

〈图像处理与仿真〉

一种基于双通道 CMOS 相机的低照度动态场景 HDR 融合方法

贺理^{1,2}, 陈果¹, 郭宏¹, 金伟其¹

(1. 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;
2. 91216 部队, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要: 高动态范围成像技术能够全面有效反映场景信息, 有利于在高动态范围场景下获得高质量的成像。但当前常用的基于单台相机的多次曝光融合方法在动态场景下易出现“鬼影”问题, 基于多个传感器同时曝光的系统复杂且价格昂贵, 基于单幅低动态范围图像的拓展方法易丢失欠曝光或过曝光区域的细节信息, 且多用于较好的照明条件。针对低照度动态场景成像, 研究了一种基于双通道低照度 CMOS 相机的高动态范围图像融合方法, 对双通道 CMOS 相机采集低照度动态场景两幅不同曝光图像, 依据累计直方图拓展原则分别进行动态范围拓展, 并采用像素级融合方法对动态范围拓展的序列图像进行融合。实验表明, 动态范围拓展融合方法可满足低照度动态场景下获取高动态范围图像的应用要求, 获得更佳的成像质量。

关键词: 高动态范围图像; 双通道低照度 CMOS 相机; 低照度动态场景; 图像融合

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2020)04-0340-08

A Dynamic Scene HDR Fusion Method Based on Dual-channel Low-light-level CMOS Camera

HE Li^{1,2}, CHEN Guo¹, GUO Hong¹, JIN Weiqi¹

(1. MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. 91216 of PLA, Huludao 125000, China)

Abstract: High dynamic range imaging technology can reflect scene information comprehensively and effectively, which is beneficial for obtaining higher imaging qualities in high dynamic range scenes. However, the classic high dynamic range image fusion method of using a single camera through multiple-exposure fusion tends to result in the “ghost” problem in a dynamic scene, whereas the method of using multiple sensors in a simultaneous exposure system is complicated and expensive. Meanwhile, an extension method based on a single low dynamic range image loses details easily in underexposed or overexposed areas. These methods are often used under better lighting conditions. Hence, a high dynamic range image fusion method based on a dual-channel low-light-level (L^3) CMOS camera is proposed for low illumination dynamic scenes. First, an image acquisition platform built using a dual-channel L^3 CMOS camera is used to collect two images with different exposures for low illumination dynamic scenes. Based on the accumulative histogram, the principle of dynamic range extension is established, and the two images collected by the system are extended. Finally, the pixel level fusion method is used to fuse the sequence images after the dynamic range extension. The results show that the method of dynamic range extension fusion can yield high dynamic range images under L^3 dynamic scenes as well as better imaging quality.

Key words: HDR image, dual-channel low-light-level CMOS camera, L^3 dynamic scene, image fusion

0 引言

现实世界自然场景昼夜光照动态范围高达 $10^8:1$ 以上^[1], 传统的成像和显示器件的动态范围都难以适

收稿日期: 2019-10-31; 修订日期: 2020-03-27.

作者简介: 贺理 (1986-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为光电成像技术。E-mail: 721400850@qq.com.

通信作者: 金伟其 (1961-), 男, 教授, 博士, 主要从事夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器的研究。E-mail: jinwq@bit.edu.cn.

基金项目: 微光夜视技术重点实验室基金 (J20160101)。

应如此大的自然场景光照变化。为此,高动态范围(high dynamic range, HDR)成像和显示技术应运而生,成为当前国内外研究的重要方向。当前,低照度CMOS、电子倍增EMCCD等新型成像器件已延拓到夜间环境,当场景存在局部灯光(如:城市照明光、各类指示灯光、探照灯光等)时,成像系统往往出现“局部饱和”或其他区域曝光不足的所谓“灯下黑”现象,造成较亮及较暗区域的场景细节信息丢失。

HDR图像通常通过两幅或多幅不同曝光光度达到低动态范围(low dynamic range, LDR)图像融合获得。例如使用单台相机通过多次曝光获取多幅同一场景不同曝光度的LDR图像,并通过融合策略获得HDR图像^[2-4],从而捕获HDR场景图像,但这种方法仅适用于静态场景成像,对于动态场景由于分时曝光,融合图像中的运动目标易出现“鬼影”。虽然采用多个成像系统同步采集同一个场景的方法^[5-6]可避免场景目标运动造成的鬼影现象,但相对成本较高,系统体积较大。近年来,通过单一相机在一帧曝光周期内取不同的两个积分时间进行两次采样获得双曝光图像技术得到发展,可避免运动目标的“鬼影”现象,例如长春辰芯公司的GSENSE 400BSI双通道低照度CMOS探测器在单通道输出模式大约具有60dB的动态范围,通过双通道输出则可拓展到90dB的动态范围。另外,也有基于单幅LDR图像延拓出HDR图像的方法研究^[7-9],其通过拓展或增强单幅图像获得成像场景的动态范围提升。例如,2005年Reinhard等^[10]根据人眼视觉细胞响应机理提出了S形映射曲线拓展方法,相比于线性曲线和Gamma曲线,具有增强高光、阴影和重要的中间亮度区域对比度的效果。2015年Wang等^[9]利用反S形映射曲线,将一幅正常曝光的图像转化为模拟的多幅不同曝光度图像,进而通过图像融合从而获得更大的动态范围。这类方法主要针对正常曝光图像的拓展,且设置参数较多,不适用于过度曝光或欠曝光图像的动态范围拓展,且

