

图文信息技术

基于改进 K 均值聚类的图像修复方法

裴晨, 徐国彬, 于艺铭, 吴灵, 黄俊轶, 王琪
(南京林业大学 轻工与食品学院, 南京 210037)

摘要: **目的** 针对常见分区域图像修复算法中, 对于待修复目标的分离效果不佳而导致的修复效果较差等问题, 提出一种基于改进 K 均值聚类的图像修复方案。**方法** 首先将待分割图像转换到 CIELab 颜色空间, 对 a , b 分量进行聚类运算, 得到 K 个聚类中心, 通过改变聚类迭代次数, 得到粗分割结果; 然后采用数学形态学对分割结果进行细化处理, 精确分离得到目标对象和背景; 最后, 采用 Reinhard 算法对目标和背景分别进行色彩迁移, 得到图像修复结果。**结果** 所提模型中的区域分割算法, 其分离效果均优于经典的分水岭算法、最大类间方差法和基于 Lab 通道的最大类间方差算法, 采用 Reinhard 色彩迁移算法图像修复结果比较接近理想修复效果。**结论** 由最终结果可知, 提出修复法的整体效果较为理想, 且优于传统的分区域图像修复算法, 可为生产实践提供必要的理论依据。

关键词: 图像修复; 区域分割; 色彩迁移; K 均值聚类; 数学形态学

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)23-0255-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.23.036

Image Restoration Method Based on Improved K-means Clustering

PEI Chen, XU Guo-bin, YU Yi-ming, WU Ling, HUANG Jun-yi, WANG Qi

(College of Light Industry and Food Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

ABSTRACT: The paper aims to propose an image restoration scheme based on improved K-means clustering to solve the problem of poor restoration effect caused by poor separation effect of the target to be repaired in the common subregional image restoration algorithms. Firstly, the image to be segmented was transformed into CIELab color space, and K clustering centers were obtained by clustering a and b components. The rough segmentation results were obtained by changing the number of clustering iterations. Then, the segmentation results were refined by mathematical morphology, and the target object and background were separated accurately. Finally, the Reinhard algorithm was used to migrate the color of the target and background respectively, and the image restoration results were obtained. The region segmentation algorithm in the model proposed in the article had better separation effects than the classic watershed algorithm, the maximum between-class variance method and the largest between-class variance algorithm based on the Lab channel. The image restoration result using the Reinhard color migration algorithm was closer to the ideal restoration effect. From the final results, it can be concluded that the overall effect of the proposed restoration method is better than that of the traditional subregional image restoration algorithm. It can provide the necessary theoretical basis for production practice.

KEY WORDS: image restoration; region segmentation; color migration; K-means clustering; mathematical morphology

收稿日期: 2019-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(31870565); 南京林业大学大学生创新创业训练计划(201910298105Y)

作者简介: 裴晨(1999—), 女, 南京林业大学本科生, 主攻印刷数字图像处理; 徐国彬(1998—), 男, 南京林业大学硕士生, 主攻印刷数字图像处理。

通信作者: 王琪(1971—), 女, 博士, 南京林业大学副教授, 主要研究方向为数字图像处理、色彩管理及印刷防伪技术。

在高度信息化的社会中,图像在信息传播的过程中重要性越来越大,对图像进行有效的处理,可以保证信息传递的准确性、稳定性。在数字化信息传递技术出现之前,对于局部有缺陷的图画如美术作品、文人宝书、壁画等的修复方案比较匮乏。早期,人们对于残损的艺术品采用直接修复的方法,这种方法风险大,容易造成对作品的二次损伤。随着图像处理技术与计算机技术的不断革新,数字图像修复技术应运而生。

近几年,一些数字图像处理软件,如 Photoshop 等,可以对局部色彩或阶调有缺陷的图像进行修复,但修复的过程比较复杂、效率低下、成本较高,因此,方便、高效的数字图像修复算法是科研工作者长期研究的热点。数字图像修复算法包括修补破损、个性化改变颜色、去除图像杂物等多种作用。数字图像修复算法在许多领域得到了广泛的应用,如去除图像中不需要的图形或文字、旧照片的复原、弥补图像传输中出现的错误、计算机多媒体编辑和图像信息中个人隐私的保护等。

