

## 一种基于多层伽马变换融合的高动态范围图像生成方法

陈小楠<sup>1</sup>, 张淑芳<sup>2\*</sup>, 雷志春<sup>1</sup><sup>1</sup>天津大学微电子学院, 天津 300072;<sup>2</sup>天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

**摘要** 高动态范围(HDR)图像指的是具有更高的能被人眼识别的亮度动态范围的图像,它能够更加全面地展现场景的细节信息。针对单幅低动态范围(LDR)图像,提出一种基于多层伽马变换融合的 HDR 图像生成方法。对 LDR 图像统计特性进行分析,将其分成 4 个亮度等级区域,每个区域自适应生成伽马变换参数;将得到的 4 个伽马变换参数依次作用在原图像上,得到强调不同区域细节信息的 4 幅图像;将 4 幅伽马变换后的图像融合生成 HDR 图像。展示利用本文方法生成的 HDR 图像色调映射结果,并与基于多幅伪曝光图像融合生成 HDR 图像的算法进行对比,结果表明,本文方法所生成的图像具有更高的信息熵,且算法运行时间更短。

**关键词** 图像处理; 高动态范围图像; 伽马变换; 图像融合

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.041014

## High Dynamic Range Image Generation Method by Fusing Multi-Level Gamma-Transformed Images

Chen Xiaonan<sup>1</sup>, Zhang Shufang<sup>2</sup>, Lei Zhichun<sup>1</sup><sup>1</sup> School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;<sup>2</sup> School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** High dynamic range (HDR) images are the images with HDR of lightness that can be recognized by human eyes, which can show more details about scenes. Aimed at one-exposure low dynamic range (LDR) images, we propose an HDR image generation method by fusing multi-level gamma-transformed images. The LDR image is firstly divided into four regions according to its histogram distribution. The Gamma parameter is calculated in each region based on the lightness level. Then, four images with richer details of different regions are generated by multi-level Gamma transform. Finally, they are fused into one HDR image with higher dynamic range and richer details. The tone-mapped HDR images generated by proposed method are compared with those by fusing multiple pseudo-exposure images. The results show that the proposed method has higher entropy and shorter running time.

**Key words** image processing; high dynamic range image; gamma transform; image fusion

**OCIS codes** 100.2000; 100.2980; 100.3010

### 1 引言

高动态范围(HDR)图像是近年来数字图像领域的一项重大突破,相比低动态范围(LDR)图像,它能呈现更接近人眼所能捕捉的动态范围,细节更为丰

富,广泛应用于模式识别、智能交通系统、遥感探测等领域<sup>[1-2]</sup>。随着 HDR 显示器终端设备的产生及普及,对 HDR 图像及视频内容的需求也随之大量增加。获取 HDR 内容的一种重要手段就是利用现有内容资源,将 LDR 图像和视频转化为 HDR 图像及视频。

收稿日期: 2017-09-29; 收到修改稿日期: 2017-10-26

基金项目: 天津市科技支撑计划重点项目(16YFZCGX00760)

作者简介: 陈小楠(1992—),女,硕士研究生,主要从事图像处理、高动态范围图像方面的研究。E-mail: xnchen@tju.edu.cn

导师简介: 雷志春(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事数字多媒体技术、高动态范围图像技术等方面的研究。

E-mail: zelei@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: shufangzhang@tju.edu.cn

针对将单一曝光的 LDR 图像转换为 HDR 图像问题,国内外学者展开了大量研究。主要分为两类。一类是反色调映射算子方法,通过一次性的线性<sup>[3-5]</sup>或非线性函数<sup>[6-8]</sup>对 LDR 图像的亮度范围进行扩展。伽马变换是其中一种采用非线性函数进行扩展的方法,相较于其他反色调映射算子,具有算法复杂度低的优势,并且在 HDR 主观评价实验中获得了较高的评价分数<sup>[9]</sup>。在伽马变换的基础上,Masia 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于图像亮度倾向自动计算伽马参数的方法,可针对不同图像进行相适应的伽马变换,适用于非正常曝光的 LDR 图像。然而这种基于整幅图像亮度倾向的伽马变换,忽略了对亮度极端区域,如过曝光与欠曝光部分的考虑,不能完全呈现图像细节。

