

彩色数字相机快速自动曝光方法

郭惠楠^{1,2} 曹剑中¹ 周祚峰¹ 廖加文¹ 刘庆¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 彩色数字相机的曝光准确度直接影响了图像的色彩表现及人眼视觉的感受效果。提出了一种基于人眼视觉感观特性的相机自动曝光方法。通过对图像清晰度、色彩饱和度以及亮度等因素的客观评价,建立了曝光估计函数。根据统计原理并结合经验公式,对曝光估计值与曝光步长增量之间的函数关系进行标定,确立了曝光增量函数。根据当前帧图像的不同亮度属性,结合曝光增量函数,实时计算下一帧所需要的理想曝光值。大量实验表明,该方法对于不同场景、不同光照条件下图像的曝光量都有良好的调节效果,稳健性较强并具有较高的调节效率。

关键词 图像处理;光学工程;自动曝光;评价函数;亮度;数字相机

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1011003

Fast Automatic Exposure Approach for Color Digital Camera

Guo Huinan^{1,2} Cao Jianzhong¹ Zhou Zuofeng¹ Liao Jiawen¹ Liu Qing¹

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Exposure accuracy of color digital camera directly affects the performance of color image and the sensory effects of human visual. An automatic exposure method of digital camera based on the color perceiving properties of human visual system, is proposed. A novel kind of exposure estimation function is also established through objective evaluating the sharpness, color saturation and brightness of input images. According to the statistical theory and empirical formulas, the functional relationship between the exposure estimation values and exposure step increment is calibrated and the exposure increment function is established as well. For different brightness properties of current frame, using the exposure increment function, the ideal exposure value of next frame in real time is calculated. A large number of experimental results show that the proposed method for different scenes and different lighting conditions always has a good performance in adjusting exposure value of the captured image. Meanwhile, the algorithm has good robustness which can achieve adjustment for input frames in short time.

Key words image processing; optical engineering; automatic exposure; evaluation function; luminance; digital camera

OCIS codes 110.2970; 120.4640; 150.6044; 230.2090

1 引 言

图像的亮度信息直接影响着人眼视觉系统对画面色彩的主观评价^[1]。根据经典色貌理论,彩色图像的饱和度、视彩度以及亮度灵敏度等受到了亮度条件的约束^[1-2]。因此,合适的亮度对于彩色图像的色彩表现有着重要意义。相机自动曝光(AE)控

制技术是调节图像亮度的主要手段,通过光圈控制(IAC)^[3]、电子快门控制(ESC)^[4-5]以及图像处理(IP)^[4]等方式实现 AE 功能。ESC-AE 方式通过感光器或片上时序精确控制积分时间,实时性较好、可靠性较高,在 AE 控制中应用较为广泛。该方式通过曝光估计、曝光调节两个步骤对相机进行曝光控

收稿日期: 2013-04-23; 收到修改稿日期: 2013-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(61201376)、陕西省自然科学基金(2012JQ8003)

作者简介: 郭惠楠(1985—),男,博士研究生,主要从事图像与视频信息处理方面的研究。E-mail: s09068@opt.cn

导师简介: 曹剑中(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事航空相机成像系统方面的研究。E-mail: cjz@opt.ac.cn

制。曝光估计方面,工程上常采用全局或中心区域的平均亮度估计方法^[6-7];梁佳毅等^[6]根据光源照射方向以及图像图形分布等因素又进一步提出了基于主体区域的亮度评价方法。曝光调节方面,通过恒定曝光步长、自适应步长等方式对最优曝光参数进行搜索,从而得到理想的曝光量。现有的 AE 方法在处理普通场景时曝光估计较准确,曝光量控制地较为理想;但对于主体目标偏离中心位置且与背景存在较大亮度差时,现有方法往往会出现曝光不足或是曝光过度等情况。目前,尼康、佳能等厂商的消费级相机的 AE 模式在画面感官上有着良好的表现,但对于在特殊环境下使用的工业级相机及军品相机而言,AE 控制方法仍有着改进空间。本文提出了一种针对彩色数字相机的 AE 控制方法,通过模拟人类视觉系统对图像色彩的感知方式,建立了一种符合人眼视觉习惯的曝光模拟模型;并根据经典色貌理论以及经验参数,拟合出曝光步长增量函数。实验证明,该方法通过迭代计算能够准确而客观地估计出场景的亮度信息,利用曝光步长增量函数快速地确定最佳曝光参数。对于不同场景图像,该方法有着良好的稳健性及调节效率,其输出图像符合人眼视觉系统对色彩及亮度的感观需求。因此该 AE 控制方法有着重要的工程实际意义及应用前景。

