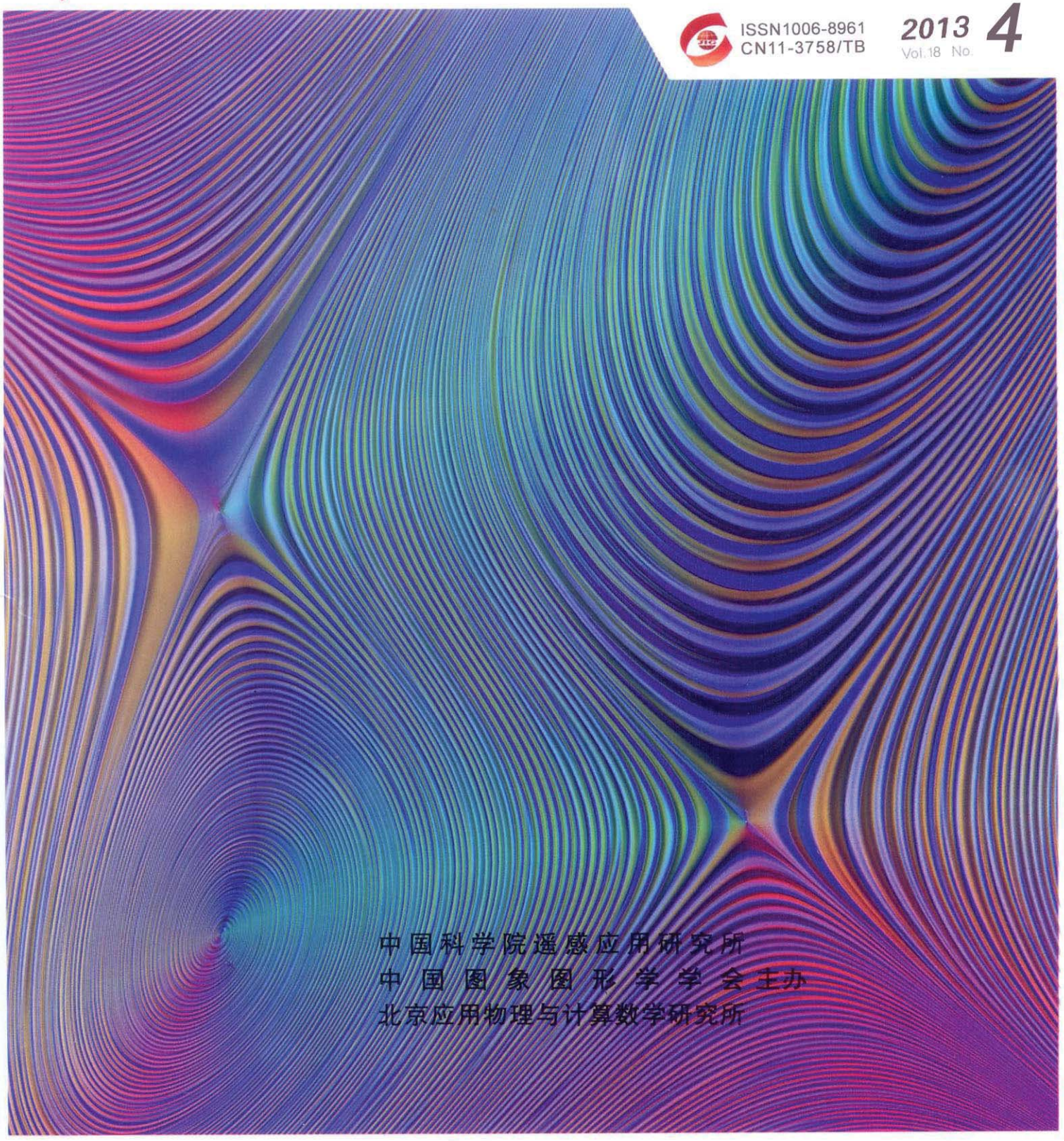
Journal of Image and Graphics

中国图象图形学报

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2013 4
Vol.18 No.



中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国精品科技期刊

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2013 年 4 月　第 18 卷　第 4 期(总第 204 期)

目　次

综述

车载视觉系统中的行人检测技术综述 …… 许腾,黄铁军,田永鸿(359)

图像处理和编码

利用边缘匹配矢量量化和变率编码的高嵌入效率信息隐藏 …… 王凌飞,潘志斌,邓晓曼,胡森(368)

小波变换和 SHA-1 相结合的图像压缩加密 …… 李园园,张绍武(376)

图像分析和识别

基于 Haar 纹理的非结构化道路消失点检测 …… 王永忠,文成林(382)

多种人群密度场景下的人群计数 …… 覃勋辉,王修飞,周曦,刘艳飞,李远钱(392)

计算机图形学

大规模散乱点的 k 邻域快速搜索算法 …… 杨军,林岩龙,王阳萍,王小鹏(399)

三角 Bézier 曲面的几何约束形变 …… 陈军(407)

遥感图像处理

面向测绘任务的光学遥感影像质量分级评定 …… 王昱,时红伟,胡闻达(415)

采用高斯归一化水体指数实现遥感影像河流的精确提取 …… 沈占锋,夏列钢,李均力,骆剑承,胡晓东(421)