另一类方法是在 LDR 图像的基础上生成多幅伪曝光图像,再将其融合生成 HDR 图像。Wang 等<sup>[11]</sup>提出一种基于区域增强的伪曝光图像生成(PMET)方法。该方法基于 S 曲线,根据不同的输入曝光参数便可对原图像进行变换,从而生成多幅具有不同曝光效果的伪曝光图像,区域增强特性使得生成的伪曝光图像展示了原图像中不同区域的细节信息。随后,通过融合算法将这些在多幅伪曝光图像中呈现的细节信息融合到同一幅图像中。这种方法可以由单一曝光 LDR 图像生成具有 HDR 效果的图像,但缺点在于所给出的一组参数并不适应于所有图像,而是需要人为地反复调整一组曝光参

数,才能使融合后的图像具有理想的效果。

为了简化将 LDR 图像转化成 HDR 图像的过程,摆脱对参数设定的依赖,同时达到提高图像动态范围、丰富图像细节的目的,提出一种基于多层伽马变换融合的 HDR 图像生成方法。在伽马变换方法基础上进行改进:通过对图像分区,获取自适应参数,再将伽马变换生成的 4 幅强调不同区域细节信息的图像融合起来生成具有 HDR 效果的图像。本文方法可快速高效地将一幅 LDR 图像转换成 HDR 图像,且能展现更清晰的图像细节,并实现动态范围扩展。更重要的是,本文方法在默认设置基本参数的情况下适应性较强,所需变换的参数在算法实现过程中基于图像内容自动计算获取,可针对不同图像自适应调整参数,从而实现自适应性变换,适用性更广。这对于将大量 LDR 图像资源实时高效转换为 HDR 图像具有重要意义。

## 2 基于多层次伽马变换融合生成 HDR 图像的方法

在先前研究的基础上,针对单一伽马变换在生成 HDR 图像时效果的不足,以及 PMET 算法实现中参数调试的不便,提出一种基于多层伽马变换融合的 HDR 图像生成方法。该方法主要包括三部分:基于图像统计特性的区域划分,多层次细节增强图像的生成,通过曝光融合方法生成 HDR 图像。整体流程如图 1 所示。

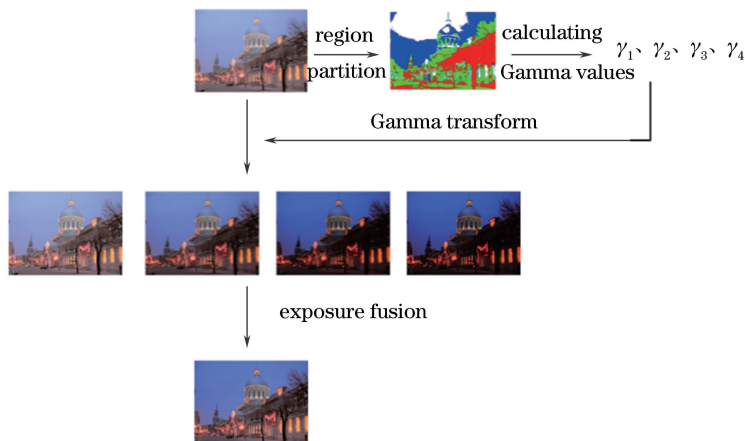


图 1 本文方法生成 HDR 图像的整体流程框图

Fig. 1 Flow chart of HDR image generated by proposed method

### 2.1 基于图像统计特性的区域划分

图像区域划分是图像处理的重要手段,基于图像直方图的阈值分割在图像处理中有着广泛的应用<sup>[12]</sup>。为了有针对性地对不同区域实现细节增强,

使其展现在不同的伽马变换图像中,首先对输入的 LDR 图像进行基于图像统计特性的区域划分。为了充分考虑各亮度层级的情况,根据亮度强弱将图像分为最暗区、暗区、亮区、最亮区。