2 现有 AE 控制方法评述

在曝光估计方面,现有的估计方法主要集中在全局或中心局部图像的亮度均值评价法^[4,6]以及主体目标区域的亮度评价方法^[6]。全局亮度均值评价法是根据不同色彩空间下的亮度定义,计算图像中所有像素的平均亮度,以此作为该图像的曝光估计参数。该方法结构简单、适用范围较广,但易受到镜头非均匀性的影响而产生较大的估计偏差。视场中心区域亮度评价方法将计算范围限定在一定规模的中心像素区域内,能够在符合人眼观察习惯的同时减小计算量,并有效地减少了非均匀性所带来的影响。主体区域评价方法是根据目标位置、大小的经验规律以及图像构图等确定出感兴趣的主体评价区域,并通过计算该区域的亮度加权均值,估计出场景的曝光参数。相比前两种评价方法而言,该方法能够较精确地评价图像的亮度信息,并提供较可靠的估计参数;然而,其评价效果依赖于主体区域的形状及分布,因此适用性受到了一定的限制。

在曝光控制方面,现有算法一般是以曝光估计值作为评判依据,以平均灰度值作为参考计算估计

值与平均灰度值的偏离大小,从而确定曝光调节步长,并以此步长搜索全局最优曝光值。恒定步长搜索法^[7],以等曝光时间步长对图像序列进行曝光时间的累加,当某帧图像的估计值与平均灰度值的偏差值落在设定的小临域内时,即认为该帧具有最优曝光量。该搜索方法具有普遍的适用性,但搜索效率较低,曝光调节时间较长。自适应步长搜索法^[5]利用上述灰度偏差值作为步长权值,有效地提高了搜索效率。然而,该方法所确定的曝光时间容易在最优曝光值附近出现往复波动,导致图像产生连续的亮暗变化。当权值设定不理想时,甚至会出现自动曝光失败的情况。

3 基于视觉感知的快速 AE 控制方法

3.1 曝光估计

人眼视觉系统由于受到视神经杆状细胞及锥状细胞的影响,对场景的亮度信息最为敏感。因此,图像的亮度变化直接决定了人眼视觉系统对画面表现的感观效果^[2]。随图像亮度的增加,人眼对图像细节表现的分辨力以及视彩度逐渐增大;当亮度增加至一定值时,人眼对色彩、纹理细节的分辨力进入到饱和阶段;当亮度进一步增大时,该分辨力迅速下降。当相机具有最佳曝光量时,图像的色彩感观及细节分辨力应达到视觉系统的整体最优值。图像的细节评价一般采用清晰度函数表征,其评价价值越大说明图像越清晰、细节越明显,从而越符合视觉系统的感观需求。同时,对于同一色调的图像而言,颜色的饱和度及亮度是评价色貌表现的重要因素。因此,利用图像的清晰度、色彩饱和度以及亮度信息作为曝光估计参数:

$$f_E = f(f_{sha}, f_{sat}, f_{lum}), \quad (1)$$

式中 f_{sha} 、 f_{sat} 、 f_{lum} 分别表示图像清晰度评价函数,饱和度评价函数以及亮度评价函数; f_E 表示由上述参数构成的曝光估计泛函。

