







为了更好地实现增强图像,我们在其基础上提出了一种改进的卡方分布函数,即:

$$f(x) = \begin{cases} 2^{\frac{x}{2}} \cdot x^{\left(\frac{a}{2}-1\right)} \cdot e^{-\frac{x}{2}}, & x > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $a$  表示在  $x > 0$  情况下的模型参数. 因为在模型中将带入曝光率  $k$  的值, 且  $k > 0$ , 因此我们主要考虑  $x > 0$  的情况.

3) 通过将曝光率映射  $K(x)$  替换该函数的自变量并结合输入图像来构成改进的卡方分布函数模型. 再对参数  $a$  进行调节来获得两幅特征不同的衍生图, 即:

$$R_o(x) = 2^{\frac{K(x)}{2}} \cdot \left(\frac{K(x)}{2}\right)^{\left(\frac{a}{2}-1\right)} \cdot e^{-\frac{K(x)}{2}} \cdot R_i(x) \quad (7)$$

## 4 衍生图融合框架

近年来, 利用基于金字塔融合的方法<sup>[17]</sup>来对低亮度图像进行亮度增强, 将权值与输入图像相乘求和得到的融合效果并不理想. 当控制权值映射不正确时, 生成的融合图像容易出现亮度和结构畸变. 由于图像中纹理细节较多的区域处于低曝光或高曝光状态时, 图像中一些重要的信息无法观察和分析. 针对上述问题, 我们通过选择边缘检测<sup>[18]</sup>、对比度拉伸<sup>[19]</sup>和亮度评估来设计一种新的权重映射来进行融合增强.

### 4.1 权值映射设计

构造权值映射通过 3 种度量方法. 1) 边缘检测. 边缘检测中的 Canny 算子是最有效的边缘检测算法. Canny 边缘检测算法不是简单的模板卷积, 而是利用梯度方向和双阈值方法检测边缘点. 2) 对比度拉伸. 对比度拉伸通过采用分段线性变换函数来扩展图像灰度

$$R^l(x, y) = \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^7 L \left\{ 2^{\frac{K(x)}{2}} \cdot \left(\frac{K(x)}{2}\right)^{\frac{a}{2}-1} \cdot e^{-\frac{K(x)}{4}} \cdot R_k(x, y) \right\}^l \times G \{ W'_k(x, y) \}^l \quad (10)$$

其中,  $l$  表示金字塔序列的层数, 它的值设置为 7,  $k$  表示融合图像的数量,  $k$  的值为 2.

最终的融合图像  $R_{\text{final}}$  通过以下操作实现, 即:

$$R_{\text{final}}(x, y) = \sum_{l=7}^1 R^l(x, y) + U_d(R^l(x, y)) \quad (11)$$

其中,  $U_d$  表示带有系数为  $d = 2^{l-1}$  的上采样操作. 本文算法结构如图 2 所示.

## 5 实验结果分析

为了验证本文方法的有效性和获取更好的感知视

觉的动态范围. 从对比度拉伸图像中可以看出, 亮度明亮区域的对比度拉伸较宽, 亮度暗区域的对比度拉伸较窄. 3) 亮度评估. 亮度评估操作可以有效地进行局部平滑, 对增强图像中亮度过亮或过暗的区域及其周围进行评估, 从而减少亮度恢复异常.

通过对衍生图进行边缘检测  $W_{ED}(x, y)$ 、对比度拉伸  $W_{CS}(x, y)$  和亮度评估  $W_{BE}(x, y)$  的观察和分析, 发现各个指标可分别观察到亮度增强图像中的不同细节成分. 结合金字塔融合增强理论, 将 3 个测量指标相乘得到图像融合参数, 即图像融合的权值映射:

$$W(x, y) = W_{ED}(x, y) \times W_{CS}(x, y) \times W_{BE}(x, y) \quad (8)$$

然后对图像融合的权值映射 ( $N=2$ ) 标准化, 即:

$$W'_k(x, y) = \left[ \sum_{k=1}^N W_k(x, y) \right]^{-1} \cdot W_k(x, y) \quad (9)$$

利用上述权值映射, 在图像融合过程中可有效对过曝光区域进行低权值分配, 并对低亮度区域进行高权值分配. 为了解决在融合过程中由于图像亮度差异导致的融合结果不自然的问题, 我们引入金字塔融合来获取更好的融合图像, 以有效减少融合过程中局部连接处变形、信息丢失等异常局部区域.