地理信息技术

图层约束下的点状自然灾害风险地图综合 …… 潘东华,王静爱,贾慧聪,袁艺(429)

模板阴影体扩展方法 …… 曹雪峰,万刚,李锋,李明(436)

“第 9 届中国计算机图形学大会”专栏

利用 SIFT 特征的非对称匹配图像拼接盲检测 …… 杜振龙,杨凡,李晓丽,郭延文,沈钢纲(442)

视觉感知的图像和视频抽象 …… 宋杰,徐丹,时永杰(450)

局部线性模型优化的灰度图像彩色化 …… 厉旭杰,赵汉理,黄辉(460)

分区域去运动模糊 …… 张璐,盛斌,马利庄(467)

脑血管体绘制的快速表意式增强 …… 吴腾飞,骆岩林,田沄,武仲科,闫建平(476)

第七届国际图象图形学学术会议征文通知 …… 封 3

© 中国图象图形学报版权所有

Journal of Image and Graphics

(**Monthly, Started in 1996**)

Vol. 18 No. 4 April 2013

Contents

Review

Survey on pedestrian detection technology for on-board vision systems ····· Xu Teng, Huang Tiejun, Tian Yonghong(359)

Image Processing and Coding

Highly efficient information hiding using SMVQ-compressed images and variable length coding ····· Wang Lingfei, Pan Zhibin, Deng Xiaoman, Hu Sen(368)

Image compression and encryption based on DWT and SHA-1 ····· Li Yuanyuan, Zhang Shaowu(376)

Image Analysis and Recognition

Vanishing point detection of unstructured road based on Haar texture ····· Wang Yongzhong, Wen Chenglin(382)

Counting people in various crowed density scenes using support vector regression ····· Qin Xunhui, Wang Xiufei, Zhou Xi, Liu Yanfei, Li Yuanqian(392)

Computer Graphics

Fast algorithm for finding the *k*-nearest neighbors of a large-scale scattered point cloud ····· Yang Jun, Lin Yanlong, Wang Yangping, Wang Xiaopeng(399)

Shape modification of triangular Bézier surfaces with geometric constraints ····· Chen Jun(407)

Remote Sensing Image Processing

Optical image quality grading assessment orienting to surveying & mapping mission requirements ····· Wang Yu, Shi Hongwei, Hu Wenda(415)

Automatic and high-precision extraction of rivers from remotely sensed images with Gaussian normalized water index ····· Shen Zhanfeng, Xia Liegang, Li Junli, Luo Jiancheng, Hu Xiaodong(421)

Geoinformatics

Generalization for point features in risk mapping of natural hazards based on layer constraint ····· Pan Donghua, Wang Jing'ai, Jia Huicong, Yuan Yi(429)

Extension method of stencil shadow volume ····· Cao Xuefeng, Wan Gang, Li Feng, Li Ming(436)

Issum of Chinagraph'2012

Fogery image blind detection by asymemetric search based on SIFT ····· Du Zhenlong, Yang Fan, Li Xiaoli, Guo Yanwen, Shen Ganggang(442)

Visual perception based image and video abstraction ····· Song Jie, Xu Dan, Shi Yongjie(450)

Local linear model optimization based grayscale image colorization ····· Li Xujie, Zhao Hanli, Huang Hui(460)

Motion deblurring based on image segmentation ····· Zhang Lu, Sheng Bin, Ma Lizhuang(467)

Fast illustrative enhancements on volume rendering of cerebral vessel ····· Wu Tengfei, Luo Yanlin, Tian Yun, Wu Zhongke, Yan Jianping(476)

© 中国图象图形学报版权所有

中图法分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2013)04-0460-07
论文引用格式: 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.

局部线性模型优化的灰度图像彩色化

厉旭杰, 赵汉理, 黄辉
温州大学智能信息系统研究所, 温州 325035

摘 要: 提出一种有效的仅需要少量线条着色的灰度图像彩色化算法。该算法在 Lab 颜色空间实现,基于抠图拉普拉斯矩阵设计了一个局部线性优化模型,只需要少量的人工线条着色就能产生高质量的彩色化图像。该模型的彩色化效果总体上与现有方法相当,而在某些情况下,能降低在灰度图像彩色化过程中出现的色彩渗透问题。局部线性优化模型建立的代价函数最优解能通过求解稀疏线性方程组获得。在构建抠图拉普拉斯矩阵时,发现利用扩散距离来代替欧氏距离能对本文模型进一步改进。实验结果显示,用基于扩散距离的改进局部线性优化模型方法,和基于欧氏距离的局部线性优化模型算法相比较,在减少人工线条交互和彩色化效果方面都能有较好的改进。
关键词: 彩色化;抠图拉普拉斯矩阵;扩散距离;灰度图像

Local linear model optimization based grayscale image colorization

Li Xujie, Zhao Hanli, Huang Hui
Intelligent Information Systems Institute, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China