随着计算机技术的发展和人们对多媒体信息处理要求的增加,运用 Photoshop 等软件修复的图像不再符合图像质量的高要求。对此,国内外许多科研人员在有关图像修复的算法上做了很多研究,建立了各种有关图像修复的数学模型和图像修复方案。张宁等^[1]针对番茄穴盘幼苗的重叠叶片,提出了一种基于 HOG 描述子改进的标记分水岭分割算法。该算法可以较为准确地选定分水岭标记和实现对叶片的准确分割。吴掬鸥等^[2]在分析图像阈值分割法的经典算法——Otsu 算法的基础上,对此算法进行了改进。改进的 Otsu 算法提高了图像分割效率并且改善了图像分割效果,但是对于灰度区别不明显的图像边缘地带的分割效果仍然不理想,需要进一步地研究和改进。朱永红等^[3]运用 K 均值聚类算法对陶瓷窑炉烧成带火焰的图像进行图像分割处理,经试验表明,该算法能在最大程度地保留彩色信息的前提下,较好地分割图像。余志俊^[4]改进了 Reinhard 的色调映射算法,实现了对图像动态范围的压缩,从而达到了重塑图像的效果。为了实现灰度图像自动添加颜色的目的,Vieira L F 等^[5]研发了一种可以将颜色从用户选择的源图像传输到目标灰度图像的技术。该技术虽然减少了必须应用更加劳动密集型技术的图像数量,但并未取代完全依赖于人工干预的图像着色技术。孙娜等^[6]采用一种基于颜色转移的修复方法对照片色彩进行修复,同时使用基于纹理合成的数字图像修复技术对图像中的缺失信息进行有效的填充和修复,但该技术对色彩、纹理复杂度较高的目标图像,其修复效果不甚理想。

针对上述研究存在的不足之处,文中在图像分割和色彩迁移算法的基础上,提出一种基于改进 K 均

值聚类的图像修复方案,可以有效解决传统修复算法存在的过分割、欠分割等问题,达到对目标对象和背景的精确定分离,以得到最佳修复结果。该研究适用于有局部阶调、色彩缺陷图像的修复,可提高图像修复的效率,并改善复原图像的质量。

1 算法原理

研究采用 K 均值聚类算法对源图像进行粗分割,然后采用形态学理论对粗分割结果图进行细化处理。已知 K 值及源图像中初始聚类中心的位置,将逐个像素点匹配至最近的聚类中心所代表的集合中。数学形态学理论包括腐蚀、膨胀及这 2 种基本运算组合的开运算和闭运算^[7]。主要是通过腐蚀和膨胀运算缓解 K 均值聚类算法图像分割中的欠分割和过分割问题。

1.1 转换图像的颜色空间

CIE RGB 颜色空间是与设备有关的颜色空间,CIE Lab 颜色空间是基于人眼的视觉特性建立起来的,是一种均匀的颜色空间,因此,在进行分割处理之前,需要将导入的图像由 RGB 颜色模式转成 Lab 颜色模式,其中, R, G, B 的取值范围为 0 到 100。

1.2 确定聚类数 K 值、迭代次数 C

将导入的图像转换到 Lab 空间后,接下来关键是如何将图像的像素点进行精确分类。K 均值聚类算法是无监督分类中一种自适应搜索算法^[8],其通过重复迭代的方式找到 K 个最佳的聚类中心样本点,从而将图像分割为 K 类,使得图像中全部像素点与其所属中心样本点之间的欧式距离的和最小。该研究主旨对重复迭代次数和聚类中心数进行了改进,依据图像中各像素点色度值之间的相似性进行聚类计算。提取图像 Lab 空间中的 a 分量和 b 分量,将 a, b 分量转换成双精度型,则整幅图像中的信息用 2 个颜色分量来表示,即 $X_{a*b}=(a,b)$ 。这样既保留了图像相应的颜色信息,又降低了基于彩色图像分割算法的计算量。

