

文章编号: 1002-2082 (2020) 02-0309-09

基于图像分割和局部亮度调整的 微光图像颜色传递算法

辛 浪¹, 刘 钧¹, 袁 渊²

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 为提高微光夜视图像质量, 提出一种基于图像分割和局部亮度调整的颜色传递算法。用简单线性迭代聚类结合 K 均值聚类对微光图像进行分割, 在 YCbCr 颜色空间中利用子区域与参考图像每一个像素点上亮度的一致性, 将匹配参考图像的颜色分量传递到目标图像的子区域, 以目标图像纹理特征中对比度的值作为系数, 调整目标图像子区域的亮度值, 进行颜色空间转换并显示颜色传递结果。搭建了微光图像成像系统, 进行了微光图像分割及完成了微光图像的颜色传递。结果表明, 改进的分割算法将图像中不同的景物分割出来, 得到的彩色微光图像的峰值信噪均值达到 12.048 dB, 比 Welsh 算法平均提高 2.63 dB。

关键词: 图像处理; 颜色传递; 超像素分割; 亮度值映射; 纹理特征

中图分类号: TN223

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202041.0202004](https://doi.org/10.5768/JAO202041.0202004)

Low-light image color transfer algorithm based on image segmentation and local brightness adjustment

XIN Lang¹, LIU Jun¹, YUAN Yuan²

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to improve the quality of low-light night vision images, a color transfer algorithm based on image segmentation and local brightness adjustment was proposed. The simple linear iterative clustering was combined with K-means clustering to segment the low-light image, and the color component of matching reference image was transmitted to the sub-region of target image by using the uniformity for the brightness of each sub-region and reference image in the YCbCr color space. The contrast value in the texture feature of the target image was taken as the coefficient to adjust the brightness value of the sub-region of the target image, perform the color space conversion and display the color transfer results. A low-light image imaging system was built, and the low-light image segmentation and color transfer were completed. The results show that the improved segmentation algorithm separates different scenes in the image, and the peak signal-to-noise mean of the obtained color low-light image reaches 12.048 dB, which is 2.63 dB higher than the Welsh algorithm.

Key words: image processing; color transfer; super pixel segmentation; brightness value mapping; texture features

收稿日期: 2019-11-14; 修回日期: 2020-01-16

基金项目: 微光夜视技术重点实验室基金 (61424120503xx)

作者简介: 辛浪 (1993-), 女, 硕士生, 主要从事微光夜视图像处理方面的研究。Email: guinashixinlang@126.com

导师简介: 刘钧 (1964-), 女, 教授, 硕士, 主要从事光学设计理论与光电仪器设计方面的研究。Email: junliu1990@163.com

引言

微光夜视图像的彩色显示技术,可以使得夜视系统获取高质量的图像,提高其分辨目标的能力,增大作用范围^[1-2]。彩色夜视技术能提高夜间的观察能力且抗干扰能力强,因此不论在理论还是实际应用上,彩色夜视技术的发展均得到人们的广泛关注^[3-4]。Reinhard在2001年基于Ruderman的 $la\beta$ 颜色空间,提出了一种利用目标图像与参考图像的统计特征进行线性变换,将参考图像的色彩颜色迁移至目标图像的算法,该算法是两幅彩色图像之间的颜色传递^[5]。Welsh等在Reinhard基础上进行了算法的改进,将彩色图像的色彩传递到灰度图像,此算法是利用图像中每一点像素的邻域亮度均值和标准差来对比灰度图像和彩色图像之间的像素以实现,该算法运行效率慢,局部细节处赋色效果不佳^[6]。许真等^[7]提出建立纹理特征库的色彩纹理传递算法,建立Gabor滤波器提取的纹理特征库^[8]和灰度共生矩阵的纹理特征库,先利用纹理特征分割图像,再用微光图像和参考图像纹理融合套印进行颜色传递。仲红玉等^[9]提出由参考图像列数和亮度共同决定的参数对目标图像进行像素匹配,将彩色图像的颜色传递到目标图像上。Arbelot等^[10]提出了使用基于区域协方差引入边缘感知纹理描述,进行颜色转换。Li等^[11]采用了一种使用图形双拉普拉斯方法进行图像着色,用双二次曲面矩阵及其相应的归一化双拉普拉斯矩阵的特征值分析亮度、色调与饱和度相关联的3个色彩通道进行颜色传递,传递后的图像色彩纹理清晰,传递过程需要手动上色。