存在场景较亮或较暗区域的细节丢失严重,生成HDR图像效果低于多曝光图像融合效果的现象;对于不同积分时间图像的HDR融合,传统基于相机响应函数的融合方法需考虑积分时间等参数,生成的HDR图像细节受到图像压缩、色调映射等因素的影响。因此,基于像素级多尺度图像融合方法受到人们关注,传统的多尺度图像融合方法主要有基于图像金字塔的拉普拉斯金字塔(Laplacian pyramid, LP)^[11]、基于小波变换的双树复小波变换(dual-tree complex wavelet transform, DTCWT)^[12]、基于几何学的Curvelet变换(Curvelet transform, CVT)^[13]等方法,这些方法能够较好保留图像的特征信息,但未充分考虑不同曝光图像像素值对融合结果的影响。另一种基于曝光适度评价的融合方法(well-exposedness assessment, WEA)^[14],利用对图像分成 $b \times b$ 大小的分块,试图通过有限次采样分析不同曝光图像像素值的亮暗变化,估算出场景中每个像素值的最佳曝光适度下的像素值,但是这种融合结果受分块尺寸影响较大。

针对上述问题,本文利用基于GSENSE 400BSI双通道低照度CMOS相机,研究利用简化的反S形映射曲线拓展夜间场景成像动态范围,并在充分考虑不同曝光图像像素值对融合结果影响的前提下采用多尺度图像融合的方法,以在低照度动态场景下获取更佳的HDR成像质量。

1 双通道低照度CMOS相机及其成像

1.1 双通道低照度CMOS相机

基于长光辰芯光电技术有限公司GSENSE 400BSI低照度CMOS器件,实验研制了双通道低照度CMOS相机(如图1),在HDR模式下可同时采集多种场景不同曝光级数下的双通道图像。相机探测器规模 2048×2048 ,帧频24fps,单通道图像动态范围60dB。表1给出了探测器各曝光级数对应的增益倍数。

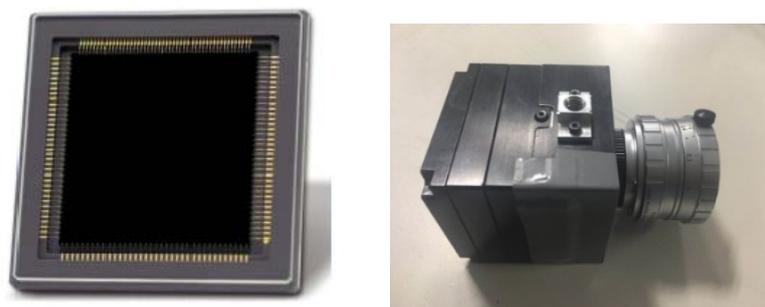


图1 GSENSE 400BSI探测器(左)及研制的双通道低照度CMOS相机(右)

Fig.1 The GSENSE 400BSI detector(left) and the developed dual-channel low-light-level CMOS camera(right)

表1 各曝光级数对应的增益倍数

Table 1 Gain multiples for each exposure level

Level 0	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Level 6	Level 7
0.66x	1.85x	2.49x	3.68x	1.29x	3.70x	4.95x	7.25x

1.2 双通道曝光图像的选取

通常,相机需进行曝光光圈、曝光时间、ISO等参数设置。本文双通道低照度CMOS相机的曝光参数可简化为曝光时间,图像像素灰度值取决于相机入射光能量 E 与曝光时间 Δt 的乘积:

$$B=f(E \cdot \Delta t) \quad (1)$$

式中: B 为图像像素灰度值; f 为相机响应函数(camera response function, CRF)。

假定成像系统具有 $n+1$ 级曝光级数并以增量曝光方式排序,分别定义 E_i^{\min} 和 E_i^{\max} 为曝光级数为 i 时,成像系统最低和最高可获取的场景光辐射度。场景中任何光辐射度高于 E_i^{\max} 的区域将记为过曝光区,任何光辐射度低于 E_i^{\min} 的区域将记为欠曝光区。相机在曝光级数 i 时可获取光辐射度范围 $\varepsilon_i=(E_i^{\min}, E_i^{\max})$ 。图2是曝光级数 i 时的相机响应曲线,其中纵坐标表示相机获得的像素值(8位),横坐标表示相机拍摄的场景光辐射度。