设图像中总像素为 N,构成的样本点集合 $R=\{(a_i,b_i)|i=1,2,\dots,N\}$ 集合中的每一个元素由表征图像中相应像素点上的红绿色度值和黄蓝色度值构成。文中 K 均值聚类主要是将图像中的 N 个像素点分成 K 类,并且组成像素点集合 $h_k=\{(h_{kj}^a,h_{kj}^b)|j=1,2,\dots\}$, $k=1,2,\dots,K$; 其中 h_k 的聚类中心为 (α_k^a,α_k^b) 。定义欧式距离:

$$D=[(a_i,b_i),(\alpha_k^a,\alpha_k^b)]=\left[(a_i-\alpha_k^a)^2+(b_i-\alpha_k^b)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

N 个像素点被分为 K 类,则所有被划分为 K 类的各个样本点到其所属类的聚类中心像素点的欧式距离之和为:

$$M(h_k)=\sum_{(a_i,b_i)\in h_k} D[(a_i,b_i),(\alpha_k^a,\alpha_k^b)] \quad (2)$$

其中, 式 (2) 代表聚类集 h_k 中某一个子类中的像素点 (h_{ij}^a, h_{ij}^b) 到其所属类聚类中心点欧氏距离的和, 因此, 将聚类中的各子类进行统计, 得到所有样本点到其所属聚类中心距离之和为:

$$E[(a_i, b_i)] = \sum_{k=1}^K M(h_k) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \lambda_i D \quad (3)$$

式中: $R=1$ 。

由式 (3) 可知, 当 $E[(a_i, b_i)]$ 取得最小值时, 则聚心为 (α_k^a, α_k^b) ^[8]。只聚类 1 次无法得到较理想的分割结果, 文中采用多次迭代的方法重新计算聚类中心, 迭代次数记为 C 。重定义聚类中心计算公式为:

$$(\alpha_k^{a'}, \alpha_k^{b'}) = \frac{\sum_{(a_i, b_i) \in h_k} (a_i, b_i)}{n_k} \quad (4)$$

式中: n_k 为第 K 个聚类里所包含的像素数; (α_k^a, α_k^b) 为重新计算后获得的新的聚类中心。重新计算聚类的次数 (即迭代次数 C) 一般是收敛的, 且聚类次数可以人为设定。当聚类的结果不再变化的时候, 算法继续向下一步运行直到输出粗分割结果, 否则, 返回上一步骤直到计算得到的聚类中心结果不变。

1.3 数学形态学细分割图像

腐蚀在数学形态学理论中最主要的作用是消除目标对象边界处未消除的点。在数字图像处理中, 首先选择用于腐蚀运算的结构元素, 然后通过腐蚀运算去除图像中小于结构元素的像素。同时, 如果一个目标区域中有一些细小的部分连接在一起, 那么通过笃实处理可以对此区域进行分割处理。

将目标对象的边缘部分“变小”是腐蚀运算的目的, 其实质是令图像的边界收缩, 这样可以消除图像中细小的目标物。表达式为:

$$A \ominus B = \{x, y | (B)_{xy} \subseteq A\} \quad (5)$$

式 (5) 表示用结构元素 B 腐蚀待处理的目标对象 A , 首先 B 需要定义一个原点, 而且 B 移动的过程和卷积核移动的过程相同, 这同卷积核和图像有重叠之后再计算一致。当 B 的原点平移至 A 像元的 (x, y) 时, 若 B 在 (x, y) 处完全被包含在图像 A 重叠的区域, 即 B 中值为 1 的元素位置对应应在 A 图像位置的值也为 1, 则将输出图像对应的像元 (x, y) 赋值为原图像的像素值, 否则赋值为 0。

在膨胀运算中, 首先需要确定 1 个结构元素 B , 通过结构元素 B 将目标对象边缘部分的像素向外扩张以达到图像膨胀的效果。其中结构元素 B 相当于一个有扩大作用的变换矩阵。对于灰度图像, 膨胀运算中将目标对象向外扩张的区域的像素值赋值为 0。对于彩色图像则是对 3 种颜色分量分别进行膨胀处理。