在一幅图像中,任意亮度值  $i$  出现的次数占图像总像素数的比例为亮度  $i$  的概率,由于通常情况下  $Y$  通道的值更好地反映了像素点的亮度,将  $i$  定义为一幅图像中  $Y$  通道的值,计算公式为

$$p_i = \frac{N_i}{N}, \quad (1)$$

式中  $N_i$  表示整幅图像中亮度为  $i$  的像素个数,  $N$  为图像总的像素数。以  $i$  为上限的累积统计概率为

$$P_i = \sum_{m=0}^i p_m, \quad (2)$$

式中  $p_m$  为亮度值为  $m$  的像素出现的概率。

基于图像  $Y$  通道的直方图分布对原图像进行分区。首先,以图像直方图的中值  $L_{middle}$  作为阈值将图像分成明暗两区域;利用两个区域的中值(分别为  $L_{low}$  和  $L_{high}$ )将图像进一步分成 4 个区域。用来划分区域的 3 个阈值分别对应累积统计概率  $P_{L_{low}}$ 、

$P_{L_{middle}}$ 、 $P_{L_{high}}$ , 3 个亮度阈值只取决于所做分区的图像。为了使每个分区的像素数均匀统一,这里将 3 个层次的累积统计概率分别设为 0.25、0.50 和 0.75。也就是说,在一幅图像中,所有累积统计概率值小于 0.25 的像素被划分为最暗区,0.25~0.50 区间的像素被划分为暗区,0.50~0.75 区间的像素被划分为亮区,而大于 0.75 的像素被划分为最亮区。具体过程如图 2 所示。图 2(a)为原始输入的 LDR 图像;图 2(b)为输入图像的  $Y$  通道亮度分布直方图;图 2(c)为将图 2(b)中的概率累积得到的累积直方图,按照之前设定的 0.25、0.50、0.75,寻找对应的分区亮度阈值,此例中得到的  $L_{low}$ 、 $L_{middle}$ 、 $L_{high}$  分别为 61、109、181,以这 3 个亮度阈值对原图像进行分区;图 2(d)为分区结果,其中,红色部分为最暗区,绿色部分为较暗区,蓝色部分为较亮区,白色部分为最亮区。

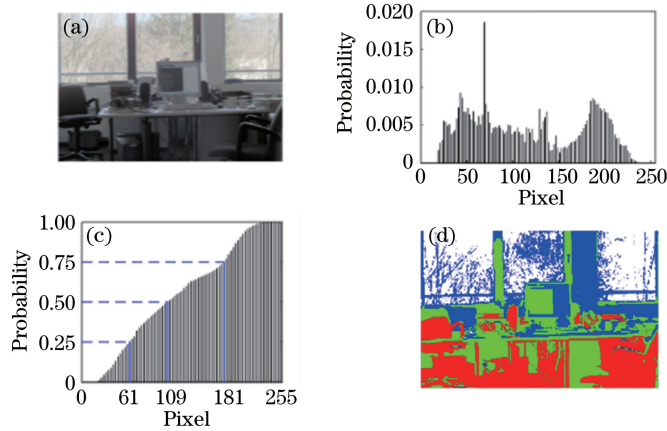


图 2 图像分区过程。(a)原始图像;(b)原始图像的亮度分布直方图;(c)亮度累积概率直方图;(d)亮度等级分区图  
Fig. 2 Partition process of image. (a) Original image; (b) histogram of luminance distribution in original image; (c) histogram of luminance accumulated probability; (d) partition result of luminance grade in original image

## 2.2 基于自适应参数的伽马变换

划分亮度区域之后,须针对每个区域进行亮度扩展,本文采用伽马曲线对原 LDR 图像实现多次伽马变换。实际上,每一次伽马变换相当于有针对性地对某一区域进行扩展与亮度拉伸,每次变换的参数由各区域的亮度倾向指数计算而得。

