



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办：中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
03
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

非真实感图像处理 P437





第20卷第3期（总第227期）

2015年3月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of

Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

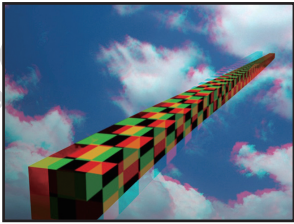
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

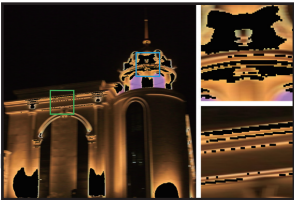
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

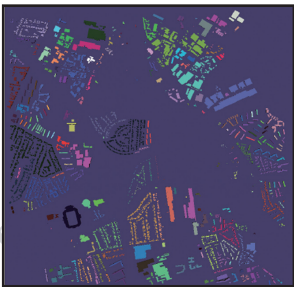
国内定价 50.00元



实时立体视觉系统中的深度映射(第0366页)



基于辐照度的运动模糊图像去模糊(第0395页)



面向智慧城市的3维城市在线可视化(第0445页)

综述

面向血管疾病诊断及预测分析的血流动力学模拟综述

徐梦佳, 杨金柱, 赵宏, 赵大哲 0297

图像处理和编码

多特征融合的车辆阴影消除

邱一川, 张亚英, 刘春梅 0311

图像分析和识别

基于局部时空特征方向加权的人体行为识别

李俊峰, 张飞燕 0320

对表情鲁棒的面部轮廓线3维人脸识别

常朋朋, 达飞鹏, 梅俊 0332

融合双层信息的显著性检测

姜霞霞, 李宗民, 匡振中, 刘玉杰 0340

面向动摄像机的高速运动目标检测

穆春迪, 谢剑斌, 闫玮, 刘通, 李沛秦 0349

匹配滤波在SAR目标单个散射部件检测中的应用

丁柏圆, 文贡坚, 钟金荣, 马聪慧 0357

图像理解和计算机视觉

实时立体视觉系统中的深度映射

李大锦, 白成杰 0366

遥感图像处理

GPU支持的SAR影像几何校正大规模并行处理

杨景辉, 程春泉, 张继贤, 黄国满 0374

基于正则化约束的遥感图像多尺度去模糊

谭海鹏, 曾炫杰, 牛四杰, 陈强, 孙权森 0386

第十届中国计算机图形学大会专栏

基于辐照度的运动模糊图像去模糊

方贤勇, 阚未然, 周健, 李黎, 郭延文 0395

对比度、颜色一致性和灰度像素保持的消色算法

王勋, 罗婷婷, 刘春晓, 彭浩宇 0408

结合因子图的多目的地地图布局优化

罗振珊, 张俊松, 范接鹏 0418

高阶连续的形状可调三角多项式曲线曲面

严兰兰, 韩旭里 0427

改进的自然图像铅笔画效果生成

黄志勇, 姚远, 张晶晶, 马凯, 任东 0437

面向智慧城市的3维城市在线可视化

潘斌, 郭小明, 陈明明, 陈为, 彭群生 0445

CONTENTS

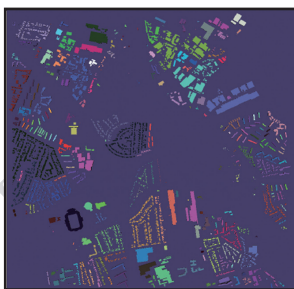
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Depth mapping in real-time stereoscopic systems (P0366)



Deblurring of motion blurred images based on the irradiance(P0395)



Online 3D city visualization for smarter cities(P0445)

Review

Survey of hemodynamics simulation for diagnosis and prediction in vascular disease

Xu Mengjia, Yang Jinzhu, Zhao Hong, Zhao Dazhe 0297

Image Processing and Coding

Vehicle shadow removal with multi-feature fusion

Qiu Yichuan, Zhang Yaying, Liu Chunmei 0311

Image Analysis and Recognition

Human behavior recognition based on directional weighting local space-time features

Li Junfeng, Zhang Feiyan 0320

Expression-robustness 3D face recognition based on facial profiles

Chang Pengpeng, Da Feipeng, Mei Jun 0332

Image saliency detection based on two-layer information fusion

Jiang Xiaxia, Li Zongmin, Kuang Zhenzhong, Liu Yujie 0340

Detecting high-speed moving targets in moving camera environments

Mu Chundi, Xie Jianbin, Yan Wei, Liu Tong, Li Peiqin 0349

The application of matched filter in detecting single scattering parts of SAR targets

Ding Boyuan, Wen Gongjian, Zhong Jinrong, Ma Conghui 0357

Image Understanding and Computer Vision

Depth mapping in real-time stereoscopic systems

Li Dajin, Bai Chengjie 0366

Remote Sensing Image Processing

GPU supported massively parallel processing for geometric correction of SAR imagery

Yang Jinghui, Cheng Chunquan, Zhang Jixian, Huang Guoman 0374

Remote sensing image multi-scale deblurring based on regularization constraint

Tan Haipeng, Zeng Xuanjie, Niu Sijie, Chen Qiang, Sun Quansen 0386

Column of Chinagraph'2014

Deblurring of motion blurred images based on the irradiance

Fang Xianying, Kan Weiran, Zhou Jian, Li Li, Guo Yanwen 0395

Decolorization with contrast, color consistency and grayscale pixel preservation

Wang Xun, Luo Tingting, Liu Chunxiao, Peng Haoyu 0408

Synthesizing multi-destinations map with factor graph

Luo Zhenshan, Zhang Junsong, Fan Jiepeng 0418

Higher-order continuous shape adjustable trigonometric polynomial curve and surface

Yan Lanlan, Han Xuli 0427

Improved algorithm for natural image pencil drawing production

Huang Zhiyong, Yao Yuan, Zhang Jingjing, Ma Kai, Ren Dong 0437

Online 3D city visualization for smarter cities

Pan Bin, Guo Xiaoming, Chen Mingming, Chen Wei, Peng Qunsheng 0445

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)03-0408-10

论文引用格式: Wang X, Luo T T, Liu C X, Peng H Y. Decolorization with contrast, color consistency and grayscale pixel preservation[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(3): 0408-0417. [王勋, 罗婷婷, 刘春晓, 彭浩宇. 对比度、颜色一致性和灰度像素保持的消色算法[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(3): 0408-0417.][DOI:10.11834/jig.20150312]