使目标对象的范围“变大”是膨胀运算的主要目的, 将与目标对象边缘部分相连接的背景的像素点合并到目标物中, 使目标边界向外部伸张。以填补目标

区域中空洞及消除目标区域的多余小颗粒噪声。表示式为:

$$A \oplus B = \{x, y | (B)_{xy} \cap A \neq \emptyset\} \quad (6)$$

式 (6) 表示用结构元素 B 膨胀图像中的目标对象 A , 将结构元素 B 的原点平移到图像像元 (x, y) 位置。如果 B 在图像像元 (x, y) 处与 A 的交集不是空集, 即 B 中是 1 的元素位置上对应 A 的部分用原图像对应位置的像素值表示, 即输出图像对应的像元 (x, y) 赋值为原图像的像素值, 其余部分赋值为 0。

2 图像分割算法及实验评价

2.1 图像分割的实验结果

选用了 3 个实验样本, 依据上述的图像分割算法原理, 运用分水岭算法^[9]、传统的最大类间方差法^[10]、基于 Lab 分通道的最大类间方差法^[11]以及基于 K 均值聚类和数学形态学的图像分割算法分别对这 3 个实验样本进行了图像分割处理。图像分割的结果见图 1—3。

对于待处理图像, 理想的分割结果是目标对象完全被分割至目标区域, 目标对象外的部分被分割为背景区域。将传统的图像分割算法与文中基于 K 均值聚类和数学形态学的图像分割算法的分割结果进行比较。由图 1b、图 2b、图 3b 可知, 传统的分水岭算法只能将目标对象标记出来, 不能将目标对象与背景完全分离。图 1c 的目标对象的欠分割缺陷较显著, 图 2c、图 3c 目标对象既存在欠分割问题又存在过分割问题。基于 Lab 通道最大类间方差法的分割结果见图 1d、图 2d、图 3d, 其分割效果相较于传统的最大类间方差法有了一定改善, 但仍存在细小范围的欠分割和过分割问题。由图 1e、图 2e、图 3e 可知, 基于 K 均值聚类和数学形态学的图像分割算法分割得到的目标对象较完整、精确。

2.2 图像分割效果的评价

通常, 运用准确率 (PRE)、召回率 (REC)、F-measure (FME) 对图像分割算法的分割效果进行评价。其中 F-measure (FME) 是对图像分割结果全面、综合的评价, FME 的数值越大则说明图像分割的结果越好^[12]。记运用准确率 (PRE) 为 P , 召回率 (REC) 为 R , F-measure (FME) 为 F 。假设将图像中感兴趣的目标对象正确分割为目标区域的像素点记为 T_p , 图像中非感兴趣的背景对象正确分割为背景区域的像素点记为 T_N , 将背景错误分割到目标区域的像素点记为 F_p , 将目标对象错误分割到背景部分的像素点记为 F_N , 则图像分割结果的准确率、召回率和 F-measure 的计算公式为:

$$P = \frac{T_p}{T_p + F_p} \quad (7)$$

$$R = \frac{T_p}{T_p + F_N} \tag{8}$$

$$F = 2 \times \frac{P \times R}{P + R} \tag{9}$$

由式(9)可知,相较于准确率、召回率,F-measure对于图像分割质量的评价更加综合、全面、客观。在相同的计算机操作系统条件下,将分水岭算法、传统最大类间方差法、基于Lab分通道处理的最大类间方