4 个区域具有不同的亮度水平,设定  $k$  为该区域相对于整幅图像的亮度倾向指数并用其区域亮度。计算公式<sup>[13]</sup>如下:

$$k_{R_i} = \frac{(\ln L_{R_i})_{avg} - \ln L_{min}}{\ln L_{max} - \ln L_{min}}, \quad (3)$$

$$\ln L_{R_i,avg} = \left\{ \sum_{x,y \in R_i} \ln [L(x,y) + \delta] \right\} / N_{R_i}, \quad (4)$$

式中  $L_{min}$  和  $L_{max}$  分别为整幅图像亮度的最小值与最大值,  $\ln L_{R_i,avg}$  表示  $R_i$  区域亮度对数的平均值,  $N_{R_i}$  为图像中  $R_i$  区域的像素总数,  $\delta$  是为了避免因  $L(x,y)$  为 0 时对数值趋于负无穷而设的小数。由此,可分别得到 4 个区域的亮度倾向指数  $k_{R_1}$ 、 $k_{R_2}$ 、 $k_{R_3}$ 、 $k_{R_4}$ 。

Masia 等<sup>[10]</sup>认为,适合图像变换的伽马值与图像场景的整体亮度相关,并呈线性关系:

$$\gamma_i = a \times k_{R_i} + b, \quad (5)$$

式中  $k_{R_i}$  为亮度倾向指数,  $a$ 、 $b$  为线性变换系数。Masia 等<sup>[10]</sup>研究发现,当  $a = 10.44$ 、 $b = -6.282$  时,可以得到最理想的伽马变换值。在(5)式中分别代入 4 个区域的亮度倾向指数,得到 4 个伽马值,分别用于 4 个区域的变换。

分别在  $R$ 、 $G$ 、 $B$  通道进行 4 次伽马变换,对原图像进行扩展,得到 4 幅变换后的图像。具体变换公式如下:

$$R_i = R^{\gamma_i}, \quad (6)$$

$$G_i = G^{\gamma_i}, \quad (7)$$

$$B_i = B^{\gamma_i}, \quad (8)$$

式中  $\gamma_i$  为之前计算得出的第  $i$  个区域的伽马值, $R$ 、 $G$ 、 $B$  分别为原图像中各色度通道像素值。 $R_i$ 、 $G_i$ 、 $B_i$  分别为伽马变换后生成的第  $i$  幅图像的三色度通道像素值。

### 2.3 HDR 图像的融合生成

通过上述操作,由原图像生成了 4 幅分别强调不同区域细节的图像,融合 4 幅图像,生成具有丰富细节信息且动态范围得以扩展的 HDR 图像。具体地:采用经典的曝光融合算法<sup>[14]</sup>,以对比度、饱和度和适度曝光量为 3 个测度因子生成权重图,对 4 幅经不同伽马值变换后的图像进行多分辨率金字塔融合,生成具有 HDR 效果的图像,融合的具体公式如下:

$$R_{ij} = \sum_{k=1}^N \hat{W}_{ij,k} I_{ij,k}, \quad (9)$$

$$\hat{W}_{ij,k} = \left( \sum_{k'=1}^N W_{ij,k'} \right)^{-1} W_{ij,k}. \quad (10)$$

式中  $R_{ij}$  为融合生成的结果图像在  $(i, j)$  位置处的像素值,  $I_{ij,k}$  为第  $k$  幅输入图像对应位置像素值,  $\hat{W}_{ij,k}$  为归一化后的权重值。权重图计算公式为

$$W_{ij,k} = (C_{ij,k}) \omega_C \times (S_{ij,k}) \omega_S \times (E_{ij,k}) \omega_E, \quad (11)$$

$$\omega_C = \omega_S = \omega_E = 1, \quad (12)$$

式中  $C_{ij,k}$ 、 $S_{ij,k}$ 、 $E_{ij,k}$  分别为在第  $k$  幅图像中  $(i, j)$  位置处像素点的对比度、饱和度和适度曝光量,  $\omega_C$ 、 $\omega_S$ 、 $\omega_E$  表示三个测度因子在生成权重图中的影响。本文将三者统一设定为 1,即三个测度因子对生成权重图的影响相同。