Abstract: An effective grayscale image colorization technique is presented in this paper by annotating the image with a few color scribbles. A cost function from a local linear model optimization assumption on Lab color channels is designed and derived. By taking advantage of the matting Laplacian matrix, the local linear model optimization can produce high quality colorizations as existing methods, while having better performance in color bleeding with sparse constraints. Our local linear model optimization is actually the global optimum of the cost function, which can be solved with a sparse linear system. We further improve the performance of our primary model to use diffusion distances instead of Euclidean distances for the construction of the matting Laplacian matrix. The experimental results show that fewer scribbles are required and better colorizations are produced with the improved diffusion distances based optimization model.
Key words: colorization; matting Laplacian matrix; diffusion distance; grayscale image

0 引 言

彩色化是一个给黑白图像、电影或电视节目加上颜色的处理过程。传统的黑白图像彩色化技术是通过纯手工或者在计算机软件工具辅助下完成的,这项工作需要人工消耗大量的时间。由于彩色化技术具有相当大的实际应用价值,被广泛地应用于图像、视频编辑和图像通信,以及科学、工业和军事等多个领域[1-6]。彩色化是在给定图像亮度通道情况下,计算颜色通道的过程,因此可以被看成一个病态问题。根据处理病态问题的规整化形式,将彩色化

收稿日期:2012-08-20;**修回日期**:2012-12-03
基金项目:国家自然科学基金项目(61100146);浙江省自然科学基金项目(Y1110004、LQ12F02010);浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放课题(A1117)
第一作者简介:厉旭杰(1981—),男,讲师,2008 年于宁波大学获通信与信息系统专业硕士学位,主要研究方向为图形图像处理技术、高性能并行计算。E-mail:lixujie101@yahoo.com.cn
通讯作者:赵汉理,E-mail:hanlizhao@gmail.com

© 中国图象图形学报版权所有

分为基于颜色转移和基于颜色扩展这两类处理方法。基于颜色转移虽然能获得高质量的彩色化图像,但是彩色化的效果强烈依赖于参考图像与目标图像的相似程度。因此,参考图像的选取是制约该方法实施的一个关键。基于局部颜色扩展的图像彩色化技术只需要简单的局部着色,比如各区域内涂上彩色线条作为颜色扩展的初始条件就可以产生高质量的彩色图像,操作简单,处理效果好,引起了很多研究者的关注。

在局部颜色扩展的图像彩色化技术方面,具有代表性的是 Levin 等人[4]的工作。Levin 等人认为两个邻域的像素如果强度值相似,那么必须有相似的颜色值。从而提出了一个能量最优化的模型。由于颜色分配是在色差空间进行的,不仅能保证图像在处理前后的灰度保持不变,而且消除了直接在 RGB 控件进行处理可能产生的颜色混扰。Gastal 等人[5]设计了边缘保持的主域变换滤波器,通过灰度图像的边缘信息,来扩散人工着色的线条以产生彩色图像,生成了和 Levin 等人一样的高质量彩色图像。Bhat 等人[6]在基于梯度域最优化的框架里使用用户提供的手工着色线条彩色化了灰度图像。在梯度域最优化的框架里,很容易实现了 Levin 算法,针对 Levin 算法会出现色彩渗透,Bhat 等人在算法中进行了改进。但是也只是相对于 Levin 算法减少了色彩渗透现象。由于 Levin 算法在最优化过程中需要求解一个大规模稀疏矩阵,当图像尺寸达到一定规模,求解非常耗时。而且由于计算机内存限制,图像尺寸进一步增加将无法获得彩色化结果。针对这种情况,胡伟等人[7]研究了高分辨率灰度图像的快速多分辨率着色,用金字塔模型对图像进行下采样,使用 Levin 算法对低分辨率进行着色,始终控制矩阵规模,使得高分辨率灰度图像的计算效率大大提高,且不至于降低彩色化的效果。在局部颜色扩展的图像彩色化技术方面另一个具有代表性的是 Yatziv 等人[8]的研究,他们在确定各混合色的权值时引入了“测地线距离”,颜色混合法能取得不逊于 Levin 算法的彩色化结果,算法的处理速度也比 Levin 算法快,但是 Yatziv 算法对初始着色点的分布比较敏感,当初始着色区域的分布位置有所改变时,常常出现不正确的着色结果,因此 Criminisi 等人[9]对测地线距离在图像和视频中的效果和效率进行了进一步改进。目前局部颜色扩展的图像彩色化方法绝大部分都是采用人工线条着色完图像所有区域,然后一次性把整幅图像进行彩色化。针对这种情况,贾云涛等人[10]和 Sheng 等人[11]分别提出了一种交互式图像彩色化通用框架和由粗到细逐步完善的彩色化方法。贾云涛等人的彩色化方法分为 3 个步骤:1)用户交互式给区域内灰度图像手工着色;2)根据用户给定区域内的着色像素用图分割的方法来进行精确的区域分割;3)在求出的精确分割区域内进行着色。这种彩色化方法更接近于实际的绘画创作,而且一旦图像精确分割后,区域之间相互独立。但是如何找到一种有效且快速的方法来进行精确的区域分割有待于进一步研究。由于图像很难进行精确的区域分割,Sheng 等人利用旋转移不变的 Gabor 滤波器最优化的特征空间测量像素强度之间的相似性和纹理之间的相似性,采用了由粗到细逐步完善的彩色化方法。