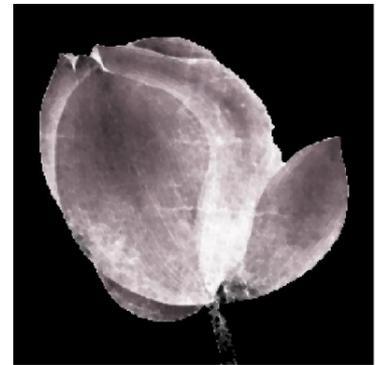
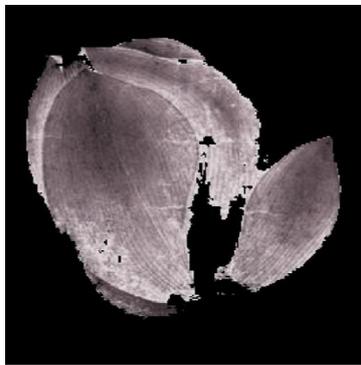
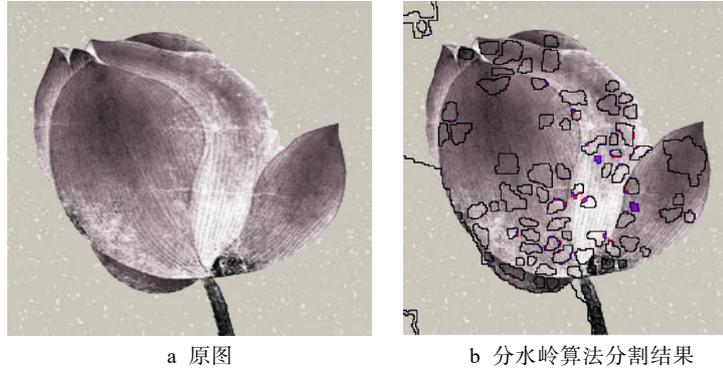


图1 样本1的图像分割结果
Fig.1 Image segmentation results of sample 1



图2 样本2的图像分割结果
Fig.2 Image segmentation results of sample 2

差法以及文中算法的分割性能进行比较。

如表 1 所示,在所有实验样本对应的 FME 值中,文中算法所得结果的 FME 值最大,分水岭法所得结果的 FME 值最小。由于图像分割结果的 FME 值越大,分割结果越理想,因此综上所述,分水岭算法所得分割效果最差,且文中算法均优于传统最大类间方差法和基于 Lab 分通道的最大类间方差法,故文中算法为上述算法中最佳的图像分割方案。

3 图像修复算法

3.1 色彩迁移 Reinhard 算法原理

利用 Reinhard 算法对经基于 K 均值聚类 and 形态学的分割算法^[13]得到的分割结果进行色彩迁移,以修复饱和度过低或局部有颜色缺陷的图像。色彩迁移 Reinhard 算法是 Reinhard 等^[14]根据 Lab 颜色空间中各通道互不关联的特点,提出了一组适用于各颜色分量的色彩迁移公式,较好地实现了彩色图像之间的全局色彩迁移。基本思想就是根据着色图像的统计分析确定一个线性变换,使得参考图像和源图像在 Lab

空间中具有同样的均值和方差^[15]。

Reinhard 算法中,假设 l^*, a^*, b^* 是 Lab 目标图像通道的数据, L', A', B' 分别是结果图像 L, a, b 通道的值, ml, ma, mb 和 ml', ma', mb' 分别为参考图像和源图像 L, a, b 通道的均值, nl, na, nb 和 nl', na', nb' 表示参考图像和源图像的标准方差。则参考图像与源图像之间的像素关系表达式为:

$$L' = \frac{nl'}{nl} \times (l - ml) + ml' \tag{10}$$

$$A' = \frac{na'}{na} \times (a - ma) + ma' \tag{11}$$

$$B' = \frac{nb'}{nb} \times (b - mb) + mb' \tag{12}$$

式 (10—12) 表示一个线性方程,以 2 幅图像的标准方差的比值作为斜率,2 幅图像各个通道的均值作为一个点^[16]。这个线性变换公式保证了参考图像和着色图像在 Lab 颜色空间中具有相同的均值和方差。最后,将变换后 L', A', B' 的值作为色彩迁移处理后图像 3 个通道的值,显示的时候再将这 3 个通道转换为 RGB 值进行显示。



a 原图



b 分水岭算法分割结果



c 最大类间方差法分割结果



d 基于图像 b 通道的最大类间方差法分割结果



e 文中算法分割效果 (k=3, C=23)