对比度、颜色一致性和灰度像素保持的消色算法

王勋, 罗婷婷, 刘春晓, 彭浩宇

浙江工商大学计算机与信息工程学院, 杭州 310018

摘要: 目的 为了解决目前消色算法中不能同时保持原始图像的对比度、颜色一致性和灰度像素特征的问题, 提出一种新的优化算法, 最大限度地同时保留这些视觉特性。方法 为了保持原始图像的结构和局部对比度信息, 用双高斯模型构建像素对之间的误差能量项; 为了保持颜色一致性, 采用局部线性嵌入模型构建能量项, 确保原始图像中颜色一致的像素在结果图像中也拥有一样的灰度级; 为了保持灰度像素特征, 先标记出原始图像中的灰度像素, 并强制规定这些像素的灰度值是已知的且在消色变换的过程中始终不变, 然后用双高斯模型构建出灰度像素与其他像素之间的误差能量项。线性结合这 3 个能量项, 得到目标能量函数, 再通过迭代法求解出使总能量值达到最小的灰度值, 从而得到了最终的消色结果。结果 实验结果表明, 本文算法能够同时较好地保持原始图像中的对比度、颜色一致性和灰度像素特征。结论 本文算法基本符合人类对图像对比度变化的感知程度, 而且能够很好地保持细节信息和全局结构, 可应用于数字打印、模式识别等方面, 具有很大的应用价值。

关键词: 彩色到灰度变换; 对比度保持; 降维; 灰度保持; 颜色一致

Decolorization with contrast, color consistency and grayscale pixel preservation

Wang Xun, Luo Tingting, Liu Chunxiao, Peng Haoyu

School of Computer Science & Information Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China

Abstract: **Objective** In theory, color-to-gray transformation is a process of dimensionality reduction, thus making information loss inevitable. Therefore, the goal of decolorization is to use the limited gray level range to preserve as much information of the original color image as possible. Researchers have proposed many related algorithms. However, the algorithms fail in the simultaneous preservation of the local and global contrast, as well as the contrast, color consistency, and grayscale pixel, of the original image. To solve these problems, we propose a new approach that can maximally maintain the features of the original color image. **Method** To preserve the structure and local information, we use a bimodal Gaussian distribution, followed by the difference between the pixel and its neighbors, to construct the error energy function. For global color consistency, we use locally linear embedding to build the energy function, which causes the same color pixels to ex-

收稿日期: 2014-09-04; 修回日期: 2014-10-20

基金项目: 国家科技支撑计划基金项目(2014BAK14B01); 国家自然科学基金项目(61003188, 61379075, 61170098, 61100137); 浙江省自然科学基金项目(LY14F020004, Z1101243); 浙江省重点科技创新团队项目(2012R10041-15); 浙江工商大学青年人才基金项目(QZ13-9); 北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室开放基金项目(BUAA-VR-13KF-2013-3); 浙江省电子商务与物流信息技术重点实验室开放基金项目(2011E10005); 浙江省新苗人才计划项目(3070JQ4213062P); 浙江工商大学研究生科技创新项目(1120XJ1513171)

第一作者简介: 王勋(1967—), 男, 教授, 2006 年于浙江大学获计算机科学与技术专业博士学位, 主要研究领域为计算机图形学、图像视频处理、智能信息处理与可视化。E-mail: wx@mail.zjgsu.edu.cn

通信作者: 刘春晓, E-mail: cxliu@mail.zjgsu.edu.cn

Supported by: National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2014BAK14B01); National Natural Science Foundation of China (61003188, 61379075, 61170098, 61100137)

hibit the same gray levels in the result. For grayscale feature preservation, we distinguish grayscale pixels and specify that the gray values of grayscale pixels are known quantities and are initially unchanged during conversion. We then construct the energy function between grayscale pixels and other pixels. Thereafter, we build the objective function with the linear combination of the three energy functions and the gray image is obtained by solving the objective function using the iterative method. **Result** Experimental results show that our algorithm can preserve salient structure and fine detail, as well ensure that the same color can be transformed to the same grayscale and that the gray value of the grayscale pixel would be unchanged after conversion. **Conclusion** Our algorithm conforms to the degree of perception about contrast change in image and can preserve detailed information and global structure. The algorithm can be applied to digital printing, pattern recognition, and so on, and thus has great application value.

Key words: color-to-gray conversion; contrast preservation; dimensionality reduction; grayscale preservation; color consistency

0 引言

理论上,彩色图像到灰度图像的变换是一个降维问题,其目的在于用有限的灰度级范围尽可能多地表示彩色图像的信息。在日常生活中,由于彩色到灰度的变换应用非常广泛(如数字打印,图像渲染,模式识别等),消色算法在图像和视觉领域都得到了密切地关注。当今社会虽然已经出现了彩色打印技术,但比起灰度打印,该技术需要更多的能耗,因此在我们的日常生活中无法普及。而如果我们采用传统的消色算法转换并打印图像,比如直接提取亮度通道或者将 R、G、B 3 个值进行线性结合得到灰度结果,会使得消色后的灰度图像损失很多重要信息以及削弱显著结构。

目前针对人类视觉感知系统的研究表明,人类视觉系统不能精确地感知到色调和亮度的变化^[1-2],而且每个人对亮度变化的敏感程度也不一样^[3]。同时由消色变换的原理可知,有限的灰度级是不可能一一对应地表示彩色空间中的每一种颜色,因此只能是尽可能多地保留视觉感知最敏感的对比度变化部分。又因为人眼对于图像相邻区域的颜色变化最为敏感,所以认为相邻像素之间的信息在灰度变换中起着重要的作用。据此结论,提出一种新的消色算法,该算法能够最大限度地保留原始图像的对比度,颜色一致性和灰度像素特征。

本文算法的核心是创建和求解一个目标能量函数,该能量函数主要包含 3 个能量项——对比度保持能量项、颜色一致性约束项和灰度特征保持能量项。在本文算法中,通过双高斯模型构建像素对之

