

doi:10.3788/gzxb20184704.0410003

单张 LDR 图像的曝光校正与细节增强

常猛,冯华君,徐之海,李奇

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室,杭州 310027)

摘 要:提出了一种单张低动态范围图像曝光校正的方法,可增强图像过曝光和欠曝光区域的细节.分别对图像过曝光区域与过欠光区域进行校正.在欠曝光区域,使用 WLS 滤波将图像分解为照度图和反射图,以提升区域亮度并增强对比度;在过曝光区域,扩展 Retinex 模型,提出暗亮度用于表征过曝光程度,压缩区域亮度并增强细节.然后利用基于显著性的融合算法将校正后的图像进行融合,得到多区域增强图像.使用两种通用图像质量评价指标比较了多种方法的结果.实验证明,本文结果的指标均优于其他方法的结果.另外,在视觉效果的比较中,本文方法可以得到细节丰富、色彩还原度高的校正图像.

关键词:曝光校正;对比度增强;图像增强;Retinex 模型;图像融合;高动态范围;计算摄影

中图分类号:TN911.73

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)04-0410003-10

Exposure Correction and Detail Enhancement for Single LDR Image

CHANG Meng, FENG Hua-jun, XU Zhi-hai, LI Qi

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

Abstract: This paper presents a method of single low dynamic range image exposure correction, which enhances details in over-/ under-exposed areas. Firstly, over-exposed areas and under-exposed areas are corrected respectively. In the under-exposed area, WLS filter is used to decompose the images into illumination map and reflection map, which enhances the brightness and contrast; In the over-exposed area, dark brightness is proposed to characterize the degree of over exposure and the Retinex model is extend to compress the brightness and to enhance details. After the corrected images are fused using the proposed fusion algorithm based on saliency, the multi-region enhancement image is obtained. The results of several methods are compared by using two common image quality evaluation indexes. Experiments show that the indexes of our results are superior to other results. In addition, in the comparison of visual effects, the proposed method can obtain the correction image with rich details and high color reproduction.

Key words: Exposure correction; Contrast enhancement; Image enhancement; Retinex model; Image fusion; High dynamic range; computational photography

OCIS Codes: 100.2980; 110.1758; 110.5200

0 引言

消费级相机可以通过选择测光模式来控制曝光,使得到的图像尽可能还原场景的细节.如果场景光照均匀,画面中不存在大面积明暗对比,光差较小,可以通过多重测光或平均测光,保持整幅画面的清晰度和色彩还原度.当场景光照条件比较复杂,如当暗场景出现强光时,上述测光方式会场景高亮区域和暗区域的细节丢失,只能通过点测光或区域测光来突出部分区域的细节.此时,消费级相机不能捕捉真实世界的高动态范围,获取的低动态范围图像(Low Dynamic Range, LDR)会出现错误曝光(过曝光或欠曝光)的区域.这种图像视觉质量差,且在错误曝光区域的细节也被压缩,甚至丢失.

针对图像过曝光或欠曝光区域的恢复问题,许多校正方法被提出,常用的直方图均衡化或 gamma 校正方

基金项目:国家自然科学基金(No. 61475135)和浙江省科技计划项目(No. 2017C01033)资助

第一作者:常猛(1994—),男,博士研究生,主要研究方向为光学成像与图像处理. Email:11630020@zju.edu.cn

导师(通讯作者):冯华君(1963—),男,教授,硕士,主要研究方向为光学成像与图像处理. Email:fenghj@zju.edu.cn

收稿日期:2017-11-10; **录用日期:**2017-12-18

<http://www.photon.ac.cn>

法^[1]可以增强图像整体对比度,但这些方法对于图像不同区域很难自适应.改进的自适应直方图均衡化^[2]可以很好地增强图像各区域细节,但其存在过增强(即饱和度过度,偏色,伪信息等)以及区域过渡不自然的现象.

在过曝光校正方法中,Masood的方法^[3]会造成图像信息丢失,且校正后的图像偏暗.Guo提出的基于最优化的方法^[4]用于校正过曝光区域,但该方法只能处理过曝光区域比较小的情况,对于过曝光比较大的区域,该方法会出现颜色丢失的现象.对于大面积过曝光的区域,也有人提出用暗通道去雾的方法^[5]恢复这些区域的细节,但该方法会使得图像整体偏暗,使得欠曝光区域的细节进一步削弱.Retinex方法^[6]可以很好地增强暗区域的对比度,显示更多的细节.单尺度Retinex方法存在光晕(halo)现象和偏色现象,后来提出了许多改进的方法,如多尺度Retinex,带颜色恢复的多尺度Retinex^[7],基于泊松方程的Retinex^[8],基于双边滤波器的Retinex^[9-10]等.然而这些Retinex方法依然有可能会造成图像偏色,或部分区域细节丢失,且不能增强过曝光区域细节.