图 3 样本 3 的图像分割结果

Fig.3 Image segmentation results of sample 3

表 1 图像分割结果对比

Tab.1 Comparison of image segmentation results

| 图片 | 尺寸 | 分水岭算法 | | | 最大类间方差法 | | | 基于 Lab 通道的最大类间方差法 | | | 文中算法 | | |
|----|---------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | PRE/% | REC/% | FME | PRE/% | REC/% | FME | PRE/% | REC/% | FME | PRE/% | REC/% | FME |
| 1 | 268×263 | 94.45 | 27.64 | 0.428 | 100 | 58.2 | 0.536 | 99.85 | 74.11 | 0.851 | 100 | 98.02 | 0.99 |
| 2 | 600×799 | 44.3 | 37.43 | 0.406 | 36.62 | 99.95 | 0.536 | 99.98 | 82.01 | 0.901 | 100 | 86.07 | 0.925 |
| 3 | 398×600 | 19.23 | 41.6 | 0.263 | 20.99 | 88.79 | 0.34 | 30.35 | 99.87 | 0.466 | 94.7 | 97.31 | 0.96 |

3.2 图像修复实验结果及分析

运用 Reinhard 算法对第 2 节中 3 个实验样本进行图像修复处理, 3 个实验样本均存在整体颜色饱和度过低和目标对象颜色缺失的问题。据图 3 结果显示, 基于 K 均值聚类和形态学的图像分割算法对实验样本中的目标对象的分割效果最佳。把与目标

对象具有相同色温的图像作为参考图像 1, 将与背景区域有相同色温的图像作为参考图像 2, 分割结果图作为源图像, 然后对分割结果分别进行局部色彩迁移处理。将处理后的目标对象与背景区域叠合得到图像修复结果。3 个实验样本 Reinhard 算法全局色彩迁移的效果和文中的图像修复结果见图 4—6。