本文提出了一种基于图像分割和局部亮度调整的颜色传递算法:通过采用简单线性迭代聚类法^[12-14]和K-means均值聚类法^[15-16]对微光夜视图像进行聚类分割,结合参考图像,将分割后的目标图像用亮度值重映射的方法进行色度传递,再根据纹理沟壑调整亮度值,对目标图像进行彩色传递。

1 相关理论

1.1 图像纹理特征

微光图像为弱纹理图像,纹理细节不清,灰度共生矩阵定义为像素对的联合分布概率,是一个对称矩阵,它不仅反映图像灰度在相邻方向、相邻间隔、变化幅度的综合信息^[17],也反映了相同灰度

级像素之间的位置分布特征,是计算纹理特征的基础。用条件概率计算图像相邻像素灰度的空间相关特性,得到共生矩阵,在已有共生矩阵的基础上计算14种灰度共生矩阵的纹理特征向量^[18]。将图像的灰度级量化成16级,计算距离 $d=1$;角度取 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向的灰度共生矩阵^[19]。计算其灰度共生矩阵的4个相关性较低且描述能力强的参数^[20]:

1) 对比度(Con),图像的清晰度和纹理沟纹深浅的程度,纹理沟纹越深,其对比度越大,看起来越清晰。

$$Con = \sum_i \sum_j (i-j)^2 p(i,j) \quad (1)$$

2) 能量(J),图像灰度分布的均匀程度和纹理粗细度,能量值大表明当前纹理是一种规则变化较为稳定的纹理。

$$J = \sum_i \sum_j p^2(i,j) \quad (2)$$

3) 相关(Cor),衡量灰度共生矩阵元素在行或列方向上的相似性,值的大小反应了局部灰度相关性,值越大,相关性也越大。

$$Cor = \frac{\sum_i \sum_j ij p(i,j) - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3)$$

4) 熵(Sh),图像中纹理的复杂程度或非均匀度,熵值表明了图像灰度分布的复杂程度,熵值越大,图像越复杂。

$$Sh = - \sum_i \sum_j p(i,j) \log[p(i,j)] \quad (4)$$

式中: (i,j) 为像素点; $p(i,j)$ 为每一个像素点对应的灰度值; μ_x 、 μ_y 分别是 p_x 、 p_y 的均值; σ_x 、 σ_y 分别是 p_x 、 p_y 的标准差; p_x 为灰度共生矩阵每一行的元素和所组成的数组,公式可表示为 $p_x = [p_{x1} \ p_{x2} \ \cdots \ p_{xj} \ \cdots]^T$, $p_{xj} = \sum_j p(i,j)$, p_y 为灰度共生矩阵每一列的元素和所组成的数组,公式可表示为 $p_y = [p_{1y} \ p_{2y} \ \cdots \ p_{iy} \ \cdots]$, $p_{iy} = \sum_i p(i,j)$ 。

1.2 多参数亮度重映射算法

用图像中每一点像素的邻域亮度均值和标准差对比灰度图像和彩色图像之间的像素来实现多参数亮度重映射算法。选取与目标图像有相似特征的参考图像,两幅图片从RGB颜色空间转至YCbCr颜色空间,将彩色图像的亮度值按照目标图像的亮度结合统计特征做线性变换,使其亮度

值动态范围一致。在亮度通道上对每个像素进行匹配,匹配到与彩色图像上相近的像素点时将色彩信息(通道)传递给目标图像对应的像素点,保留目标图像本身的亮度信息,进行颜色空间逆变换得到结果图。参考图像进行亮度对比传递的公式如下:

$$L = (l_s - \mu_s) \times \frac{D_t}{D_s} + \mu_t \quad (5)$$

式中: L 为变换后新的彩色参考图像中像素点亮度值; l_s 为彩色参考图像 l 通道中某一点的亮度值; μ_s 和 μ_t 分别是彩色参考图像和灰度目标图像所有像素点的亮度均值; D_s 和 D_t 为彩色参考图像和灰度目标图像。

2 本文算法

本文算法包含以下要点: 1) 分割后的子目标图像纹理特征与参考图纹理特征值在相同范围内; 2) 按照每一像素点子目标图像的亮度值与参考值匹配, 将亮度一致的像素点颜色进行传递; 3) 微光图像大多细节不清, 为保证色彩传递后纹理细节不消失, 将微光图像的亮度用灰度共生矩阵的对比度的值重新调整系数, 最终得到一幅具有真实场景的颜色与纹理的彩色图片。算法思路框图如图 1 所示。

2.1 图像分割

利用简单线性迭代聚类(SLIC)算法进行分割预处理, 分割原理是将一幅图像以 K 个初始聚类中心为核心, 根据距离产生大小近似相等的超像素小图块, 图块中心的间隔近似为 $S = \sqrt{N/K}$, 在其中进行采样, 对图像像素进行局部聚类。其中 N 为像素数, K 为超像素数。