近些年也有许多方法被提出用于欠曝光图像的增强,Dong^[11]利用反向暗通道去雾法增强低照度图像,Guo^[12]利用改进的Retinex方法增强低照度图像,Fu^[13]针对于低照度图像,利用改进的Retinex和图像融合的方式进行图像增强.这些方法对于欠曝光图像都能得到较好的视觉效果,但也会出现图像过饱和现象,使得图像看起来不够自然,另外,这些方法对过曝光区域都不能得到好的处理结果.

为了同时处理过曝光区域与欠曝光区域,Hou^[14]提出基于图像修复的方法,然而该方法为只有单个目标的图像设计,在复杂场景中没有很好地表现.Yuan^[15]提出了一种自适应的S曲线曝光校正,其可以得到比较好的视觉效果,但对于曝光错误区域的细节却不能很好地恢复.有很多色调映射的方法^[16-18]可以将多张LDR图像融合得到正确曝光的图像,但其需要多张LDR图像或者针对高动态范围图像(High-Dynamic Range, HDR)设计,对于单张LDR图像无能为力.

本文提出了一种基于融合的方法,可以同时处理存在过曝光与欠曝光的图像.本文的方法是针对单张LDR图像增强,可以同时增强其过曝光与欠曝光区域的细节,对Retinex进行了改进和扩展,使其还原图像的色彩,并能够增强过曝光区域的细节.并提出了一种基于显著性的图像融合方法,可以将校正后的多张图像进行融合,得到多区域增强图像.

1 图像曝光校正

LDR图像曝光校正分为三个步骤,即欠曝光区域校正,过曝光区域的校正,以及将两者的校正结果进行图像融合.算法的流程图如图1.

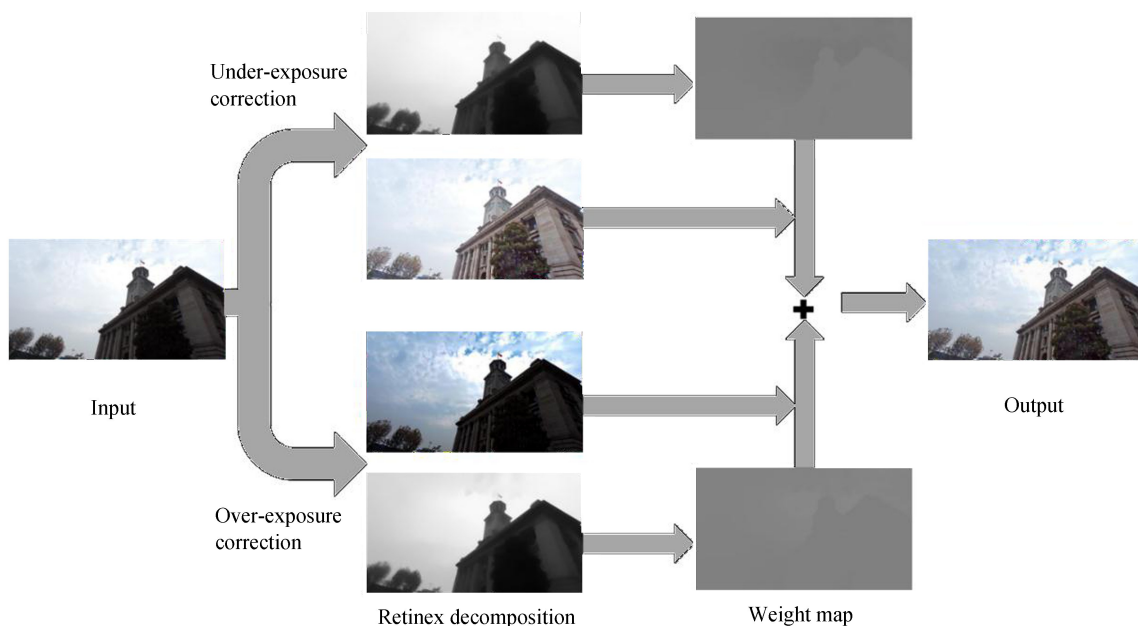


图1 图像曝光校正流程图

Fig.1 The workflow of image exposure correction

1.1 欠曝光区域校正

Retinex 理论模型表示为

$$I=L \times R \tag{1}$$

即正常图像亮度是由照明光强 L 与场景反射 R 共同作用的结果.先假设照明光强是缓慢变化的,以此确定 L ,然后将场景本身的反射强度 R 分离出来.场景反射 R 显示场景本身的细节,而与照明光强无关.

