

## 基于主色检测与灰度传播的彩色图像灰度化方法

刘春晓, 朱臻阳, 伍 敏, 赵锦威

(浙江工商大学计算机与信息工程学院 杭州 310018)  
(cxliu@mail.zjgsu.edu.cn)

**摘 要:** 针对已有图像灰度化方法不能同时体现原始图像的全局和局部对比度, 且不能保持灰度像素的灰度值等问题, 提出一种基于主色检测与灰度传播的彩色图像灰度化方法. 首先提出一种基于直方图峰值的主色检测方法, 用于提取输入图像中具有代表性的少量主要颜色特征; 然后采用基于梯度域的主色灰度化方法将图像主色映射到灰度空间, 最大程度地在灰度空间保持主色在彩色空间的视觉对比度; 再利用基于局部线性嵌入的灰度传播方法, 将主色灰度值和原有灰度像素的灰度值扩散到与其颜色相似的像素上; 最后检查图像中是否存在没有被灰度化的彩色像素, 如果存在, 则使用基于梯度域的局部灰度化方法将其灰度化, 得到最终的灰度图像. 大量实验结果表明, 该方法将全局和局部对比度保持有机结合, 得到的灰度图像较好地保持了彩色图像中色彩之间的差异性, 并且保持了灰度像素的灰度值.

**关键词:** 彩色图像灰度化; 主色检测; 灰度传播; 对比度保持; 局部线性嵌入  
**中图法分类号:** TP391.41

## Dominant Color Detection and Grayscale Propagation Based Color2gray Method

Liu Chunxiao, Zhu Zhenyang, Wu Min, and Zhao Jinwei

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

**Abstract:** As state-of-the-art color2gray methods can not guarantee the simultaneous preservation of global and local contrast, as well as the values of grayscale pixels, a color2gray method based on dominant color detection and grayscale propagation is put forward in this paper. Firstly, this paper proposes a histogram peaks based dominant color detection method to extract a small representative colors set for the input image. Secondly, these dominant colors are mapped to grayscale space with gradient domain based color2gray method, which can preserve the contrast in color space as much as possible. Then, grayscale values of dominant colors and grayscale pixel are propagated into nearby colors through local linear embedding model. Finally, this method detects if there are pixels which haven't been decolorized and transform them to grayscale ones. Numerous experimental results show that this method simultaneously preserves the global and local contrast as well as the grayscale pixels and thus the diverse scene as shown in the input color image.

**Key words:** color2gray; dominant color detection; grayscale propagation; contrast preservation; local linear embedding

收稿日期: 2015-03-09; 修回日期: 2015-09-03. 基金项目: 浙江省自然科学基金(LY14F020004); 国家自然科学基金(61003188, 61379075); 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课题(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课题(2011E10005). 刘春晓(1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, CCF 会员, 主要研究方向为图像视频处理与理解、智能视觉监控、计算机视觉、模式识别与智能系统; 朱臻阳(1993—), 男, 在校学生; 伍 敏(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为图像视频处理; 赵锦威(1995—), 男, 在校学生.

图像灰度化在日常生活中的应用十分广泛,如打印机、视频监控和风格化等领域。在已有的灰度化方法中,有些方法在局部对比度保持上有一定的效果,而在整体结构保持上则有所欠缺;有些方法则恰好相反;另有一些方法在局部对比度和整体结构信息保持上均有一定的效果,但会出现类似于边缘模糊和光晕等不良效应。另外,RGB 彩色空间中 3 个通道值相等的像素被称为灰度像素,其颜色被称为灰度颜色,这些像素的灰度值在灰度化过程中应加以保持。然而,已有的方法几乎没有考虑彩色图像中灰度像素的保持问题。

针对上述问题,本文提出了一种基于主色检测与灰度传播的彩色图像灰度化方法。一幅图像的代表性颜色称为主色,它可以体现一幅彩色图像的主要色彩特征且具有较强的描述能力。一幅图像所有主色所构成的集合被称为主色集,以最相似的主色代替每个像素的颜色值所获得的新图像被称为主色图。

## 1 相关工作

根据在不同的图像区域所采用的灰度化变换方式的异同,将已有图像灰度化方法分类为局部法、全局法和混合法。局部法在不同的图像区域使用不同的变换方式。其中,Bala 等<sup>[1]</sup>先使用高通滤波对输入图像预处理,再结合亮度通道保持不同颜色区域间的对比度;Neumann 等<sup>[2]</sup>使用颜色梯度和快速集成方法实现彩色图像的灰度化;Smith 等<sup>[3]</sup>使用输入图像的亮度图作为初始灰度图,随后对灰度图的局部进行锐化。Wu 等<sup>[4]</sup>利用多维尺度和颜色聚类保持输入图像中的边缘信息。局部法能保持原始图像整体的结构信息,但会产生诸如局部对比度丢失、光晕等不良效应。