提出了一种新的基于局部线性模型优化的灰度图像彩色化方法。基于亮度通道 L 和颜色对立维度 a 和 b 之间的一个局部线性优化模型,推导了一个代价函数。局部线性优化模型引用了抠图拉普拉斯矩阵,该模型建立的代价函数的最优解能通过求解稀疏线性方程获得。只需要少量的人工线条着色,就能有效地产生高质量的彩色化图像。

1　算法思想

采用 Lab 彩色空间,L 表示亮度通道,a 和 b 表示颜色对立维度通道,灰度图像彩色化就是给定亮度通道 L,计算颜色对立维度通道 a 和 b。

本文算法基于如下假设:图像中除去物体边界,邻近像素间的颜色是平滑的,不会发生剧变;颜色通道和亮度通道具有边缘一致性。基于上述两个假设,给出了一个颜色对立维度通道 a、b 和亮度通道 L 的一个局部线性模型

$$\boldsymbol{F}_i = \alpha_k \boldsymbol{I}_i + \beta_k, \forall i \in \boldsymbol{\omega}_k \tag{1}$$

式中,i 和 k 为图像像素索引值,$\boldsymbol{F}_i$ 表示对立维度通道 a 或 b,$\boldsymbol{I}_i$ 表示已知的亮度通道。线性系数(α_k,β_k)在窗口 $\boldsymbol{\omega}_k$ 中为常量。从式(1)中可以得到 $\nabla \boldsymbol{F} = \alpha \nabla \boldsymbol{I}$,因此对立维度通道和亮度通道保持了边缘的一致性。本文提出的局部线性模型在形式上和 He 等人[12]提出的滤波器模型类似。

目标是找到 $\boldsymbol{F}$、α、β,最小化代价函数

$$J(\boldsymbol{F},\alpha,\beta) = \sum_{k \in I} \left(\sum_{i \in \boldsymbol{\omega}_k} ((\alpha_k \boldsymbol{I}_i + \beta_k - \boldsymbol{F}_i)^2 + \varepsilon \alpha_k^2) \right) \tag{2}$$

© 中国图象图形学报版权所有

式中，$\boldsymbol{\omega}_k$ 为以 k 为中心的 3×3 窗口，ε 为规则化参数，防止 α_k 取的太大，增加数值稳定性。

因此，为找到线性系数[α, β]使得式(2)取得最小值

$$J(\boldsymbol{F}) = \min_{\alpha,\beta} J(\boldsymbol{F},\alpha,\beta) \tag{3}$$

把式(2)重写为

$$J(\boldsymbol{F},\alpha,\beta) = \sum_k \left\| \boldsymbol{H}_k \begin{bmatrix} \alpha_k \\ \beta_k \end{bmatrix} - \overline{\boldsymbol{F}}_k \right\|^2 \tag{4}$$

在每个窗口 $\boldsymbol{\omega}_k$ 中，$\boldsymbol{H}_k$ 定义为(|$\boldsymbol{\omega}_k$| +1)×2 的矩阵，|$\boldsymbol{\omega}_k$|表示窗口中像素的个数，$\boldsymbol{H}_k$ 矩阵中行的形式为[$\boldsymbol{I}_i$ 1]，最后一行为[$\sqrt{\varepsilon}$ 1]。$\overline{\boldsymbol{F}}_k$ 定义为(|$\boldsymbol{\omega}_k$| + 1)×1的向量，元素为 $\boldsymbol{F}_k$，最后一个元素为0。

为了求解式(4)，对式(4)中的(α_k, β_k)求偏导数，得到

$$\frac{\partial J(\boldsymbol{F},\boldsymbol{r})}{\partial \boldsymbol{r}} = \frac{\partial \sum_k \| \boldsymbol{H}_k\boldsymbol{r} - \overline{\boldsymbol{F}}_k \|^2}{\partial \boldsymbol{r}} = \frac{\partial \sum_k (\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{r} - \overline{\boldsymbol{F}}_k)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{r} - \overline{\boldsymbol{F}}_k)}{\partial \boldsymbol{r}} = \sum_k 2\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{r} - 2\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{F}}_k \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{r}$ = [α_k, β_k]$^{\mathrm{T}}$，为了求解式(4)的最小值，式(4)中的[α_k, β_k]求偏导数结果应为0，因此可得到[α_k,β_k]$^{\mathrm{T}}$ = $(\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_k)^{-1}\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{F}}_k$，把结果代入式(4)，得

$$J(\boldsymbol{F}) = \sum_k \| (\boldsymbol{H}_k(\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_k)^{-1}\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}} - I)\overline{\boldsymbol{F}}_k \|^2 = \sum_k \overline{\boldsymbol{F}}_k^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{H}}_k^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{H}}_k\boldsymbol{F}_k \tag{6}$$

式中，$\overline{\boldsymbol{H}}_k^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{H}_k(\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_k)^{-1}\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{I}$，$\sum_k \overline{\boldsymbol{H}}_k^{\mathrm{T}}\overline{\boldsymbol{H}}_k$ 能被证明是 $N\times N$(N 为图像像素的总数)的抠图拉普拉斯矩阵[12-13]

$$\boldsymbol{L} = \sum_{k\,|\,(i,j)\in\boldsymbol{\omega}_k} \left(\delta_{ij} - \frac{1}{|\boldsymbol{\omega}_k|}\left(1 + \frac{1}{\frac{\varepsilon}{|\boldsymbol{\omega}_k|} + \sigma_k^2}(\boldsymbol{I}_i - \mu_k)(\boldsymbol{I}_j - \mu_k)\right)\right) \tag{7}$$