改进 K-means 均值聚类算法, 基于灰度图像的亮度均值、方差与对比梯度将超像素图块作为一

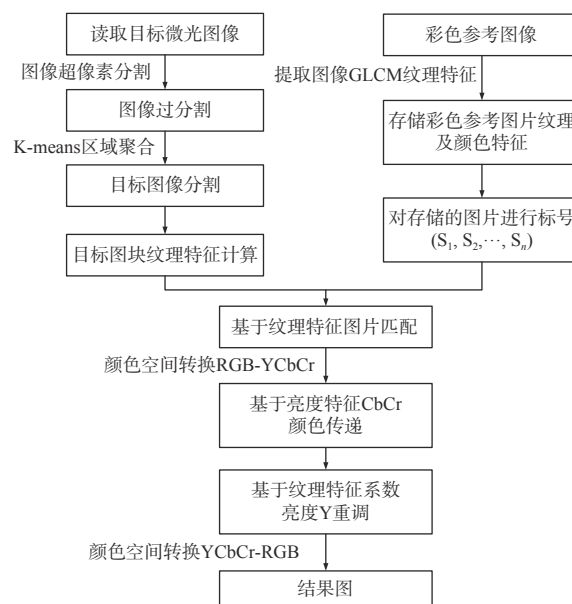


图 1 算法思路总体框图

Fig. 1 Overall block diagram of algorithm

个整体对其进行超像素合并。亮度均值表明在某一处的图像的平均灰度, 同一物体在同一条件(光照、时间、场景相同)下亮度变化不大, 所以拍摄的微光图像中同样的景物亮度均值相似。方差表示超像素图块中每一个像素点与均值的差, 其中方差越大, 其差越大, 在超像素图块中灰度变化越大, 场景变化也就越明显。对比梯度指一个像素点四连通邻域内的点的变化幅度, 其值越大, 周围明暗对比越明显。对已经分割成超像素的图片进行 K-means 聚类, 依照其每一超像素图块的均值 \bar{x} 、方差 Var 及四连通区域对比梯度 $Grad$ 。

$$\bar{x} = \sum_{k=1}^n x_k / n \quad (6)$$

$$Var = \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 / n \quad (7)$$

$$x_{grad} = \frac{x_{(i,j)} + (x_{(i-1,j)} - x_{(i,j)})^2 + (x_{(i+1,j)} - x_{(i,j)})^2 + (x_{(i,j-1)} - x_{(i,j)})^2 + (x_{(i,j+1)} - x_{(i,j)})^2}{5} \quad (8)$$

$$Grad = \sum_{k=1}^n x_{grad} / n \quad (9)$$

式中: x_{grad} 为每一像素点的对比梯度; (i, j) 为像素点; k 为变量; n 为每一个超像素范围内包含的像素点个数; $x(i, j)$ 为每一个像素点对应的灰度值。分割流程如下:

1) 读取预分割微光图片;

2) 选取超像素的个数 K , 在图像内均匀分配聚类中心;

3) 在每个聚类中心的邻域 $2S \times 2S$ 范围内, 利用距离为每个像素点聚类, 得到超像素尺寸大小近似为 $S \times S$, 图像分为 K 个超像素的图像;

4) 把每一个超像素图块看做是一个整体, 再

根据图像重新定义聚类中心,依照其每一超像素部分的均值、方差及对比梯度,对已经分割成超像素的图片重新进行全局 K-means 聚类;

5) 通过不断迭代收敛,至每个超像素聚类中心不再发生变化为止,图像根据景物特点分割出不同场景;

6) 将不连续的超像素、尺寸过小的超像素重

新分配给最邻近的聚类中心,遍历所有的像素点分配给相应的聚类中心,直到遍历完毕为止。

图 2(a) 为 K-means 均值聚类分割时在整幅图像中寻找聚类点,图 2(b) 为超像素分割时在聚类中心邻域 $2S \times 2S$ 范围内寻找聚类点,图 2(c) 为用 K-means 均值聚类法将已分割超像素点进行聚类。

