对比度条件下,由于主体和背景之间有很强的对比度,得到的图像其图像熵值 $E < E_{th}$,如图 1(b)所示.尤其在过度曝光时,其图像信息损失严重,灰度级分布非常不均匀,如图 1(c)所示.

通过图像熵计算得到的图像亮度可以最大化地反应图像中感兴趣区域亮度的信息.考虑到对于相同的曝光值可以通过不同的快门速度和光圈大小的组合得到,所以图像亮度与曝光量之间的关系为

$$B = k \times L \times G \times T \times (F/\#)^{-2} \quad (5)$$

式(5)中 k 为一常量反应场景的照明条件, L 表示周围环境的亮度, G 和 T 分别表示相机的增益和曝光时间, F 是相机镜头的光圈数, B 是获得当前图像的亮度.对一定的场景当前后帧相隔时间比较短, L 和 G 保持不变.在此采用光圈优先式自动曝光,所以光圈 $F/\#$ 也是不变的.当前图像的亮度记为 B_{cur} ,当曝光达到最佳时得到的图像亮度记为 B_{opt} ,可以表示为

$$B_{cur} = k \times L \times G \times T_{cur} \times (F/\#)^{-2} \quad (6)$$

$$B_{opt} = k \times L \times G \times T_{opt} \times (F/\#)^{-2} \quad (7)$$

对式(5)、(6)整理可得

$$\log_2 T_{opt} = \log_2 T_{cur} - \log_2 B_{cur} + \log_2 B_{opt} \quad (8)$$

通过计算当前帧的图像亮度和图像的参考亮度,然后由上式可以得出最佳自动曝光时所需要的时间,从而进行准确地自动曝光.

2 根据图像熵分区后的自动曝光

通过计算图像的图像熵进行准确地自动曝光,当一幅图像中某区域的图像熵较大,则此区域所包

含的信息量也很大,认为是感兴趣区域.为了准确得到图像中感兴趣区域,先将图像平均分成 $M \times N$ 的区域,比如 3×3 ,每一区域的图像熵值用 E_{ij} 表示.如果图像中所分的区域太小,噪音可能成为此区域中的主要成分,从而会影响此区域的灰度分布,因此图像中分的区域数目不能太多.对得到的当前帧图像计算其图像熵,若图像熵大于其阈值,那么认为这帧图像在正常光照下,然后根据公式(7)计算曝光所需时间.若图像熵小于其阈值,那么将图像中每一个区域的图像熵与整幅图像熵值作比较,如果大于整幅图像熵值则其很可能是图像中感兴趣的区域,如果小于整幅图像熵值则其很可能是图像中不感兴趣的区域.

事实上对图像的准确曝光就是对图像中感兴趣区域的准确曝光.因此,对于含有较大图像熵的区域应赋予较大权重,相反地,含较小图像熵值的区域赋予较小权重.当不感兴趣区域过大即所有区域的图像熵值都小于整幅图像熵值,此时不感兴趣区域几乎占据整幅图像,如果对其分配非常小的权重将会导致整幅图像的非正常曝光.

对于这种情况,在实际实验中,我们将图像不同区域的图像熵大于所有区域熵平均值的区域作为感兴趣区域,相反小于所有区域图像熵平均值的区域作为不感兴趣区域.采用如图 2 所示图像主体分配权重的曲线在优化图像曝光效果的同时可以保证自动曝光控制的稳健性,也就是在过曝光和欠曝光的情况下都能自动调节曝光时间得到最佳的图像.

