

# 结合区域特性的图像改色算法\*

张可为<sup>1,2</sup>, 申群太<sup>2</sup>

(1. 湖南工程学院 电气信息学院, 湖南 湘潭 411101; 2. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410008)

**摘要:** 针对现有图像改色方法应用于零散分布对象时效果不佳的问题,提出了一种结合区域特性的两级协同扩散算法。首先将图像像素与通过过度分割得到的小块区域分别组成有权图的两级,除了建立像素级近邻连接外,图中还引入了区域级全连接,以及每块区域与其内部像素之间的连接;然后设计一迭代过程对所有这些连接进行信息调配,从而既能实现远距离扩散,也能使区域内像素的色彩特性趋近于一致。实验结果表明,即使添加非常少的人工标记该算法也可以获得很好的改色效果。

**关键词:** 改色; 零散对象; 有权图; 协同扩散

**中图分类号:** TP393.04      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2012)06-2390-03

**doi:**10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.105

## Recolorization employing region cues

ZHANG Ke-wei<sup>1,2</sup>, SHEN Qun-tai<sup>2</sup>

(1. College of Electrical & Information Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan Hunan 411101, China; 2. College of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha 410008, China)

**Abstract:** Existing recolorization methods could hardly provide pleasant visual result when they were applied to scattered objects, this paper put forward a two-layers propagation algorithm incorporated with regions cues. Firstly, combined regions by over-segmentation with pixels to construct a two layer weight graph. In contrast to previous works which only employed connection between neighboring pixels, it introduced both full-connections in region layer and inter-connections between the pixels and their corresponding regions into this graph additionally. Then it integrated all these connections in a chrominance iteration formulation, not only facilitated propagation of local grouping cues across larger image areas but partly enforced color edit consistency inside each region. Experiment result indicates that even very small amount of user's scribble is good enough for this proposed method to produce wonderful visual effect.

**Key words:** recolorization; scattered object; weighted graph; cooperative propagation

图像改色是对彩色图像的局部进行色彩调整的技术。当用户在图像局部添加少量的标记(由改色标记和不改色标记组成)表明改色区域的大致位置后,计算机自动将新的颜色扩散至整个待改色对象区域。其实现方式主要分为两种:a)将其转换为优化问题的求解,如 Levin 等人<sup>[1]</sup>将图像改色转换为约束优化问题,构建了一个全局代价函数来衡量每个像素与其周围像素颜色的加权差的差异,将添加的颜色标记作为约束条件,而最佳的改色效果满足该全局函数的最小化;b)采用混色机制,它基于图像改色实际上是改色标记的颜色与图像原始颜色混色而成,不同的改色结果对应于标记具有不同的混色比例分布。如 Yatziv 等人<sup>[2]</sup>引入每个像素至不同标记的最短路径来构建混色指标,从而将颜色扩散转换为对每个像素上各标记的混色比例的求解。这些算法同样可用于图像着色(colorization),只是在计算像素间相似度时用灰度差取代颜色差异。同样,许多着色算法也可以方便地转换成改色算法,如半监督学习法<sup>[3]</sup>、随机游走法<sup>[4]</sup>、RWR(random walk with restart)法<sup>[5]</sup>、不平整度法<sup>[6]</sup>、过度分割法<sup>[7]</sup>、多分辨率法<sup>[8]</sup>以及结合非局部均值法<sup>[9]</sup>等着色方法。尽管这些算法在应用中获得了很大的成功,但实验发现其改色效果对标记的数量以及位置比较敏感,特别是当图像中存在零散分布对象(如树叶后天空、网

状物后的背景以及花簇等)时改色质量不高。鉴于实际彩色图像中同一对象的组成不仅可能表现为一块相连区域,也可能呈零散分布,关键是它们具有相同或相近的视觉特征这一特点,本文提出一种基于两级扩散的改色算法,即使用户只添加非常少的标记也可以获得很好的改色效果。