### 4.2 改进的金字塔融合

首先, 将两幅亮度增强的衍生图放于拉普拉斯金字塔中, 提取图像特征, 并分解成不同分辨率的多尺度金字塔图像序列. 序列的区域大小依次改变为前一层图像大小的 1/4. 然后, 将优化后的标准权值映射分解为高斯金字塔序列  $G\{W'_k(x, y)\}^{[20]}$ , 再将其与拉普拉斯金字塔的多尺度图像  $L\left(2^{\frac{K(x)}{2}} \cdot \left(\frac{K(x)}{2}\right)^{\frac{a}{2}-1} \cdot e^{-\frac{K(x)}{4}} \cdot R_k(x, y)\right)^l$  平滑组合得金字塔融合序列  $R^l(x, y)$ , 表达式如下:

觉效果, 本文使用了 6 种近几年提出的亮度增强算法: 多尺度 Retinex (Multiscale Retinex, MSRRCR) 算法、基于去雾增强技术 (Dehazing-based, Dong) 算法、保留图像自然性增强技术 (Naturalness Preserved Enhancement, NPE) 算法、多偏差融合 (Multi-deviation Fusion, MF) 算法、同时使用反射和照明评估 (Simultaneous Reflection and Illumination Estimation, SRIE) 算法和基于亮度评估增强 (illumination estimation-based method, LIME) 算法作为实验对比算法. 同时分别计算 3 组客观评价指标: 视觉信息保真度 (Visual Information

Fidelity, VIF)、亮度误差 (Lightness Order Error, LOE) 以及图像互信息 (Mutual Information, MI) 来对融合图像质量进行评估. 对于视觉信息保真度和图像互信息, 值越大, 表明融合效果越好; 而对于亮度误差, 值越小,

表明效果越好. 选取低亮度图像 Tower 和 Plaza 为实验数据集, 其中, 图 3 和图 4 为源图像与不同算法实验结果对比. 实验环境为: Windows 10, Intel Corel CPU 3.00 GHz, RAM16 GB, Matlab R2015b.