式中，δ_{ij}是克罗内克函数，如果 i 和 j 相等，则 δ_{ij}为1，否则 δ_{ij}为0；μ_k 和 σ_k^2 分别是亮度通道中以 k 为中心的 $\boldsymbol{\omega}_k$ 窗口中的像素的平均值和方差。|$\boldsymbol{\omega}_k$|表示窗口中像素的个数，ε 为规则化参数，在算法实现中设置为 10^{-6}。

最小化式(2)中的代价函数得到

$$J(\boldsymbol{F}) = \min_{\alpha,\beta} J(\boldsymbol{F},\alpha,\beta) = \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}\boldsymbol{F} \tag{8}$$

抠图拉普拉斯矩阵被广泛地用在图像和视频抠图中[13-16]，而本文局部线性优化模型正是利用抠图拉普拉斯矩阵在抠图中的性能来指导灰度图像的彩色化，为了解决灰度图像彩色化的问题，对如下函数进行最小化

$$J(\boldsymbol{F}) = (\boldsymbol{F} - \boldsymbol{S})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}(\boldsymbol{F} - \boldsymbol{S}) + \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}\boldsymbol{F} \tag{9}$$

式中，$\boldsymbol{D}$ 为 $N\times N$ 对角矩阵，在该对角矩阵中，人工着色区域相应的对角线上的值为1，其余对角线上的值为0。$\boldsymbol{S}$ 对应为手工着色图像的对立维度通道 a 和 b。根据$\frac{\partial J(\boldsymbol{F})}{\partial \boldsymbol{F}} = 0$，可以得到

$$(\boldsymbol{D} + \boldsymbol{L})\boldsymbol{F} = \boldsymbol{D}\boldsymbol{S} \tag{10}$$

从式(10)可以看出，对立维度通道 a 或 b 可以通过求解线程稀疏矩阵方程获得。抠图拉普拉斯矩阵 $\boldsymbol{L}$ 为 $N\times N$ 矩阵。最近 Huang 等人[16]用 CUDA (compute unified device architecture)实现了抠图拉普拉斯矩阵，并应用在高分辨率的图像抠图算法中。在运算速度上比用传统串行算法效率提高了 100 多倍，而且可以减少 80% 的内存使用率。这为抠图拉普拉斯矩阵的实时应用提供有效的方式。式(10)中 $\boldsymbol{D} + \boldsymbol{L}$ 为稀疏矩阵，求解稀疏线性矩阵方程应用非常广泛，如何提高求解稀疏线性矩阵方程的速度和减少内存的使用，已经成为学术界和工程界研究的热点。求解算法可以分为两类，直接法和迭代法。MatrixPro GPU 公司[17]开发了基于 CUDA 的并行线性稀疏矩阵方程求解，相比于其他直接法在速度上有比较大的优势。相比而言，迭代法在算法复杂性和内存要求上比直接法更有优势，而且通常容易并行化[18]。Krishnan 等人[19]采用多网格和多层次预条件迭代法可以高效地求解线程稀疏矩阵方程，并且该方法很适合采用 GPU 并行算法实现。

2 实验结果

图1显示了3幅灰度图像彩色化结果，通过少量人工手工着色，不需要人工对图像进行分割，应用本文算法产生了高质量的彩色化图像，特别在图像细节上获得了很好的性能。因为在彩色化过程当中亮度通道保持不变，从式(1)中可以看出，对立维度通道和亮度通道保持了边缘的一致性。由于抠图拉普拉斯矩阵能在图像抠图中很好地提取前景和背景，特别在图像细节上表现出了很好的性能。本文算法提出的局部线性模型最优化算法很好地利用了抠图拉普拉斯矩阵的优点，用少量的人工线条着色，通过稀疏数

© 中国图象图形学报版权所有

据插值来扩散人工着色的线条来产生彩色图像。图 1 中显示的 3 幅灰度图像彩色化结果可以看出,本文算法彩色化结果获得了和 Levin 算法彩色化结果类似的效果,而 Yatziv 算法在第 3 幅图像彩色化过程中产生了色彩渗透。测地线距离是对灰度差的累积,因此与两个点的空间距离有关。如果已着色像素和未着色像素过远,就可能造成彩色化结果出现误差。Yatziv 算法采用测地线距离来衡量两个像素之间的相似性,因此对初始着色点的分布比较敏感。

图 2 显示了 3 组用 Levin 算法、Yatziv 算法、Bhat 算法和本文算法彩色化用少量的人工线条着色的灰度图像的处理结果。虽然 Levin 等人[4]的能量最优化的模型在大部分情况下,可以保证产生高质量的彩色化图像。但是在少量的人工线条着色的灰度图像的处理过程也会产生色彩渗透,必须进一步增加人工着色的线条输入,从图 2(b)(c)可以看出,在少量手工着色的情况下,3 组图像均出现了色彩渗透。针对 Levin 算法会出现色彩渗透,Bhat 等人[6]