对于清晰度评价函数,此处在 Brenner 函数^[8]的基础上进行了改进。为了提高评价算法对于不同图像的适用性,将两个方向隔点像素的亮度梯度信息作为评价参数:

$$f_{sha} = \frac{1}{nm} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m |(I_{i+2,j} - I_{i,j})(I_{i,j+2} - I_{i,j})|, \quad (2)$$

式中对于一幅 $m \times n$ 的图像, I 为像素点的亮度分量值。此函数描述了水平与垂直方向梯度同时变化的作用效果,提高了边缘细节的分辨能力。

相对于其他色彩空间,HSI(色度、饱和度、亮

度)色彩空间更符合人眼视觉系统对颜色的描述方式^[9]。因此,采用HSI空间下饱和度分量的定义方式作为曝光估计泛函中饱和度评价参数

$$f_{\text{sat}} = \frac{1}{mm} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left[1 - \frac{3\min(R_{ij} + G_{ij} + B_{ij})}{R_{ij} + G_{ij} + B_{ij}} \right], \quad (3)$$

式中 R, G, B 分别为红、绿、蓝三基色。

同时,定义图像的平均亮度与参考亮度的相对距离为泛函中亮度评价参数,考虑到亮度与清晰度、饱和度之间的相关性,根据实际工程经验,在评价参数中加入了清晰度与饱和度因素。该亮度评价参数表示为

$$f_{\text{lum}} = \frac{|\bar{I} - I_0|}{128} + |f_{\text{sha}, \max} - f_{\text{sat}, \max}|, \quad (4)$$

式中 \bar{I} 为图像的平均亮度, I_0 为参考亮度, $f_{\text{sha}, \max}$ 、 $f_{\text{sat}, \max}$ 分别为图像清晰度参数及饱和度参数的最大值。由于人眼对不同亮度图像的亮度分辨力不同,在极暗或极亮条件下,其分辨能力几乎为0。根据大量实验,上述两种状态可以定义为

$$\begin{cases} \arg\{I \mid I \in 0\} \triangleq \\ \left\{ \bar{I} \mid \bar{I} = \frac{1}{mm} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m I_{ij}, \bar{I} \in [0, 30] \right\}, \\ \arg\{I \mid I \in 255\} \triangleq \\ \left\{ \bar{I} \mid \bar{I} = \frac{1}{mm} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m I_{ij}, \bar{I} \in [240, 255] \right\}. \end{cases} \quad (5)$$

因此,此处参考亮度 I_0 取该两种状态上下限的中间值135(HSI色彩空间下的亮度定义)。其理论意义为:图像亮度在 I_0 处,人眼的亮度分辨力相对较大; \bar{I} 与 I_0 的距离越大,表明人眼分辨率越低。

设曝光估计泛函是清晰度函数、饱和度函数以及亮度函数的线性组合,综上所述可以得出

$$f_E = f(f_{\text{sha}}, f_{\text{sat}}, f_{\text{lum}}) = k_1 f_{\text{sha}} + k_2 f_{\text{sat}} + k_3 f_{\text{lum}}, \quad (6)$$

式中系数经验值分别为 $k_1 = 0.3, k_2 = 0.4, k_3 = 0.3$ 。在实际工程应用中,清晰度评价系数应与亮度评价系数保持平衡。若 k_1 过大,AE效果注重保留图像细节,因此在亮度上往往不能满足人眼视觉的需求(偏暗);若 k_3 过大,则图像偏亮,亦丢失了高亮处的细节部分。经过大量实验,图像在不同亮度均值(0~255)范围内,该评估函数呈现非负、上凸等特点,满足了后期最优曝光搜索的需求。

3.2 曝光控制

曝光控制部分的设计流程如图1所示,整个曝光控制可分为起始帧亮度估计、昏暗图像属性判别、步长计算以及最优曝光值搜索等四个部分。图中 f_{E_0} 、 f_{E_p} 分别为起始帧,第 p 帧图像的曝光估计值, L_D 、 L_B 为亮度递增增量函数、亮度递减减量函数, t_0 为起始帧曝光时间, I_0 为起始帧亮度, t_p 为第 p 帧曝光时间。