由于场景反射 R 在区间 $[0, 1]$ 内,所以光照强度 $L \geq I$,取三个颜色通道的最大值作为初始估计光照强度 \hat{L}

$$\hat{L} = \max(I^c) \tag{2}$$

式中, c 表示 RGB 颜色通道.

根据光照强度 L 是缓慢变换的先验条件,本文采用加权最小二乘法(Weighted Least Squares, WLS)^[19],确定光照强度 L ,使得光照强度保持场景整体结构而不受纹理细节影响

$$\min_L \{ (L - \hat{L}) + \lambda \| a_x D_x L + a_y D_y L \|^2 \} \tag{3}$$

式中, D_x, D_y 为水平和垂直方向的梯度, λ 控制平滑程度, a_x 和 a_y 是依赖于 \hat{L} 的平滑权重

$$a_x = (|D_x \hat{L}|^\alpha + \epsilon)^{-1} \tag{4}$$

$$a_y = (|D_y \hat{L}|^\alpha + \epsilon)^{-1} \tag{5}$$

式中, $\alpha=1.2, \epsilon$ 是一个小常数,防止分母为零,一般取 0.000 1.

然后利用式(6)恢复场景反射强度

$$R_u = \frac{I}{L^\gamma + \epsilon} \quad I \in [0, 1] \tag{6}$$

式中, γ 用来控制图像增强强度,一般取为 0.4~0.8.

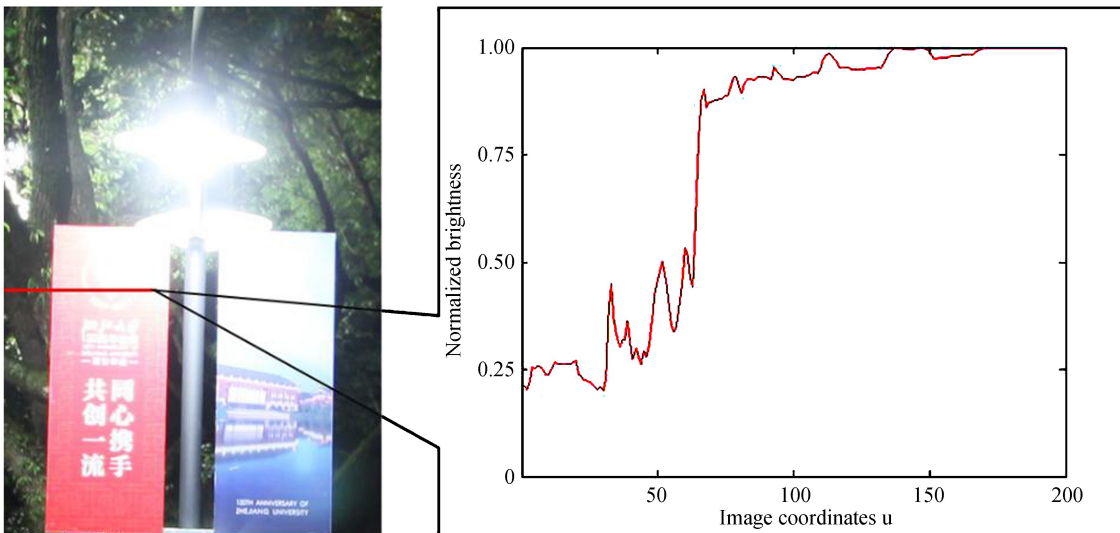
1.2 过曝光区域校正

Retinex 模型无法处理过曝光区域.如图 2(b)所示,在欠曝光区域,用式(6)得到的反射强度会提升区域亮度并增强细节的对比度;而在过曝光区域,得到的光照强度 L 接近于饱和,不能有效增强这些区域的细节.

在 LDR 图像的过曝光区域,被压缩得图像细节叠加在高亮度值上.为了增强过曝光区域的细节,首先需要将其亮度进行压缩.参照欠曝光区域的校正模型,本文对该模型进行扩展,可以将过曝光区域看作欠曝光区域的反转,则原 Retinex 模型变为