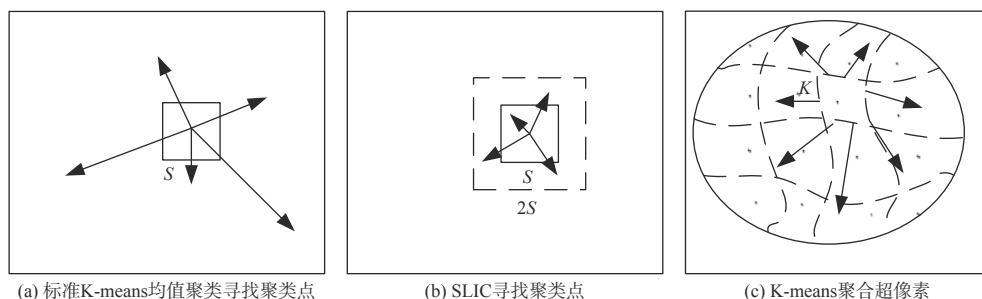


图 2 图像分割

Fig. 2 Image segmentation

2.2 参考图像纹理统计信息

在全局算法的理论基础之上,基于已分割好的图像块,对不同景物特征的图像块分别进行颜色传递,提出局部区域的颜色传递。文中的参考图像按照灰度共生矩阵纹理特征及常见场景色彩给彩色图像分类标记。

选择常见场景目标(包括天空、建筑、树木、

草地、道路)进行图片切割,切割成互不重叠 64×64 像素大小的图片,在同一场景下随机选择 64 幅图,图 3 显示了选取的部分图像。分别计算 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向的灰度共生矩阵的上述特征,对 4 个方向的同一特征求平均值和均方差,从而得到具有旋转不变性的八维纹理特征,用 f_1, f_2, \dots, f_8 表示 4 种特征的均值和均方差。用 f_9 表示颜色信

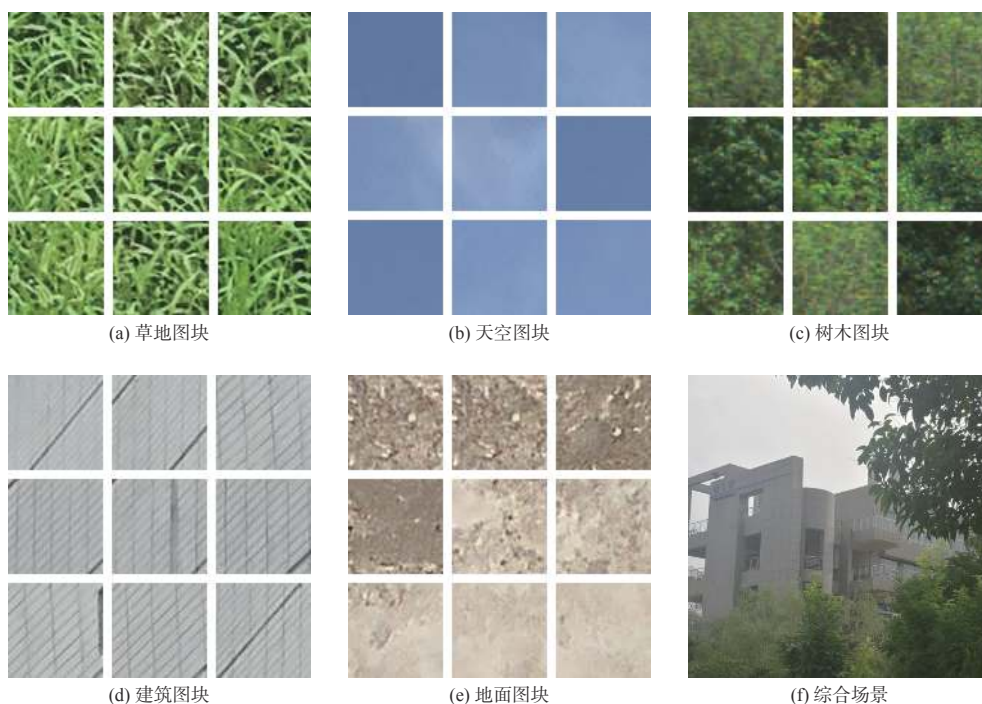


图 3 参考图像选取

Fig. 3 Reference image selection

息, $f_9 = 1, 2, 3$, 当 $f_9 = 1$ 天空为蓝色, RGB 3 个颜色通道中蓝色分量大于其他分量, 则可以满足天空的颜色; 当 $f_9 = 2$, 树木与草地是绿色分量最大; $f_9 = 3$ 为建筑与地面。用 f_{10} 表示类别标记, $f_{10} = 1, 2, 3, 4, 5$, 其中 1 是天空, 2 是建筑, 3 是树木, 4 是草地, 5 是道路。