对一幅图像中所有颜色采用同一种变换方式的方法被称为全局法。Gooch 等<sup>[5]</sup>利用色调和亮度信息计算颜色间的梯度,通过最小化像素对之间的能量值获取每个像素的最终灰度值。Rasche 等<sup>[6]</sup>提出了一个新的颜色对间梯度的计算方式,并基于误差函数的最小化获得整幅图像的灰度值。上述 2 种方法在保持图像结构信息的同时,会产生不良的轮廓且会丢失较多的色彩信息。为了使灰度化图像具有更强的对比度,Grundland 等<sup>[7]</sup>结合亮度和色彩信息,采用线性映射的方法获取灰度图像。基于非线性整体映射方法,Kim 等<sup>[8]</sup>既可以保

持原图像的整体对比度,且可以被应用到视频灰度化中,但它会使物体边界变得模糊不清。王辉等<sup>[9]</sup>在三角级数混合多项式逼近的基础上提出了一种新的非线性整体映射方法,以解决文献[8]中存在的问题。朱薇等<sup>[10]</sup>基于 IHLS 颜色空间的亮度信息,也提出了一种非线性整体映射方法。为了保持输入图像中的流行结构,Cui 等<sup>[11]</sup>采用 ISOMAP 方法使灰度空间与彩色空间之间进行交流学习。

局部法和整体法分别可以保持输入图像的局部对比度和整体结构信息,但对于 2 类信息同时保持的问题还存在不足。针对这种现象,Kuk 等<sup>[12]</sup>在考虑相邻像素间梯度约束的同时加入了全局中部分像素的信息,确保结果能同时保持局部和全局两种对比度。Lu 等<sup>[13]</sup>在像素间梯度计算时引入了双峰分布函数来自动确定梯度的方向。为了达到将灰度图像进行锐化的目的,Zhu 等<sup>[14]</sup>在做引导图像对比度调整时,利用滤波原理定义了一种通道显著性度量标准。Wu 等<sup>[15]</sup>首先将原图像用软分割分成多个区域,通过整体映射函数确定每个区域的灰度值后添加入原图像的局部特征信息,得到最终的灰度化图像。Song 等<sup>[16]</sup>在概率图模型的基础上将彩色图像灰度化问题看作视觉线索保留问题,通过求解积分模型的最小值得到灰度图像。这些同时考虑局部对比度和整体结构信息保持的方法被称为混合法;但这类方法也会损失边缘信息,使整幅图像的颜色一致性得不到保持。同时,以上方法均没有考虑输入图像中原有灰度像素的灰度值保持问题。

为了解决已有图像灰度化方法中存在的上述问题,本文提出了一种基于主色检测和灰度传播的彩色图像灰度化方法,首先提取图像的主色,然后通过主色的灰度化及其灰度传播来同时保持全局和局部对比度。下面对已有的图像主色提取工作稍作介绍。

已有的主色检测方法分为基于聚类的方法<sup>[17-18]</sup>、基于量化的方法<sup>[19]</sup>和基于分块的方法<sup>[20-21]</sup>。基于聚类的主色检测方法将通过迭代得到的稳定聚类中心作为主色。较为经典的聚类方法为  $K$  均值聚类方法,它的初始聚类中心随机选取,因此同一幅图像可能会检测出不同的结果。Yang 等<sup>[17]</sup>在  $K$  均值聚类方法的基础上将 RGB 空间均分为 8 个子空间,并将每个子空间中心作为初始聚类中心,将数量小于阈值的类合并到其他类中。Min 等<sup>[18]</sup>提出了一种新的颜色空间,在该颜色空间内统计每种

颜色本身及周围颜色总像素数, 并检测其局部峰值, 对峰值做降序排序后取前 8 个峰的中心颜色作为主色. 基于量化的主色检测方法将颜色空间划分成若干个区域, 每个区域内所有颜色用同一个特征向量表示, 取若干区域作为主色区. Shao 等<sup>[19]</sup>将 HSV 颜色空间分成 72 个区域, 将所有区域按区域内像素数进行降序排序, 取前 8 个区域作为主色区. 基于分块的主色提取方法先将图像分割成若干块, 再进行主色检测. Jiang 等<sup>[20]</sup>获取 JPEG 压缩过的图像后, 直接在离散余弦变换域内对图像进行主色检测. Li 等<sup>[21]</sup>用区域生长法对图像进行分割, 对像素数大于图像总像素数 1% 的区域进行合并, 然后提取像素数大于图像总像素数 5% 的区域的主色. 上述主色检测方法中, 部分方法采用固定的主色数目, 即没有实现主色数目的自动确定, 某些方法则会将源图像中并不存在的颜色作为主色或遗漏了源图像中重要的色彩特征. 针对已有主色检测方法存在的上述问题, 本文提出一种基于直方图峰值的图像主色检测新方法.