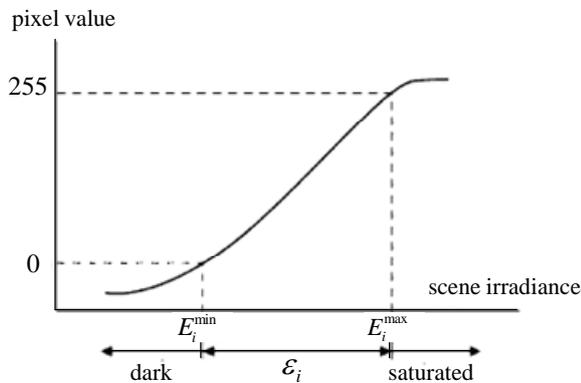


图2 曝光级数 i 时相机CRF

Fig.2 The CRF on exposure level i

图3给出实验用相机各个曝光增益编号对应可获取的光辐射度范围,可以看出:与文献[15]不同,GSENSE 400BSI的增益编号与增益倍数不是单调的;在帧曝光周期内增益倍数越大,传感器积分时间越长,能够捕获更暗区域细节信息,反之增益倍数小可获取场景中更亮区域细节信息。因此,对于低照度HDR场景成像应用背景,为了最大限度获取场景的较亮区域和较暗区域的场景细节,减少冗余信息,选择低照度高动态场景选取0级和7级曝光级数作为HDR融合图像源,即曝光级数0级获取场景的较亮区域细

节信息,曝光级数7级获取场景的较暗区域细节信息。

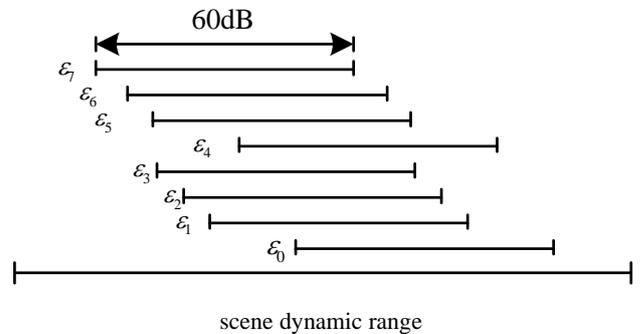


图3 相机各曝光级数对应的动态范围

Fig.3 The dynamic range corresponding to each exposure level of the camera

2 双通道低照度CMOS相机HDR融合方法

2.1 双通道曝光图像动态范围的拓展

Wang等^[9]对一幅曝光图像采用了反S形映射曲线方程进行变换,引入了多个变换参数。本文借鉴反S形映射拓展成像范围的思想,并进一步对映射处理的图像引入反Gamma校正增强和制定动态范围拓展原则,由低照度CMOS相机输出的两幅LDR图像进行自适应动态范围拓展,实现低照度HDR成像。

简化的反S形映射曲线方程变换:

$$B_w(i, j) = \begin{cases} \frac{\eta \cdot B(i, j)}{1 - B(i, j)} & \text{当 } B(i, j) < 1 \\ \eta \cdot B_{smax} & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

式中: B_w 为生成的扩展图像的像素值; $B(i, j)$ 为输入图像在像素 (i, j) 处的归一化像素值; η 为控制生成拓展图像平均像素值水平因子; B_{smax} 是常数,实验中被设置为382.5。

引入图像拓展程度系数 k , $k=1$ 时定义为输入图像拓展的初始图像,上拓展时 $k=2,3 \dots$;下拓展时 $k=1/2, 1/3 \dots$ 。并通过对实际图像实验,定义了图像拓展系数 k 与调整参数 η 的关系近似为 $\eta=0.2k$ 。图4给出不同拓展系数 k 时的图像映射曲线图。可以看出:简化的反S形曲线能保持中间范围像素值的条件下,对两端欠曝光区域和过曝光区域的动态范围进行有效的拉伸。

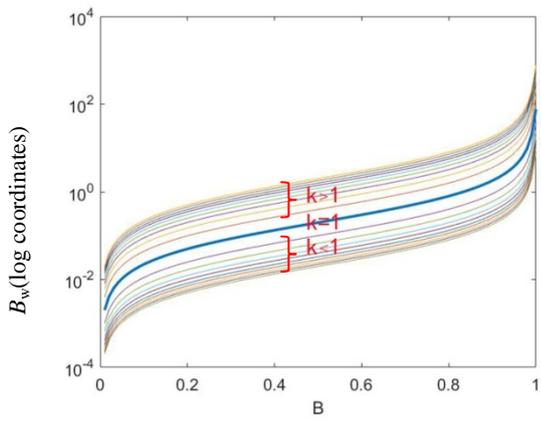


图4 不同 k 值对应的简化反 S 形曲线图

Fig.4 The simplified inverse s-shaped curves corresponding to different k values

使用式(2)分别对采集的双通道图像进行动态范围拓展: 对高曝光图像采用上拓展 (Up, 模拟增加曝光时间), 对低曝光图像采用下拓展 (Down, 模拟减少曝光时间), 得到曝光度由高到低的图像序列, 依次定义为图像 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 。为了确保拓展图像与输入图像像素值处于同一数量级, 且能够最大限度模拟不同曝光程度的图像效果, 对经过简化的反 S 形映射处理图像使用反 Gamma 校正 ($\gamma=2.2$)。以单台相机通过多次曝光获取 LDR 图像序列为例 (如图 5 所示), 图像依据曝光度由高到低编号为 1#, 4#, 将 2# 和 3# 图像假设作为双通道采集图像 T_2 和 T_3 , 分别应用反 S 形映射对图像两端欠曝光区域和过曝光区域的动态范围进行拉伸, 然后使用反 Gamma 校正规范像素值范围, 确保处理图像能够在 8 bit 显示器有效显示。