间的对比度保持能量项,以此保持原始图像的结构和局部对比度信息;同时采用局部线性嵌入模型构建颜色一致性约束能量项,确保原始图像中颜色一致的像素在结果图像中也拥有一样的灰度级;为了保持灰度像素特征,先标记出原始图像中的灰度像素(即 R、G、B 3 个值相等的像素),并强制规定这些像素的灰度值是已知的且在消色变换的过程中始终等于它们的 R 值,然后用双高斯模型构建出灰度像素与其他像素之间的灰度特征保持能量项。线性结合这 3 个能量项,得到目标能量函数,然后再通过迭代法求解出使总能量值达到最小的灰度值,从而得到了最终的消色结果。

1 相关工作

根据算法的不同区域是否采用不同的函数进行变换,将当前的消色技术分为 3 类——局部函数法、全局函数法和混合法。局部函数法是指对原始图像中不同的局部区域应用不同的函数。在局部函数法中,Bala 和 Eschbach^[4]将色彩信息和亮度信息相结合用以保持不同颜色之间的边界,其中色彩信息是通过高通滤波来获得。Neumann 等人^[5]通过颜色梯度和快速集成的方法进行消色变换。Smith 等人^[6]基于可感知的亮度信息提出了一种灰度变换算法,该算法先用全局映射获得灰度图像之后,再用局部锐化法锐化图像。Wu 和 Robinson^[7]提出了一个新的灰度化变换方法,他们通过颜色聚类和多维尺度来保持边缘结构,并防止出现低频失真的现象。尽管局部函数法能够保持图像大部分的结构信息,但是会损失很多的局部对比度信息并产生光晕等现象。

全局函数法是指对整幅图像的所有像素采用相同的变换函数。Gooch 等人^[8]根据亮度和色调的差异计算相邻像素之间的距离,然后通过求解像素对之间的最小能量值获得最终的消色图像。而 Rasche 等人^[9]提出了另一种计算差异的方法,他们先统计一幅图像总的颜色种类,然后计算颜色对之间的差异,并构建一个误差函数来求得灰度图像。这两种算法虽能保持部分的结构信息,但会产生一些不和谐的轮廓以及损失很多的色彩信息。为了更好地保持图像的色彩对比度和亮度对比度,Grundland 和 Dodgson^[10]提出了一种将色彩信息添加到亮度信息上的线性映射方法。而相对地, Kim 等人^[11]提出了一种非线性映射的方法,该方法不仅能够保持原始图像的颜色差异和全局一致性,还能进一步应用到视频变换中,但它会使图像丢失或者模糊边缘特征。为了解决 Kim 等人^[11]方法的问题,王辉等人^[12]基于三角级数混合多项式逼近的思路,提出了改进的非线性全局映射灰度化方法。朱薇等人^[13]在 IHLS 颜色空间上,基于人眼感知明度的视觉模型,也提出了一种全局非线性映射的方法,该方法能更好地反映人眼对彩色图像的感知。而 Cui 等人^[14]也提出了一个非线性映射的方法,该方法通过 ISOMAP 在彩色空间和灰度空间之间进行流形学习,以此保留原图像的流形结构。

前面的这些方法虽然能够较好地保持原始图像的局部对比度或全局结构,但是它们不能同时在结果中保留这些信息。针对这个不足, Kuk 等人^[15]在构建能量函数时不仅考虑到相邻像素之间的差异,还考虑到每个像素与标识像素之间的差异,从而确保了部分的局部对比度和全局结构能在结果图像中体现出来。而 Lu 等人^[16]减弱了以前算法中严格的颜色顺序约束,并在像素对中应用双峰分布函数自动选择合适的符号,从而较好地保持了原始图像的对比度信息。Zhu 等人^[17]基于滤波原理定义了一个通道显著性度量标准,该标准能够引导图像进行对比度调整,从而锐化灰度图像。Wu 等人^[18]提出了一个新的彩色图像灰度化算法,他们先用软分割将彩色图像分成多个区域,然后通过求解一个全局映射函数来获得每个区域最优的灰度级,最后将局部细节信息添加到结果中获取最终的灰度图。Song 等人^[19]基于

概率图模型将彩色图像灰度化变换当成是一个视觉线索保持的问题,并通过积分最小化方法优化该模型,获得最终的灰度图像。这些既考虑了局部对比度也考虑了全局对比度保持的方法,称为混合法。它们虽然能够同时保持局部和全局信息,但是它们依然会损失部分重要的边界信息或破坏全局颜色一致性特征,而且目前所提出的所有方法均未考虑到灰度像素问题。

本文提出了一个新的消色算法,该算法能够同时保持原始图像的对比度信息,颜色一致性和灰度像素特征。我们算法的核心部分是创建一个目标函数,而根据不同的目的,该函数可被分成 3 个部分,每个部分都有它们各自的作用和意义:第一部分用于保持局部对比度和全局信息,第二部分是为了确保颜色一致性,最后一部分保证了灰度像素的灰度值在消色变换的过程中不发生变化。下面,我们将详细介绍算法部分。

2 本文消色算法

为了解决目前消色算法无法同时保持原图像中的对比度信息,颜色一致性和灰度像素特征问题,提出一种新的消色算法。在该算法中,通过双高斯模型构建像素对之间的差异能量项,用以保持原始图像的对比度信息;采用局部线性嵌入模型构建能量项来保持颜色一致性;而为了保持灰度像素特征,标记出原始图像中的灰度像素,并强制约束这些像素的灰度值在灰度变换的过程中固定等于 R 值,再用双高斯模型构建出误差能量项,以此确保灰度像素的量级与其他像素一致。最后将 3 个能量项进行线性组合,得到目标能量函数,再通过迭代法求解出使总能量值达到最小的灰度值,从而得到了能够同时较好地保持原始图像的这些特征信息的消色结果。目标函数定义为

$$E = \lambda_1 E_1 + \lambda_2 E_2 + \lambda_3 E_3 \quad (1)$$

式中, E_1 为对比度保持能量项, E_2 为颜色一致性约束项, E_3 为灰度特征保持能量项。 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别表示 E_1 、 E_2 、 E_3 在目标函数中所占的比重。建立目标函数后,通过迭代法求出使能量值达到最小的图像灰度值,从而得到灰度图像。