## 3 实验结果与分析

以 Wreath Building 图片为例,采用本文方法将其由 LDR 图像转换为 HDR 图像的过程如图 3 所示。图 3(a)为 LDR 原图;图 3(b)为对原图进行亮度分区的结果;图 3(c)~(f)分别为根据 4 个亮度等级计算得到的伽马值进行变换的结果,分别强调了原图中各亮度等级的细节信息;图 3(g)为由图 3(c)~(f)融合得到的 HDR 图像,包含原图像在各亮度等级的细节信息。

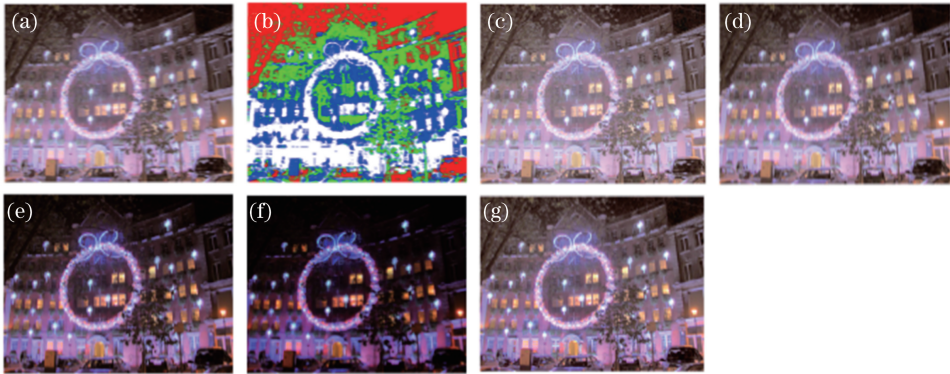


图 3 图像 Wreath Building 由 LDR 生成 HDR 图像的过程。(a)原始图像;(b)原始图像的亮度等级分区图;(c)  $\gamma_1 = 0.7494$  时变换所得的图像;(d)  $\gamma_2 = 1.0000$  时变换所得的图像;(e)  $\gamma_3 = 1.8694$  时变换所得的图像;(f)  $\gamma_4 = 3.1372$  时变换所得的图像;(g)融合生成的 HDR 图像

Fig. 3 Generation process of HDR image from LDR image of Wreath Building. (a) Original image; (b) partition result of luminance grade in original image; (c) Gamma transform result with  $\gamma_1 = 0.7494$ ; (d) Gamma transform result with  $\gamma_2 = 1.0000$ ; (e) Gamma transform result with  $\gamma_3 = 1.8694$ ; (f) Gamma transform result with  $\gamma_4 = 3.1372$ ; (g) HDR image fused by (c), (d), (e) and (f)

将本文算法与 PMET 算法进行对比分析,由两种算法生成的 HDR 图像经色调映射之后的图像如图 4 所示,其中 3 组图像作为样例结果在这里展示。图 4(a)为未经变化的原始 LDR 图像,图 4(b)为通过 PMET 算法生成的 HDR 图像经色调映射后的

图像,图 4(c)为由本文方法生成的 HDR 图像经色调映射后的图像。可以看出:由 PMET 算法所生成的图像中,部分区域过饱和,导致细节不清晰。由本文算法所生成的图像中,原 LDR 图像的细节信息得以更清晰完整地显示。