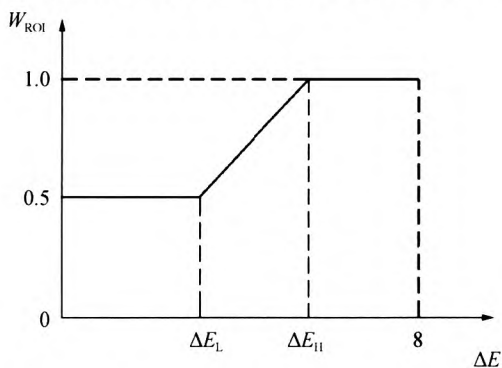


图 2 感兴趣区域的权重分配函数

Fig. 2 The weighting function of regions of interests

图中横坐标表示感兴趣区域与不感兴趣区域的图像熵的差值即 $\Delta E = \bar{E}_{ROI} - \bar{E}_{RONI}$,纵坐标表示主体区域的权重,不感兴趣区域的权重即为 $W_{RONI} = 1 - W_{ROI}$.基于图像熵分配区域加权后的图像亮度为

$$B = \frac{W_{ROI} \times B_{ROI} + W_{RONI} \times B_{RONI}}{W_{ROI} \times N_{ROI} + W_{RONI} \times N_{RONI}} \quad (9)$$

图 3 为自动曝光算法流程.

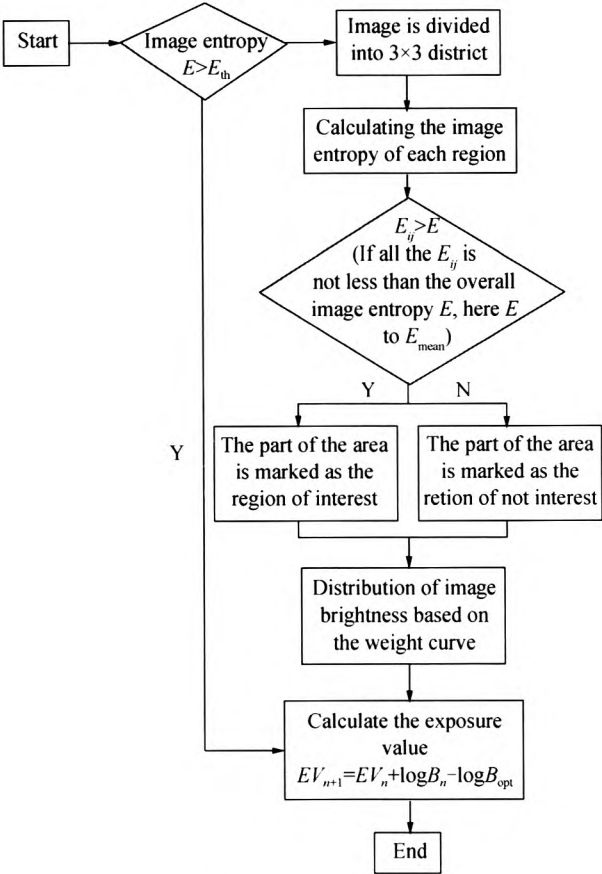


图 3 自动曝光的流程图
Fig. 3 The process of the auto exposure

由于采用区域加权策略赋予感兴趣区域更高的权重,所以此时得到的图像亮度可以准确地反应感兴趣区域的亮度.这样进行的自动曝光不会导致感兴趣区域的曝光过度或曝光不足.

通常情况下,自动曝光可以通过控制相机的动态范围来增加场景中可感知的亮度信息.但是,动态范围控制与曝光时间控制是相互耦合的,在实际中同时控制好很困难,并且不适合于对每个像素光强响应特性固定的一般相机^[11-12].然而利用基于图像熵的自动曝光算法可以增加曝光后的图像的动态范围,增加可感知的亮度信息.相对比该算法实现简单易行,对相机也没有特定的要求.

在实际应用中为了使自动曝光具有连续和自然的效果可以采用模糊逻辑对分成的不同区域进行权重分配.通过产生隶属函数且定义一组基于图像熵大小的模糊逻辑规则进行不同区域的加权^[13],应用模糊逻辑分配权重可以进一步提高该算法的性能.