2.1 对比度保持能量项

由于人眼对图像相邻区域的颜色或亮度的变化

最为敏感,因此通过保持每个像素与邻近的4个像素之间的对比度来保持整幅图像的局部对比度和全局对比度。首先,回顾一下以前的消色算法的能量函数,对像素 x 和 y ,他们通过最小化下面的误差能量函数来得到灰度化结果,即

$$\min_g \sum_{x,y} (g_x - g_y - \delta_{xy})^2 \quad (2)$$

式中, g_x, g_y 分别表示像素 x 和 y 灰度化后的灰度值。从概率密度上看,式(2)可以看成像素 x 和 y 之间的灰度级差异服从均值为 δ_{xy} 的高斯分布^[16]。因此在本文算法中,采用高斯分布函数来表示像素对之间的灰度级差异。

在等式(1)中, E_1 表示对比度保持能量项,通过 E_1 来保持原始图像的局部和全局对比度,即

$$E_1 = - \sum_{(x,y) \in N} \ln \{ \alpha_{xy} G(\delta_{xy}, \sigma^2) + (1 - \alpha_{xy}) G(-\delta_{xy}, \sigma^2) \} \quad (3)$$

式中, $\sigma \in [0, 1]$ 是一个用于控制平滑程度的变量; δ_{xy} 表示颜色对比度, α_{xy} 为像素对的灰度级,等式(3)的算法架构和Lu等人^[16]的方法相类似,都重点考虑了相邻像素对之间的差异。Lu等人^[16]首先定义了一个全局非线性映射函数,然后对所有的像素均用该函数进行消色变换。这种全局变换法虽然能够较好地保持原始图像的结构,但由于没考虑到每对像素对本身的色彩特征,导致局部色彩边界的损失。

在本文算法中,将图像的每个像素点都当成是一个变量。对每个像素 x ,首先找出它的相邻像素 $y, (x, y) \in N, N$ 表示相邻像素集;然后根据双高斯模型创建对应的能量函数。高斯函数为

$$G(\delta_{xy}, \sigma^2) \propto \exp \left\{ - \frac{|g_x - g_y - \delta_{xy}|^2}{\sigma^2} \right\} \quad (4)$$

$$\delta_{xy} = \sqrt{(L_x - L_y)^2 + (a_x - a_y)^2 + (b_x - b_y)^2} / 100 \quad (5)$$

式中, L, a 和 b 分别表示彩色图像在CIE Lab空间中的亮度通道和两个颜色通道。

由等式(4)可得,高斯函数在 δ_{xy} 处达到了最值,而 δ_{xy} 的大小不仅与像素对之间的对比度有关,也与像素对的灰度级符号 α_{xy} 相关。由于灰度级符号在公式中并没有准确的物理意义,因此通过调整它的正负来提高对比度保持约束的灵活性。

在彩色图像中,很容易辨别出颜色对中哪种

颜色的亮度更强一些。比如,在正常人看来,任何其他颜色都比黑色亮一些。对于这种能够明确区分出次序的颜色对,采用单高斯函数,如式(4)。而为了更好地判断哪些颜色对是可区分的,定义判断条件

$$c_x \leq c_y \Leftrightarrow r_x \leq r_y, g_x \leq g_y, b_x \leq b_y \quad (6)$$

像素对 x, y 如果能满足式(6)中的条件,则认为这对像素对的颜色次序能被明确区分,此时 δ_{xy} 的符号直接取决于 $g_x - g_y$ 。否则不明确指定 δ_{xy} 的符号,而是采用双高斯模型来自动寻找一个合适的颜色次序。其中双高斯模型为

$$\frac{1}{2} \{ G(\delta_{xy}, \sigma^2) + G(-\delta_{xy}, \sigma^2) \} \quad (7)$$

根据前面定义的颜色次序判断方法,将判断条件函数化

$$\alpha_{xy} = \begin{cases} 1.0 & r_x \leq r_y, g_x \leq g_y, b_x \leq b_y \text{ 或} \\ & r_y \leq r_x, g_y \leq g_x, b_y \leq b_x \\ 0.5 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

如果 $\alpha_{xy} = 1$,那么像素对采用单高斯函数 $G(\delta_{xy}, \sigma^2)$ 或者 $G(-\delta_{xy}, \sigma^2)$ 。否则,令颜色对之间的差异服从双高斯分布,如式(7),以此来自动地选择符号。

在式(3)中,用像素的4邻域来约束和增强对比度,并用双高斯来自动寻找合适的符号。但如果我们的目标函数仅包含这一能量项,虽然能够增强局部和全局的对比度,却有可能会使原图中颜色相同的像素转换到不同的灰度级上。因此,在目标函数中加入了能量项 E_2 ,用以确保颜色一致性特征。

2.2 颜色一致性约束项

局部线性嵌入(LLE)算法^[20]是一种将一组高维数据投影到低维空间上的非线性降维方法,它能够使降维后的数据较好地保持原有的流形结构。假设给定一组数据集 $X_1, \dots, X_N$,其中 X_x 表示像素 x 的一组特征向量(在本文算法中,用的是 R, G, B 3个特征值)。对每个 X_x ,找出它的 K 个最近邻,即 $X_{x_1}, \dots, X_{x_k}$ 。然后,通过最小化式(9)能量函数计算出一组能够很好地重建出 X_x 的权重 w_{xj} 。

$$\sum_{x=1}^N \| X_x - \sum_{j=1}^K w_{xj} X_{x_j} \|^2 \quad (9)$$

求解出的权重 w_{x_j} 还需要满足一个约束条件, 即 $\sum_{j=1:K} w_{x_j} = 1$ 。根据 Roweis 和 Saul^[20] 所描述的方法, 可计算出权重矩阵 $\mathbf{W}$ (w_{x_j} 表示 $\mathbf{W}$ 的第 x_j 个元素), 该矩阵包含了数据集在特征空间中的流形信息。在本文消色算法中, 希望图像在消色后能够保持颜色一致性特征, 这就要求图像中颜色相同的像素之间的联系在灰度化后依然保持着这种联系 (一般称为流形结构)。而 LLE 算法在进行数据降维时所得到的权重矩阵包含了数据集的流形信息, 因此用该算法建立颜色相同的像素之间的联系, 并以此来保持颜色一致性特征。