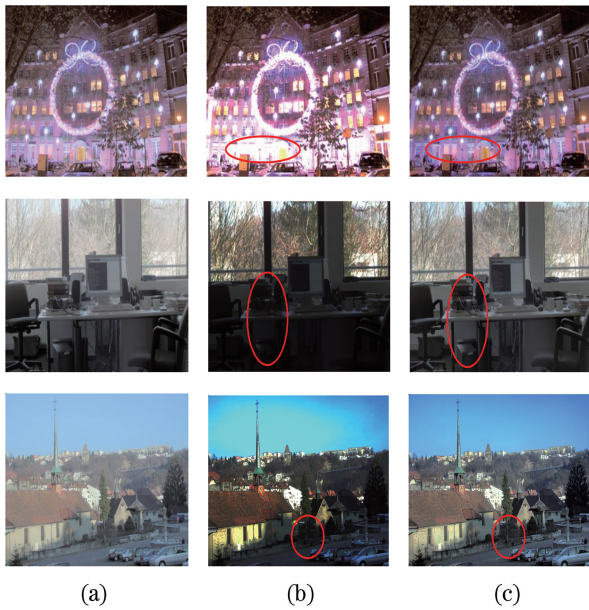


图4 PMET与本文方法生成的HDR图像与原图的对比。(a)原始图像;(b)PMET方法;(c)本文算法

Fig. 4 Comparison of HDR images generated by PMET and proposed method with original images. (a) Original images; (b) PMET method; (c) proposed method

表1 两种方法生成的HDR图像的信息熵

Table 1 Information entropy of HDR images generated by two methods

bit

Algorithm	Wreath	Office	Morning	Clock	Display	Church	Fribourg
PMET method	3.0829	3.0234	2.3555	2.8909	2.5056	2.6300	3.2014
Proposed method	3.2478	3.0423	2.9112	3.0779	3.0378	3.0552	3.3582

表2 两种方法生成的HDR图像的平均梯度

Table 2 Average gradient of HDR images generated by two methods

Algorithm	Wreath	Office	Morning	Clock	Display	Church	Fribourg
PMET method	14.7208	10.7080	20.4957	9.1712	13.7810	7.1773	7.8528
Proposed method	15.1626	11.9420	21.5473	10.9574	14.4642	8.6197	8.1130

表3 两种方法生成的HDR图像与原图像的色彩差

Table 3 Chromatic aberration of HDR images generated by two methods with original images

Algorithm	Wreath	Office	Morning	Clock	Display	Church	Fribourg
PMET method	35.2295	24.1876	20.8443	33.0815	28.4437	27.1942	26.7511
Proposed method	7.3468	9.3206	13.9504	10.1783	5.2490	3.7108	16.6267

对两种算法的运行时间进行实验测试,实验平台为Windows 7系统下的Matlab2014b,计算机配置为4 G内存、i3中央处理器、主频3.40 GHz。两种方法在7

首先采用经典的图像信息熵指标对两组图像进行评价分析,对比数据如表1所示。可以发现,在全部7组对比数据中,由本文方法生成的HDR图像的信息熵均高于由PMET算法生成的HDR图像的信息熵,说明本文算法较PMET算法生成的HDR图像具有更大的信息量和更丰富的细节信息。

图像的平均梯度指的是图像的边界或影线两侧附近灰度变化的明显程度,即图像的灰度变化率,反映了图像微小细节反差变化的速率,一定程度上反映了图像细节的清晰程度。本文采用图像的平均梯度作为评价标准,对两幅图像进行对比实验,结果如表2所示。在7组对比实验中,本文方法生成的图像均比由PMET方法生成的图像具有更大的平均梯度,证明本文方法在展现图像细节方面效果良好。

考虑到伽马变换会引起与原始图像的色彩差,通过实验对比两种算法所产生的色彩差大小。其中,每个点的色彩差为该处变换前后的像素值在LAB空间的距离,对每组图像所有像素点求平均色彩差,统计实验结果如表3所示。可以看出,本文方法生成的图像具有较小的色彩差,与原图更接近。