$$(1-I) = (1-L_d) \times (1-R) \tag{7}$$

式中, L_d 称为暗亮度,该值越高,则相应区域更可能出现过曝光现象,如图2(b)所示.初始估计暗亮度为三个



(a) Original intensity

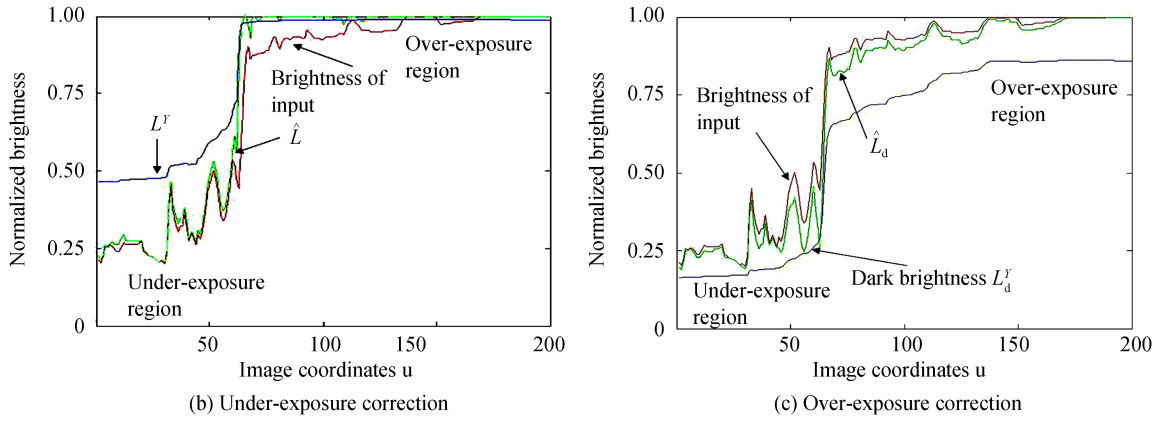


图2 图像校正亮度图

Fig.2 Brightness of image correction

颜色通道的最小值

$$\hat{L}_d = \min(I^c) \quad (8)$$

式中, c 表示 RGB 颜色通道. 同样, L_d 是满足缓慢变换的条件, 利用式(8)估计暗亮度值

$$\min_{L_d} \{ (L_d - \hat{L}_d) + \lambda \| a_{dx} D_x L_d + a_{dy} D_y L_d \|^2 \} \quad (9)$$

其参数可以与欠曝光区域增强过程中设置的相同. 然后利用式(10)恢复过曝光场景的反射强度

$$R_o = 1 - \frac{1 - I}{(1 - L_d)^\gamma + \epsilon} \quad (10)$$

为了使得过曝光区域不过增强, 取 $\gamma = 0.5$.

1.3 图像融合

得到了过曝光校正图像 R_o 和欠曝光校正图像 R_u , 需要将其融合为单张增强图像. 为了使得各自增强的细节保留下来, 需要给其相应被增强的区域更大的权重. 从上面的 Retinex 模型分解可以看到, 对于欠曝光的区域, 重点增强的区域是那些光照强度 L 比较小的区域, 而对于过曝光的区域, 重点增强的区域是那些暗亮度 L_d 比较大的区域, 所以我们定义两幅图像的权重如下, 对于欠曝光校正图像的权重为

$$\hat{W}_u = 1 - L \quad (11)$$

对于过曝光校正图像的权重为

$$\hat{W}_o = L_d \quad (12)$$

Retinex 方法往往会出现过增强现象, 直接采用上述权重会造成结果对比度过于强烈, 使得图像看起来不自然. 故本文利用基于显著性的权重模板作为最终融合的权重, 其计算为

$$W_{os} = \text{SalientMap}(\hat{W}_o) \quad (13)$$

$$W_{us} = \text{SalientMap}(\hat{W}_u) \quad (14)$$

$$W_o = [W_{os} / (W_{os} + W_{us} + \epsilon)] \quad (15)$$

$$W_u = [W_{us} / (W_{os} + W_{us} + \epsilon)] \quad (16)$$

为了实现快速显著性检测, 采用 LC (Luminance Contrast) 显著性检测方法^[20], 其计算方法为

$$\text{SalientMap}(I_k) = \sum_{\forall I_i \in I} \| I_k - I_i \| \quad (17)$$

最后, 通过式(18)将校正图像融合起来

$$I_{out} = \frac{(W_o + 1 - W_u) \times R_o + (W_u + 1 - W_o) \times R_u}{2} \quad (18)$$

采用该融合方法, 可以保持各区域的细节, 并抑制融合出现的光晕现象, 使得图像保持良好的视觉效果.

1.4 多尺度处理

为了进一步消除融合可能出现的光晕现象, 使得结果更加符合人眼的视觉特性, 可采用多尺度上方法对

图像进一步处理.多尺度图像的获得可以通过调整 WLS 算法里面的平滑权重 λ , λ 越大,照明分量越平滑,计算得到的反射分量细节增强的越强烈.一般可取 λ 为 0.125、1.0、8.0.最后将多尺度增强的结果加权叠加起来

$$I_{\text{msout}} = \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^s \omega_i I_{\lambda_i} + \omega_0 I \right) \quad (19)$$

式中, k 为归一化因子, $k = \sum_{i=1}^s \omega_i + \omega_0$, s 为尺度数.一般情况下,可取 $\omega_i = \omega_0 = 1$.