2.3 色彩传递

本文面向自然场景, 树木本身纹理沟壑深, 其对比度大, 但在微光图像中视觉效果不明显, 为使其清晰, 用上文灰度共生矩阵中对比度参数的均值及均方差调整图像亮度系数, 让原本不容易赋上色彩的纹理沟壑深度部分更易上色。反之, 文中天空和陆地本身色彩信息比较单一, 但亮度相对较高一些, 灰度共生矩阵的对比度小, 沟纹浅, 易赋色, 则不再凸显出亮度信息。具体算法如下:

1) 目标微光图像 T 进行分割后, 对分割出来的模块进行纹理特征匹配并标记, $T_m (m = 1, 2, 3, 4, 5)$, 其中 1 是天空, 2 是建筑, 3 是树木, 4 是草地, 5 是道路;

2) 选择目标图像 T_m , 计算纹理特征 f_1, f_2, \dots, f_8 , 用 (10) 式与参考图像的纹理特征匹配, D 代表目标与参考图像纹理特征相似性, 值越小, 纹理特征值相似性越高, 选择的参考图像标记为 S_m , 再用 f_9 对匹配的参考图像 S_m 进行检验, 得到目标图像的参考图像及它们的类别, 类别用 f_{10} 表示;

$$D(S, T) = \sqrt{\sum_{i=1}^8 (f_i^T - f_i^S)^2} \quad (10)$$

3) 将图像 T_m 与 S_m 都转至 YCbCr 空间, 计算各个颜色分量上的均值和方差, 将目标图像的颜色统计量传递给源图像, 使目标图像具有与源图像一致的均值和方差, 进行颜色统计量匹配的映射方法如 (11) 式:

$$\begin{cases} Y_T = \frac{\sigma_T^Y}{\sigma_S} (Y_T - \bar{Y}_T) + Y_S \\ Cb_T = \frac{\sigma_T^{Cb}}{\sigma_S} (Cb_T - \bar{Cb}_T) + Cb_S \\ Cr_T = \frac{\sigma_T^{Cr}}{\sigma_S} (Cr_T - \bar{Cr}_T) + Cr_S \end{cases} \quad (11)$$

4) 用 (12) 式调整图片亮度, 其中 Y'_T 为调整后的亮度, Y_T 为原亮度;

$$Y'_T = DY_T \quad (12)$$

式中系数由灰度共生矩阵中对比度的均值和均方差求得, 即 2.2 小节中 f_1, f_2 的值, 不同场景的值亦不同;

5) 将二次颜色传递后的图像再进行颜色空间转换, 由 YCbCr 颜色空间转至 RGB 空间;

$$D(i, j) = w_1 \frac{|T_m(i, j) - \mu|}{\delta} + w_2 \quad (13)$$

式中: $D(i, j)$ 是每个像素的系数; T_m 是目标图像; μ, δ 分别是目标图像灰度共生矩阵中对比度的均值和均方差; $w_1 + w_2 = 1$;

6) 重复 2)~5), 直至所有的目标场景都被传递上相应的最佳彩色。

3 实验研究

本实验采用 Andor 公司的 EMCCD 相机, 该相机的分辨率为 130 像素, 每秒可采集 60 帧图像; 采用 AZURE 公司的 M2518 MPW2 镜头, 焦距为 25 mm。本实验时间为 2019 年夏季 7 月底, 凌晨 01:00~03:00。地点: 室外。温度: 24 °C。能见度: 14 km。相对湿度: 在 60%~70% 之间。光照度: $1.9 \times 10^{-3} \text{ lx} \sim 2.7 \times 10^{-3} \text{ lx}$ 。采集的微光图像的宽度和高度都为 1 024 像素, 水平与垂直分辨率为 96 dpi, 位深度为 8 bit 位。本文采用 MATLAB 软件 R2016a 版本进行算法仿真。

3.1 图像处理结果

图 4 为分割效果图, 其中: 图 4(a1)、4(a2)、4(a3) 为拍摄的原始微光图片, 包括天空、建筑、树木、草地和路面常见微光场景; 图 4(b1)、4(b2)、4(b3) 为预分割图像, 利用超像素将图片分割成多块近似的小图块, 为下一步分割做准备; 图 4(c1)、4(c2)、4(c3) 为本文分割算法, 图 4(c1) 中建筑、天空、树木、窗户 4 种景物分割边缘清晰, 图 4(c2) 中路面、草地、树木能很好地分割出来; 图 4(d1)、4(d2)、4(d3) 是用 Gabor 滤波器分割^[21] 作为对比组, 将景物的形状分割出来, 图 4(d1) 中天空和建筑连接处细节分割效果不佳, 图 4(d2) 处同一路面分割成不同效果, 图 4(d3) 建筑与树木的轮廓没有分割出来。