### 1 算法描述

改色过程中标记信息依据像素间相似度进行扩散,但现有的改色算法在计算像素间相似度时考虑近邻连接(只有位置相近的像素存在直接联系),整个扩散过程表现为颜色沿周围像素逐步向外扩散,其对应的有权图只有一级——像素级的近邻扩散。而新算法的扩散机制由两级组成:在保留原有像素级近邻扩散方式的基础上,利用均值漂移算法将图像过度分割成小块区域(简称为块),组成区域级,块与块之间采用全连接,同时在扩散过程中的两级之间进行信息交换。本章首先介绍有权图的设计方法,然后提出一种迭代算法实现两级协同扩散,并对算法的收敛性进行证明。

#### 1.1 有权图结构模型

建立一个有权图  $G$ , 图由节点集合  $V$  和边集合  $E$  构成,

收稿日期: 2011-11-29; 修回日期: 2011-12-30      基金项目: 湖南省教育厅科研项目(08c220)

作者简介: 张可为(1966-),男,湖南益阳人,讲师,博士研究生,主要研究方向为智能控制与图像处理(d10zhangkw@yahoo.com.cn); 申群太(1945-),男,湖南衡阳人,教授,博导,主要研究方向为智能控制与信息处理。

$G(V, E)$ 。V 包括像素集合  $X$  和区域集合  $R$ , 且组成两级形式, 称为像素级和区域级。若像素总数为  $n$ , 区域总数为  $m$ , 则共有  $n+m$  个节点。边集合  $E$  反映节点间的连接关系, 连接节点  $i$  和  $j$  之间的边表示为  $e(i, j)$ , 其权值代表节点  $i$  与  $j$  之间的连接紧密程度, 对应于像素  $X(i)$  和  $X(j)$  间的相似度。 $E$  由四部分组成,  $E = \{E^X, E^R, E^{XR}, E^{RX}\}$ , 分别定义如下:

a) 像素之间采用近邻连接, 即只有位置相邻的像素间才有边存在, 用边集  $E^X$  表示, 传统算法中只存在这种连接方式。像素  $X(i)$  和  $X(j)$  间的相似度权值表示为宽度为  $\sigma$  的高斯核函数

$$W^X(i, j) = \begin{cases} \exp(-\|c^X(i) - c^X(j)\|^2/\sigma) & j \in N(i) \\ 0 & j \notin N(i) \end{cases}$$

其中:  $N(i)$  表示像素  $X(i)$  的近邻;  $c^X(i)$  为像素  $i$  的初始颜色;  $W$  为  $n \times n$  矩阵, 其行归一化结果为

$$P^X(i, j) = W^X(i, j) / \sum_j W^X(i, j)$$

b) 块之间采用全连接 (即任意一对区域块均有边存在), 用集合  $E^R$  表示。块  $R(i)$  和  $R(j)$  间的相似度权值表示为

$$W^R(i, j) = \exp(-\|c^R(i) - c^R(j)\|^2/\sigma)$$

其中:  $c^R(i)$  表示块  $R(i)$  颜色, 即块内像素颜色的平均值, 其行归一化权值为

$$P^R(i, j) = W^R(i, j) / \sum_j W^R(i, j)$$

由于块非常少, 所以即使采用全连接, 增加的计算量普通计算机也完全可以承受。

c) 块与像素间的连接用边集合  $E^{XR}, E^{RX}$  表示。块只与所包含的像素有边存在, 像素  $X(i)$  与块  $R(j)$  间的相似度权值为

$$W^{XR}(i, j) = \begin{cases} \exp(-\|c^X(i) - c^R(j)\|^2/\sigma) & X(i) \in R(j) \\ 0 & X(i) \notin R(j) \end{cases}$$

其行归一化权值为

$$P^{XR}(i, j) = W^{XR}(i, j) / \sum_j W^{XR}(i, j)$$

而块  $R(i)$  与像素  $X(j)$  间的相似度权值表示为

$$W^{RX}(i, j) = \begin{cases} \exp(-\|c^R(i) - c^X(j)\|^2/\sigma) & X(j) \in R(i) \\ 0 & X(j) \notin R(i) \end{cases}$$

其行归一化权值为

$$P^{RX}(i, j) = W^{RX}(i, j) / \sum_j W^{RX}(i, j) = 1$$

这是因为一个像素只可能属于一块的缘故。

### 1.2 两级协同扩散机制

由于图像改色实际上是各类改色标记的颜色与图像原始颜色的混色结果, 所以整个颜色扩散过程表现为各类标记在每个像素与块上的混色比例分布的状态更新过程。因此两级扩散机制的建立包括确定各颜色标记在每个像素、块的初始混色比例以及状态的更新策略。