根据以上的研究和结论, 建立了颜色一致性约束能量函数

$$E_2 = - \sum_{x \in U} \ln \left\{ \exp \left\{ - \frac{|g_x - g'_x|^2}{2\sigma^2} \right\} \right\} \quad (10)$$

$$g'_x = \sum_{j=1:K} w_{x_j} g_j$$

式中, U 表示整幅图像的所有像素; w_{x_j} 表示在重建像素 x 时, 第 j 个最近邻所占的权重, 其值可通过 LLE 算法^[20] 计算得到。

前面已经提到, 用 LLE 算法计算得到的权重矩阵能够很好地重构出原图像。如果保持原图像的流形结构, 那就意味着在结果图像中用权重矩阵也能很好地重构出灰度图像, 即 $g_x = g'_x$, g_x 表示像素 x 的消色结果。因此, 在处理中, 将 g'_x 当成是一个整体, 使得 g_x 和 g'_x 的差异服从高斯分布函数, 然后构建如式 (10) 所示的误差能量函数, 其值越小, 表示每个像素的 K 个最近邻越能很好地重建像素本身, 意味着颜色一致性特征保持地越好。

2.3 灰度特征保持能量项

在彩色图像中存在着一些 R、G、B 3 个值相等的像素, 这种像素称为灰度像素。理论上, 在进行灰度变换时, 灰度像素的灰度值固定为 R 值。然而目前已有的灰度化算法中少有考虑到这个问题的, 因此, 希望在本文算法中能够保持图像的灰度特征。但若目标函数中仅包含 E_1 和 E_2 项, 依然会导致灰度像素的灰度值在图像消色的过程中发生改变。因此, 定义了灰度特征保持能量项。

首先, 从原始图像的所有像素中标记出灰度像素; 然后, 将这些灰度像素看做是已知量, 并构建能

量函数。但如果仅是将这些像素作为已知像素点进行计算的话, 由于灰度像素和其他像素在数量级上的不同, 会导致灰度像素在结果图像中特别地凸显出来。因此, 为了使结果图像能够比较和谐, 同时能够保持所需要的对比度, 在创建能量函数时, 将灰度像素作为一个硬性的约束条件, 使得其他像素的灰度值能根据灰度像素的灰度值进行调整。其能量函数为

$$E_3 = - \sum_{x \in U} \sum_{t \in P} \ln \{ \alpha_{xt} G(\delta_{xt}, \sigma^2) + (1 - \alpha_{xt}) G(-\delta_{xt}, \sigma^2) \} \quad (11)$$

该能量项表示每个像素均需与所有的灰度像素进行一次能量计算。式中 P 表示图像中所有灰度像素的集合; α_{xt} 表示像素 x 所对应的 δ_{xt} 的符号, 其计算方法与式 (8) 一样。 $G(\delta_{xt}, \sigma^2)$ 表示像素 x 和灰度像素 t 之间的差异所服从的高斯函数, 即

$$G(\delta_{xt}, \sigma^2) \propto \exp \left\{ - \frac{|g_x - g_t - \delta_{xt}|^2}{\sigma^2} \right\} \quad (12)$$

式中, g_t 表示灰度像素, 是一个已知量, 其值等于像素 t 所对应的 R 值。

2.4 参数设置

本文算法是将彩色图像中的颜色差异转换成灰度级之间的差异。然而, 要产生一个满意的结果有时候需要进行人工调整, 在本文算法中, 有 4 个可调整的参数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 σ 。

1) λ_1 和 λ_2 分别用于控制目标函数中 E_1 和 E_2 所占的比重, 默认为 $\lambda_1 = 1$ 和 $\lambda_2 = 1$ 。

2) λ_3 表示 E_3 在目标函数中所占的比重, 其默认值为 $\lambda_3 = \frac{1}{T}$, T 表示彩色图像中所包含的灰度像素个数。之所以取这个默认值, 是因为如果 $\lambda_3 = 1$, 会使得除灰度像素以外的其他像素的能量值增加 T 倍左右。这样会导致灰度像素与其他像素的量级出现不同, 从而使得灰度像素在结果图中特别地凸显出来。因此, 取 $\lambda_3 = \frac{1}{T}$ 为默认值。

3) σ 是高斯函数中的参数, 该参数用于调整灰度图像的平滑程度, 其值越大, 结果图像越平滑, 如图 1 所示。一般情况下, 取 $\sigma = 0.1$ 为默认值。

图1 不同 σ 的结果Fig. 1 Results with different σ

本文算法能够有效地增强对比度,保持颜色一致性和灰度像素特征。当然,用默认的参数设置并不能满足所有图像的需求,因此用户可以根据图像的不同需求调整参数以达到满意的效果。

3 实验结果

用 Matlab R2011b 来实现本文算法,并在一个拥有 3.20 GHz Intel® Core™ i5 CPU 和 4 GB 内存的 PC 机上测试本文的结果。在空间变换上,使用 MATLAB 函数 `applycform` 将图像从 RGB 空间转换到 CIELab 空间上。在参数设置上,采用默认值,即 $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = 1/T, \sigma = 0.1$ 。

在文献[21]中,针对多种算法进行了相应的性能比较,得出 Smith 等人^[6]和 Grundland 和 Dodgson^[10]的算法性能是最好的,因此本文只与这两种

算法进行比较。为了更好地证明算法的有效性,还将本文算法的结果与传统的直接取亮度通道(先将图像转到 CIE Lab 空间,然后取亮度通道作为灰度图像)和 RGB 三通道线性结合的方式(在这里采用常见的加权平均法,其具体转化式为 $G = 0.30R + 0.59G + 0.11B$)进行比较,以及与近年来在灰度化邻域做得比较优秀的 Lu 等人^[16]算法相对比。本文中的原始图像和其他算法的参数设置是从 Čadík^[21]中获取的。

图 2 和图 3 共展示了 5 组不同类型图像的对比图。从图 2、图 3 中可以发现 Smith 等人^[6]的结果损失了大部分的局部信息。而 Grundland 和 Dodgson^[10]的方法能保持较多的局部对比度信息,但是它具有一定的局限性,即其仅适用于像图 3 中所展示的这种内容比较丰富的图像,而对于图 2