2 实验结果

2.1 参数设定与测试环境

本文使用的照片来自于自己拍摄的图片以及论文^[15]中使用的图片.拍摄相机型号为 Canon 40D,曝光时间设为 1 s,ISO 设为 200,光圈 f 数设为 4.5.本文的结果都是由同一组参数得到的,对于欠曝光区域的增强, $\lambda = 1.0, \gamma = 0.6$,对于曝光过度区域的增强, $\lambda = 1.0, \gamma = 0.5$.多尺度处理中,将图像分为三个尺度,分别取 λ 为 0.125、1.0、8.0.

本文的算法运行于 MATLAB R2014a.其结果来自于配置为 Core i5 CPU@3.20 GHz 以及 8 GB RAM 的 PC.

2.2 视觉比较

图3展示了本文方法的处理过程,分别展示过曝光和欠曝光的校正结果,以及融合后的结果.图4展示

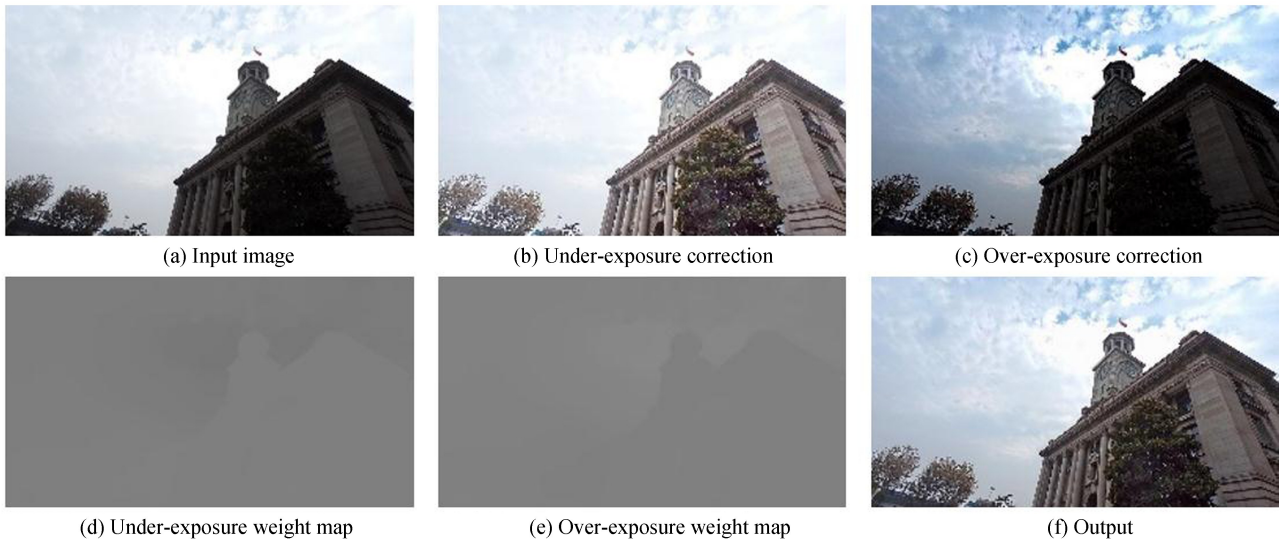


图3 图像曝光校正的处理结果

Fig.3 Results of the proposal





图4 夜景图像曝光校正的处理结果
Fig.4 Results of night scene images

了本文的方法应用于实拍夜景图像的处理结果.可以看出,过曝光校正增强了图像过亮区域的细节,而欠曝光校正增强了图像暗区的细节.融合后的结果细节更加丰富,且不会出现过增强现象.

图5比较了本文提出的方法与直方图均衡化(HE),以及 Yuan^[15]的方法.直方图均衡化不能自适应于各个区域,许多区域细节不能被很好地体现,而本文方法避免了这个问题,视觉效果更加自然.从图6的细节比较可以看出,本文的方法比起 Yuan的方法会还原更加丰富的细节.