## 2 本文方法

本文方法流程图如图 1 所示, 首先提取输入彩色图像的主色, 并先对主色进行消色; 然后采用灰度传播方法将主色和灰度像素的灰度值扩散到相似颜色的像素上; 最后检测图像中未被灰度化的像素, 若有则利用局部灰度化方法将其灰度化.

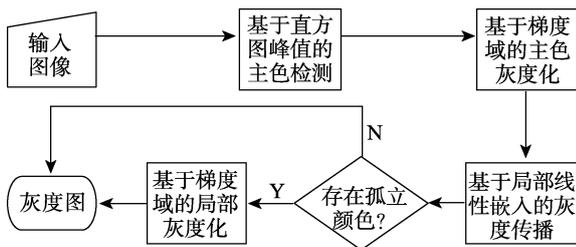


图 1 本文方法流程图

### 2.1 基于直方图峰值的主色检测方法

本文方法首先提取直方图峰值集合, 即初始候选主色集, 然后通过筛选和剔除步骤得到最终的图像主色集.

#### 2.1.1 直方图峰值检测

HSV 颜色空间区分了颜色的色度  $h$ , 饱和度  $s$  和强度  $v$  信息. 当  $s$  或  $v$  较小时, 人眼对色度的感知能力较弱, 不必考虑  $h$  的角度问题. 因此本文先

对颜色按照

$$O(c) = \begin{cases} 1, & v \leq 0.2 \\ 2, & v > 0.2 \text{ \& } s \leq 0.1 \\ 3, & \text{其他} \end{cases}$$

进行分类. 其中  $c$  为任意颜色. 第 1 类  $v$  较小, 可认为是黑色; 第 2 类  $s$  较小但  $v$  大于一定阈值, 可认为是灰白色; 第 3 类即为彩色. 基于此分类方式, 任意 2 种颜色  $c_i$  和  $c_j$  ( $O(c_i) \leq O(c_j)$ ) 的相似性判断方式可表示为

$$\begin{cases} \text{a. } O(c_i) = 1 \text{ 且 } O(c_j) = 1; \\ \text{b. } O(c_i) = 1 \text{ 且 } (O(c_j) = 2 \text{ 或 } O(c_j) = 3) \text{ 且 } |\Delta v| \leq v_s \\ \text{c. } O(c_i) = 2 \text{ 且 } O(c_j) = 2 \text{ 且 } |\Delta v| \leq v'_s \\ \text{d. } O(c_i) = 2 \text{ 且 } O(c_j) = 3 \text{ 且 } |\Delta s| \leq s_s \text{ 且 } |\Delta v| \leq v'_s \\ \text{e. } O(c_i) = 3 \text{ 且 } O(c_j) = 3 \text{ 且 } |\Delta h| \leq h_s \text{ 且 } |\Delta s| \leq s_s \text{ 且 } |\Delta v| \leq v'_s \end{cases}$$

其中,  $|\Delta h| = \min\{|h_i - h_j|, 360^\circ - |h_i - h_j|\}$ ,  $|\Delta s| = |s_i - s_j|$ ,  $|\Delta v| = |v_i - v_j|$ .  $h_s, s_s, v_s$  和  $v'_s$  为阈值. 如果  $c_i$  和  $c_j$  满足以上 5 个条件之一, 则  $c_i$  和  $c_j$  相似; 否则, 不相似. 判断候选主色间相似性时使用的阈值分别为  $h_s = 30^\circ, s_s = 0.5, v_s = 0.1, v'_s = 0.4$ ; 其他情况下采用的阈值为  $h_s = 10^\circ, s_s = 0.1, v_s = 0.1, v'_s = 0.2$ .