首先确定两级的初始颜色比例。将添加颜色标记的像素集合用  $S^X$  表示。而将包含标记像素的区域定义为标记块, 其标记与标记像素相同, 而所有标记块组成的集合定义为  $S^R$ 。而混色比例的状态更新通过设计一个迭代算法来实现。该迭代算法的设计思想可描述如下:

a) 标记像素点及标记块的混色比例值始终保持不变。

b) 非标记像素、块在每步迭代中能结合外部信息对原有的比例状态进行更新, 而且最终能收敛。

c) 为实现两级协同扩散, 接收的信息应包括本级信息与级间信息两部分, 并且两部分的可以控制。

为此设计以下迭代方程描述所有的图像像素与块的状态更新策略

$$C(t+1) = \alpha DPC(t) + C(0) \quad (1)$$

其中:  $\alpha$  为常数, 表示接收外部信息的比例;  $C(t)$  为  $(n+m) \times k$  维向量, 表示第  $t$  次迭代后像素和块各颜色标记所占的混色比例, 其中  $k$  为标记种类数,  $C(0)$  表示初始混色比例;  $D$  为  $(n+m)$  维对角阵, 其对角元素满足

$$D(i, i) = \begin{cases} 0 & i \in (S^X \cup S^R) \\ 1 & i \notin (S^X \cup S^R) \end{cases}$$

$P$  为  $(n+m) \times (n+m)$  矩阵,

$$P = \begin{bmatrix} (1-\beta)P^X & \beta P^{XR} \\ (1-\gamma)P^{RX} & \gamma P^R \end{bmatrix}$$

其中, 常数  $\beta, \gamma$  控制级间信息在所有接收信息中的比例,  $\beta$  用于像素级,  $\gamma$  用于区域级。

式(1)不仅保证了标记像素点及标记块的状态在整个迭代过程中的比例保持不变, 而且在每次迭代时, 非标记像素点、块均接收比例  $\alpha$  的外部信息, 外部信息的构成比例由  $\beta, \gamma$  控制。非标记像素的外部信息有  $\beta$  部分信息来自级间信息 (该像素所属块), 其余来自本级周围像素对应标记混色比例的加权平均; 而非标记块有  $\gamma$  部分信息来自级间信息 (该块所包含的像素颜色的加权平均), 其余信息由本级所有块的标记混色比例作加权平均而成。下面证明算法的收敛性, 存在下列定理。

**定理 1** 迭代过程  $C(t+1) = \alpha DPC(t) + C(0)$  一定收敛, 且收敛至

$$C^* = (I - \alpha DP)^{-1} C(0) \quad (2)$$

**证明** 由式(1)可知

$$C(1) = DPC(0) + C(0)$$

$$C(2) = \alpha DPC(1) + C(0) = \sum_{i=0}^2 [\alpha DP]^i C(0)$$

以此类推,  $C(t) = \sum_{i=0}^t [\alpha DP]^i C(0)$  为一个等比级数, 其收敛条件为  $\lim_{t \rightarrow \infty} [\alpha DP]^t C(0) = 0$ 。

取  $T = DP$ , 考察  $T^t$  任一行  $i$ , 有

$$\sum_{j=1}^{n+m} T^t(i, j) = \sum_{j=1}^{n+m} \sum_{k=1}^{n+m} T^{t-1}(i, j) T(k, j) = \sum_{k=1}^{n+m} T^{t-1}(i, k) \sum_{j=1}^{n+m} T(k, j)$$

由于  $P^X, P^{XR}, P^{RX}, P^R$  为行归一化阵, 故  $P$  为行归一化阵, 使  $\sum_{j=1}^{n+m} T(k, j) \leq 1$ , 且

$$\sum_{j=1}^{n+m} T^t(i, j) \leq \sum_{j=1}^{n+m} T^{t-1}(i, k) \cdot 1 \leq 1t$$

即  $T^t$  每行之和不超过  $1$ 。另外由于  $T^t$  不存在负值元素 (因为  $D$  和  $P$  均不存在负值元素), 且  $0 < \alpha < 1$ , 故当  $t \rightarrow \infty$  时矩阵  $[\alpha P]^t$  变为  $0$  矩阵, 从而