3 实验结果

为了评价该算法,基于 MATLAB 的平台进行仿真.大量实验数据表明,当所得到的图像熵大于 E_{th} 时,说明此时的图像在正常光照条件下, E_{th} 为该算法中的图像熵阈值.在实际实验中对参量的选取

为 $B_{opt} = 128, E_{th} = 7.1$. 结果表明该算法可以准确检测光照条件.此外,该算法与光源位置以及场景中主要目标的数目和位置没有关系,使得该算法能很好地对各种高动态范围的场景进行准确地自动曝光.

应用该算法在不同光照条件下对场景测试的结果如图 4 所示.图 4(a)为典型的逆光光照条件,拍摄的图像灰度分布不均匀,自动曝光前其图像熵较小, $E = 6.74$.图 4(a)右为在此光照条件下应用该算法所得到的自动曝光控制效果图, $E = 7.45$.图 4(b)为桌面上摆放的一些物品.此时用光正面照射物体,拍摄的图像有较高的对比度,其图像熵较小, $E = 6.86$.图 4(b)右为对此光照条件下应用该算法所得到的自动曝光控制效果图, $E = 7.26$.图 4(c)为正常光照条件,拍摄的图像有较小的对比度,图像灰度级分布均匀.图 4(c)右为对此光照条件应用所得到的曝光控制效果图.

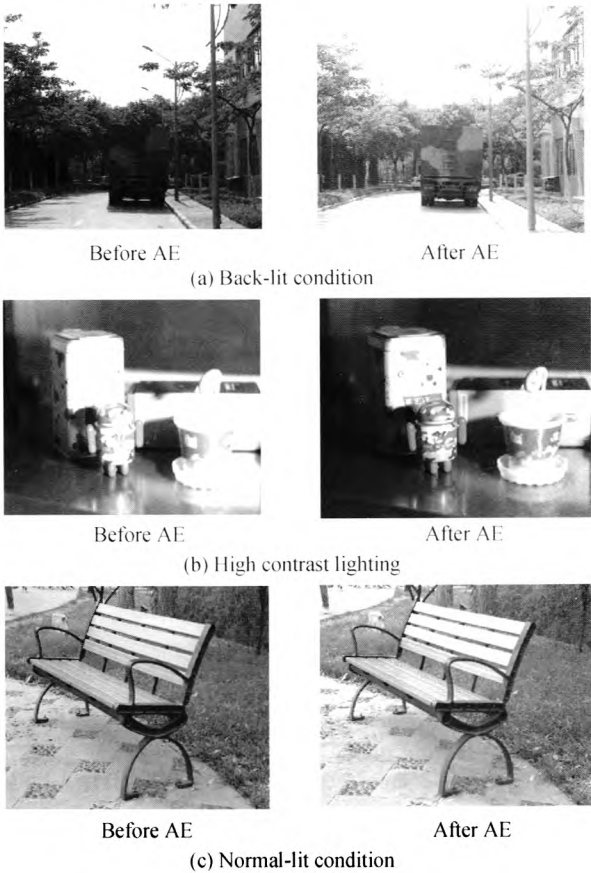


图 4 不同光照条件下自动曝光的实验结果
Fig. 4 The experiment result with AE algorithm in different lighting conditions

本文所提出的新算法可以有效提高对复杂光照条件的场景的成像质量,同时并没有对正常光照下场景的成像质量有负面的影响.

表 1 显示了在不同光照条件下对图像自动曝光前后的实验结果.对图像要得到正确的曝光,需使感

兴趣区域主导图像亮度均值. 如表 1 所示,不同光照条件下图像平均亮度与加权亮度一般不同. 在逆光条件或在高对比度光照条件下,根据式(7)利用整幅图像平均亮度进行自动曝光,结果会使感兴趣区域曝光不足或过度曝光. 在图 4 中采用通过图像熵最终得到的加权亮度,结果使图中感兴趣区域即车或桌面上的物品得到正确曝光. 图像曝光达到最佳,此时感兴趣区域所含灰度级丰富即其图像熵将会达到最大,从表 1 中可以看出,自动曝光后图像熵大于曝光前图像熵值.