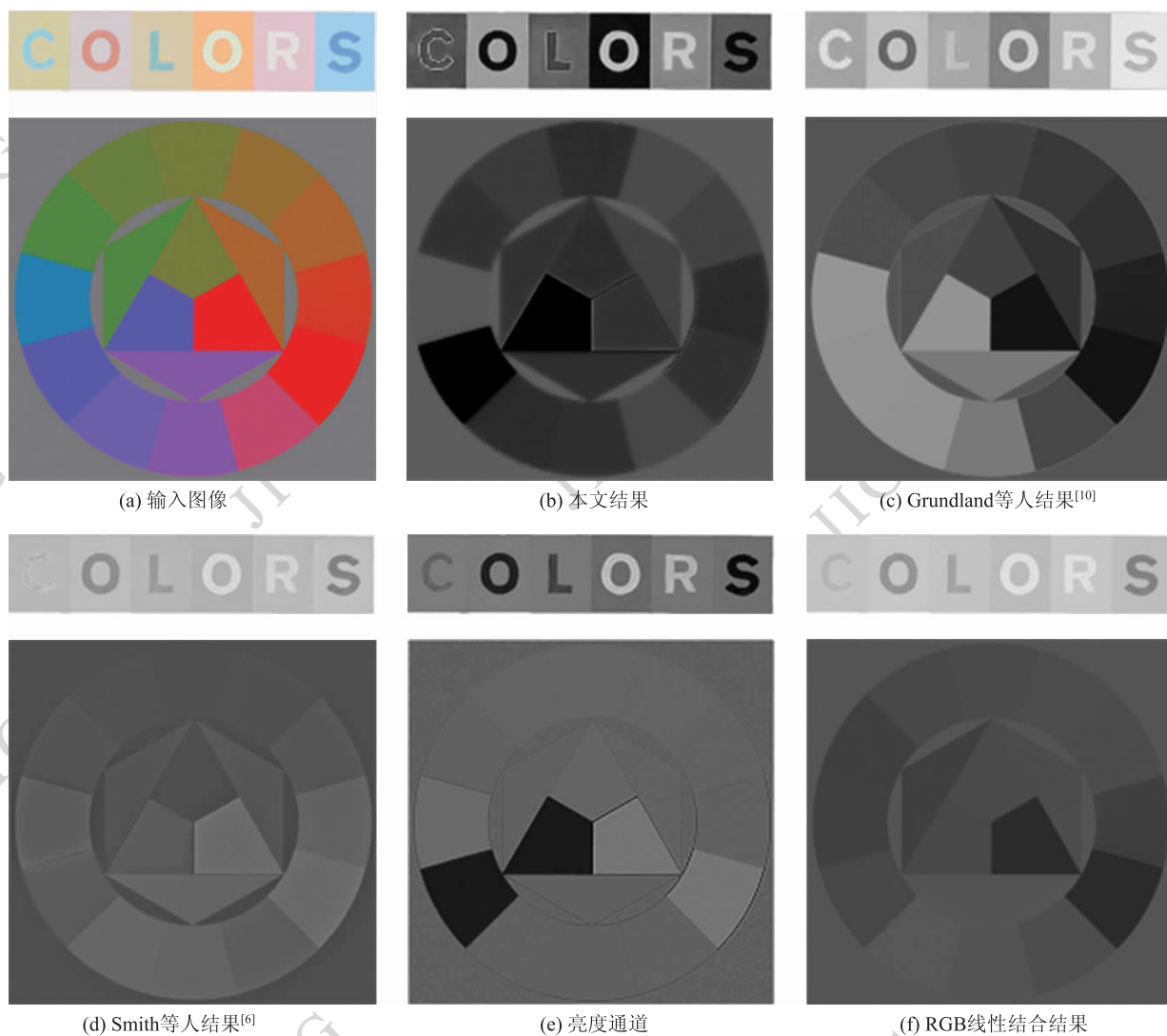


图2 不同消色算法对内容单一图像的测试结果

Fig. 2 The results of different algorithms for simple image

中这种内容单一、颜色变化明显的图像,其局部对比度保持的效果并不理想。针对图2所示的图像,传统的两种灰度化算法所得到的灰度图像损失了更多的对比度信息。对图3所示的图像,传统的两种灰度化算法得到的效果基本上保持了全局的结构信息,但仍然损失了很多的局部对比度信息。与这4种算法相比,本文算法不仅适用于内容丰富的图像也适用于内容单一的图像,而且能够同时很好地保持原始图像的全局结构和局部对比度信息。

对于保持颜色一致性,本文算法能使原图中颜色一致的像素在变换后得到相同的灰度值。如图4所示,将本文的实验结果与Smith等人^[6]和Lu等人^[16]算法的结果进行对比,图4中灰色边框中的像

素是灰度像素,数字表示边框中像素所对应的灰度值。在本文结果中,这些灰度像素的灰度值始终等于它们原始图像三通道的值,而另外两种算法的结果看起来虽然也是白色的,但它们的灰度值实际上已经发生了变化,因此他们的算法并没有保持原始图像的灰度像素特征。

图5是细节对比图,其中第1行是原图和各个方法所得出来的效果,第2行是细节放大图。在原始彩色图像中,可以清楚地看到蓝色衣服上的褶皱。但用Grundland和Dodgson^[10]和Lu等人^[16]的算法进行消色变换,得到如图的结果,从图中我们可以发现这种褶皱变得平滑了,说明这两种方法会损失重要的局部细节信息。相对比而言,本文方法能够清晰地保持这些细节信息。