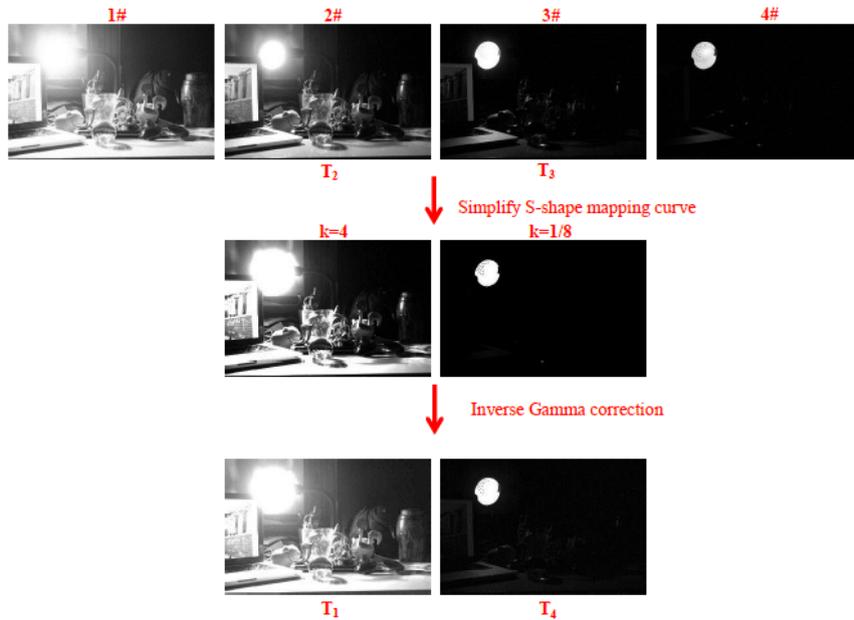


图5 动态范围拓展流程

Fig.5 Dynamic range expansion process

通过双通道图像动态范围拓展方法, 获得的 $T_1 \sim T_4$ 的模拟不同曝光图像序列与原曝光图像序列直观对比效果较为一致, 说明了方法对图像动态范围拓展的有效性, 获得的图像不仅符合增加/降低探测器积分时间的规律, 更符合以往构建多曝光图像序列的经验, 同时引入噪声少, 有利于后续图像的融合。对于实验平台采集的图像, 为了合理确定拓展系数 k , 在输入图像中按直方图分布设置 4 个区域 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 , 分别用图像总像素数的 0.25、0.50、0.75 作为图像分块像素值, 分别为 $B_{0.25}$ 、 $B_{0.50}$ 、 $B_{0.75}$, 如图 6 所示。

设像素值 z 的像素数为 n_z , z 出现的概率为:

$$p_z = n_z / n \quad (3)$$

式中: n 为一幅图像的总像素数。

以 z 为上限的累计概率为:

$$pr_z = \sum_{i=0}^z p_i \quad (4)$$

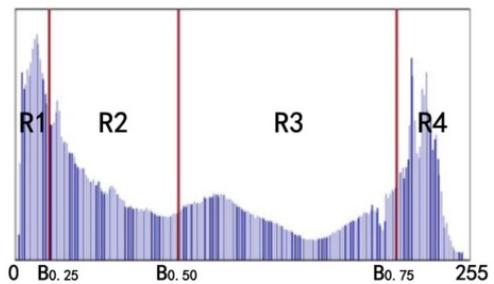


图6 依据直方图分块方法

Fig.6 Histogram segmentation method

可以看出, 这 3 个划分像素值对应 3 个累计概率 pr_{low} 、 pr_{middle} 、 pr_{max} 。如果 pr_z 小于 pr_{low} , 则这些像素位于 R_1 区域; 如果 pr_z 大于 pr_{low} , 小于 pr_{middle} , 则这

些像素位于 R2 区域;如果 pr_z 大于 pr_{middle} , 小于 pr_{max} , 则这些像素位于 R3 区域; 如果 pr_z 大于 pr_{max} , 则这些像素位于 R4 区域。拓展原则为: 图像 T_1 相对于图像 T_2 在 R1 区域像素数比值不大于 0.1, 图像 T_4 相对于图像 T_3 在 R4 区域的像素数比值不大于 0.1, 通过取最优值的方法确定图像拓展系数 k 值, 进而得到所需要的动态范围拓展图像。

2.2 动态范围拓展后图像融合

选择图像 T_3 作为基准图像, 按上节方法划定 R1、R2、R3、R4 四块作用于新的图像序列, 分别使用高斯模型估算出最佳曝光适度下的像素值, 然后利用权重函数得到各图像的权重, 最终使用拉普拉斯金字塔的多分辨率方法融合图像。

高斯模型为:

$$G_{R_i, T_i}(i, j) = \exp\left[-\frac{(B_{R_i, T_i}(i, j) - B_{T_i}^{med})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

式中: G_{R_i, T_i} 为使用高斯模型计算得到的 T_i 图像 R_i 分块像素值的高斯分布; B_{R_i, T_i} 为 T_i 图像 R_i 分块像素值;