任意像素  $p$  的空间聚集度 (spatial aggregation degree, SAD) 可表示为

$$SAD(p) = \frac{m_p}{r_p}$$

其中,  $r_p$  为任意像素  $p$  周围的像素数目,  $m_p$  为  $p$  周围像素中与  $p$  颜色相似的像素数目. 然后, 提取满足条件  $SAD \geq 0.8$  的像素形成特征向量集  $F$ ,

$$F = \{(c_i, x_i), i = 1, 2, \dots, n_F\}$$

其中,  $c_i$  为第  $i$  个空间聚集度  $\geq 0.8$  的像素的颜色值,  $x_i$  为它的坐标,  $n_F$  为  $SAD \geq 0.8$  的颜色数目. 统计关于  $F$  的直方图, 并检测峰半径大于参数  $\phi$  的峰值颜色, 即在 RGB 颜色空间内, 与颜色  $c$  距离小于  $\phi$  的所有颜色中,  $c$  的像素数最多, 则  $c$  为峰值颜色. 取所有峰值颜色形成初始的候选主色集  $K$ , 候选主色个数为  $n_k$ . 非峰值颜色归类到 RGB 颜色空间上距离最近的候选主色上. 本文统计归类于候选主色  $k$  且与  $k$  相似的所有颜色的像素总数, 作为  $k$  的代表像素数 (representative pixel number, RPN), 其中包括  $k$  本身的像素数.

显然, 此时候选主色集内候选主色间可能区分度不大, 因此本文通过候选主色筛选和剔除, 对

部分候选主色做进一步的归类.

### 2.1.2 候选主色筛选

虽然一种非峰值颜色只归类于一个候选主色,但它仍可能与另一种候选主色相似,本文称这 2 种候选主色间存在代表重复现象. 2 种颜色  $k_i$  和  $k_j$  的区分度使用理论代表重复程度(theoretical overlapping, TO)来衡量,

$$TO(k_i, k_j) = \begin{cases} 1, & O(k_i) = 1 \text{ 且 } O(k_j) = 1 \\ \frac{(0.31 - v_{k_j})}{0.2}, & O(k_i) = 1 \text{ 且 } (O(k_j) = 2 \text{ 或 } O(k_j) = 3) \\ \frac{(0.31 - v_{k_i})}{0.2}, & O(k_j) = 1 \text{ 且 } (O(k_i) = 2 \text{ 或 } O(k_i) = 3) \\ tov, & O(k_i) = 2 \text{ 且 } O(k_j) = 2 \\ tos \times tov, & (O(k_i) = 2 \text{ 且 } O(k_j) = 3) \\ & \text{或 } (O(k_i) = 3 \text{ 且 } O(k_j) = 2) \\ toh \times tos \times tov, & O(k_i) = 3 \text{ 且 } O(k_j) = 3 \end{cases}$$

其中,  $RPN_{k_i} \geq RPN_{k_j}$  且 2 种颜色理论上存在代表重复现象,  $toh = (0.21 - |\Delta h|) / 0.2$ ,  $tos = (0.21 - |\Delta s|) / 0.2$ ,  $tov = (0.41 - |\Delta v|) / 0.4$ . 如果两者理论上不存在代表重复现象, 则  $TO(k_i, k_j)$  无限接近于 0.

本文使用的筛选依据有 2 条:

依据 1. 在 RGB 颜色空间内, 与  $k$  距离小于  $\phi$  且与  $k$  相似的所有候选主色中,  $k$  的代表像素数最多, 则将  $k$  保留.

依据 2. 如果  $k_i$  满足保留条件, 那么在 RGB 颜色空间上取与  $k_i$  距离小于  $\phi$  且与  $k_i$  相似的任意候选主色  $k_j$ , 计算两者的区分度(difference degree, DD),

$$DD(k_i, k_j) = \begin{cases} \|\Delta c_{ij}\| \Delta d_{ij} / d, & \Delta d_{ij} / d \geq 0.1 \\ 1 / TO(k_i, k_j), & \Delta d_{ij} / d < 0.1 \text{ 且 } RPN_{k_j} / RPN_{k_i} \geq 0.1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中,  $\|\Delta c_{ij}\|$  为  $k_i$  与  $k_j$  在 RGB 颜色空间上的欧氏距离,  $d$  为输入图像对角线长度,  $\Delta d_{ij}$  为两者的代表像素中心坐标间的距离. 当  $DD(k_i, k_j) > RPN_{k_i} / RPN_{k_j}$  时, 保留  $k_j$ ; 否则, 将  $k_j$  从候选主色集内筛除.