图 4 实验样本 1 图像修复处理
Fig.4 Image restoration processing of experimental sample 1



图 5 实验样本 2 图像修复处理
Fig.5 Image restoration processing of experimental sample 2

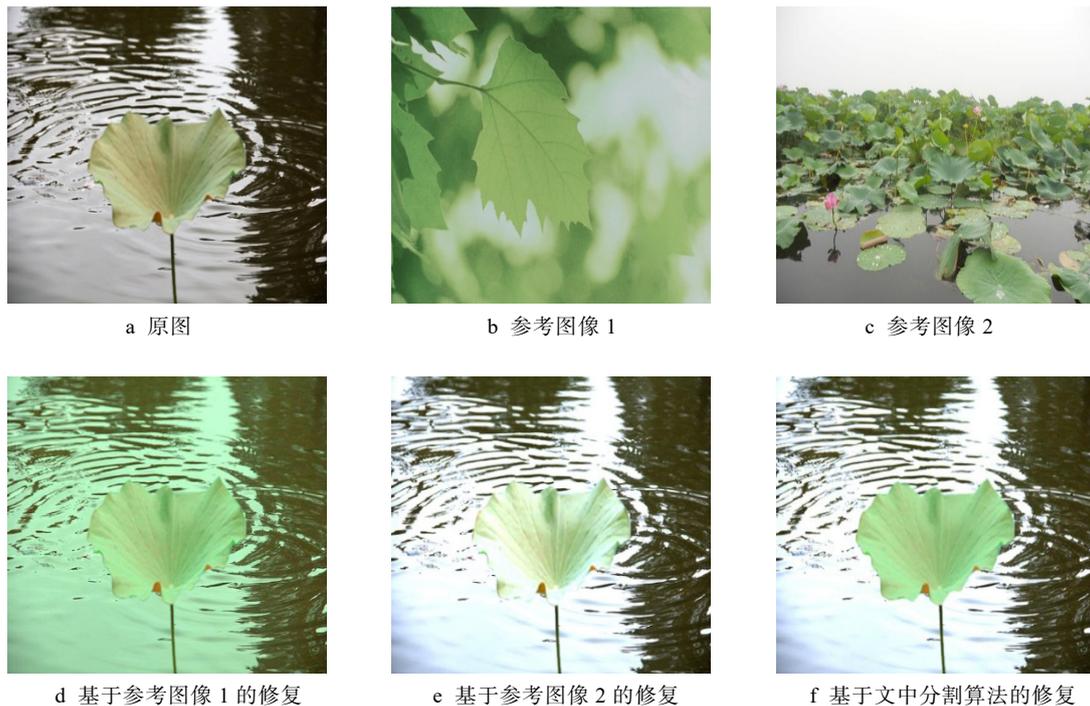


图 6 实验样本 3 图像修复处理

Fig.6 Image restoration processing of experimental sample 3

对于图 4a, 理想的修复结果是目标对象在保留自身纹理信息的前提下, 其颜色能还原成鲜艳的红色或粉色, 且提高了饱和度, 背景区域的颜色能还原成这类纸张褪色前的效果。样本 1 目标对象的参考图像见图 4b, c, 参考图像 1 对样本 1 进行全局色彩迁移的结果见图 4d, 目标对象还原的效果较自然且接近理想效果, 但背景区域的嫩绿色与目标的玫红色反差过大, 导致整体的修复效果不协调。参考图像 2 对样本 2 全局色彩迁移的结果见图 4e, 目标对象的颜色没有得到改善, 原图全局被迁移成土黄色, 修复效果不理想。文中方案的修复结果见图 4f, 目标的颜色、饱和度还原较理想, 背景颜色与目标颜色搭配的很协调, 整体修复效果较自然、美观。

图 5a 理想的修复效果是目标颜色可以更加鲜艳明亮, 背景可以还原成亮度较高、自然饱和度较高的翠绿色。样本 2 目标对象的参考图像见图 5b, c, 参考图像 1 对原图进行色彩迁移的结果见图 5d, 目标对象的颜色饱和度得到改善, 但背景部分的变化不明显。参考图像 2 对原图的色彩迁移结果见图 5e, 图像全局被迁移成绿色, 整体修复结果显得不真实, 颜色失真严重。文中方案的修复结果见图 5f, 目标和背景的颜色和饱和度适当, 且目标与背景融合协调, 图像修复结果接近理想的修复效果, 图像的整体效果比较和谐、逼真。

图 6a 理想的修复效果是目标的黄绿色能被还原成嫩绿色, 背景部分的亮度可以增强。样本 3 目标对象的参考图像见图 6b—c, 参考图像 1 对样本 3 色彩

迁移的结果见图 6d, 图像全局被迁移成绿色, 背景部分的亮度位得到改善, 整体修复结果比较虚假。参考图像 2 对样本 3 色彩迁移的结果见图 6e, 背景区域的亮度达到理想的效果, 但目标对象部分有图像曝光过度的感觉, 图像的整体效果不佳。文中方案的修复结果见图 6f, 图像整体效果比较真实、协调、美观。

根据上述的实验结果表明, 文中的修复方案突破了 Reinhard 算法对图像全局无差别色彩迁移的局限, 图像修复结果比较接近理想修复效果, 且整体效果比较自然、协调、逼真、美观。

4 结语

针对整体颜色饱和度较低或局部有颜色缺陷的图像修复问题, 文中提出了一种基于改进 K 均值聚类的图像修复方案。研究了传统分水岭算法、最大类间方差法与基于 Lab 通道最大类间方差法的不足, 分水岭算法分割图像的准确率偏低且难以将目标与背景独立分离, 2 种最大类间方差法均存在欠分割或过分割现象。文中基于 K 均值聚类 and 形态学的分割算法与传统分割算法相比, 实现了待修复图像目标和背景的较完整分离, 解决了细小范围的欠分割和过分割问题, 且对于各类图像具有较高的分割适用性; 采用 Reinhard 色彩迁移算法对分割目标进行迁移修复, 修复效果较为理想, 为艺术品高清复制提供了新的理论依据。

参考文献:

- [1] 张宁, 王志明, 郑健. 基于标记分水岭的植物重叠叶片改进分割算法[J]. 计算机与现代化, 2019(1): 21—26.
ZHANG Ning, WANG Zhi-ming, ZHENG Jian. Improved Segmentation Algorithm for Overlapping Leaves of Plants Based on Marked Watershed[J]. Computer and Modernization, 2019(1): 21—26.
- [2] 吴掬鸥, 袁晓桂. 基于阈值分割技术的图像分割法研究[J]. 现代电子术, 2016, 39(16): 105—107.
WU Ju-ou, YUAN Xiao-gui. Research on Image Segmentation Based on Threshold Segmentation Technology[J]. Modern Electronics, 2016, 39(16): 105—107.
- [3] 朱永红, 熊朦, 赵一峰, 等. 基于 K 均值聚类陶瓷窑炉火焰图像分割方法[J]. 陶瓷学报, 2016, 37(1): 86—90.
ZHU Yong-hong, XIONG Meng, ZHAO Yi-feng, et al. K-means Clustering Method for Flame Image Segmentation of Ceramic Kilns[J]. Journal of Ceramics, 2016, 37(1): 86—90.
- [4] 余志俊. 高动态范围图像色调映射算法的研究与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2010: 18—29.
YU Zhi-jun. Research and Implementation of Hue Mapping Algorithm for High Dynamic Range Images[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010: 18—29.
- [5] VIEIRA L F, VILELA R D, NASCIMENTO E R. Automatically Choosing Source Color Images for Coloring Grayscale Images[C]// 16th Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, 2003: 151—158.
- [6] 孙娜, 刘振超. 数字图像修复技术在旧损照片修复上的应用[J]. 信息记录材料, 2019, 20(3): 100—101.
SUN Na, LIU Zhen-chao. Application of Digital Image Repair Technology in the Repair of Old Damaged Photos[J]. Information Recording Materials, 2019, 20(3): 100—101.
- [7] 吴凯. 基于数学形态学的焊接熔池图像边缘检测技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2018: 14—23.
WU Kai. Research on Edge Detection Technology of Welding Pool Image Based on Mathematical Morphology[D]. Xi'an: Xi'an Petroleum University, 2018: 14—23.
- [8] 吴迪, 刘伟峰, 胡胜, 等. 基于 Lab 空间的 K 均值聚类彩色图像分割[J]. 电子科技, 2017, 30(10): 29—32.
WU Di, LIU Wei-feng, HU Sheng, et al. K-means Clustering Color Image Segmentation Based on Lab Space[J]. Electronic Science and Technology, 2017, 30(10): 29—32.
- [9] 桑艳艳, 李昕. 基于改进分水岭算法的菌落图像分割[J]. 电子测量技术, 2019, 42(6): 87—93.
SANG Yan-yan, LI Xin. Colony Image Segmentation Based on Improved Watershed Algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(6): 87—93.
- [10] 吴掬鸥, 袁晓桂. 基于阈值分割技术的图像分割法研究[J]. 现代电子术, 2016, 39(16): 105—107.
WU Ju-ou, YUAN Xiao-gui. Research on Image Segmentation Based on Threshold Segmentation Technology[J]. Modern Electronics, 2016, 39(16): 105—107.
- [11] 蔡燕伟. 基于彩色空间的二维 OTSU 铝塑包装药片图像分割算法研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2014: 28—34.
CAI Yan-wei. Image Segmentation Algorithm for Two-dimensional OTSU Aluminium-plastic Packaging Tablets Based on Color Space[D]. Jinzhou: Bohai University, 2014: 28—34.
- [12] 黄欣研. 复杂背景下的植物叶片分割算法研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017: 37—48.
HUANG Xin-yan. Research on Plant Leaf Segmentation Algorithms under Complex Background[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2017: 37—48.
- [13] AHMED M N, YAMANY S M, MOHAMED N, et al. A Modified Fuzzy C-means Algorithm for Bias Field Estimation and Segmentation of MRI Data[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2018, 21(3): 193—199.
- [14] LIAO P S, CHEU T S, CHUNG P C. A Fast Algorithm for Multilevel Thresholding[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2018, 17(5): 713—727.
- [15] WELSH T, ASHIKHMIN M, MUELLER K. Transferring Color to Greyscale Images[C]// Computer Graphics Proceedings of SIGGRAPH, 2002: 277—280.
- [16] PITIE F, PAN Z, DONG Z. A New Algorithm for Adding Color to Video or Animation Clips[J]. Proceedings of WSCG-International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, 2004, 12(3): 515—519.