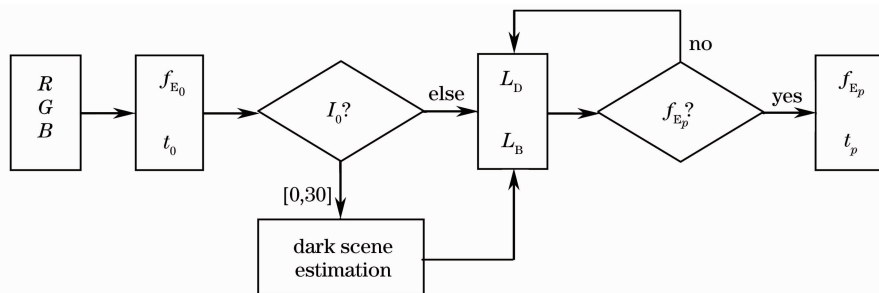


图1 曝光控制流程

Fig. 1 Flow chart of exposure control

3.2.1 起始帧亮度估计

起始帧的亮度水平决定了后续曝光调节的模式。由于不同属性的低亮度图像对相同曝光步长的色差响应不同,对其属性判定的准确性直接影响了AE控制效果。由(5)式可知,当起始帧的平均亮度低于30时,即认为该帧图像为昏暗场景,按照3.2.2节方式对其属性进行判定并进行相应的步长计算;否则直接利用其曝光估计值 f_E 进行步长计算。

3.2.2 昏暗图像属性判别

昏暗(低亮度)图像一般有两种成因:1)曝光不足引起的图像整体昏暗;2)图像中目标或背景本身

具有较低灰度及彩度等特征,且占据图像中较大比例。如图2所示,图2(a)为曝光不足图像(曝光时间 $t=2$ ms),图2(c)为曝光不足且大范围背景灰度级较低的图像($t=2$ ms)。由于图2(b)、(d)可以看出($t=20$ ms),当给予一定曝光量时,因曝光不足引起的图像昏暗情况得到了明显的改善,其平均亮度值有了明显的提高;对于大范围暗背景图像,虽然场景目标(硬币)亮度有所改善,但图像整体平均亮度较低。因此,可以利用多帧图像的平均亮度差来判定昏暗图像属性。

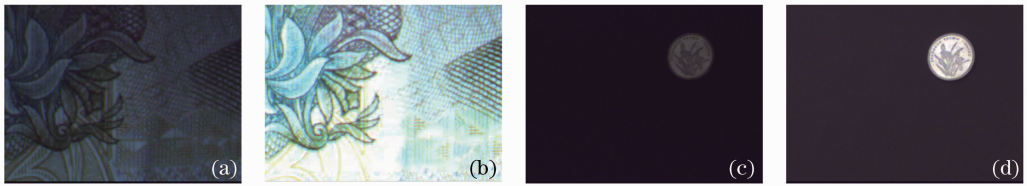


图 2 不同属性的低亮度图像对比

Fig. 2 Contrast of low-luminance images with different properties

当起始帧估计为低亮度图像时,利用连续 3 frame 不同曝光图像的亮度差判定其色彩属性。设首帧曝光值为 t_1 ,相机帧频为 F ,则后两帧曝光时间分别为 $t_2 = t_1 + \Delta t_T, t_3 = t_1 + 2\Delta t_T, \Delta t_T$ 为初始曝光增量。该 3 frame 图像对应的平均亮度值分别为 I_1, I_2, I_3 , 判定其场景属性的评价价值 μ 可表示为

$$\mu = \frac{I_3 - I_2}{I_2 - I_1}, \quad (7)$$

式中当 $\mu \in [0.8, 1.2]$ 时,场景即为大范围低灰度图像。当 Δt_T 较小时,图像的亮度变化小于人眼的视觉分辨力,无法分辨昏暗场景的具体属性;当 Δt_T 较大时,可能丢失评价曲线的极大值,影响后期的搜索效果。因此,选取 Δt_T 的经验值为 $1/(8F)$ 。