对  $K$  中所有候选主色进行完一轮筛选后, 判断是否增大  $\phi$  进行下一轮筛选或减小  $\phi$  重新进行本轮筛选, 以及判断是否退出筛选, 方式如下: 当  $n_k > n_k^{\max}$ , 若  $\phi \geq \phi^{\max}$ , 则退出筛选; 若  $\phi < \phi^{\max}$ ,

则更新  $\phi = \phi + t$ , 进行下一轮筛选. 当  $n_k < n_k^{\min}$ , 若  $t > t^{\min}$ , 则更新  $t = t/2$ ,  $\phi = \phi - t$ , 重新进行本轮筛选; 若  $t \leq t^{\min}$ , 退出筛选. 当  $n_k^{\min} \leq n_k \leq n_k^{\max}$ , 若本轮  $n_k$  与上一轮相等或  $\phi \geq \phi^{\max}$ , 则退出筛选; 否则, 更新  $\phi = \phi + t$  并进行下一轮筛选.

### 2.1.3 候选主色剔除

为了去除筛选过程误保留的候选主色, 本文通过 2 个剔除策略来增强结果的准确性.

策略 1. 计算候选主色  $k_i$  与  $k_j$  ( $RPN_{k_i} > RPN_{k_j}$ ) 实际代表重复率(actual overlapping, AO),

$$AO(k_i, k_j) = q / RPN_{k_j},$$

其中,  $q$  为输入图像中同时与  $k_i$  和  $k_j$  相似的像素数. 如果  $AO(k_i, k_j) \geq 0.5$ , 那么将  $k_j$  标记为非主色.

策略 2. 如果  $RPN_k < \max\{20, 6.28 \times \sigma_k, SN\}$ , 则将候选主色  $k$  标记为非主色. 其中, 代表像素标准数量(standard number, SN)表示为

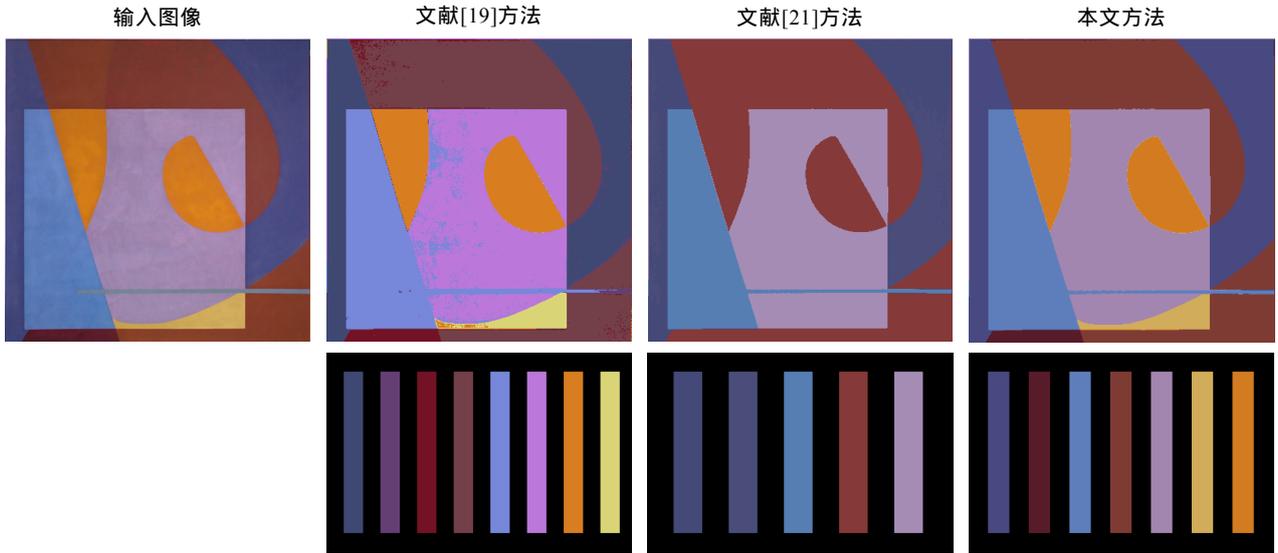
$$SN = \begin{cases} 0.005 \times RPN_{\max}, & RPN_{\max} \leq 10 \times RPN'_{\max} \\ 0.005 \times RPN'_{\max}, & \text{其他} \end{cases}$$

$RPN_{\max}$  和  $RPN'_{\max}$  分别为最大及次最大代表像素数目,  $\sigma_k$  为  $k$  的代表像素空间分布标准差.