图 5 为颜色传递效果图。其中: 图 5(a1)、5(a2)、5(a3) 为 Welsh 算法所得到的全局颜色传递, 从主观评价上看, 整幅图像颜色传递成了彩色, 但其天空色彩出现误传; 图 5(b1)、5(b2)、5(b3) 为仲红玉等人算法颜色传递的结果; 图 5(c1)、5(c2)、5(c3) 是本文算法颜色传递结果, 相比前两种算法, 得到的图像效果更好一些, 整体色彩更适应人眼的视觉, 图 5(c1) 中树木的颜色鲜艳且纹理细节清晰。

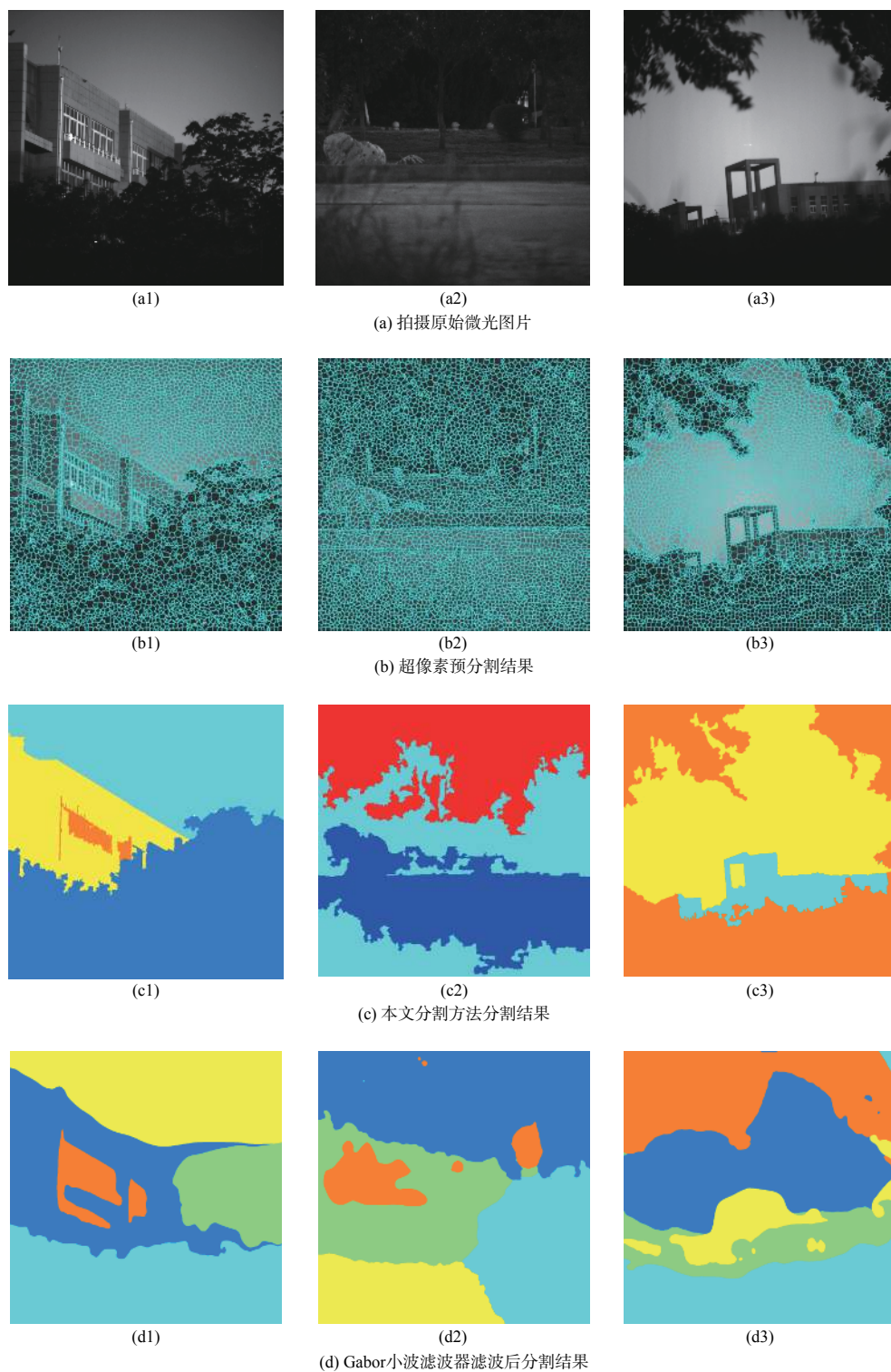


图 4 分割效果图

Fig. 4 Effect diagram of segmentation

3.2 结果评价

选取空间频率、平均梯度、峰值信噪比 (PSNR) 这 3 个指标对图 5 的图像质量进行评价。由图 6 的柱状图所示, 同一个柱状表为同一衡量指标下 3 种不同场景的 3 种颜色传递算法结果的

