

图像彩色化方法研究进展

马贺贺¹, 周岳斌², 饶刚¹

(1. 武汉科技大学 机械自动化学院, 武汉 430081; 2. 湖北文理学院 机械工程学院, 襄阳 441053)

摘要: **目的** 介绍典型图像彩色化的实现方法及其原理, 总结分析图像彩色化方法的特点和应用场景, 结合最新研究进展, 提出图像彩色化技术以后的研究方向和发展趋势。**方法** 按照图像彩色化技术实现手段分类, 对国内外图像彩色化技术研究领域的相关方法进行系统介绍, 对比分析基于偏微分方程、图像融合、图像分割的图像彩色化方法及其特点。**结论** 在将来的研究工作中, 将图像彩色化技术与其他学科结合, 利用计算机的快速处理能力、硬件优势以及丰富的软件资源, 并根据应用场景和算法特点, 选择合适的图像彩色化方法, 可以更好地提高图像处理效率和视觉效果, 实现图像彩色化的精准应用。

关键词: 彩色化; 偏微分方程; 图像融合; 图像分割; 红外图像; 稀疏表示

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)03-0229-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.03.035

Research Progress of Image Colorization Methods

MA He-he¹, ZHOU Yue-bin², RAO Gang¹

(1. College of Mechanical Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhhan 430081, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce the realization method and principle of typical image colorization, summarize and analyze the characteristics and application scenarios of image colorization method, and put forward the research direction and development trend of image colorization technology in the future based on the latest research progress. According to the classification of image colorization technology, the relevant methods in the research field of image colorization technology at home and abroad were systematically introduced, and the image colorization method and its characteristics based on partial differential equation, image fusion and image segmentation were compared and analyzed. In future research work, combining the image colorization technology with other disciplines, using computer rapid processing capability, hardware advantages and rich software resources, and selecting the appropriate image colorization method according to the application scene and algorithm characteristics, can better improve the image processing efficiency and visual effects, and achieve precise application of image colorization.

KEY WORDS: colorization; partial differential equation; image fusion; image segmentation; infrared image; sparse representation

图像彩色化是计算机图形学与计算机视觉领域的研究热点^[1-3], 可以准确高效地从带有颜色图像中获得视觉信息, 对其中事物进行分辨。自 Wilson

Maxkle 提出彩色化概念后, 激起了很多学者的研究兴趣^[4]。图像彩色化, 顾名思义是指给图片中的每个单元重新赋予新的颜色。Reinhard 等最早提出 2

收稿日期: 2018-05-29

基金项目: 湖北省自然科学基金(2015CFC802); “机电汽车”湖北省优势特色学科群开放课题项目(XKQ2017004)

作者简介: 马贺贺(1993—), 女, 武汉科技大学硕士生, 主攻机械测试、图像增强处理。

通信作者: 周岳斌(1973—), 男, 博士, 武汉科技大学副教授, 主要研究方向为智能传感、网络化测控等。

个彩色图像之间的颜色转移理论^[5],文中所说的彩色化指的是对灰度图像的彩色化处理,从本质上来说,灰度图像彩色化就是把目标图像中的每个像素,用多维空间中的矢量(如色调、饱和度、亮度)来取代灰度值的亮度这一维标量的过程。图像彩色化技术已经普遍应用于影视动漫、医学影像、遥感图像、红外夜视图像等领域。对于不同的应用场景,图像彩色化的目的是不同的^[6-7]。至今,图像彩色化的研究主要有基于参考图像的颜色传递方法和基于人工着色的局部颜色扩展方法^[8-9]。一般来说,基于参考图像的颜色传递方法首要采取图像处理方法,例如:借助图像融合技术的红外图像彩色化、基于图像分割技术、图像分类技术的图像彩色化方法;基于人工着色的局部颜色扩展方法主要依赖于

偏微分方程将彩色化问题转化为最优解问题,文中将详细介绍这几种常用的图像彩色化方法的特点、相关研究进展和发展趋势。

1 常见的图像彩色化方法

不论是人工着色还是参考源图像的色彩迁移方法,其实现方法不外乎应用偏微分方程将彩色化处理转化为求解最优解、借助于图像融合技术、图像分类和分割等,对上述方法的部分性能做了综合比较见表1。因目前并没有一个统一的标准来评估图像彩色化的效果,所以文中所阐述的效果是以人眼直观视觉效果为主,客观数据以峰值信噪比、均方误差的大小等来衡量。

表1 图像彩色化方法比较
Tab.1 Comparison of image colorization methods

图像彩色化方法	应用目标图像种类	复杂度	彩色化效果
基于偏微分方程	灰度、夜视、遥感图像	较小	边缘清晰,实时性中等
基于图像融合	夜视图像	较大	人眼视觉效果较好,目标纹理特征较明显,实时性较低
基于图像分割	灰度、夜视、遥感图像	中等	对于大尺寸图像,彩色化准确度较高,实时性较高