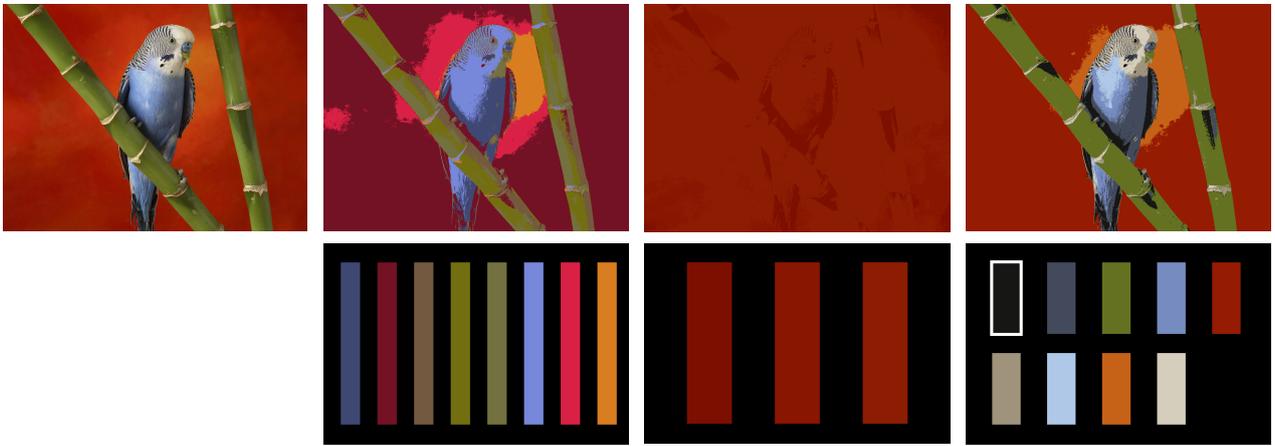
图 2 所示为 2 组主色检测结果比较图, 每组测试实例的第 1 行从左往右分别为输入图像, 文献[19]方法, 文献[21]方法以及本文方法得到的主色图; 第 2 行为各检测方法的主色标签. 从图 2 可以发现, 在文献[19]方法的主色图中偏色严重, 其中图 2a 的中间灰色区检测为紫色, 图 2b 则将鲜红检测为紫红; 在文献[21]方法的主色图中图像色彩特征漏检严重, 其中图 2a 漏检了黄色, 图 2b 则漏检了竹子和鸚鵡的颜色; 本文方法较好地保持了输入图像的主要色彩特征. 由此可见, 本文方法比已有方法更具优越性.

### 2.2 基于梯度域的主色灰度化方法

对输入图像进行主色检测后得到的主色数目远小于输入图像总颜色数, 可以最大程度地在灰度空间保持主色在彩色空间的视觉对比度. 在 CIE Lab 颜色空间里, 亮度通道  $L$  在一定程度上反映了图像梯度域的变化, 但是当 2 种颜色在色彩上差异较大时, 亮度通道无法准确地描述出不同颜色的色彩梯度变化. 在尊重颜色原亮度方向的前提下, 为了尽可能地体现不同颜色间梯度的差异, 本文建立了能量函数



a. 实例 1



b. 实例 2

图 2 主色检测方法对比

$$\varphi(g) = \sum_{i=1}^{n_k} ((g_i - l_i)^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^{n_k} (g_i - g_j - \text{div}(i, j))^2);$$

$$n_k g_i - \sum_{j=1, j \neq i}^{n_k} g_j = l_i + \sum_{j=1, j \neq i}^{n_k} \text{div}(i, j).$$

其中,  $l_i$  为主色 (dominant color, dc)  $dc_i$  在 CIE Lab 颜色空间内的亮度值,  $g_i$  为待求解的主色  $dc_i$  对应的灰度值. 2 种主色  $i$  和  $j$  之间的梯度  $\text{div}(i, j)$  可表示为

$$\text{div}(i, j) = \alpha_{ij} \sqrt{l_{\Delta c_{ij}}},$$

其中,  $\Delta c_{ij}$  为  $dc_i$  与  $dc_j$  的 RGB 颜色差值绝对值;  $\alpha_{ij}$  为符号方向, 按顺序比较两者的亮度通道  $L$ , RGB 三通道之和,  $G$  通道,  $R$  通道; 若  $dc_i$  的某一项大于  $dc_j$ , 则  $\alpha_{ij} = 1$ , 反之  $\alpha_{ij} = -1$ ; 若相等, 则继续比较下一项. 对  $g_i$  求偏导数并使其为 0, 得到

联立求解所有方程形成的方程组, 即可得到每个主色对应的灰度值. 若主色集内存在灰度颜色, 其对应的灰度值可能与其本身的灰度值不同, 因此本文根据主色集内原有的灰度颜色对主色灰度值进行重映射; 为了避免灰度化图像中的过曝或欠曝缺陷, 本文在主色集内加入了输入图像中亮度最大和最小的 2 种颜色. 设主色集内存在的 2 种相邻灰度颜色  $dc_p$  和  $dc_q$ , 其重映射方式为

$$g'_t = \frac{g_t - g_p}{g_q - g_p} \times (l_q - l_p) + l_p.$$

其中,  $g_p$ ,  $g_q$  和  $g_t$  ( $l_p < l_t < l_q$ ) 分别为  $dc_p$ ,  $dc_q$  和

任意主色  $dc_i$  重映射前对应的灰度值;  $g'_i$  为  $dc_i$  重映射后对应的新灰度值.