图 1　本文算法、Levin 算法和 Yatziv 算法的彩色化效果对比

Fig. 1　Colorization results compared with the popular Levin et al.'s colorization method and Yatziv et al.'s colorization method

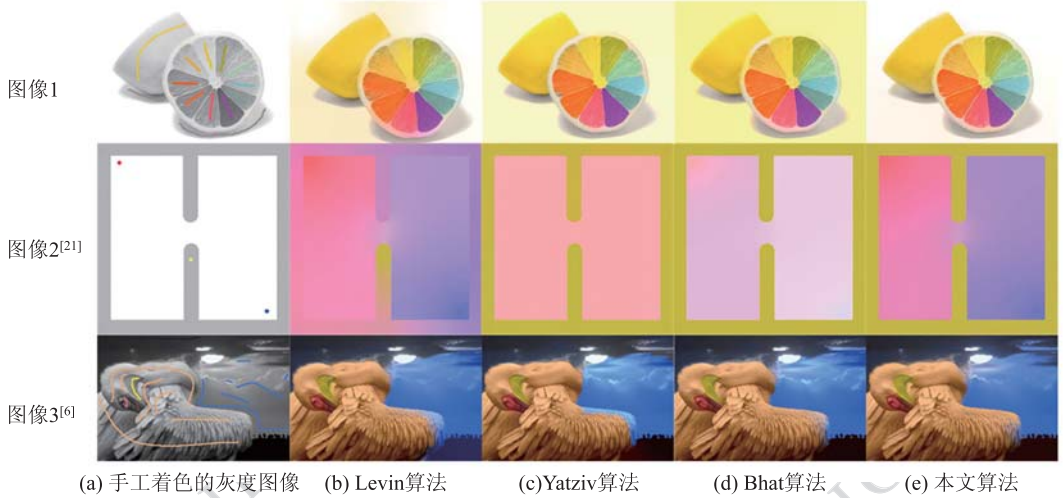


图 2　本文算法与 Levin 算法、Yatziv 算法、Bhat 算法的效果对比

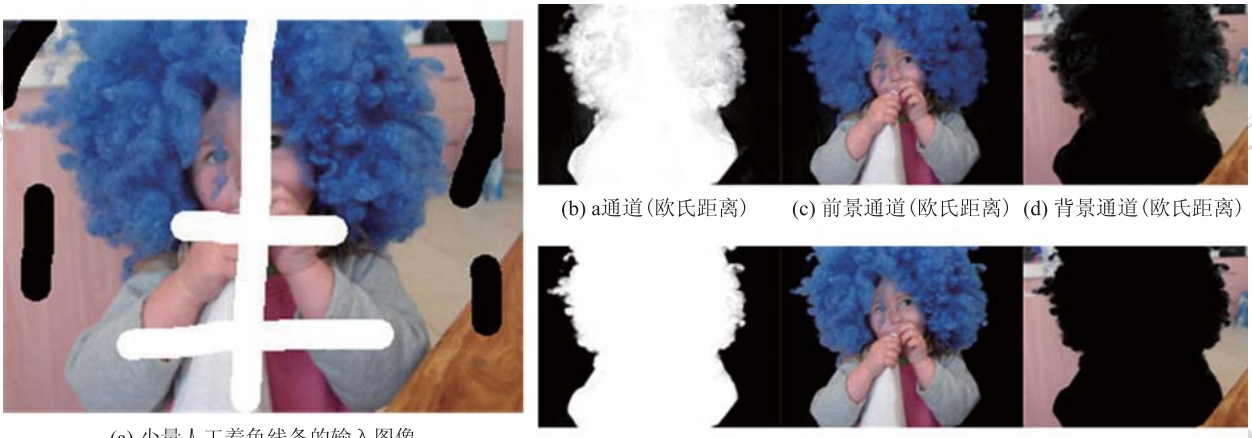
Fig. 2　Colorization results compared with the Levin et al.'s method, Yatziv et al.'s method and Bhat et al.'s colorization method

© 中国图象图形学报版权所有

在算法中进行了改进。提出基于梯度域最优化的框架,使用用户提供的手工着色线条彩色化了灰度图像。图 2(d)很明显除了第 3 组图像 3 没有出现色彩渗透,前两组图像也和 Levin 算法一样出现了色彩渗透现象,因为 Bhat 算法是基于边缘检测基础上的图像彩色化结果,而图像 2 的两个不同的着色点没有边界点来区分不同区域,因此 Bhat 算法出现了严重的色彩渗透。从图 2(e)可以看出,本文算法彩色化结果不仅没出现色彩渗透现象,而且得到了高质量的彩色化图像。