组图像上的运行时间如表4所示,可以看出,本文算法所需的运行时间约为PMET算法运行所需时间的1/2,说明本文算法在实时性方面具有一定的优势。

表4 两种算法在7组测试图像上的运行时间

Table 4 Time consumption to generate HDR images from seven test LDR images by two methods

s

Algorithm	Wreath	Office	Morning	Clock	Display	Church	Fribourg
PMET method	0.977	0.832	1.023	1.131	0.966	0.946	1.299
Proposed method	0.557	0.482	0.520	0.545	0.554	0.580	0.647

## 4 结 论

提出一种基于多层伽马变换融合生成 HDR 图像的方法。通过对图像不同亮度区域自适应生成伽马变换参数,有针对性地对不同区域进行亮度拉伸与细节增强,最后将各部分融合到一幅图像中,生成具有原图像中各部分区域细节信息的 HDR 图像。本文方法中图像的变换参数不依赖于系统外界输入,根据原图像特征计算而得,具有较好的自适应性,相较于 PMET 算法(需要 3 组输入参数,并且不能适应于所有图像)具有很大优势。将本文方法与 PMET 的结果进行对比发现,本文方法生成的 HDR 图像具有更高的图像信息熵和平均梯度,且算法运行时间约为 PMET 的 1/2,在 LDR 视频实时转换为高动态视频方面具有重要应用价值。

### 参 考 文 献

- [1] Du L, Sun H Y, Wang S, *et al.* High dynamic range image fusion algorithm for moving targets[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0410001.  
都琳, 孙华燕, 王帅, 等. 针对动态目标的高动态范围图像融合算法研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0410001.
- [2] Cui H X, Liu L, Liu C, *et al.* Displacement vector detection method for low altitude dynamic imaging [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0904008.  
崔红霞, 刘丽, 刘畅. 低空动态成像位移矢量探测方法[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0904008.
- [3] Aydin T O, Mantiuk R, Myszkowski K, *et al.* Dynamic range independent image quality assessment [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2008, 27(3): 69.
- [4] Rempel A G, Trentacoste M, Seetzen H, *et al.* Ldr2Hdr: on-the-fly reverse tone mapping of legacy video and photographs [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2007, 26(3): 39.
- [5] Meylan L, Daly S, Süssstrunk S. Tone mapping for high dynamic range displays [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6492(1): 847-850.
- [6] Wang L, Wei L Y, Zhou K, *et al.* High dynamic range image hallucination [C]// *Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques*, Eurographics Association, 2007: 321-326.
- [7] Banterle F, Ledda P, Debattista K, *et al.* Expanding low dynamic range videos for high dynamic range applications [C]// *Proceedings of the 24th Spring Conference on Computer Graphics*, 2008: 33-41.
- [8] Wen H B, Bi D Y, Ma S P, *et al.* Variational retinex algorithm for infrared image enhancement with staircase effect suppression and detail enhancement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0911005.  
温海滨, 毕笃彦, 马时平, 等. 消除阶梯效应与增强细节的变分 Retinex 红外图像增强算法[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0911005.
- [9] Akyüz A O, Fleming R, Riecke B E, *et al.* Do HDR displays support LDR content?: a psychophysical evaluation [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2007, 26(3): 38.
- [10] Masia B, Agustin S, Fleming R W, *et al.* Evaluation of reverse tone mapping through varying exposure conditions [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2009, 28(5): 160.
- [11] Wang T H, Chiu C W, Wu W C, *et al.* Pseudo-multiple-exposure-based tone fusion with local region adjustment [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2015, 17(4): 470-484.
- [12] Nie F Y, Li J Q, Zhang P F, *et al.* A threshold selection method for image segmentation based on Tsallis relative entropy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 071002.  
聂方彦, 李建奇, 张平凤, 等. 一种基于 Tsallis 相对熵的图像分割阈值选取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 071002.
- [13] Akyü A O, Reinhard E. Color appearance in high-dynamic-range imaging [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2006, 15(3): 033001.
- [14] Mertens T, Kautz J, Reeth F V. Exposure Fusion [C]. *Conference on Computer Graphics & Applications*, 2007: 382-390.