1.1 基于偏微分方程的图像彩色化

2005年,就有学者应用偏微分方程来进行图像处理,但Sapiro等率先用偏微分方程方法实现颜色扩展到灰度图像上^[10]。在基于偏微分方程的图像处理方法中^[11-12],有如下定义:

$$\partial_t u = F[u(x, y, t)] \quad (1)$$

$$u(x, y, 0) = I(x, y) \quad (2)$$

式中: u 为连续信号; F 为偏微分算子; I 为初始条件; u 为方程的解。

Sapiro的图像彩色化模型通过式(3—4)恢复灰度图像的色彩信息(C_b , C_r):

$$\min_{C_b} \int_{\Omega} \rho(\|\nabla Y - \nabla C_b\|) d\Omega \quad (3)$$

$$\min_{C_r} \int_{\Omega} \rho(\|\nabla Y - \nabla C_r\|) d\Omega \quad (4)$$

式中: ∇ 为梯度; $\rho(\cdot): IR \rightarrow IR$ 可以为 l_1 范数,但使用最多的为 l_2 范数。Sapiro彩色化模型可以使颜色快速地扩展到整幅图像以实现着色的效果,但忽略了图像边界颜色定位的问题,容易出现颜色越界、边界模糊现象,因此基于偏微分方程方法的彩色化处理主要适用于快速着色且对边界的彩色化处理精度要求低的应用场景下。

针对Sapiro彩色化方法在边缘彩色化效果的不足,学者们做了许多改进的地方,其中以中国科学院的腾升华和上海大学的陈颖等学者为首的研究成果较为成熟^[13]。陈颖等在用户赋予种子颜色后,利用求泛函极值建立非线性方程,通过此方法求解的结果比

Sapiro方法彩色化结果的峰值信噪比提高了1~2 db,明显改善不同颜色边界区域的彩色化细节。陈颖还在在此基础上选用一个适当的扩散张量函数来改善颜色越界问题^[14-15]。基于偏微分方程的图像彩色化方法,多数情况下是结合人工着色,利用局部扩展的彩色化来实现图像的半自动彩色化。只要选择合适的参数和约束条件,就能达到人眼可见的较好的着色效果和较清晰的图像边界。

基于偏微分方程的彩色化方法把彩色化问题转换成求取最优解问题进行处理,相对来说比较简单易实现,计算复杂度较低,具有较好的实时性。厉旭杰^[16]通过设计利用在空间中的拉普拉斯矩阵的优点,通过稀疏数据插值来扩散少量的人工线条着色得到彩色图像。Hui Huang等^[17]利用图像纹理等特征来优化颜色的分布,使像素与 K 非局部最近纹理-特征空间中相似领域之间的能量最小化,将图像亮度通道的流形结构嵌入到最能保留原始空间几何特性的颜色通道中。如图1所示,原灰度图像见图1a,文献[17]、文献[9]的彩色化效果图分别见图1b、图1c。根据彩色化后效果图,人眼可以明显看出,图1b的彩色化效果更好,边缘清晰;图1c中的区域边界附近,明显出现彩色误传的现象。同时根据表2可知,文献[17]的彩色化方法的均值误差更小,可以产生更高质量的着色,而且对于大小为1002×615的图像,文献[17]相比文献[7]算法时间优化近1/4,展现出很好的实时性。文献[17]彩色化方法实际上是成本函数的全局和局部最优组合,但对于稍大尺度的图像,这种方法的应用效果还有所局限。

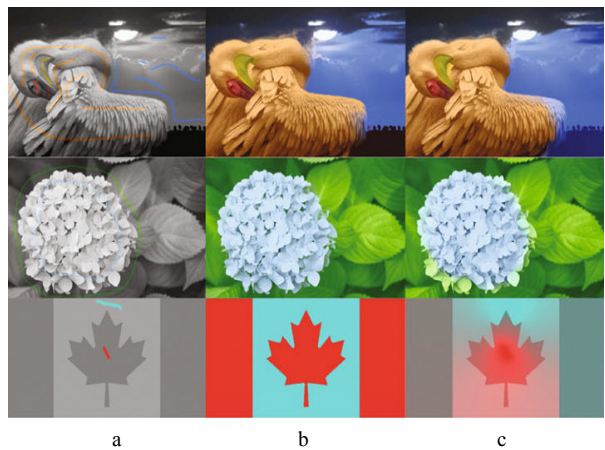


图 1 彩色化方法效果
Fig.1 Results of colorization method

表 2 图 1 中图像彩色化算法的均方误差及运行时间
Tab.2 MSE (mean squared error) of and the performances (in seconds) of algorithms for image colorization in Fig.1

图片	文献[17]均方误差	文献[9]均方误差	文献[17]运行时间/s	文献[9]运行时间/s
鸟	0.002	0.013	2.50	8.86
花	0.009	0.013	15.98	60.16
旗	0.006	0.059	5.53	12.30