3.2.3 步长计算

为了能够准确、快速地进行曝光控制,针对不同特征场景图像采用不同的控制方式。当起始帧平均亮度在 $(30, 255]$ 范围内时,计算每帧图像的曝光估计值 f_E ,并直接根据标定的 $f_E - \Delta t$ 函数解算出相应的 Δt 值。

$f_E - \Delta t$ 曝光增量函数描述了曝光估计值与快门调节时间步长之间的对应关系。一帧图像 f_E 值越小,则下一帧所需的曝光时间越长,即曝光调节所需的步长增量就越大;反之,则步长增量就越小。基于此事实,针对室内、外的不同参考物、不同光照环境下的相机曝光参数进行了大量的研究与实验,根据统计规律得到了 $f_E - \Delta t$ 的 3 阶多项式标定函数,如(8)式所示

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \end{bmatrix} = \mathbf{M} [f_E^3 \quad f_E^2 \quad f_E \quad 1]^T, \\ \mathbf{M} = [\mathbf{m}_1 \quad \mathbf{m}_2]^T \end{cases}, \quad (8)$$

式中 f_E 是当前帧的曝光估计值; $\Delta t_i (i = 1, 2)$ 为步长增量值; \mathbf{M} 为经验系数矩阵; $\mathbf{m}_1 = [-324.9, 838.7, -728.3, 243.1], \mathbf{m}_2 = [345.9, -1396.9, 1834.2, -2264.2]$ 。当图像曝光不足时,选用 Δt_1 ; 当曝光过量时,选用 Δt_2 。

当起始帧平均亮度在 $[0, 30]$ 内时,可根据 3.2.2 节判定暗场景图像的具体属性。若低亮度由

曝光不足引起,则从第 3 frame 起按照 $f_E - \Delta t$ 对后续帧进行调整。若低亮度由场景本身色彩属性引起,则将图像平均划分为多个 $40 \text{ pixel} \times 40 \text{ pixel}$ 的子区域,计算每个子区域的平均亮度值 I_a ; 当某区域的 I_a 大于门限值 I_{th} 时[见(9)式],即认为该区域为亮度参考区域;同时,对该区域进行曝光估计,其后续帧按照 $f_E - \Delta t$ 函数,将此参考区域调整至最优曝光量,以满足人眼对亮目标的正常感观需求。

$$I_{th} = \frac{2}{3} I_{a,max} + \frac{1}{3} I_{a,min}, \quad (9)$$

式中 I_{th} 为亮度门限, $I_{a,max}$ 与 $I_{a,min}$ 分别是子区域中平均亮度最大值与最小值。

3.2.4 最优曝光值搜索

最优曝光值搜索规则如图 3 所示,图中 \circ 表示该值较前一帧变小;反之 \bullet 表示变大。设亮度递增增量函数 L_D 为 $f_E - \Delta t_1$, 亮度递减增量函数 L_B 为 $f_E - \Delta t_2$ 。