$B_{T_i}^{med}$ 为 T_i 图像的中值像素值。各中值像素值为:

$$B_{T_i}^{med} = \arg \max\left(\frac{N_{G_{R_i, T_i} \geq 0.9}}{N_{R_i, T_i}}\right) \quad (6)$$

式中: N 为满足条件的像素数。为保证较理想的人眼视觉感受像素值取值应在 0.5 附近, 估算的最佳曝光适度下的像素值取 0.5 与中值像素值的加权和:

$$u_{T_i} = (1 - \beta) \times 0.5 + \beta \times B_{T_i}^{med} \quad (7)$$

式中: u_{T_i} 代表 T_i 图像的最佳曝光适度下的像素值; β 为权重平衡参数, 实验中取值 0.5。最终得到 T_i 图像融合权重:

$$W_{T_i}(i, j) = \exp\left(-\frac{(B_{T_i}(i, j) - u_{T_i})^2}{u_{T_i}^2}\right) \quad (8)$$

对图像权重进行归一化:

$$\hat{W}_{T_i}(i, j) = W_{T_i}(i, j) / \sum_{i=1}^4 W_{T_i}(i, j) \quad (9)$$

将动态范围拓展后的 4 幅图像分别进行拉普拉斯金字塔分解, 将式(9)得到的 4 幅权重图进行高斯金字塔分解, 分别得到不同分辨率的图像和权重图。记图像 T_i 的第 l 层拉普拉斯金字塔分解为 $L\{T_i\}^l$, 记权重 \hat{W}_{T_i} 的第 l 层高斯金字塔分解为 $G\{\hat{W}_{T_i}\}^l$, 得到融合式:

$$L\{R(i, j)\}^l = \sum_{i=1}^4 G\{\hat{W}_{T_i}(i, j)\}^l L\{B_{T_i}(i, j)\}^l \quad (10)$$

最后, 将金字塔 $L\{R\}^l$ 进行拉普拉斯逆变换, 得到最终的 HDR 融合图像 R 。

3 拓展与融合成像实验及其结果分析

双通道 CMOS 相机对室内低照度高动态场景(1# 场景) 在各曝光级数的图像如图 7 所示。实验环境照度标注在曝光级数为 7 级的图像上(下同)。对选用曝光级数 0 级和曝光级数 7 级增益图像, 使用本文的动态范围拓展方法进行处理。

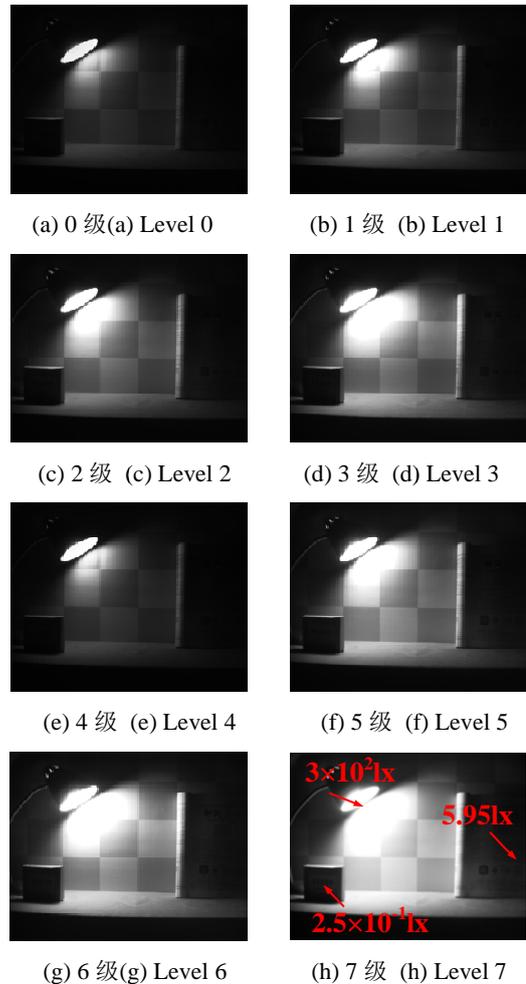
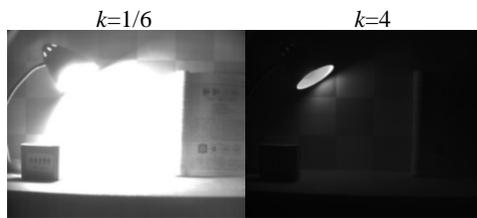


图7 1#场景采集各曝光级数图像

Fig.7 Eight exposure level images in scene 1#

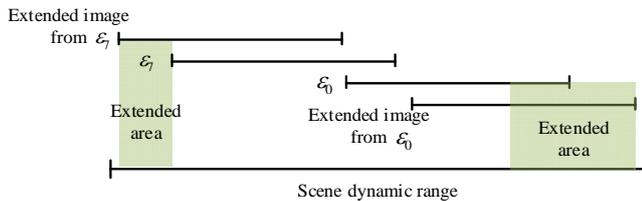
如图 8(a)所示, 分别为对场景 1 双通道采集图像动态范围上拓展和下拓展处理图像, 拓展系数 k 分别为 4 和 1/6。为了说明动态范围拓展效果, 使用累计直方图估计曝光时间倍率的方法^[16], 取像素值映射曲线在像素值 0 处的斜率, 分别估算出动态拓展图像相对于原图像的曝光积分时间倍率为 2.01 和 1/2.40。本文简化曝光参数为积分时间一个参数, 根据多曝光高动态范围成像原理, 得到动态范围拓展后各个曝光级数可捕获光辐射度范围的关系如图 8(b)所示, 该方法可以对采集的双通道图像的动态范围起到明显拓展作用, 降低了因基于两幅 LDR 图像生成 HDR 图像带来动态范围偏低的影响。