1.2 基于图像融合的图像彩色化

图像融合技术可以提取自然光图像和红外图像的互补信息，获得对同一场景描述解释更为准确、全面和可靠的图像。像素级融合是常用于灰度图像与可见光图像的融合。基于源图像的彩色化就是源图像和目标图像的融合过程，使其同时兼有源图像的颜色和目标图像的形状、纹理等特征信息，达到整体颜色基调整谐、真实。影响图像融合的主要因素：图像庞大数据量的处理、融合规则的选择等。基于图像融合技术实现图像彩色化的一般流程见图 2。

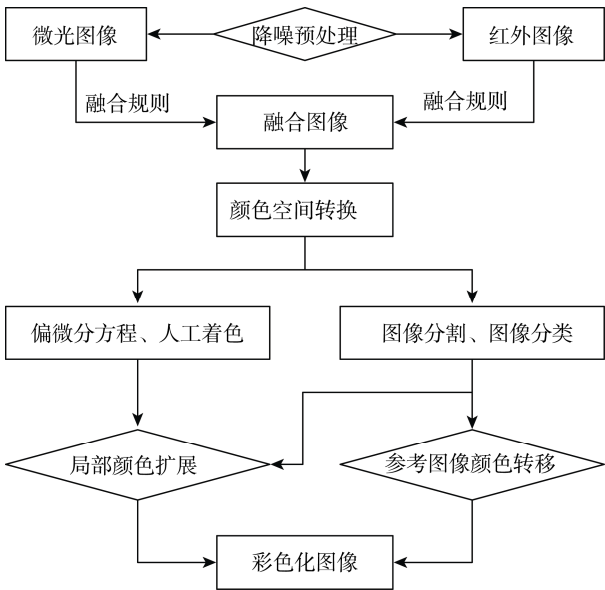


图 2 基于图像融合的图像彩色化流程
Fig.2 Image colorization flow chart based on image fusion

关于图像融合技术的应用研究，主要集中在夜视图像中微光图像和红外图像的彩色处理。Yufeng Zheng 等^[18]通过利用离散小波变换进行夜视图像间融合，用融合图像 V 值，代替采用颜色空间转换、图像分割、模式识别和直方图匹配局部着色方法的彩色化图像 V 值，逐段渲染夜视图像以获得更加自然和现实的着色。如图 3 所示，图 3a 和 3b 都是双波段夜视图像，图 3c 是图 3a 和 3b 的融合图像，图 3d 是通过使用图 3a 和 3b 的彩色图像，图 3e 是来自图像 3d 的漫射图像，图 3f 是图像内容形成 21 个簇，图 3g 是图 3f 分为 12 段，并且通过使用直方图和统计匹配，得到 5 个自动分类的颜色方案（植物、道路、地面、建筑物和其他），图 3h 彩色化后图像。该方法能得到人体视觉效果较自然的彩色化图像，但前后 4 次颜色空间转换较大地增加了彩色化计算量。

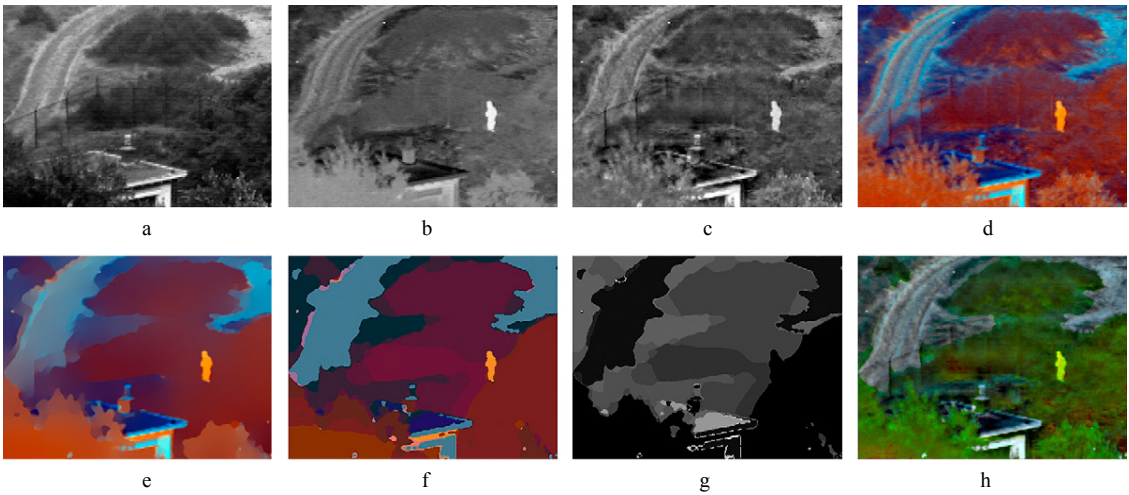


图 3 夜视图像的局部（逐段）彩色化
Fig.3 Local-coloring (segment-by-segment) of night-vision image