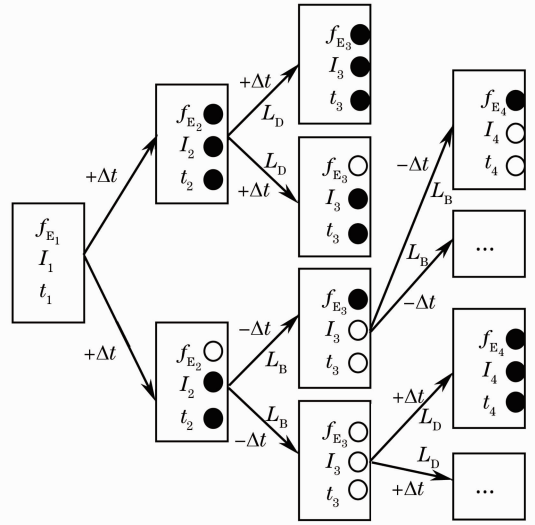


图 3 搜索规则示意图

Fig. 3 Diagram of search-rule

当根据 3.2.2 节及 3.2.3 节完成相应的判别与计算后,对于起始帧图像(设曝光估计值为 f_{E1}),首先利用一个小步长 Δt_0 确定调整方向,则第 2 frame 图像的曝光时间为 $t_2 = t_1 + \Delta t_0$,并计算其曝光估计值 f_{E2} 。当 $f_{E2} > f_{E1}$ 时,表明以曝光时间递增的方

式搜索正确,并按照 L_D 线确定下一帧的步长递增量;当 $f_{E_2} < f_{E_1}$ 时,表明应以曝光时间递减的方式进行搜索,并按照 L_B 线计算下一帧的步长递增量。同理,后续所有帧皆按照上述规则进行搜索。当相机按照搜索规则调节曝光值至 f_E 的最大值 $f_{E,max}$ 附近时,其曝光估计值相对稳定(在 $f_{E,max}$ 左右波动)。此时,计算该帧前 5 frame 图像的波动方差 D_{or} :

$$D_{or} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \left[f_{E_i} - \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 f_{E_j} \right]^2, \quad D_{or} \leq \beta_{or}. \quad (10)$$

当方差小于门限值 β_{or} 时即表明相机已达到最优曝光量(β_{or} 经验值为 1.5)。

达到最优曝光后,对最优曝光时间进行锁定,后续帧将沿用该曝光量。同时,记录后续每帧的平均亮度值 I_{avg} 。若场景变化不大时,相机不做曝光修订;若场景变化较大时,即

$$|I'_{avg} - I_{avg}| > \delta, \quad (11)$$

式中 I'_{avg} 为场景变化时的图像平均亮度; δ 为突变阈值,其经验值为 $\delta=20$ 。此时曝光控制解锁,并按照新场景进行上述所有判断、计算工作,重新搜索最优曝光量。并且,为了避免相机抖动及外界瞬时扰动对曝光参数的影响,实际工程应用中(11)式为发生场景突变后连续 2 s 内的所有帧都应满足该条件。

4 实验与分析

实验硬件采用 APTINA 公司的彩色 CMOS-MT9M034 以及 Cyclone II EP2C8Q208C8N 系列现场可编程门阵列(FPGA)作为前端图像采集设备,并利用 Matlab 软件对获得的原始图像进行后期自动曝光仿真实验。通过对不同场景、不同 AE 方法的实验数据对比,验证了本方法的实际调节效果。

对于普通场景图像,图 4 给出了中心测光恒定步长方法(CCM)、主体区域测光变步长方法(MVM)以及本文方法(VLM)的实验效果对比。表 1 为采用三种算法执行 AE 控制时的具体参数。

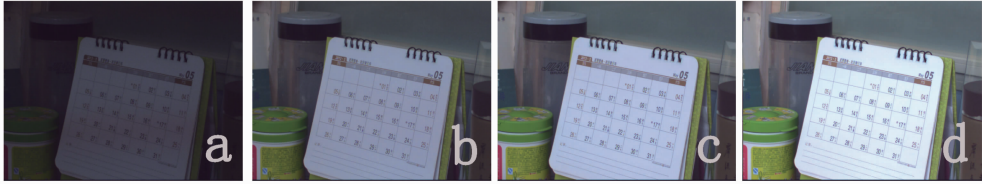


图 4 不同算法对普通场景的曝光效果对比

Fig. 4 Contrast of different AE methods for normal scene

表 1 不同算法的 AE 参数

Table 1 AE parameters of different methods

Frame	CCM (I)	MVM (I)	VLM (f)
1	34.22	38.88	0.84
2	45.41	54.19	1.04
3	56.25	80.11	1.06
4	66.06	113.21	1.07
5	75.66	148.92	—
6	84.33	131.98	—
7	91.63	—	—
8	99.39	—	—
9	106.78	—	—
10	113.97	—	—
11	120.55	—	—