### 2.3 基于局部线性嵌入的灰度传播方法

上一步得到的主色灰度值之间较好地保持了彩色空间内的对比度. 接着, 本文利用基于局部线性嵌入的灰度传播方法将主色和灰度颜色的灰度值作为传播源, 并将其传播到与其相近颜色的像素上, 以达到保持灰度图像全局对比度的效果.

在利用局部线性嵌入模型<sup>[22]</sup>将灰度值扩散到相似颜色的像素方面, Chen 等<sup>[23]</sup>为本文方法提供了一种可以借鉴的思路, 但是他们在使用局部线性嵌入模型计算拟合系数时采用固定的最近邻数目, 没有考虑拟合误差大小, 势必造成较大的误差. 为此本文引入拟合误差检测机制, 自动确定最近邻个数. 本文灰度传播优化模型为

$$E = E_1 + E_2.$$

其中, 传播源灰度约束项  $E_1$  用于将主色和灰度颜色对应的灰度值指定为传播源,

$$E_1 = \sum_{i=1}^{n_0} \lambda_i (z_i - u_i)^2,$$

$z_i$  为颜色  $c_i$  对应灰度值,  $u_i$  为其目标灰度值,  $\lambda_i$  标记  $c_i$  是否为主色或灰度颜色. 如果  $c_i$  为主色或灰度颜色, 则  $\lambda_i = 1$ , 且  $u_i$  采用主色和灰度颜色对应的灰度值; 否则,  $\lambda_i = 0$ ,  $u_i = 0$ .  $n_0$  为输入图像总颜色数. 灰度传播约束项  $E_2$  采用局部线性嵌入模型, 将传播源的灰度值进行扩散

$$E_2 = \sum_{i=1}^{n_0} \left( z_i - \sum_{j=1}^{\tau_i} w_{ij} z_j \right)^2.$$

在 CIE Lab 颜色空间, 每种颜色  $c_i$  于图像颜色集合中搜索  $\tau_i$  种最相近的颜色  $c_j$ .  $w_{ij}$  为用这  $\tau_i$  种最近邻颜色  $c_j$  重新拟合颜色  $c_i$  的系数, 它可以通过最小化

$$\sum_{i=1}^{n_0} \left\| c_i - \sum_{j=1}^{\tau_i} w_{ij} c_j \right\|^2.$$

得到. 对  $z_i$  求偏导数并使其等于 0, 得到下列方程

$$(1 + \lambda_i) z_i - \sum_{j=1}^{\tau_i} w_{ij} z_j + \sum_{p \in \Omega_i} \left( z_p - \sum_{q=1}^{\tau_p} w_{pq} z_q \right) = \lambda_i u_i,$$

其中  $\Omega_i$  表示  $c_i$  被作为最近邻颜色的颜色集合. 联立并求解所有偏导数方程形成的方程组, 即可得到主色和灰度颜色的灰度值扩散后形成的图像.

局部线性嵌入模型要求拟合误差不能过大, 否则拟合图像会比输入图像显得平滑, 导致灰度化图像的细节损失. 为了解决这个问题, 本文引入拟合误差检测机制, 并设置颜色的最大最近邻个数  $\tau_{\max}$ , 拟合误差阈值  $\delta$ , 拟合系数绝对值的最大值阈值  $\varepsilon$ . 对于任意颜色  $c$ , 首先取  $\tau_{\max}$  个最近邻颜色计算拟合误差. 如果拟合误差小于阈值  $\delta$  且拟合系数绝对值的最大值小于阈值  $\varepsilon$ , 则  $\tau_i = \tau_{\max}$ ; 否则, 循环执行以下步骤: 剔除当前最近邻颜色中颜色差异最大的颜色,  $\tau_i = \tau_i - 1$ , 直至拟合误差小于阈值  $\delta$  且拟合系数绝对值的最大值小于阈值  $\varepsilon$ . 另外, 由于局部线性嵌入模型的局限性, 可能会出现个别没有扩散到从而没有被灰度化的颜色. 为此, 需要对灰度传播图像进行检测, 如果图像中存在没有被灰度化的像素, 则采用基于梯度域的局部灰度化方法将其灰度化.