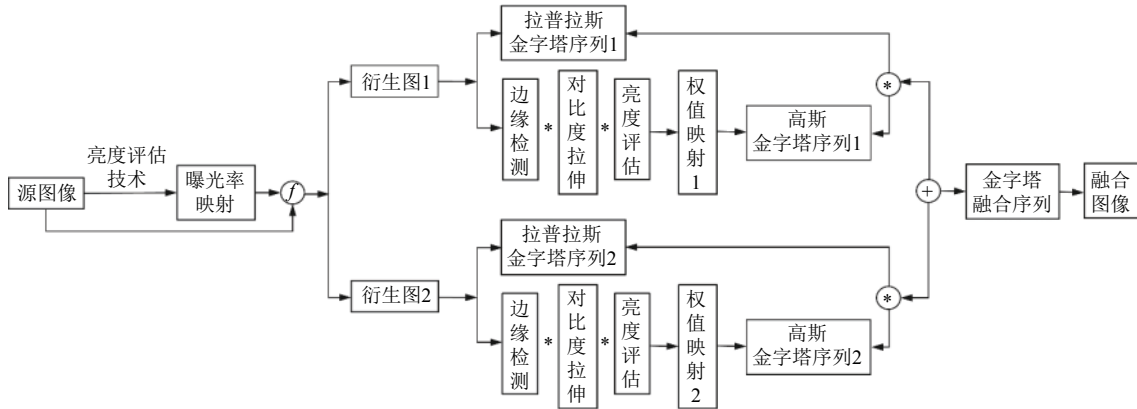


图 2 本文算法流程

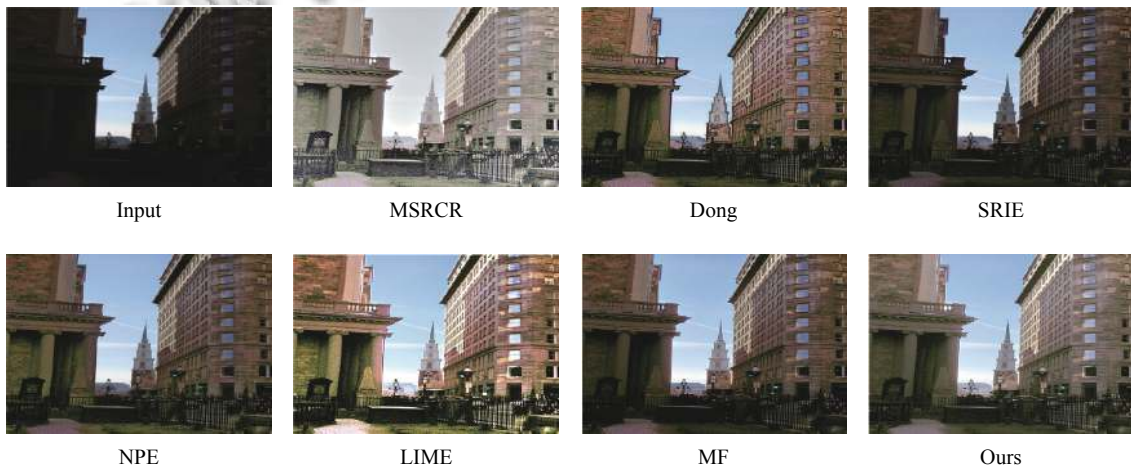


图 3 Tower 增强对比实验结果



图 4 Plaza 增强对比实验结果

在表 1 所示的客观评价指标数值中, 本文方法在 LOE 和 MI 两项指标上, 全部优于近年来的新方法. 虽然从表 1 中获得的 VIF 指标不是最高的, 但是通过观察实验图像可得, 本文方法获得的增强图像已经可以获得很好的视觉信息. 并且结合数据和实验图像发现, 如方法 LIME, 当 VIF 值越大时, LOE 值伴随着也会增大, 观察该方法获得的增强图像发生了亮度失真.

在本测试中, 我们首先使用带有局部曝光率映射

的非线性函数对低光图像进行适当的亮度增强. 当本文方法中参数  $a$  的值满足一定条件时, 函数值随自变量的增大而先增大后减小. 因此, 采用该方法合理地增强低亮度区域亮度和抑制高亮度区域亮度. 然后对该像素值周围亮度分布进行评估, 并根据曝光率映射进行准确的亮度增强. 由于亮度增强方法导致整体视觉效果不理想, 因此通过调整融合参数, 得到了具有不同优良特征信息的两幅衍生图.

表 1 Tower 和 Plaza 的增强图像客观评价指标

数据集	算法指标	MSRCR	Dong	SRIE	NPE	LIME	MF	本文算法
Tower	VIF	2.731 03	2.196 86	1.666 18	1.655 02	4.106 31	1.575 07	1.761 60
	LOE	1601.68	830.56	677.58	1011.12	1177.81	339.23	172.89
	MI	1.116	1.759	1.759	1.636	1.540	2.080	2.344
Plaza	VIF	3.036 233	1.912 90	1.662 44	2.074 37	4.454 27	2.077 49	2.244 62
	LOE	1422.59	721.41	683.27	1050.24	622.77	339.12	32.34
	MI	0.967	1.432	1.398	1.219	1.440	1.698	1.986

在融合过程中, 我们设计了权值映射来整合两幅衍生图的优良特征. 在权值映射设计中, 我们加入了对比度拉伸来增强融合结果的前景和背景区域的局部对比度. 同时, 为了避免融合结果的边缘噪声对图像造成严重的噪声, 我们在权值映射中加入了边缘检测来进行优化. 为了更好的评价和调整融合后图像的亮度分布, 我们在权值映射中加入了亮度评估, 使融合后的图像更具有自然性. 最后, 采用改进的权值映射的金字塔融合方法, 得到的融合图像能够更好地突出图像细节, 使整体图像在视觉上更具有自然性并且信息失真更少.

## 6 结语

本文针对金字塔融合方法提出一种有效恢复图像亮度和保留图像自然性的基于亮度评估技术的特征增强衍生图融合算法. 首先对低亮度图像像素值使用亮度评估技术, 结合 Retinex 理论和大脑皮层调节原理, 得到曝光率映射. 然后引进了基于改进的卡方分布函数模型对单一低亮度图像进行亮度与细节的增强, 从而获得两幅不同特征性能的衍生图来进行图像融合. 最后通过改进的金字塔融合方法来获得清晰的融合图像. 实验结果表明, 通过结合图像的自然性, 细节恢复程度, 亮度扭曲情况考虑, 获得的融合图像在图像边缘和轮廓细节得到了较好的保留, 其融合效果在视觉感知方面优于其他现有的几种方法, 这意味着本文图像融合算法具有可行性和一定的优越性.