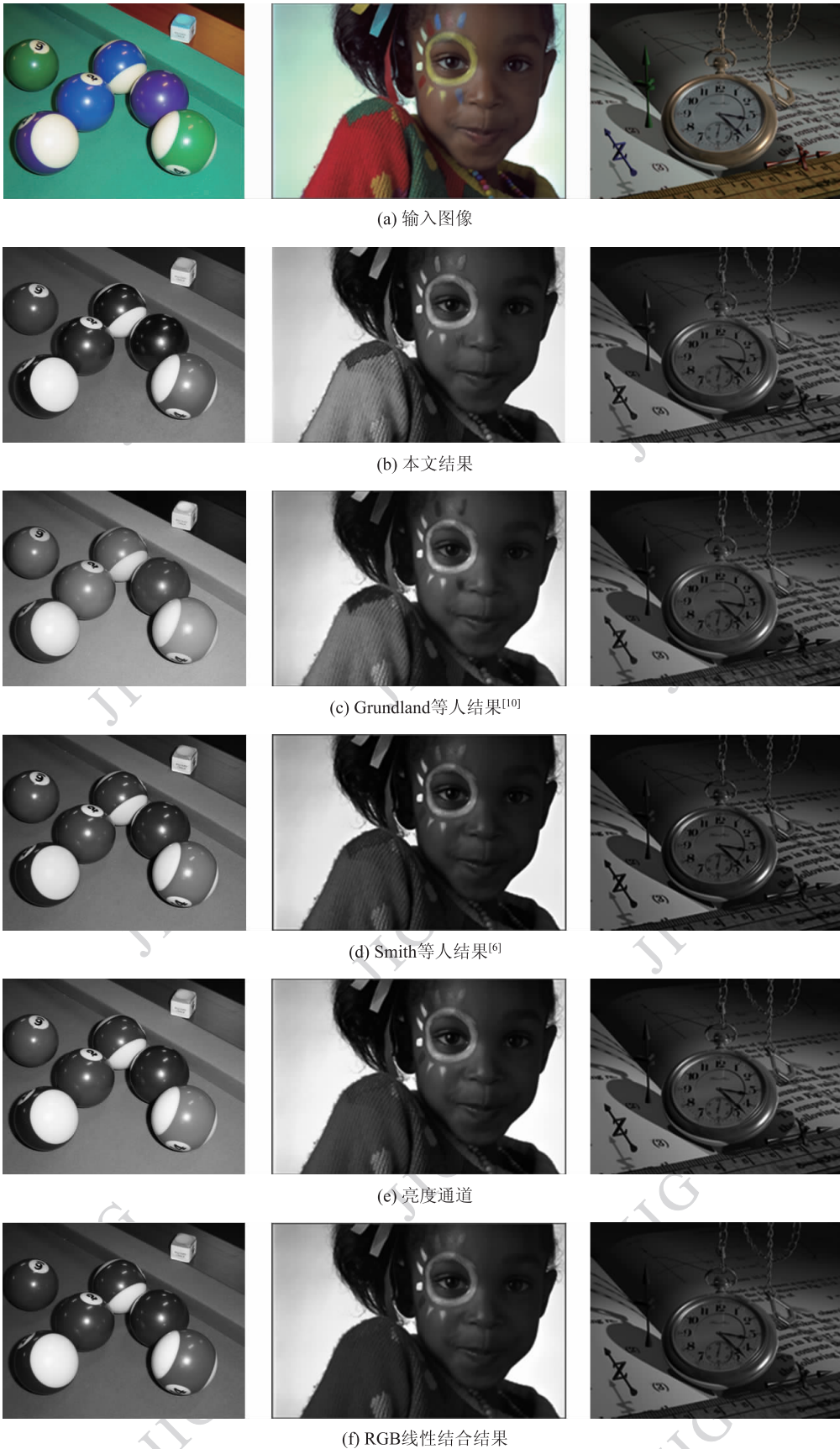


图3 不同消色算法对内容复杂图像的测试结果

Fig. 3 The results of different algorithms for complex images

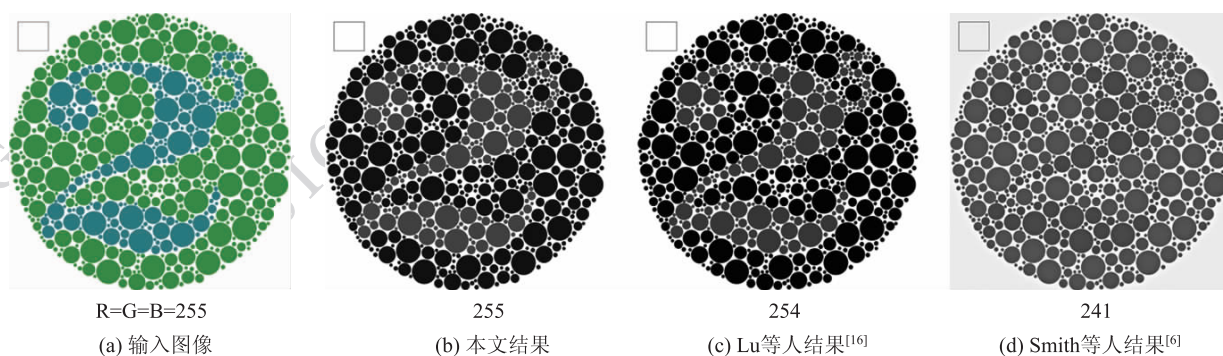


图4 不同结果的数据分析

Fig. 4 The digital analysis of different results

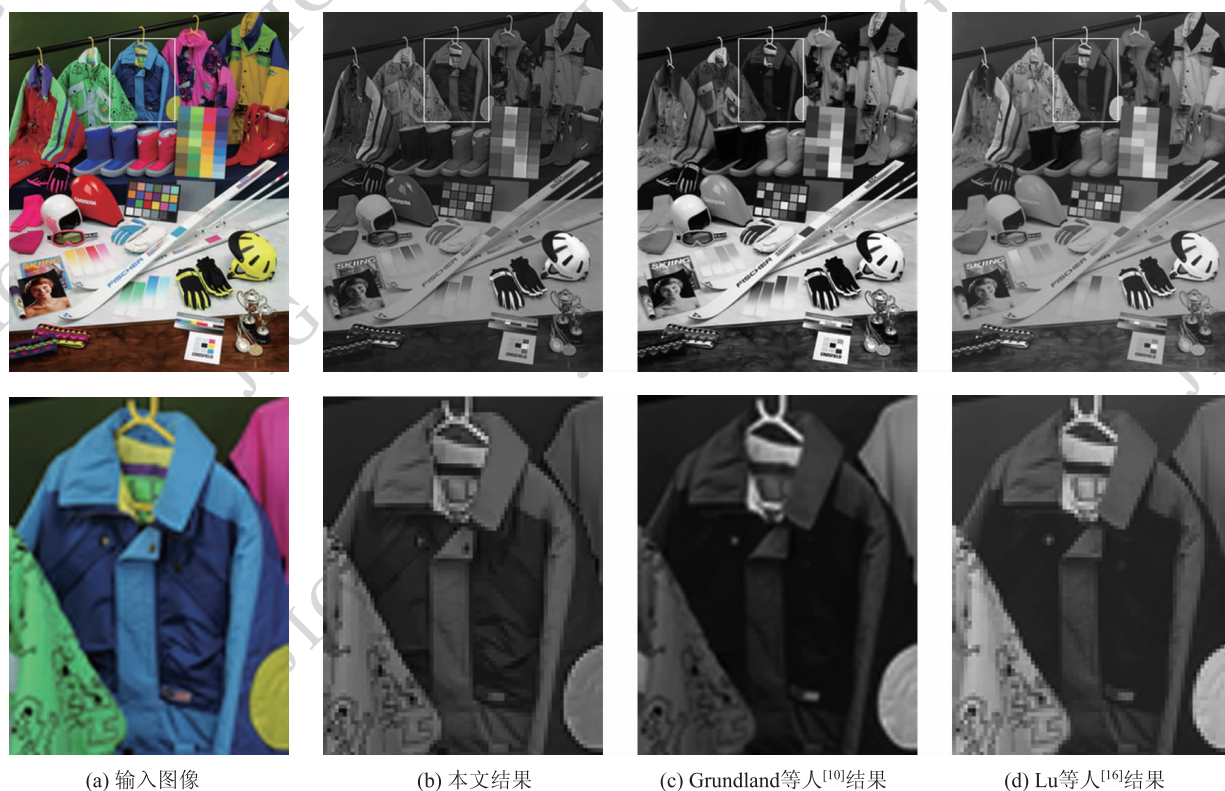


图5 细节对比图

Fig. 5 The comparison of detail information

4 结论

本文展现了一个用双高斯模型和局部线性嵌入算法有效地同时保持颜色一致性和灰度像素特征,并增强对比度的消色算法。在本文算法中,令像素对之间的差异服从高斯分布,并利用双高斯函数来自动选择像素对的颜色对比度符号和构建能量函数,从而达到保持全局和局部对比度的目的。同时将局部线性嵌入算法与双高斯模型相结

合来保持图像的对比度和全局颜色一致性特征,即原始图像中颜色相同的像素经过消色变换后得到的灰度值也相等。而且本文标记了原图像中的灰度像素,并规定其灰度值在变换过程中不发生改变,以此保证在结果图像中能保持原始图像中灰度像素的信息。本文的实验结果也进一步证明了本文算法能够适用于大部分图像,并产生更好的结果。

但由于本文算法在颜色一致性约束项中引入了局部线性嵌入算法以及灰度像素保持能量项,

在对目标函数求导时要进行额外的遍历,所以运行速度较慢。对1幅 200×44 的彩色图像,本文算法运行需要6 min左右。在接下来的研究中,将从速度优化方面继续进行,目前正在尝试用协同优化以及智能优化算法对本文算法进行优化,提高其运行效率。

参考文献 (References)

- [1] Lotto R, Purves D. A rationale for the structure of color space [J]. *Trends in Neurosciences*, 2002, 25(2): 84-88.
- [2] Corney D, Haynes J, Rees G, et al. The brightness of color [J/OL]. *PLoS ONE*, 2009, 4(3): #e5091. [2014-08-20]. [DOI: 10.1371/journal.pone.0005091]
- [3] Özgen E. Language, learning, and color perception [J]. *Current Directions in Psychological Science*, 2004, 13(3): 95-98.
- [4] Bala R, Eschbach R. Spatial color-to-grayscale transform preserving chrominance edge information [C]// *Proceedings of the 12th Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, Applications*. Scottsdale, Arizona: The Society for Imaging Science and Technology Press, 2004: 82-86.
- [5] Neumann L, Čadík M, Nemcsics A. An efficient perception-based adaptive color to gray transformation [C]// *Proceedings of Eurographics Workshop on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization and Imaging*. Banff, Alberta: Eurographics Association Press, 2007: 73-80.
- [6] Smith K, Landes P, Thollot J, et al. Apparent greyscale: a simple and fast conversion to perceptually accurate images and video [J]. *Computer Graphics Forum*, 2008, 27(2): 193-200.
- [7] Wu Z R, Robinson J. Edge-preserving colour-to-greyscale conversion [J]. *IET Image Processing*, 2014, 8(4): 252-260.
- [8] Gooch A A, Olsen S C, Tumblin J, et al. Color2gray: salience-preserving color removal [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 634-639.