值。图 6(a) 是平均梯度, 描述了图像的微小细节变化和纹理变换的能力, 平均梯度的值越大, 边缘信息和纹理细节越明显; 其中场景 1 里本文算法平均梯度是 3.157 1, 仲红玉算法为 2.330 5, Welsh 算法仅为 1.650 2, 仲红玉的算法平均梯度大于 Welsh



图 5 颜色传递效果

Fig. 5 Color transfer effect

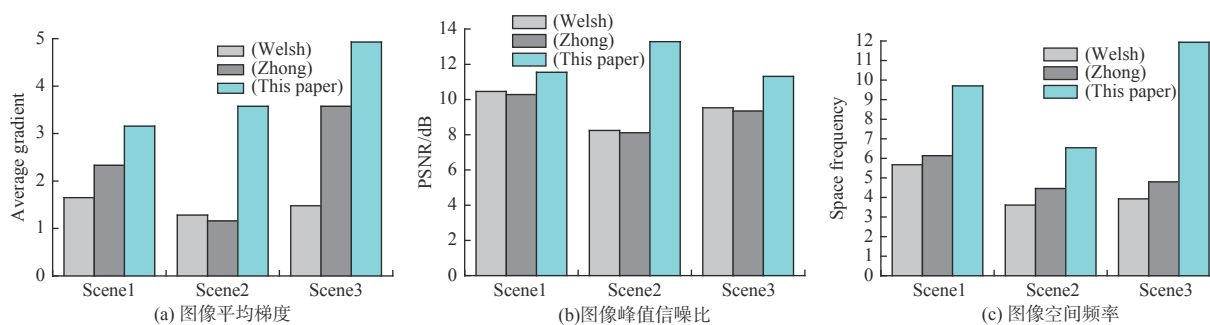


图 6 结果评价柱状图

Fig. 6 Results evaluation histogram

算法, 本文算法值优于这两种算法。图 6(b) 为峰值信噪比, 该值是用图 3(f) 作为参考图像, 计算像素点之间的误差, 值越高, 图像失真的程度越小, 反映图像的色彩信息; 峰值信噪比最高提高了

5.171 6 dB, 最低提高了 1.267 8 dB, 平均提高了 2.8 dB, 本文的算法值优于其他算法, 图像失真小。图 6(c) 是空间频率(SF), 反映了图像在空间域的总体活跃程度, 空间频率的值越大, 代表着图

像的视觉效果越好;本文算法 3 个场景中分别为 9.706 8、6.538 9、1.934 5,比 Welsh 算法的 5.671 1、3.608 3、3.927 9 值大,说明其图像所含的信息越多,边缘信息以及细节越丰富,图像效果越好。

4 结论

在分析现有算法的基础上,提出了一种基于分割的局部图像亮度调整颜色传递方法。颜色传递过程中,纹理细节不丢失,目标图像超像素预分割后再进行超像素之间的聚合,让图像中不同场景实现准确分割。颜色传递过程中利用不同的子区域分别进行颜色传递,目标图像与相应的参考图像亮度值对应,让每一部分颜色都尽可能地与自然真实场景颜色接近。利用灰度共生矩阵的对比度特性,根据不同场景子区域的纹理沟壑程度调整亮度,得到微光图像的局部颜色传递的图像符合人眼观察特性的彩色图片。文中颜色传递算法得到图像的平均梯度值最高 4.928 5,最低 3.157 1,比其他算法平均提高 1.98;峰值信噪比的值本文算法最高 13.287 1 dB,最低 11.312 5 dB,比其他算法平均提高 2.72 dB;空间频率的值本文算法最高 11.934 5,最低 6.538 9,比其他算法平均提高 4.63。

参考文献:

- [1] FLOREA L, FLOREA C, IONASCU C. Avoiding the deconvolution: framework oriented color transfer for enhancing low-light images[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). USA: IEEE Computer Society, 2016: 27-35.
- [2] HOGERVORST M A, Toet A. Fast natural color mapping for night-time imagery[J]. *Information Fusion*, 2010, 11(2): 69-77.
- [3] LI Yufeng, JIANG Yong, CHEN Niannian, et al. Night-vision image coloration fusion in oRGB color space[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(11): 2795-2804.
李郁峰, 蒋勇, 陈念年, 等. oRGB颜色空间的夜视图像彩色融合[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(11): 2795-2804.
- [4] SHI Shiming, WANG Lingxue, JIN Weiqi, et al. Color night vision research based on multi-resolution color transfer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(3): 553-558.
史世明, 王岭雪, 金伟其, 等. 基于多分辨率色彩传递的彩色夜视方法研究[J]. *光子学报*, 2010, 39(3): 553-558.
- [5] REINHARD, E, ADHIKMIN M, GOOCH B, et al. Color transfer between images[J]. *IEEE Computer Graphics and Application*, 2001, 21(2): 34-41.
- [6] CHEN Qian. Improvement of Welsh grey image colorization arithmetic[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2009, 31(22): 151-153.
陈倩. 一种改进的Welsh灰度图像彩色化算法[J]. *武汉理工大学学报*, 2009, 31(22): 151-153.
- [7] XU Zhen, SUN Shaoyuan, DAI Zhonghua, et al. Texture library based color & texture transferring for LLL images[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(1): 49-55.
许真, 孙韶媛, 代中华, 等. 基于纹理特征库的微光图像色彩纹理传递[J]. *红外技术*, 2011, 33(1): 49-55.
- [8] SUN Shaoyuan, JING Zhongliang, LIU Gang, et al. Transfer color to night vision images[J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(8): 448-450.
孙韶媛, 敬忠良, 刘刚, 等. Transfer color to night vision images[J]. *中国光学快报(英文版)*, 2005, 3(8): 448-450.
- [9] ZHONG Hongyu, YIN Liju, GAO Mingliang, et al. Color transfer method of luminance remapping with multi-parameters[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 159-166.
仲红玉, 尹丽菊, 高明亮, 等. 多参数亮度值重映射的颜色传递方法[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(5): 159-166.
- [10] ARBELOT B, VERGNE R, HURTUT T, et al. Local texture-based color transfer and colorization[J]. *Computers & Graphics*, 2017, 62: 15-27.
- [11] LI F, NG M. Image colorization by using graph bi-Laplacian[J]. *Advances in Computational Mathematics*, 2019, 45(3): 1521-1549.
- [12] BOEMER F, RATNER E, LENDASSE A. Parameter-free image segmentation with SLIC[J]. *Neurocomputing*, 2018, 277: 228-236.
- [13] LUO Xuegang, LYU Junrui, PENG Zhenming. Recent research progress of superpixel segmentation and evaluation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(9): 45-55.
罗学刚, 吕俊瑞, 彭真明. 超像素分割及评价的最新研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(9): 45-55.
- [14] ZHANG Liang, LI Huan, SHEN Peiyi, et al. improving semantic image segmentation with a probabilistic superpixel-based dense conditional random field[C]//USA: IEEE Access, 2018: 15297-15310.
- [15] TANIR D, NURIYEVA F. On selecting the initial cluster centers in the K-means algorithm[C]//2017 IEEE 11th In-

- ternational Conference on Application of Information and Communication Technologies. USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [16] HOU Qunqun, WANG Fei, YAN Li. Extraction of color image texture feature based on gray-level co-occurrence matrix[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2013, 25(4): 26-32.
- 侯群群, 王飞, 严丽. 基于灰度共生矩阵的彩色遥感图像纹理特征提取[J]. *国土资源遥感*, 2013, 25(4): 26-32.
- [17] GU Xiaojing, SUN Shaoyuan, FANG Jian'an. Coloring night vision imagery for depth perception[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(5): 396-399.
- [18] BO Hua, MA Fulong, JIAO Licheng. Research on computation of GLCM of image texture[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(1): 155-158, 134.
- 薄华, 马缚龙, 焦李成. 图像纹理的灰度共生矩阵计算问题的分析[J]. *电子学报*, 2006, 34(1): 155-158, 134.
- [19] KOREN O, HALLIN C A, PEREL N, et al. Decision-making enhancement in a big data environment: application of the k-means algorithm to mixed data[J]. *Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*, 2019, 9(4): 293-302.
- [20] HAMAM T, DORDEK Y, COHEN D. Single-band infrared texture-based image colorization[J]. *IEEE*, 2012, 27: 4673-4681.
- [21] LIU Kang, CHEN Xiaolin, LIU Yanjun, et al. Vane pump assembly quality detection based on Gabor and gray level co-occurrence matrix hybrid characteristics[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(11): 936-942.
- 刘康, 陈小林, 刘岩俊, 等. 基于Gabor和灰度共生矩阵混合特征叶片泵装配质量检测[J]. *液晶与显示*, 2018, 33(11): 936-942.