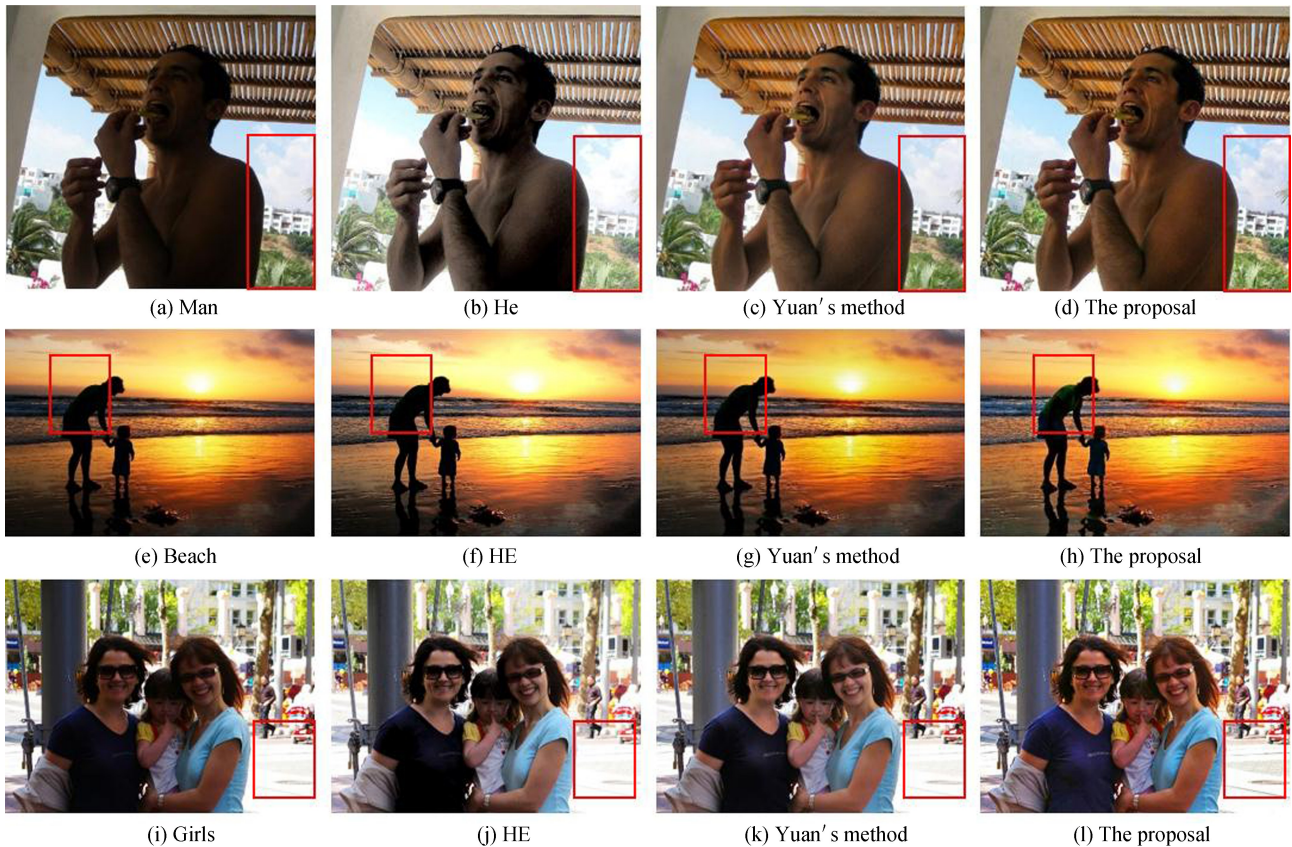


图5 几种方法结果比较
Fig.5 Comparison of results of several methods

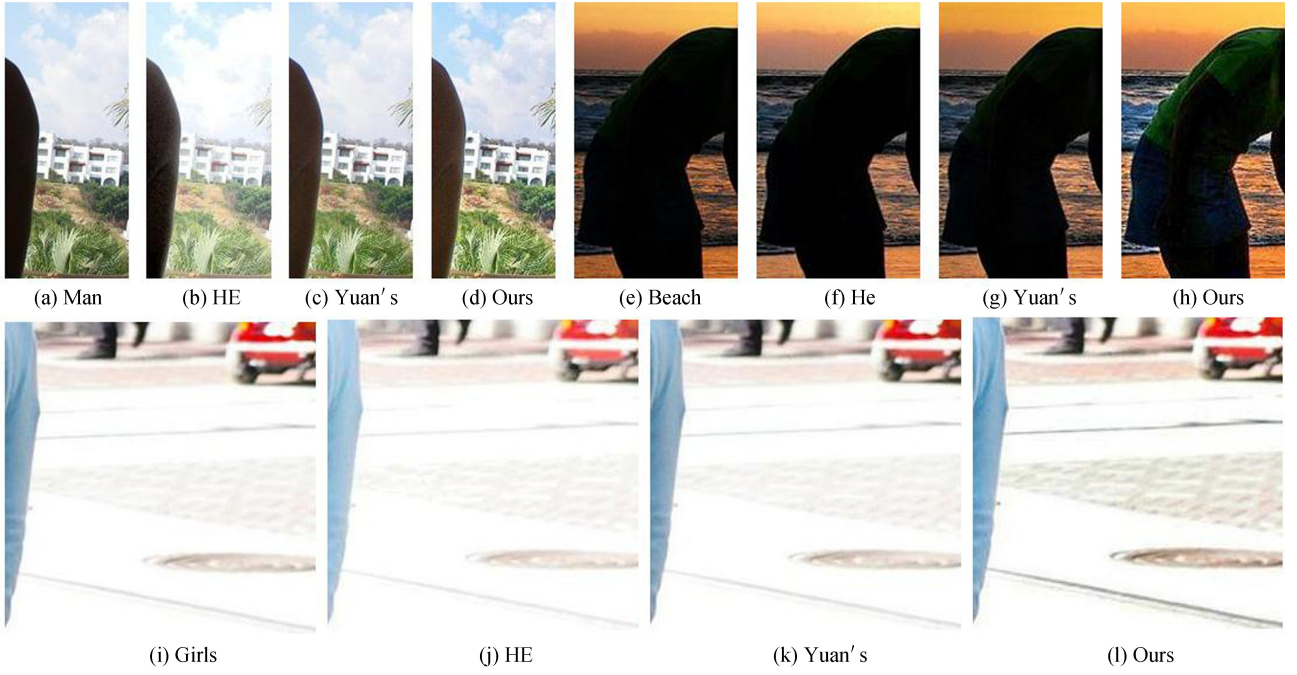


图 6 几种方法细节比较

Fig.6 Detail comparisons of several methods

2.3 评价指标

为了更好地评价结果表现,本文使用两种评价指标来比较不同方法的处理结果,包括图像灰度平均梯度 GMG,和拉普拉斯梯度模 LS.这两者都可以反应图像对细节和纹理的表现程度,也常用于图像锐利度的评价.

2.3.1 图像灰度平均梯度

灰度平均梯度(Gray Mean Grads, GMG)能反应图像纹理变换的特征,值越大表示图像越清晰,其定义为

$$\text{GMG} = \frac{\sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} \frac{1}{4} \sqrt{\left[\frac{I(x,y)}{x} \right]^2 + \left[\frac{\partial I(x,y)}{\partial y} \right]^2}}{(M-1)(N-1)} \quad (20)$$

式中, M 和 N 表示图像 I 的行和列, $\frac{\partial I(x,y)}{\partial x}$, $\frac{\partial I(x,y)}{\partial y}$ 表示在水平和垂直方向的偏导数.

2.3.2 拉普拉斯梯度模 LS

拉普拉斯梯度模 LS 值越大,则像素点附近灰度值变化越大,轮廓越清晰,其定义为

$$\text{LS} = \frac{\sum_{x=2}^{M-1} \sum_{y=2}^{N-1} |L_g * I|}{(M-1)(N-1)} \quad (21)$$

其中, L_g 为拉普拉斯滤波模板,定义为 $\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$, $*$ 表示卷积运算, $|\cdot|$ 表示取模运算符.

用上述评价算子从数值上对几种方法的处理结果比较,比较结果见表 1 和表 2.从两种评价指标的比较结果可以看出,利用本文方法的得到图像细节和纹理的丰富度都要多于直方图均衡化和 Yuan 的方法.