相同的方法分别获得 2#~6#场景的双通道图像及其拓展图像, 2#场景在暗室中使用 LED 台灯作为高亮目标, 3#场景在室外利用路灯、灯字牌作为高亮目标, 4#场景在室外将屋内照明作为高亮目标, 5#场景在室外利用白炽灯作为高亮目标, 6#场景在室外利用路灯、车灯作为高亮目标, 如图 9 所示。为了验证该实验平台的 HDR 成像特点, 避免因多次曝光图像融合造成“鬼影”问题, 3#~6#场景是对动态场景采集图像。图中前两列是利用实验平台采集的曝光级数 0 级和 7 级的图像, 后两列是对双通道图像动态范围拓展后获得的图像。各场景的拓展系数及估算曝光倍率见表 2。



(a) 双通道图像动态范围拓展

(a) Dynamic range extension of dual-channel images



(b) 动态范围拓展后可捕获光辐射度范围

(b) The captured range after dynamic range extending

图 8 场景 1#采集图像动态范围拓展

Fig.8 Dynamic range expansion of images in scene 1#

对双通道图像动态范围拓展后分别使用 LP 法、CVT 法、WEA 法和本文方法进行的融合结果如图 10 所示。相比于图 9 的双通道图像可以看出: 融合算法得到的 HDR 图像在较亮和较暗区域的细节信息可见性提升明显, 这说明图像动态范围拓展是有意义的; LP 法和 CVT 法因采用多尺度融合策略, 能较好保留图像中细节特征, 但未充分考虑不同曝光图像中像素值对融合结果的影响, 最终融合效果不太理想; WEA 法通过曝光适度评价确定各曝光图像融合权重, 但因采用单分辨率融合策略, 在低照度场景下对过曝光区域效果不理想; 本文方法在通过曝光适度评价确定各曝光图像融合权重的同时, 采用多尺度拉普拉斯金字塔融合策略, 较好保证了欠曝光区域和过曝光区域的成像效果。

实验表明: 对双通道图像动态范围拓展, 能够降低因基于两幅 LDR 图像融合带来动态范围偏小的影

响, 本文融合方法能够更好地凸显过曝光和欠曝光区域的细节信息, 使图像视觉效果更加自然。

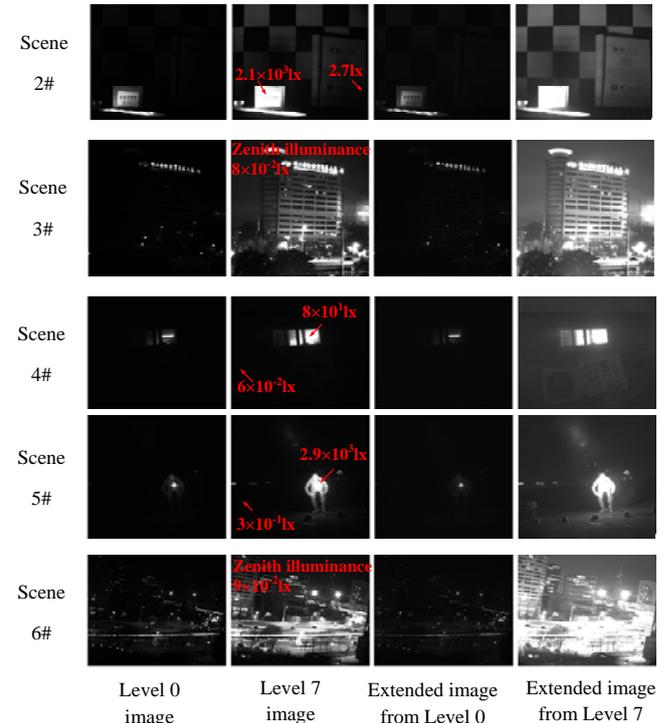


图 9 各场景图像采集及拓展

Fig.9 Images acquisition and expansion

表 2 各场景的拓展系数 k 及估算曝光倍率

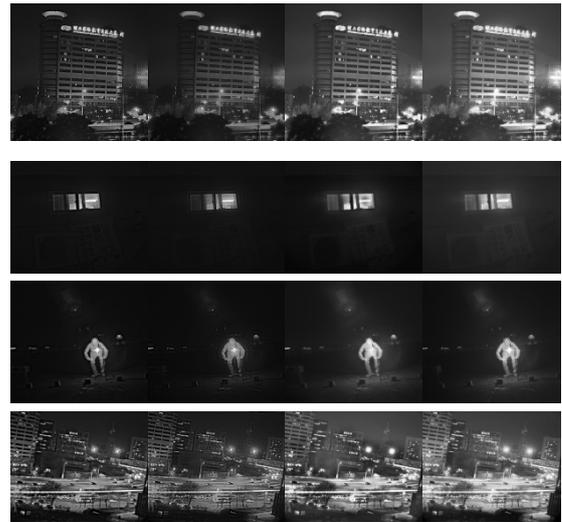
Table 2 The expansion ratio k and estimated exposure ratio of each scene