表 1 在不同光照条件下自动曝光前后图像的实验结果
Table 1 The experiment result of the image in different lighting conditions

Light condition	The number	The average bright	The weighted bright	The entropy before AE	The entropy after AE
Back lit	1	126.38	84.75	6.74	7.45
	2	137.73	110.35	6.63	7.19
High contrast	1	119.74	147.26	6.83	7.26
	2	118.64	130.45	6.92	7.72
Normal lit	1	113.49	112.28	7.52	7.76
	2	112.13	118.78	7.46	7.63

4 结论

本文提出了一种新的自动曝光控制算法,不同于传统的主要依赖于图像亮度的算法,该算法主要基于图像熵值的大小自动控制曝光. 通过图像熵确定了加权亮度均值的计算原则,降低不感兴趣区域在加权均值中的重要性. 为了进一步简化和优化算法,在实际应用中,具体确定权值之间的关系时可以采用模糊逻辑的方法. 采用这种新的自动曝光算法,对于高动态范围场景可以提高其准确度,增强输出图像的细节,使曝光效果不受图像中对象及光源位置的影响. 该算法可以准确地检测出光照条件,增强了对感兴趣区域自动曝光的准确性.

参考文献

[1] JIN E W, LIN S, DHARUMALINGAM D. Face detection assisted auto exposure: supporting evidence from a psychophysical study [C]. *SPIE*, 2010, **7537**: 75370k1-75370k12.

[2] LEE J S, JUNG Y Y, KIM B S, *et al.* An advanced video camera system with robust AF, AE, and AWB control [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2001, **47**(3):

694-699.

[3] GAN Yu-quan, GAO Wei. An automatic exposure algorithm using scene analysis [J]. *Computer Information*, 2009, **25**(12): 303-304.

甘玉泉, 高伟. 一种基于图像分区的自动曝光算法[J]. *微计算机信息*, 2009, **25**(12): 303-304.

[4] MURAKAMI M, HONDA N. An exposure control system of video cameras based on fuzzy logic using color information[C]. New Orleans, LA: 5th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1996, 1-3: 2181-2187.

[5] LIANG Jia-yi, HONG Zhi-liang. 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.

[6] VUONG Q K, YUN S H, KIM S. A new auto exposure system to detect high dynamic range conditions using CMOS technology [C]. 2008 Third International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology (ICCIT), Busan, Korea, 2008, 577-580.

[7] ZHOU Mian, WANG Xiang-jun. Optical clustering method for locating facial features [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(3): 576-580.

周冕, 王向军. 一种定位人脸部特征的光学聚类方法. *红外与激光工程*, 2011, **40**(3): 576-580.

[8] SU Ding, ZHANG Qi-heng, TAO Bing-jie, *et al.* Fractal segmentation for multi-target from multi-source in complex backgrounds[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(3): 387-390.

宿丁, 张启衡, 陶冰洁, 等. 复杂背景下多源多目标图像的分形分割算法[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(3): 387-390.

[9] LIU Zhong-hua, YIN Jun, JIN Zhong. An adaptive feature and weight selection method based on gabor image for face recognition[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 636-641.

刘中华, 殷俊, 金忠. 一种自适应的 Gabor 图像特征抽取盒权重选择的人脸识别方法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 636-641.

[10] RAHMAN M T, KEHTARNAVAZ N, RAZLIGHI Q R. Using image entropy maximum for auto exposure [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2011, **20**(1): 013007(1)-013007(10).

[11] PAN Sheng-dong; AN Xiang-jing. Content-based auto exposure control for on-board CMOS camera [C]. Beijing: 2008 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2008: 772-777.

[12] GOOSSEN A, ROSENSTIEL M, SCHULZ S, *et al.* Auto exposure control for multiple-slope cameras [C]. *ICIAIR'08 Proceedings of the 5th International Conference on Image Analysis and Recognition*, 2008, **5112**: 305-314.

[13] ZHOU Jie. Auto-exposure method based on image segmentations and fuzzy logic [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.

周杰. 基于多区域分割及模糊逻辑的自动曝光方法[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.