在解决特征信息比较丰富的图像的彩色化问题上,LIB、宋芳伟等巧妙地结合稀疏理论来进行融合处理,稀疏表示凭借其较好的系数表达能力,在图像修复、去噪、人脸识别等应用中谋得一席之地,通过构建合适的过完备基字典,采取正交追踪匹配算法对图像进行稀疏表示,不仅减少了很大一部分数据量的处理工作,还得到了亮度和细节信息较为丰富的彩色化图像,更易于人眼观察^[19-20]。

凭借图像融合提高了图像信息的利用率、对目标探测识别的可靠性及系统处理的自动化程度等优点。华斌等^[21]将颜色融合应用于医学图像彩色化,彩色化后的医学图像标记特殊颜色能清晰地体现患者病灶信息,有利于医患沟通。

利用图像融合技术,虽然可以有效避免色彩误传等问题,得到较为清楚、色彩鲜明的彩色化图像,但现有融合方法都是针对待融合图像的像素灰度需要进行综合性的分析与处理,这样庞大的数据量给图像融合带来很大的劣势;另一方面,借用融合技术得到的彩色化图像,更大程度上增强了人眼的视觉效果,但目前彩色化后的图像效果也没有统一的客观评价标准,因此该方法最明显的劣势就是很难找到一个客观评价数据标准来衡量该彩色化方法的效果,这也很大程度上局限了该方法的应用。该方法的后续相关研究可以减少融合数据量、提高融合效率为突破口,应用在对视觉要求比较高的场合,更方便后期的场景解释和目标识别、追踪等处理。

1.3 基于图像分割的图像彩色化

图像分割是从图像预处理到图像识别、理解的关键步骤。图像分割可以使原图像更容易、更清晰地表露出图像中的特征信息,从而达到更高层的图像识别、剖析和理解。利用图像分割技术来进行彩色化通常有一个明显的弊端就是分割结果对彩色化效果影响很大:分割的精度越高,分割区域越多,彩色化效果就越好。

在实际应用中,待彩色化的目标图像的尺寸往往较大,但综合 Welsh, Levin 的图像彩色化方法,虽然简单可行且结果颇好,对于大尺寸图像,其处理速度显著下降,因此腾升华等在 Levin 方法的基础上,利用多区域过度分割,以分割后的区域取代像素作为基本的彩色化单元,在相同初始着色情况下,可以提高大尺寸图像的彩色化速度,并且彩色化后效果和 Levin 方法基本相同^[22]。Peter、HU M、陈颖等^[23-25]都有利用分割点代替像素点来作为彩色化处理的基本单元,以帮助用户确定需要为哪些像素进行高质量彩色图像着色。

应用图像分割技术在提高彩色化质量的问题上,沈振一等^[26]提出一种基于随机森林分类器和超像素

分割算法相结合的红外图像彩色化算法,该方法首先对目标和参考图像各个像素点进行特征提取、分类,再使用超像素分割与直方图统计相结合的方法对分类结果图像进行优化,最后转换到 HSV 色彩空间中,进行对应的色彩传递。该方法能很好地对红外图像进行彩色化处理,同时也保证了色彩传递的正确性和实时性。随机森林分类在某些噪音较大的样本集上,模型易陷入过拟合,最好先对目标图像进行降噪预处理,会大大提高此方法的彩色化效果。Yong S H 等^[27]利用高斯混合模型的概率分割方案来分割每个参考图像以及目标图像,并提取对应区域的颜色和细节特征,然后针对细节部分,定义了一种结合颜色和几何距离的有效距离测量,以准确确定每个目标区域的最佳对应源区域,并采用直方图匹配将匹配区域的细节从参考图像传送到目标。这种方法不仅能得到颜色一致的彩色化图像,能真实地将参考图像细节特征转移到目标图像中,比较适合应用于要表达用户意志的彩色化场景,但这种方法依赖高质量的分割模型对训练数据进行分割,限制了其在室外场景的应用。在一些需要提高彩色化速度的应用场合下,可以根据目标图像的尺寸,选用比较适宜的分割方法,另外在保证分割精度的前提下,适当地减少分割区域。

张砚等将^[28]分割技术应用在遥感图像的彩色化处理上,利用多尺度分割技术、亮度匹配和颜色传递,再与降噪预处理相结合,来增强遥感图像的细节分辨能力,实现全自动彩色化增强。此方法不需要目标图像与参考彩色图像配准,只需要图像间的特征、风格相近似,就能实现遥感图像彩色化,打破了只针对某种特定类型图像处理的限制。