由表 1 可知,CCM 方法由于采用恒定步长方式调节曝光量,搜索效率较低,其平均亮度值收敛至期望亮度区间 $[120, 140]$ 需要 11 frame;而 MVM 采用变步长搜索,其收敛速度明显加快(需要 6 frame);VLM 算法利用曝光增量经验函数,其搜索步长值随曝光估计值动态变化,搜索效率较前两种方式明

显提高,仅需 4 frame 即可搜索至最优曝光量。同时由图 4 可以看出,三种 AE 方式的调节效果不尽相同,VLM 方法能够在保留图像细节的同时提高图像整体亮度,其效果更符合人眼的视觉需求。

图 5 为两种不同光源照射方向下的 AE 效果对比。当相机逆光拍摄或是场景中目标与背景亮度反差较大时,现有 AE 方法往往会出现曝光过度或曝光不足的情况。图 5(a)、(e)为 CCM 方式的曝光效果;图 5(b)、(f)为局部放大图。同时,图 5(c)、(d)、(g)、(h)为 VLM 方式的调整效果。可以看出,由于 VLM 方式考虑到图像整体的细节、色彩饱和度以及亮度等因素,其 AE 效果能兼顾不同亮度细节,较 CCM 方式有更好的感观效果。

对于大范围低灰度背景图像如图 6 所示,CCM 方式及 MVM 方式由于对图像中的固定区域进行亮度评价,评价值受暗背景影响严重。如表 2 所示,CCM 方式经过 40 frame 的调节,在可控曝光时间内(实验帧频为 25 frame/s,其最大可控曝光时间为 $t_{max}=40$ ms),提高了图像整体亮度,但牺牲了高亮

度细节[见图 6(a),(c)];MVM 方法在第 5 frame 达到了 t_{max} ,其亮部细节几乎全部丢失;而 VLM 方法在对图像亮度属性判别后(前 3 frame),针对高亮度部分进行 AE 计算,经过 4 frame 搜索达到最佳

曝光量,从而避免了昏暗背景对 AE 效果的影响[见图 6(b),(d)].表 2 中,“—”表示该值稳定,“×”表示固场景亮度评价异常导致该帧图像曝光失败(过度)。