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\alpha DP]^t C(0) = 0$$

表示  $C(t)$  可以收敛, 其收敛结果为

$$C^* = \lim_{t \rightarrow \infty} C(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^{t-1} [\alpha DP]^i C(0) = (I - \alpha DP)^{-1} C(0)$$

由此定理得证。

### 1.3 算法实现步骤

a) 添加颜色标记。用户在图像的均匀颜色区域添加少量的标记, 由改色与不改色两类标记组成。

b) 转换颜色空间。将标记后图像转换成 YUV 颜色空间, 以便于将彩色信息与灰度信息分开。

c) 建立两级有权图  $G = (V, E)$ , 如 1.1 节所示。

d) 计算各种标记的混色比例。计算出各类标记各像素上的混色比例的收敛结果, 见式(2)。

e) 实现混色。按上述比例分别在两颜色通道 ( $U$  和  $V$ ) 完成混色, 并与图像的灰度值结合转换回 RGB 空间, 从而整合成

最终的改色图像。

### 2 实验结果及数据分析

鉴于改色的结果与各颜色标记(包括改色标记与原始颜色标记)所占的混色比例具有一一对应的关系,算法的改色质量可以通过改动颜色在图像中的混色比例分布反映出来。而混色比例分布可通过归一化灰度图表示,即图中像素的灰度值越大表示改动颜色所占的混色比例越大,而原来颜色所占比例越小;黑色表示不改色,白色对应于完全改色。

#### 2.1 参数设置

参数包括分割参数以及迭代参数。

当采用均值漂移算法作过度分割时,需要确定每次搜索的区域范围,所以需要用到一对带宽参数 $(h_s, h_c)$ ,其中 $h_s$ 控制平面尺度, $h_c$ 控制颜色尺度,设置为 $(h_s, h_c) = (7, 7)$ ,另外分割块的最小尺寸设置为 $M = 30$ 。

在迭代过程中,非标记像素与块在每步更新时既接收外部信息,同时又保留部分初始状态,参数指定 $\alpha$ 两方面信息的比例。实验发现当 $\alpha$ 取值范围在 $[0.9, 0.99999]$ 内,改色效果没有明显的视觉差异,故取 $\alpha = 0.999$ 。而接收的外部信息包括本级信息和级间信息,由常数 $\beta, \gamma$ 控制级间信息所占比例, $\beta$ 用于像素级, $\gamma$ 用于区域级。为了有效地选取 $\beta, \gamma$ 值,本文选取了多组值进行实验观察,如图1所示。其中(b)~(e)用于说明参数 $\beta$ 的作用( $\gamma = 0.1$ )。当 $\beta = 0$ 时,由于像素无法接收区域级信息,本算法退化成像素级的近邻连接形式,改色对象花簇中只有被涂上标记的一朵花可以获得好的混色比例,而其他花朵改色不到位的问题严重。随着 $\beta$ 增大,两级协同扩散机制发挥作用,在 $[0.002, 0.01]$ 内均可以获得满意的改色效果。如果 $\beta$ 太大,改色效果呈块状,通过参照过度分割结果图1(f),可知该情形下本算法已退化成区域级的全连接形式,只对与标示块亮度相近的花朵区域进行改色。而图1(g)~(j)说明参数 $\gamma$ 的作用,即 $\gamma$ 太小,本算法退化成区域级的全连接形式,而太大又会退化成像素级的近邻连接形式。合适的 $\gamma$ 值可选在 $[0.05, 0.2]$ 内,在下面的比较实验中取 $\beta = 0.005, \gamma = 0.1$ 。