3 算法改进

Levin 等人[13]进一步研究显示,在少量人工着色线条输入的情况下,抠图拉普拉斯矩阵并不能获得很好的性能。在抠图拉普拉斯矩阵中用欧氏距离来计算像素之间的相似度,因此依赖于邻近像素之间的梯度,在高纹理或者低对比度边缘的图像处理上,不能获得很好的性能。Farbman 等人[22]提出用扩散距离来代替欧氏距离,而扩散距离可以通过距离映射(由一组亲和矩阵的特征向量组成)来近似,他们把扩散矩阵应用于各种图像编辑算法中,极大地提高了这些编辑算法的性能。本文算法实现了基于扩散距离和欧氏距离的抠图拉普拉斯矩阵的抠图效果。图 3 显示了在少量人工着色线条输入的情况下,采用欧氏距离抠图拉普拉斯矩阵并不能精确地计算出图像的 α 通道(前景不透明度),而采用扩散距离抠图拉普拉斯矩阵在相同情况下,能有效地提取出前景和背景区域。同样采用 Farbman 等人[22]提出的用扩散距离来代替欧氏距离,在构建抠图拉普拉斯矩阵时,用扩散距离来代替欧氏距离。



(a) 少量人工着色线条的输入图像 (b) a通道(欧氏距离) (c) 前景通道(欧氏距离) (d) 背景通道(欧氏距离) (e) a通道(扩散距离) (f) 前景通道(扩散距离) (g) 背景通道(扩散距离)

图 3 采用扩散距离和欧氏距离的抠图拉普拉斯矩阵获得的抠图效果

Fig. 3 A comparison of matte quality produced by matting Laplacian matrix with diffusion distances and Euclidean distances

3.1 扩散距离和扩散映射

定义关联矩阵[22]

$$\boldsymbol{W}_{i,j}=k(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{x}_j) \tag{11}$$

式中,$k(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{x}_j)$为两个像素之间距离,建立对角归一化矩阵 $\boldsymbol{D}_{i,i}=\sum_j \boldsymbol{W}_{i,j}$,获得归一化随机矩阵 $\boldsymbol{M}=\boldsymbol{D}^{-1}\boldsymbol{W}$。$M_{i,j}$ 表示一步从点 $\boldsymbol{x}_i$ 跳到点 $\boldsymbol{x}_j$ 的几率,因此 M^t 表示了 t 步从点 $\boldsymbol{x}_i$ 跳到点 $\boldsymbol{x}_j$ 的几率。归一化矩阵随机矩阵 $\boldsymbol{M}$ 有 n 个实特征值 $\{\lambda\}_0^{n-1}$,$\boldsymbol{\psi}_0,\cdots,\boldsymbol{\psi}_{n-1}$ 为相应特征值的特征向量。在时间 t,距离映射定义为

$$\boldsymbol{\psi}_t=\{\lambda_1^t\boldsymbol{\psi}_1(x),\lambda_2^t\boldsymbol{\psi}_2(x),\cdots\lambda_{n-1}^t\boldsymbol{\psi}_{n-1}(x)\} \tag{12}$$

在式(12)中,由于 $\boldsymbol{\psi}_0$ 是常量,并没有参与计算。扩散距离通过扩散映射来近似为

$$\boldsymbol{D}_t(x,y)=\|\boldsymbol{\psi}_t(x)-\boldsymbol{\psi}_t(y)\|_2 \tag{13}$$

从式(13)可以看出,两个像素之间扩散距离可以简单通过具有权重的特征向量 $\lambda_i^t\boldsymbol{\psi}_i^t$ 之间的欧氏距离和来实现。由于距离映射的计算量比较大,采用 Fowlkes 等人[23]的方法进行采样,可以高效地计算扩散距离,在基于局部线性模型优化的灰度图像彩色化方法,构建抠图拉普拉斯矩阵时,用扩散距离来代替欧氏距离。

3.2 基于扩散距离的改进彩色化结果

计算了归一化矩阵随机矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的特征值和特征向量,接着计算了随机矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的 3 个主要的特征值和特征向量。3 个特征向量很好地表现了在特征空间中的像素全局分布,但是,3 个特征向量

© 中国图象图形学报版权所有

在边缘处存在部分像素可能会发生突变。因此,在计算抠图拉普拉斯矩阵时,边缘处仍然采用式(7)计算,而在非边缘区域,则采用基于扩散距离的特征向量来计算。图 4 显示了未改进局部线性优化模型来彩色化图像失败的例子。在少量人工线条着色的情况下,着色区域的颜色并不能很好地扩散,而 Levin 算法和基于距离映射的算法得到了高质量的彩色化结果。将花朵部分进行放大观察,Levin 算法在花朵的白色边缘处存在轻微的色彩渗透。从图 5 可以看出,在大部分情况下,基于距离映射算法保持了基于欧氏距离的局部线性优化模型的高质量的彩色化性能,但是在少量手工着色的某些情况下,用基于扩散距离的改进局部线性优化模型算法,和基于欧氏距离的局部线性优化模型算法相比较,提高了彩色化的效果,只需要少量手工着色就能产生令人满意的结果。

(a) 手工着色的灰度图像　(b) Levin算法彩色化结果　(c) 本文未改进算法结果　(d) 本文改进算法结果

图 4　基于距离映射的方法对彩色化算法的改进

Fig. 4　A comparison with the method of Levin and the our methods by using diffusion distances and Euclidean distances respectively