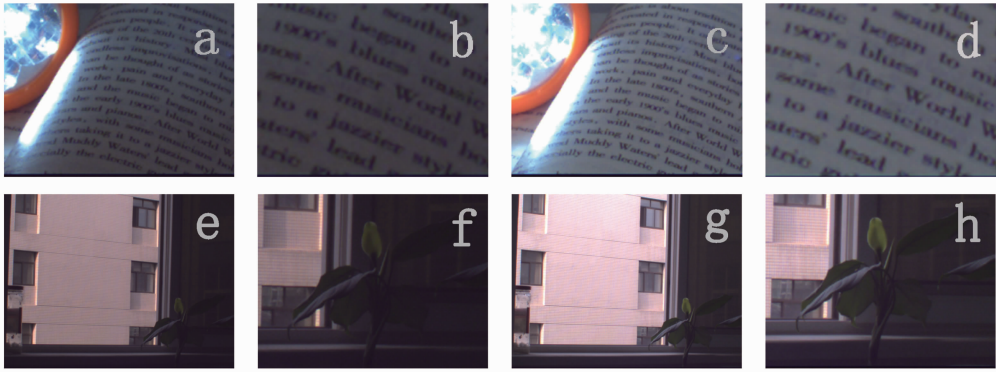


图 5 不同算法对不同光照场景的曝光效果对比

Fig. 5 Contrast of different AE methods for different illumination scenes

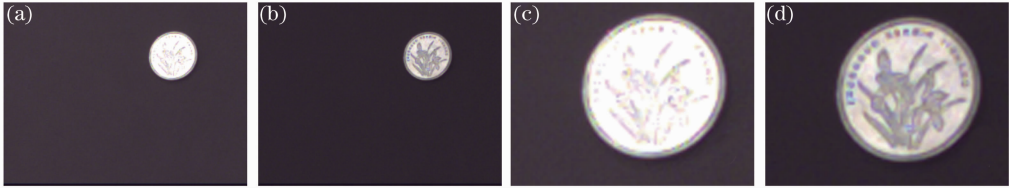


图 6 不同算法对暗场景的曝光效果对比

Fig. 6 Contrast of different AE methods for dim scene

表 2 不同算法的 AE 效率

Table 2 AE efficiencies of different methods

Frame	CCM (<i>I</i>)	MVM (<i>I</i>)	VLM (<i>f</i>)
1	20.26	21.07	0.811
2	22.26	25.05	0.826
3	23.35	36.74	0.831
4	25.31	48.89	0.901
5	27.05	73.38	0.914
6	28.46	×	0.910
7	29.89	×	0.918
8	31.05	×	—
9	32.53	×	—
10	33.88	×	—
40	63.61	×	—

5 结 论

通过对人眼视觉系统感知特性的研究,提出了一种彩色数字相机自动曝光方法。利用图像的清晰度、色彩饱和度以及亮度特征建立图像的曝光估计函数;并根据该估计值确定不同场景下图像的曝光步长增量。通过不同亮度属性的步长增量函数,快速搜索最优曝光量,极大地减小了曝光调节时间。实验证明,该 AE 方法的调节效果符合人眼对场景

色彩、亮度的感知习惯;在不同场景下,该方法有着良好的稳健性;对于一般场景图像,能在 5 frame 内完成最优曝光搜索,对于昏暗背景下的目标场景亦能在 10 frame 内达到理想曝光值。

参 考 文 献

- Andreas Koschan, Mongi Abidi. Digital Color Image Processing [M]. Zhang Yujin Transl. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. 26-39.
科斯汗,阿比狄. 彩色数字图像处理[M]. 章毓晋译. 北京:清华大学出版社,2010. 26-39.
- Hu Weijie, Tang Shunqing, Zhu Zhengfang. Modern Color Science and Application [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007.
胡威捷,汤顺青,朱正芳. 现代颜色技术原理及应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2007.
- Chen Canning, Deng Huaqiu, Wang Jianhua. Research on auto-exposure algorithm based on iris control [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(11): 46-48.
陈参宁,邓华秋,王剑华. 基于光圈控制的自动曝光算法研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(11): 46-48.
- Jiao Jichao, Zhao Baojun, Tang Linbo, et al.. Exposure algorithm for space image based on light and inter prediction [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 382-387.
焦继超,赵保军,唐林波,等. 基于光照和帧间预测的空间图像曝光控制算法[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 382-387.
- 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.
- 6 Liang Jiayi, Hong Zhiliang. 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.
- 7 Ge Zhiwei, Yao Suying, Xu Jiangtao, *et al.*. A fast automatic exposure control method for CMOS image sensor [J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(10): 854—859.
- 戈志伟, 姚素英, 徐江涛, 等. 一种应用于 CMOS 图像传感器的快速自动曝光控制方法[J]. 天津大学学报, 2010, 43(10): 854—859.
- 8 Wang Jian, Chen Hongbin, Zhou Guozhong, *et al.*. An improved Brenner algorithm for image definition criterion [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(7): 855—858.
- 王 健, 陈洪斌, 周国忠, 等. 改进的 Brenner 图像清晰度评价算法[J]. 光子学报, 2012, 41(7): 855—858.
- 9 Rafael C Gonzalez, Richard E Woods, Steven L Eddins. Digital Image Processing Using MATLAB [M]. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2009. 145—178.

栏目编辑：张 腾