表 1 几种方法 GMG 指标比较

Table 1 Quality comparisons in terms of GMG

Input image	Input	HE	Yuan at Ref.[15]	The proposal
man	0.026 5	0.028 3	0.028 7	0.035 5
beach	0.018 7	0.020 2	0.021 9	0.027 1
girls	0.013 9	0.017 8	0.030 1	0.032 5

表 2 几种方法 LS 指标比较

Table 2 Quality comparisons in terms of LS

Input image	Input	HE	Yuan at Ref.[15]	The proposal
man	0.182 3	0.199 6	0.196 3	0.253 0
beach	0.158 8	0.164 3	0.182 9	0.226 3
girls	0.096 0	0.080 1	0.206 0	0.217 5

2.4 多尺度图像校正结果

图 7 为多尺度图像校正结果,并与单层图像校正结果作对比.多尺度图像校正结果还原的细节更加丰富.表 3 为单尺度与多尺度处理评价指标比较,多尺度图像校正结果普遍高于单尺度图像校正结果.



图 7 单尺度处理结果与多尺度处理结果比较

Fig.7 Comparisons of single-scale results and multi-scale results

表 3 单尺度与多尺度校正结果评价指标比较

Table 3 Quality comparisons of single-scale results and multi-scale results

Input image	GMG of single-scale	GMG of multi-scale	LS of single-scale	LS of multi-scale
principle	0.017 9	0.018 2	0.080 3	0.082 1
building	0.023 8	0.024 5	0.198 1	0.201 5
vendor	0.013 0	0.013 5	0.074 4	0.081 2

虽然多尺度图像校正可以得到更加丰富的细节,但其处理时间会几倍于单尺度图像校正,在对处理时间有限制的条件下,单尺度图像校正可以实现较好的性能.