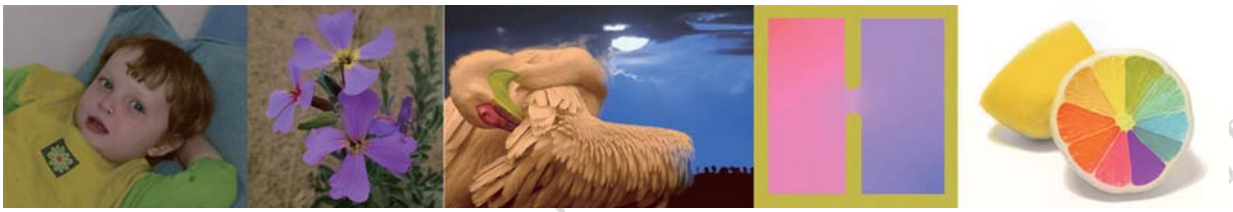


图 5　基于距离映射算法的彩色化结果

Fig. 5　Colorization results with our method by using diffusion distances

4　结　论

提出了一种新的基于局部线性模型优化的灰度图像彩色化方法。理论上推导基于局部线性模型优化的灰度图像彩色化的最优解,由于在彩色化过程中亮度通道保持不变,对立维度通道和亮度通道保持了边缘的一致性。只需要用少量的人工线条着色,不仅没出现色彩渗透现象,还能有效地产生高质量的彩色化图像。针对少量手工着色的灰度图像中,基于欧氏距离计算的抠图拉普拉斯矩阵在性能上有所下降,用扩散距离来代替欧氏距离,获得了较好的灰度图像彩色化结果。

参考文献(References)

[1] Liu S G, Zhang X, Wu J T, et al. Gray-scale image colorization based on the control of single-parameter [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(7):1297-1302. [刘世光, 张翔, 吴婧婷,等. 单参数控制的灰度图像着色 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(7):1297-1302.]

[2] Liu X P, Wan L, Qu Y G, et al. Intrinsic colorization [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5):152(1-9).

[3] Zhu L B, Sun S Y, Gu X J, et al. Image colorization based on color transfer and propagation [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(2):200-205. [朱黎博, 孙韶媛, 谷小婧, 等. 基于色彩传递与扩展的图像着色算法 [J]. 中国图象图

© 中国图象图形学报版权所有

形学报, 2010, 15(2):200-205.]
[4] Levin A, Lischinski D, Weiss Y. Colorization using optimization [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23:689-693.
[5] Gastal E S L, Oliveira M M. Domain transform for edge-aware image and video processing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4):69(1-12).
[6] Bhat P, Zitnick C L, Cohen M, et al. GradientShop: a gradientdomain optimization framework for image and video filtering [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(2):10(1-12).
[7] Hu W, Qin K H. Fast multi-resolution colorization of high-resolution gray images [J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(5):1062-1068. [胡伟, 秦开怀. 高分辨率灰度图像的快速多分辨率着色[J]. 计算机学报, 2009, 32(5):1062-1068.]
[8] Yatziv L, Sapiro G. Fast image and video colorization using chrominance blending [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(5):1120-1129.
[9] Criminisi A, Sharp T, Rother C, et al. Geodesic image and video editing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29: 134(1-15).
[10] Jia Y T, Hu S M. Interactive graph cut colorization [J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(3):508-512. [贾云涛, 胡事民. 基于图切分的交互式图像染色算法 [J]. 计算机学报, 2006, 29(3):508-512.]
[11] Sheng B, Sun H Q, Chen S B. Colorization using the rotation-invariant feature space [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2011, 31(2):24-35.
[12] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [C] // Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision. Crete, Greece: Springer, 2010:1-14.
[13] Levin A, Lischinski D, Weiss Y. Closed-form solution to natural image matting [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2):228-242.
[14] Lin H T, Tai Y W, Michael S. Motion regularization for matting motion blurred objects [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(11): 2329-2336.
[15] He K M, Sun J, Tang X. Fast matting using large kernel matting Laplacian matrices[C] // Proceedings of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, USA: IEEE, 2010: 2165-2172.
[16] Huang M C, Liu F, Wu E H. A GPU-based matting Laplacian solver for high resolution image matting [J]. The Visual Computer: International Journal of Computer Graphics, 2010, 26:943-950.
[17] MatrixPro Software Inc. General sparse matrix solver using direct multi-frontal approach and cuda[EB/OL]. (2011-4-1)[2011-10-1]. http:// www. matrixprosoftware. com.
[18] Li X J, Zhao H L, Jin X G, et al. Real-time image smoothing based on true edges [C] // Proceedings of the 12th International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics. WenZhou, China: IEEE, 2011:141-145.
[19] Krishnan D, Szeliski R. Multigrid and multilevel preconditioners for computational photography [J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 60(6):177.
[20] Xu L, Lu C W, Xu Y, et al. Image smoothing via L0 gradient minimization [J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6):1-12.
[21] Kim T H, Lee K M, Lee S U. Edge-preserving colorization using data-driven random walks with restart [C] // Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009:1641-1644.
[22] Farbman Z, Fattal R, Lischinski D. Diffusion maps for edge-aware image editing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(6):145.
[23] Fowlkes C, Belongie S, Chung F, et al. Spectral grouping using the Nyström method [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(2):214-224.

© 中国图象图形学报版权所有