## 参考文献

- 1 刘栋, 周冬明, 聂仁灿, 等. NSCT 域内结合相位一致性激励 PCNN 的多聚焦图像融合. 计算机应用, 2018, 38(10): 3006–3012. [doi: 10.11772/j.issn.1001-9081.2018040885]
- 2 Parihar AS, Singh K. A study on Retinex based method for image enhancement. 2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control. Coimbatore, India. 2018. 619–624. [doi: 10.1109/icisc.2018.8398874]
- 3 Brainard DH, Wandell BA. Analysis of the Retinex theory of color vision. Journal of the Optical Society of America A, 1986, 3(10): 1651–1661. [doi: 10.1364/josaa.3.001651]
- 4 Jobson DJ, Rahman Z, Woodell GA. A multiscale Retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965–976. [doi: 10.1109/83.597272]
- 5 Petro AB, Sbert C, Morel JM. Multiscale Retinex. Image Processing on Line, 2014, 4: 71–88. [doi: 10.5201/ipol.2014.107]
- 6 Dong X, Pang Y, Wen J. Fast efficient algorithm for enhancement of low lighting video. ACM SIGGRAPH 2010 Posters. Los Angeles, CA, USA. 2010. 1–6. [doi: 10.1145/1836845.1836920]
- 7 Fu XY, Zeng DL, Huang Y, et al. A weighted variational model for simultaneous reflectance and illumination estimation. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas, NV, USA. 2016. 2782–2790. [doi: 10.1109/CVPR.2016.304]
- 8 Wang SH, Zheng J, Hu HM, et al. Naturalness preserved enhancement algorithm for non-uniform illumination images.

- IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(9): 3538–3548. [doi: [10.1109/TIP.2013.2261309](https://doi.org/10.1109/TIP.2013.2261309)]
- 9 Guo XJ, Li Y, Ling HB. LIME: Low-light image enhancement via illumination map estimation. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(2): 982–993. [doi: [10.1109/TIP.2016.2639450](https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2639450)]
- 10 Fu XY, Zeng DL, Huang Y, *et al.* A fusion-based enhancing method for weakly illuminated images. Signal Processing, 2016, 129: 82–96. [doi: [10.1016/j.sigpro.2016.05.031](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.05.031)]
- 11 华顺刚, 王丽丹, 欧宗瑛. 基于多幅不同曝光量照片的场景高动态范围图像合成. 大连理工大学学报, 2007, 47(5): 678–682.
- 12 Land EH. The Retinex theory of color vision. Scientific American, 1977, 237(6): 108–128. [doi: [10.1038/scientificamerican1277-108](https://doi.org/10.1038/scientificamerican1277-108)]
- 13 熊昌镇, 车满强, 王润玲. 基于稀疏卷积特征和相关滤波的实时视觉跟踪算法. 计算机应用, 2018, 38(8): 2175–2179.
- 14 杨兴东, 邵保刚, 吴亚娟. 矩阵 Frobenius 范数不等式. 高等学校计算数学学报, 2009, 31(1): 42–49. [doi: [10.3969/j.issn.1000-081X.2009.01.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-081X.2009.01.005)]
- 15 Mei Z, Kai J, Wang S, *et al.* Color retinal image enhancement based on luminosity and contrast adjustment. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2018, 65(3): 521–527. [doi: [10.1109/TBME.2017.2700627](https://doi.org/10.1109/TBME.2017.2700627)]
- 16 陈刚, 王梦婕. 卡方分布密度函数与分布函数的渐近展开. 南京师大学报(自然科学版), 2014, 37(3): 39–43. [doi: [10.3969/j.issn.1001-4616.2014.03.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4616.2014.03.007)]
- 17 江铁, 朱桂斌, 孙奥. 基于金字塔变换的多曝光图像融合. 计算机技术与发展, 2013, 23(1): 95–98.
- 18 Wang H, Gao CH, Xie XX, *et al.* Study on edge detection method of aluminum foil image. 2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control. Dalian, China. 2017. 1008–1010. [doi: [10.1109/iccsec.2017.8447027](https://doi.org/10.1109/iccsec.2017.8447027)]
- 19 王琳, 毕笃彦, 李晓辉, 等. 基于负修正和对比度拉伸的快速去雾算法. 计算机应用, 2016, 36(4): 1106–1110. [doi: [10.3969/j.issn.1001-3695.2016.04.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3695.2016.04.032)]
- 20 刘军, 白雪. 基于梯度方向直方图与高斯金字塔的车牌模糊汉字识别方法. 计算机应用, 2016, 36(2): 586–590. [doi: [10.3969/j.issn.1001-3695.2016.02.061](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3695.2016.02.061)]