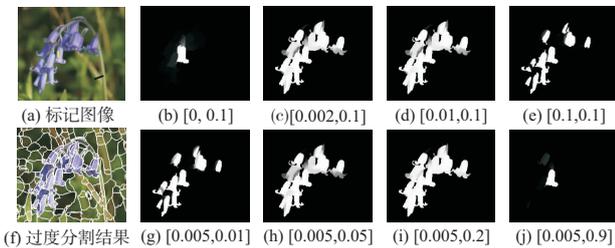


图1 参数 $[\beta, \gamma]$ 对改动颜色所占混色比例的影响

#### 2.2 算法比较的实验结果与分析

为了验证本算法的效果与效率,选取常用的改色算法——混色法<sup>[2]</sup>进行实验比较。

图2是使用两种方法根据完全相同的输入进行改色的三组实验图像。从左至右分别为人工标记图像以及利用新方法和混色法实现改色时获得的改动颜色所占混色比例的灰度示意图。

可以看到在人工标记很少的情况下,混色法改色结果不佳,容易出现改色不到位或越界改色;相反,新算法可以获得满意的改色效果。其原因在于混色法(以及其他现有改色算法)是基于近邻扩散的改色算法,颜色只能沿周围像素向外扩散,若颜色标记为单笔标记时,改色区必然为一块相连的区域,难

以有效实现对零散分布对象的区域改色;相反,新算法由于引入了区域间全连接,有利于颜色的远距离跨块传输,提高了零散分布对象的改色效果。

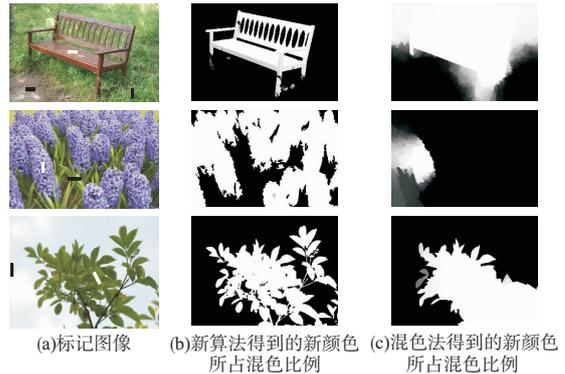


图2 本文算法与混色法的改色效果比较

### 3 结束语

本文针对现有改色算法对颜色种子的数量及位置敏感且处理零散分布对象质量不高的问题,注意到同一对象的组成不仅可能表现为一块相连区域,也可能呈零散分布,关键它们具有相同或相近的视觉特征这一特点,引入图像区域特性,设计了一个信息扩散的迭代算法,并证明了该算法的收敛性。在该算法中引入了两类连接方式,即在区域级,块与块之间采用全连接,而两级之间的连接实现块与块内每个像素的信息交流。为了减少分割精度的影响,以及抑制块对阴影的敏感性,对级间信息扩散的比例加以控制。由于能有效地将全局信息结合到局部信息,并始终应用于颜色的整个扩散过程,所以该算法即使在图像中对象为零散分布时也可以获得高质量的改色效果,并且对人工标记的数量与位置具有强的鲁棒性。

由于新扩散机制的三个参数 $(\alpha, \beta, \gamma)$ 依靠经验设置,另外像素与块的特性只考虑了颜色特征,如果参数能自适应选择出最优值,并且把纹理和边缘检测信息结合到像素与块的特性中,有望获得更好的改色效果。

#### 参考文献:

- [1] LEVIN A, LISCHISKY D, WEISS Y. Colorization using optimization [J]. ACM Trans on Graphics, 2004, 23(3): 689-694.
- [2] YATZIV L, SAPIRO G. Fast image and video colorization using chrominance blending [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2006, 15(5): 1120-1129.
- [3] LIU Bei-bei, LU Zhe-ming. Image colourisation using graph-based semi-supervised learning [J]. IET Image Processing, 2009, 3(3): 115-120.
- [4] LIU Xiao-ming, LIU Jun, FENG Zhi-lin. Colorization using segmentation with random walk [C]//Proc of the 13th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns. Berlin: Springer-Verlag, 2009: 468-475.
- [5] KIM T H, LEE K M, LEE S U. Edge-preserving colorization using data-driven random walks with restart [C]//Proc of the 16th IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway NJ: IEEE, 2009: 1641-1644.
- [6] 李志永, 滕升华, 杜坤, 等. 基于不平度颜色混合的图像彩色化方法 [J]. 电子信息学报, 2008, 3(3): 514-517.
- [7] 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.
- [8] 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): 1062-1069.
- [9] YAO Chen, YANG Xiao-kang, WANG Jia, et al. Patch-driven colorization [J]. Optical Engineering, 2010, 49(1): 1-5.