- [9] Rasche K, Geist R, Westall J. Detail preserving reproduction of color images for monochromats and dichromats [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2005, 25(3): 22-30.
- [10] Grundland M, Dodgson N A. Decolorize: fast, contrast enhancing, color to grayscale conversion [J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(11): 2891-2896.
- [11] Kim Y, Jang C, Demouth J, et al. Robust color-to-gray via nonlinear global mapping [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(5): #161.
- [12] Wang H, Chen X D, Wang Y G. The improved color-to-gray via nonlinear global mapping [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2013, 25(10): 1476-1479. [王辉, 陈小雕, 王毅刚. 改进的非线性全局映射灰度化方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(10): 1476-1479.]
- [13] Zhu W, Liu L G. Decolorize nonlinear tri-mapping in IHLS color space [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2013, 25(2): 154-159. [朱薇, 刘利刚. IHLS 颜色空间的灰度化全局非线性三向映射[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(2): 154-159.]
- [14] Cui M, Hu J X, Razdan A, et al. Color-to-gray conversion using ISOMAP [J]. *The Visual Computer*, 2010, 26(11): 1349-1360.
- [15] Kuk J G, Ahn J H, Cho N I. A color to grayscale conversion considering local and global contrast [C]// *Proceedings of the 10th Asian Conference on Computer Vision*. Lecture Notes in Computer Science: 6495. New Zealand, Queenstown: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 513-524.
- [16] Lu C W, Xu L, Jia J Y. Contrast preserving decolorization [C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Computational Photography*. Seattle, WA: IEEE, 2012: 1-7.
- [17] Zhu W, Hu R Z, Liu L G. Grey conversion via perceived-contrast [J]. *The Visual Computer*, 2014, 30(3): 299-309.
- [18] Wu J L, Shen X Y, Liu L G. Interactive two-scale color-to-gray [J]. *The Visual Computer*, 2012, 28(6-8): 723-731.
- [19] Song M L, Tao D C, Chen C, et al. Color to gray: visual cue preservation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(9): 1537-1552.
- [20] Roweis S T, Saul L K. Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding [J]. *Science*, 2000, 290(5500): 2323-2326.
- [21] Čadík M. Perceptual evaluation of color-to-grayscale image conversions [J]. *Computer Graphics Forum*, 2008, 27(7): 1745-1754.