近几年,研究学者多是结合图像分类器来优化图像分割后的分类结果再进行彩色化处理,此方法可以更好地提高图像彩色化的处理速度以及视觉效果,减小分类不确切引起的色彩误传问题。Xiaojing Gu 等^[29]将目标图像分割成植物、建筑物、天空、水、道路等,然后计算每个类别的颜色,引入马尔可夫决策过程(Markov decision processes, MDP)来处理着色问题的计算复杂性,并优化分类结果,最后通过概率方式混合所属每个类别的特征颜色来计算段的色度值,在考虑相邻一致性和风景布局的情况下,算法的彩色效果令人满意,见图 4。关于选取的分类优化方式不同,所对应的处理速度的对比见表 3。可以很明显地看出,MDP 处理效果明显优于马尔可夫随机场(Markov random field, MRF)和(conditional random field, CRF),因此借助图像分割的彩色化方法,选取搭配优秀的分类器,可以明显减小颜色误传问题,从而很好地解决图像边缘的彩色化问题。

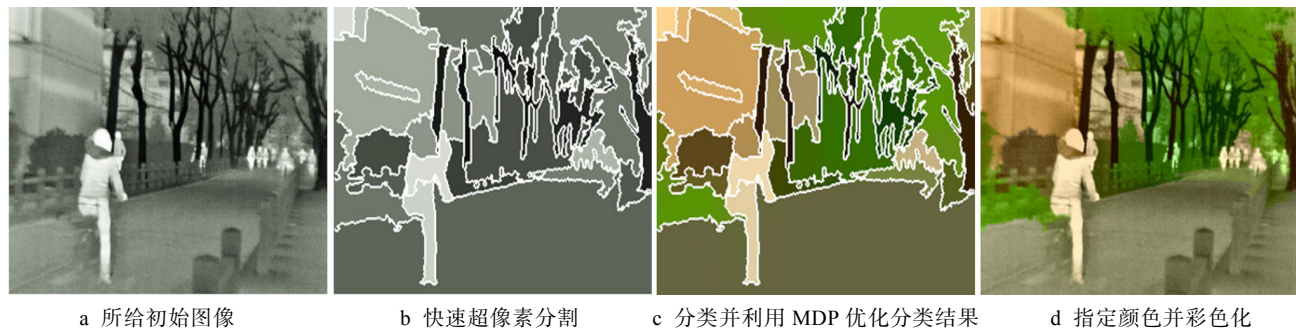


图 4 彩色化方法流程及结果
Fig.4 Flow and results of colorization method

表 3 MDP、MRF、CRF 的平均识别率和时间的对比 Tab.3 Comparison of average recognition rate and time of MDP, MRF and CRF		
分类优化方法	平均识别率/%	所用时间/s
MRF	84.3	1.37
CRF	85.6	3.89
MDP	83.7	0.03

2 近期研究趋势

近年来,很多研究学者利用深度学习、字典匹配、稀疏表示等来实现图像彩色化的全自动化^[30—35],在提高彩色化过程实时性的同时,更改善了彩色化结果依赖于用户对参考源图像选择的情况,得到较高质量的彩色化图像,为目标追踪、场景解释等提供较为清晰的参考。

在实现全自动化彩色化方面,Iizuka 等^[36]利用卷积神经网络中的融合层可以精确地将小图像块的局部信息与整个图像计算的全局先验进行融合,可以处理任何分辨率的图像,进行端对端学习来同时进行图像分类和自动彩色化的方法。其彩色化结果不支持用户交互,不能根据不同用户的需求对彩色化结果进行调整。Larsson 等^[37]利用了深度网络的低级和语义表示,开发了一款全自动图像着色系统。由于许多场景元素根据多模态颜色分布自然出现,训练模型以预测每像素颜色直方图。该中间输出可用于自动生成彩色图像,或在图像形成之前进一步处理。Larsson 方法在完全和部分自动着色任务上,胜过现有方法,还可将彩色化作为自我监督的视觉表现学习工具。

在一个足够大的训练样本空间内,对于一个类别的物体,可以由训练样本中同类的样本子空间线性表示,因此在当该物体有整个样本空间表示时,其表示的系数是稀疏的。基于这一思想,梁海等^[38]提出“离线字典库”的概念,可以实现同类内容目标图像的彩

色化。Dan Yan 等基^[39]于特征分类和细节突出,提出一种多稀疏字典分类彩色化模型。在特征分类中,采用相应局部约束算法来提高分类的准确度;在细节突出方面,采用拉普拉斯金字塔来解决错失的图像细节,以及提高图像彩色化的计算速度。以上 2 篇文献彩色化效果对比见图 5^[39]。可以看出,图 5c 中存在大量错误彩色像素。在图 5 中方框标识区域中,应该是蓝色的天空用黄色着色,并且缺少细节,另外该算法需要分别求解每个字典的稀疏系数,这大大增加了计算量。在图 5d 中明显减少了色彩误传的可能性,并且清楚地显示了细节,证明了此种结合特征分类和细节增强的算法是有效的。客观评价指标结果见图 6。通过均方误差值 (mean square error, MSE)颜色峰值信噪比 (the color peak signal-to-noise ratio, CPSNR)、结构相似度 (the structural similarity, SSIM),这 3 个指标的折线图可清晰地看出文献^[39]的多稀疏表示的彩色化方法性能更优于文献^[38],该算法实现了即使没有人工干预,仍然可以达到与人工干预算法一样的彩色化效果,但未来可以采用其他模式识别算法以提高区分亮度信息和特征信息相似图像块的着色效果。