2.5 其他结果比较

图 8 为本文的算法与基于多张 LDR 融合算法的比较,其中本文的算法对中间曝光图像(即图像(b))进

行了处理.从结果可以看到,虽然本文的算法是基于单张 LDR 图像的增强,但其结果仍然可以显示丰富的细节,其可以与多张图像融合的结果相媲美,并且能保持良好的视觉效果.



图 8 本文算法与多张图像融合算法的比较

Fig.8 Comparisons of proposal and multiple images fusion method

3 结论

提出了一种基于融合的单张 LDR 图像曝光校正的方法,通过对 Retinex 模型的改进与扩展,分别对图像中过曝光与欠曝光区域进行增强,然后基于加权融合的方法得到增强结果.本文的方法对图像中同时存在过曝光与欠曝光区域有很好的处理效果,不仅增强这些区域的细节和对比度,而且保持好的视觉效果.本文对于过曝光与欠曝光区域的校正方法也可以用于只存在过曝光或欠曝光的图像.本文的目的是增强图像过曝光和欠曝光区域的细节,但在增强细节的同时,可能会放大图像的噪声,特别是欠曝光区域的噪声.如何在增强细节的同时抑制噪声,是本文需要进一步改进的方向.

参考文献

- [1] GONZALEZ Z, RAFAEL C, WOOD S, *et al.* Digital image processing[J]. *Prentice Hall International*, 1992, **28**(4): 484-486.
- [2] ZUIDERVELD K. Contrast limited adaptive histogram equalization [M]. *Graphics gems IV*. Academic Press Professional, Inc. 1994: 474-485.
- [3] MASOOD S Z, ZHU Jie-jie, TAPPEN M F. Automatic correction of saturated regions in photographs using cross - channel correlation[J]. *Computer Graphics Forum*, 2009, **28**(7): 1861-1869.
- [4] GUO Dong, CHENG Yuan, ZHUO Shao-jie, *et al.* Correcting over-exposure in photographs[C]. *Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, 2010:515-521.
- [5] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Single image haze removal using dark channel prior[C]. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009, IEEE, 2009:1956-1963.
- [6] LAND E H, MCCANN J J. Lightness and retinex theory[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, **61**(1): 1-11.
- [7] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[M]. IEEE Press, 1997.
- [8] FUNT B V, DREW M S, BROCKINGTON M. Recovering shading from color images[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 1992, **588**(12): 124-132.

-
- [9] DURAND F, DORSEY J. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, **21**(3): 257-266.
- [10] ELAD M. Retinex by two bilateral filters[C]. International Conference on Scale-Space Theories in Computer Vision, Springer, Berlin, Heidelberg, 2005:217-229.
- [11] DONG X, WANG G, PANG Y, *et al.* Fast efficient algorithm for enhancement of low lighting video[C]. IEEE International Conference on Multimedia and Expo. IEEE, 2011:1-1.
- [12] GUO X, LI Y, LING H. LIME: Low-light image enhancement via illumination map estimation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, **26**(2): 982-993.
- [13] FU X, ZENG D, HUANG Y, *et al.* A fusion-based enhancing method for weakly illuminated images[J]. *Signal Processing*, 2016, **129**(C): 82-96.
- [14] HOU Li-kun, JI Hui, SHEN Zuo-wei. Recovering over-/underexposed regions in photographs[J]. *Siam Journal on Imaging Sciences*, 2013, **6**(4): 2213-2235.
- [15] YUAN Lu, SUN Jian. Automatic exposure correction of consumer photographs [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2012, **7575**(1): 771-785.
- [16] REINHARD E, STARK M, SHIRLEY P, *et al.* Photographic tone reproduction for digital images [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, **21**(3): 267-276.
- [17] MERTENS T, KAUTZ J, REETH F V. Exposure fusion[C]. Computer Graphics and Applications, Pacific Conference on IEEE, 2007: 382-390.
- [18] FATTAL R, LISCHINSKI D, WERMAN M. Gradient domain high dynamic range compression [C]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. ACM, 2002, **21**(3): 249-256.
- [19] FARBMAN Z, FATTAL R, LISCHINSKI D, *et al.* Edge-preserving decompositions for multi-scale tone and detail manipulation[C]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. ACM, 2008, **27**(3): 67.
- [20] ZHAI Y, SHAH M. Visual attention detection in video sequences using spatiotemporal cues[C]. Proceedings of the 14th ACM International Conference on Multimedia, ACM, 2006: 815-824.