Scene	Up-extending		Down-extending	
	k	Estimate	k	Estimate
2#	6	2.32	1/4	1/1.91
3#	4	1.90	1/5	1/2.22
4#	7	2.83	1/5	1/2.06
5#	4	2.16	1/5	1/2.01
6#	7	2.85	1/7	1/1.92

在客观评价方面, 对各场景图像融合结果分别采用均值、信息熵和边缘相关融合质量指数 Q , QW , QE (The fusion quality index, The weighted fusion quality index, The edge-dependent fusion quality index) 进行的评价结果如表 3 所示 (各指标中最优数值用黑体标出)。均值反映图像亮度的平均水平^[17], 数值越大, 图像亮度平均水平越大; 图像信息熵反映图像包含的平均信息量^[17], 即图像灰度分布的聚集特征; 边缘相关融合质量指数是将结构相似理论引出图像融合质量评价所提出的 3 项评价指标^[18]。从表 3 可以看出, 本文方法在像素均值和信息熵方面占有较大优势, 在边缘相关融合质量方面数值指标较为接近。

4 结论

针对当前使用单台相机多次曝光和基于单幅LDR图像获取HDR图像存在的问题,本文基于GSENSE400 BSI型号传感器提出使用两幅不同曝光量图像的场景高动态范围图像融合方法。考虑两幅图像仅能捕获场景有限的动态范围,通过对图像虚拟曝光进一步拓展图像的动态范围。除此之外,本文在图像融合时,通过估算最佳曝光适度下的像素值生成权重图,并采用多分辨率的金字塔分解方式,使得生成的HDR图像效果更好,能够较好解决低照度动态场景中HDR图像融合问题。



(a) LP法 (b) CVT法 (c) WEA法 (d) 本文方法
(a)LP method(b)CVT method(c)WEA method (d)Proposed method

图10 各场景HDR图像融合结果
Fig.10 HDR image fusion results of each scene

表3 融合结果评价指标 Table 3 Evaluation of fusion result

Scene	Method	Mean	Comentropy	Q	QW	QE
1#	LP method	73.65	7.18	0.42	0.82	0.30
	CVT method	73.53	7.14	0.38	0.76	0.26
	WEA method	95.76	7.31	0.35	0.83	0.33
	Proposed method	104.95	7.42	0.44	0.79	0.34
2#	LP method	34.95	6.28	0.27	0.82	0.45
	CVT method	34.88	6.17	0.24	0.79	0.39
	WEA method	59.58	6.83	0.32	0.81	0.44
	Proposed method	73.65	6.79	0.32	0.80	0.43
3#	LP method	43.51	6.33	0.63	0.81	0.34
	CVT method	43.50	6.24	0.59	0.76	0.28
	WEA method	75.79	6.82	0.76	0.82	0.35
	Proposed method	94.28	6.93	0.76	0.81	0.38
4#	LP method	20.15	4.10	0.09	0.83	0.36
	CVT method	20.14	4.14	0.08	0.80	0.33
	WEA method	23.52	5.20	0.10	0.87	0.36
	Proposed method	42.14	5.33	0.09	0.79	0.35
5#	LP method	19.01	4.44	0.18	0.80	0.35
	CVT method	18.99	4.46	0.17	0.75	0.30
	WEA method	35.11	5.57	0.22	0.81	0.34
	Proposed method	35.53	5.55	0.23	0.81	0.35
6#	LP method	60.50	7.18	0.52	0.83	0.49
	CVT method	60.61	7.14	0.49	0.81	0.42
	WEA method	88.53	7.19	0.59	0.81	0.50
	Proposed method	122.50	7.61	0.56	0.78	0.46

参考文献:

- [1] 章卫祥, 周秉锋. 一个稳健的用于HDR图像的相机响应函数标定算法[J]. 计算机学报, 2006, 29(4): 658-663.
ZHANG Weixiang, ZHOU Bingfeng. A robust HDR image calibration algorithm for camera response function[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2006, 29(4): 658-663.
- [2] Mann S. On Being 'Undigital' with digital cameras: extending dynamic range by combining differently exposed pictures[C]//*Is & t's Conference*, 1995: 442-448.
- [3] Debevec P E, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs[C]//*Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1997: 369-378.
- [4] Mitsunaga T, Nayar S K. Radiometric Self Calibration[C]//*IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1999: 374-380.
- [5] Ikeda E. Image data processing apparatus for processing combined image signals in order to extend dynamic range: US, US 5801773 A[P]. 1998.
- [6] Aggarwal M, Ahuja N. Split aperture imaging for high dynamic range[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 58(1): 7-17.
- [7] Banterle F, Ledda P, Debatista K, et al. A framework for inverse tone mapping[J]. *Visual Computer*, 2007, 23(7): 467-478.
- [8] 朱恩弘, 张红英, 吴亚东, 等. 单幅图像的高动态范围图像生成方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(10): 1713-1722.
ZHU Enhong, ZHANG Hongying, WU Yadong, et al. Method of generating high dynamic range image from a single image[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(10): 1713-1722.
- [9] WANG T H, Chiu C W, WU W C, et al. Pseudo-multiple- exposure-based tone fusion with local region adjustment[J]. *IEEE Trans. on Multimedia*, 2015, 17(4): 470-484.
- [10] Reinhard E, Kunkel T, Marion Y, et al. Display algorithms for high and low dynamic range display devices[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2012, 15(12): 997-1014.
- [11] Barakat N, Hone A N, Darcie T E. Minimal-bracketing sets for high-dynamic-range image capture[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2008, 17(10): 1864-1875.
- [12] WANG W, CHANG F. A multi-focus image fusion method based on laplacianpyramid[J]. *Journal of Computers*, 2011, 6(12): 2559-2566.
- [13] Hill P R, Canagarajah C N, Bull D R. Image Fusion Using Complex Wavelets[C]//*BMVC*, 2002: 1-10.
- [14] Nencini F, Garzelli A, Baronti S, et al. Remote sensing image fusion using the curvelettransform[J]. *Information Fusion*, 2007, 8(2): 143-156.
- [15] 江燊煜, 陈阔, 徐之海, 等. 基于曝光适度评价的多曝光图像融合方法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2015, 49(3): 470-475.
JIANG Shenyu, CHEN Kuo, XU Zhihai, et al. Multi-exposure image fusion based on well-exposedness assessment[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2015, 49(3): 470-475.
- [16] Grossberg M D, Nayar S K. Determining the camera response from images: what is knowable?[J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(11): 1455-1467.
- [17] 阳方林, 郭红阳, 杨风暴. 像素级图像融合效果的评价方法研究[J]. 测试技术学报, 2002(4): 44-47.
YANG Fanglin, GUO Hongyang, YANG Fengbao. Study of evaluation methods on effect of pixel-level image fusion[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2002(4): 44-47.
- [18] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [19] Grossberg M D, Nayar S K. Determining the camera response from images: what is knowable?[J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(11): 1455-1467.
- [20] 阳方林, 郭红阳, 杨风暴. 像素级图像融合效果的评价方法研究[J]. 测试技术学报, 2002(4): 44-47.
- [21] YANG Fanglin, GUO Hongyang, YANG Fengbao. Study of evaluation methods on effect of pixel-level image fusion[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2002(4): 44-47.
- [22] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [23] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [24] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [25] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [26] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [27] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [28] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [29] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [30] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [31] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [32] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [33] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [34] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [35] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [36] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [37] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [38] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [39] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [40] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [41] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [42] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [43] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [44] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [45] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [46] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [47] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [48] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [49] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [50] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [51] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [52] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [53] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [54] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [55] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [56] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [57] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [58] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [59] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [60] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [61] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [62] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [63] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [64] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [65] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [66] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [67] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [68] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [69] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [70] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [71] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [72] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [73] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [74] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [75] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [76] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [77] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [78] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [79] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [80] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [81] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [82] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [83] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [84] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [85] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [86] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [87] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [88] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [89] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [90] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [91] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [92] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [93] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [94] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [95] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [96] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [97] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [98] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [99] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.
- [100] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]//*International Conference on Image Processing of IEEE*, 2003, 3: 173-176.

(上接第339页)

- [4] ITU-T and ISO/IEC, ISO/IEC23008-2(HEVC). High efficiency video coding[S]. International Organization for Standardization, 2015.
- [5] 商世广, 桂新翔. 基于重归一化的 CABAC 算法改进[J]. 信息技术, 2018(9): 66-70.
SHANG Shiguang, GUI Xinxiang. Improvement of CABAC algorithm based on renormalization[J]. *Information Technology*, 2018(9): 66-70.
- [6] ZHOU D, ZHOU J, FEI W, et al. Ultra-high-throughput VLSI architecture of H.265/HEVC CABAC encoder for UHD TV applications[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2015, 25(3): 497-507.
- [7] 郭斌, 王维东, 叶青青, 等. 基于概率估计更新的 CABAC 加速算法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(2): 281-285.
GUO Bin, WANG Weidong, YE Qingqing, et al. A CABAC accelerating algorithm based on probability estimation update[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(2): 281-285.
- [8] CHEN C, LIU K, CHEN S. High-throughput Binary Arithmetic Encoder architecture for CABAC in H.265/HEVC[C]//*IEEE International Conference on Solid-state & Integrated Circuit Technology*, 2017: DOI: 10.1109/ICSICT.2016.7998755.
- [9] 郭勇, 王桂海, 范益波, 等. 基于 HEVC 标准的全高清 CABAC 编码器设计[J]. 电视技术, 2014, 38(9): 71-74.
GUO Yong, WANG Guihai, FAN Yibo, et al. High definition CABAC encoder design based on HEVC[J]. *Video Engineering*, 2014, 38(9): 71-74.
- [10] 赵文钰. 基于高级综合的 CABAC 的 VLSI 设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
ZHAO Wenyu. VLSI Design of CABAC Based on High-level Synthesis[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.