在图像彩色化算法的处理实时性方面,赵汉理等^[40]利用硬件 GPU 性能优势,来实现近实时的图像彩色化方法。这种别出心裁的处理方法同时利用 GPU 的并行处理和优秀的算法处理,很容易完成彩色化处理。同时因该方法需要更少的系统响应时间,提高了人机交互性的智能性^[41]。

基于常用的借助微分方程、图像融合、图像分割实现的彩色化方法有很多局限性,因此图像彩色化方法的未来研究可以有效地结合字典学习、稀疏表示的特点,也许能够更好地解决具有复杂的灰度图像彩色化问题。但此方法不能解决参考彩色图像的选择受用户的影响的问题,因此未来可以采取针对参考图像的选择实现自动客观化的算法,这样不仅能实现彩色化过程的自动化、减小计算复杂度,还能得到客观优秀的彩色化结果。



图 5 文献[38]和文献[39]彩色化方法的效果对比
Fig.5 Comparison of [38] and [39] colorization method effects

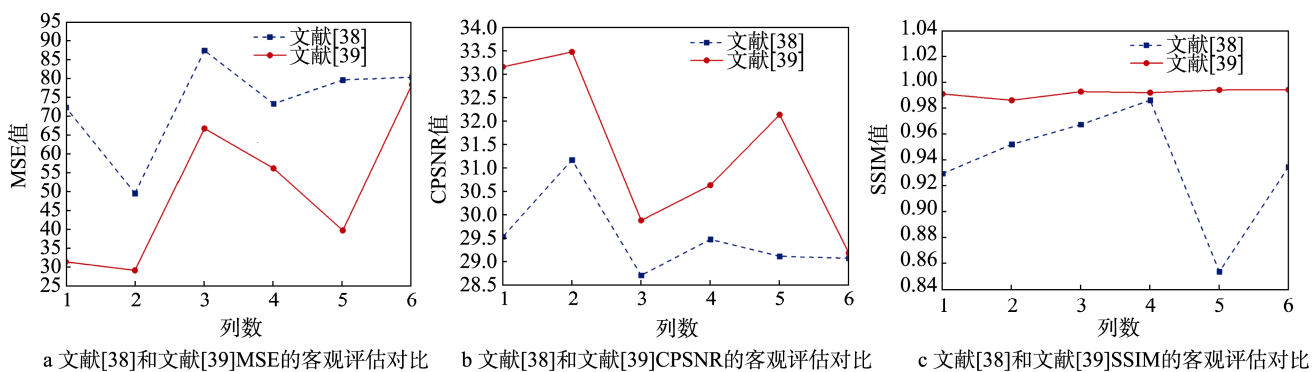


图 6 MSE, CPSNR 和 SSIM 的客观评估
Fig.6 Objective evaluation of MSE, CPSNR, and SSIM

3 结语

图像彩色化可以准确高效地从带有颜色的图像中获得所需的视觉目标信息,从而对其中事物进行分辨。不论是人工着色还是参考源图像的色彩迁移方法,其实现方法多是通过目标图像进行分割、分块对应着色,应用偏微分方程将彩色化问题转化为最优解问题,借助图像融合、图像分类分割、深度学习和稀疏字典等技术手段实现图像的彩色化。图像彩色化技术不是一门单一的研究内容,在将来的研究工作中

可与其他学科结合,利用计算机的快速处理能力和硬件优势,来满足图像增强处理的需求。另一方面,相比其他图像处理技术,图像彩色化方法的种类相对单一,而且彩色化过程中,很难达到彩色化的实时性和人眼视觉效果的双重要求,后期的研究可根据应用场景和算法的特点来选择优化图像彩色化方法,例如在监控应用中,需进行人脸识别、目标跟踪定位等稍高精度的图像处理的应用场景,建议选择借助图像融合、结合深度学习和稀疏表示的彩色化处理手段。当图像增强彩色化处理应用在车载系统、实时监控等图像处理实时性较高的场景,建议选择基于图像分割的

彩色化方法。当需要对图像内容的细节处理要求较高时, 建议优先选择借助偏微分方程的彩色化方法。总而言之, 图像彩色化作为一种图像增强处理手段, 提高图像彩色化的精确度、视觉效果以及图像分析时的精准应用始终是图像彩色化技术的终极和最基本目的。

参考文献:

- [1] 张军, 张海云, 赵玉刚, 等. 基于机器视觉的瓷砖裂纹检测[J]. 包装工程, 2018, 39(9): 146—150.
ZHANG Jun, ZHANG Hai-yun, ZHAO Yu-gang, et al. Crack Detection of Ceramic Tiles Based on Machine Vision[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(9): 146—150.
- [2] 史二颖, 朱家群, 杨长春. 基于最近邻搜索耦合近邻损耗聚类的图像伪造检测算法[J]. 包装工程, 2018, 39(5): 185—190.
SHI Er-ying, ZHU Jia-qun, YANG Chang-chun. Image Forgery Detection Algorithm Based on Nearest Neighbor Search Coupling Neighbor Loss Clustering[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(5): 185—190.
- [3] 陈安猛, 马骁, 王洪添, 等. 一种边缘检测的方法及装置: 中国, 105718933A[P]. 2016-06-29.
CHEN An-meng, MA Xiao, WANG Hong-tian, et al. Edge Detection Method and Device: China, 105718933A[P]. 2016-06-29.
- [4] MARKLE W. The Development and Application of Colorization[J]. Society of Motion Picture and Television Engineers Journal, 1989, 93(7): 632—635.
- [5] REINHARD E, ASHIIKHMIN M, GOOCH B, et al. Color Transfer between Images[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(5): 34—41.
- [6] SOUMYA T, THAMPI S M. Self-organized Night Video Enhancement for Surveillance Systems[J]. Signal, Image and Video Processing, 2017, 11(1): 57—64.
- [7] 周波, 钟昌勇, 马旭东, 等. 一种基于 RGB-D 信息的实时行人跟踪方法: 中国, 106384079A[P]. 2017-02-08.
ZHOU Bo, ZHONG Chang-yong, MA Xu-dong. Real-time Pedestrian Tracking Method Based on RGB-D Information: China, 106384079A[P]. 2017-02-08.
- [8] WELSH T, ASHIIKHMIN M, MUELLER K. Transferring Color to Greyscale Images[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 277—280.
- [9] LEVIN A, LISCHINSKI D, WEISS Y. Colorization Using Optimization[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 689—694.
- [10] SAPIRO G. Inpainting the Colors[C]// IEEE International Conference on Image Processing, Genoa, 2005: 698—701.
- [11] ELMOATAZ A, TOUTAIN M, TENBRINCK, D. On the p -Laplacian and ∞ -Laplacian on Graphs with Applications in Image and Data Processing[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2015, 8(4): 2412—2451.
- [12] HUANG H Z, ZHANG S H, MARTIN R R, et al. Learning Natural Colors for Image Recoloring[J]. Computer Graphics Forum, 2014, 33(7): 299—308.
- [13] LAI Y R, TSAI P C, YAO C Y, et al. Improved Local Histogram Equalization with Gradient-based Weighting Process for Edge Preservation[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(1): 1585—1613.
- [14] 陈颖, 王朔中. 避免颜色越界的各向异性扩散图像彩色化[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(2): 271—276.
CHEN Ying, WANG Shuo-zhong. Avoid Cross-border Color Anisotropic Diffusion Image Colorization[J]. Electronics and Information Technology, 2014, 36(2): 271—276.
- [15] 陈颖, 姚恒, 舒明磊. 基于再生核空间的自适应图像彩色化算法[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(10): 22—25.
CHEN Ying, YAO Heng, SHU Ming-lei. Adaptive Image Colorization Algorithm Based on Reproducing Kernel Space[J]. Microelectronics & Computer, 2012, 29(10): 22—25.
- [16] 厉旭杰, 赵汉理, 黄辉. 局部线性模型优化的灰度图像彩色化[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(4): 460—466.
LI Xu-jie, ZHAO Han-li, HUANG Hui. Local Linear Model Optimization Greyscale Image Colorization[J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(4): 460—466.
- [17] HUANG H, Li X, Zhao H, et al. Manifold-preserving Image Colorization with Nonlocal Estimation[J]. Multimedia Tools & Applications, 2015, 74(18): 7555—7568.
- [18] ZHENG Yu-feng, EDWARD A E. A Local-coloring Method for Night-vision Colorization Utilizing Image Analysis and Fusion[J]. Information Fusion, 2008, 9(2): 186—199.
- [19] LI B, ZHAO F, SU Z, et al. Example-based Image Colorization Using Locality Consistent Sparse Representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(11): 5188—5202.
- [20] 宋芳伟, 孙韶媛. 基于稀疏表示和色彩传递的图像融合与彩色化[J]. 激光与红外, 2014, 44(6): 687—691.
SONG Fang-wei, SUN Shao-yuan. Image Fusion and Colorization Based on Sparse Representation and Colour Transfer[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(6): 687—691.
- [21] 华斌, 杨巍, 盛家川. 改进颜色融合的医学图像彩色化技术[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(5): 1581—1583.
HUA Bin, YANG Wei, SHENG Jia-chuan. Medical Image Colorization Based on Improved Color Fusion[J]. Application Research of Computers, 2016,

- 33(5): 1581—1583.
- [22] 滕升华, 谌安军, 袁建华, 等. 一种改进的基于过度分割的图像彩色化方法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(7): 1160—1164.
TENG Sheng-hua, CHEN An-jun, YUAN Jian-hua, et al. An Improved Colorization Algorithm for Gray-scale Image Based on Over-segmentation[J]. Journal Electronics & Information Technology, 2006, 28(7): 1160—1164.
- [23] PETER P, KAUFHOLD L, WEICKET J. Turning Diffusion-based Image Colorization into Efficient Color Compression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(2): 860—869.
- [24] HU M, OU B, XIAO Y. Efficient Image Colorization Based on Seed Pixel Selection[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(22): 23567—23588.
- [25] 陈颖, 董嘉炜, 宗盖盖, 等. 过度分割与流形保持的图像彩色化[J]. 中国科技论文, 2016, 11(20): 2321—2324.
CHEN Ying, DONG Jia-wei, ZONG Gai-gai, et al. Manifold Preserving Image Colorization Using Segmentation[J]. China Sciencepaper, 2016, 11(20): 2321—2324.
- [26] 沈振一, 孙韶媛, 侯俊杰, 等. 基于随机森林和超像素分割优化的车载红外图像彩色化算法[J]. 红外技术, 2015, 37(12): 1041—1046.
SHEN Zhen-yi, SUN Shao-yuan, HOU Jun-jie, et al. The Vehicle Infrared Image Colorization Algorithm Based on Random Forest and Super Pixel Segmentation[J]. Infrared Technology, 2015, 37(12): 1041—1046.
- [27] YONG S H, SOOCHAHN L, HO Y J. Consistent Color and Detail Transfer from Multiple Source Images for Video and Images[J]. The Visual Computer, 2016, 32(10): 1273—1289.
- [28] 张砚, 罗强一, 刘东红, 等. 基于多尺度图像分割和颜色传递的遥感图像彩色增强方法: 中国, 103136733A[P]. 2013-06-05.
ZHANG Yan, LUO Qiang-yi, LIU Dong-hong, et al. Remote Sensing Image Enhancement Based on Color Transfer and Multi-scale Image Segmentation: China, 103136733A[P]. 2013-06-05.
- [29] GU X J, MENG C, GU X S. Thermal Image Colorization Using Markov Decision Processes[J]. Memetic Computing, 2017, 9(1): 15—22.
- [30] CHENG Z, YANG Q, SHENG B. Deep Colorization[C]// IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 415—423.
- [31] CHEN X W, LI J W, ZOU D Q, et al. Learn Sparse Dictionaries for Edit Propagation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(4): 1688—1698.
- [32] LIU Y, CHEN X, PENG H, et al. Multi-focus Image Fusion with a Deep Convolutional Neural Network[J]. Information Fusion, 2017, 36: 191—207.
- [33] ZHANG R, ISOLA P, EFROS A A. Colorful Image Colorization[C]// European Conference on Computer Vision, 2016, 99(7): 649—666.
- [34] PIERRE F, AUJOL J F, BUGEAU A, et al. Luminance-chrominance Model for Image Colorization[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2015, 8(1): 536—563.
- [35] 张焱. 车载红外图像彩色化算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
ZHANG Yao. Research on Infrared Image Colorization Algorithm for Vehicle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [36] IIZUKA S, SIMOSERRA E, ISHIKAWA H. Let There be Color: Joint End-to-end Learning of Global and Local Image Priors for Automatic Image Colorization with Simultaneous Classification[M]. ACM, 2016.
- [37] LARSSON G, MAIRE M, SHAKHNAROVICH G. Learning Representations for Automatic Colorization[M]. European Conference on Computer Vision, 2016, 99(8): 577—593.
- [38] 梁海. 基于多字典的多内容灰度图像彩色化算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
LIANG Hai. Multiple-content Image Colorization Algorithm Based on Multiple-dictionary[D]. Beijing: Beijing JiaoTong University, 2016.
- [39] DAN Yan, BAI Lian-fa, Yi zhang, HAN Jing. Multi-sparse Dictionary Colorization Algorithm Based on the Feature Classification and Detail Enhancement[J]. Optical Review, 2018, 25(1): 78—93.
- [40] 赵汉理, 季智坚, 金小刚, 等. GPU 加速的近实时图像彩色化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(8): 1425—1433.
ZHAO Han-li, JI Zhi-jian, JIN Xiao-gang, et al. GPU-accelerated Near Real-time Image Colorization[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, 29(8): 1425—1433.
- [41] 柏茂源, 代福平. 网络动态可视化的交互设计原则构建[J]. 包装工程, 2018, 39(4): 193—198.
BAI Mao-yuan, DAI Fu-ping. Building the Interaction Design Principles for Network Dynamic Visualization[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(4): 193—198.