### 2.4 基于梯度域的局部灰度化方法

灰度传播图像的全局对比度得到保持, 但是可能存在少量局部像素未被灰度化, 在此使用基于梯度域的局部灰度化方法将其进行灰度化.

为了尽可能利用已经被灰度化的像素, 并且使未被灰度化的像素在灰度化之后保持与周围像素之间的局部对比度, 本文建立模型

$$\psi(g) = \sum_{i,j} \beta_i (g_i - g_j - \text{div}(i, j))^2.$$

其中,  $\beta_i$  用于标记该像素  $p_i$  是否已经被灰度化, 如果已经被灰度化, 那么  $\beta_i = 0$ , 否则  $\beta_i = 1$ ;  $g_i$  为该像素对应的灰度值,  $g_j$  为与它相邻的像素对应的灰度值. 通过最小化函数  $\psi(g)$  得到所有未被灰度化像素的灰度值.

图 3 所示为本文方法的一个实例, 其中加红框的为最亮或最暗颜色; 图 3f 所示为阈值  $\tau_{\max} = 3$  时的灰度传播图像. 在该实例中, 由于  $\tau_{\max}$  取值比较小, 将主色和灰度颜色的灰度值进行灰度传播时, 图像左边紫色的球上出现了因灰度值扩散不到而未被灰度化的情况, 如图 3g 所示. 整幅图像未被灰度化的像素数目为 23 个, 采用基于梯度域的局部灰度化方法进行灰度化. 图 4 所示为当  $\tau_{\max}$  取不同值时得到的灰度化图像及其局部放大图. 可以看出, 随着  $\tau_{\max}$  的增大, 在局部纹理特征拟合上效果会更好; 当  $\tau_{\max}$  增大到一定的程度之后, 灰度传播也可以将确定的灰度值扩散到整幅图像, 尽管计算时间会稍有增加.

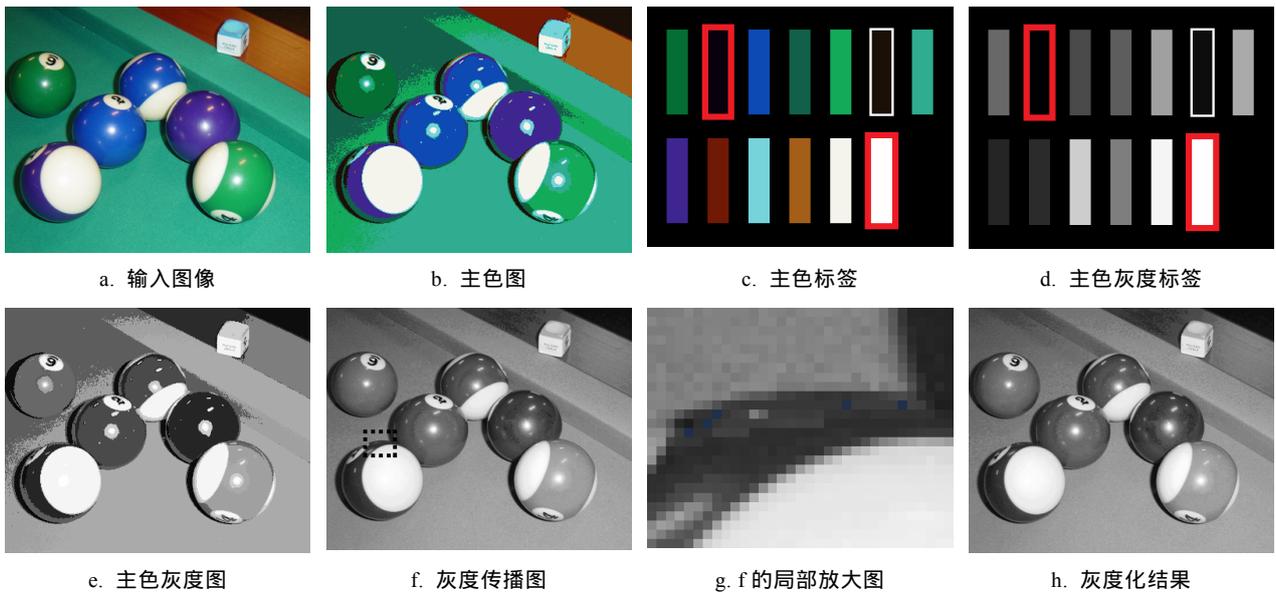


图 3 实例 1

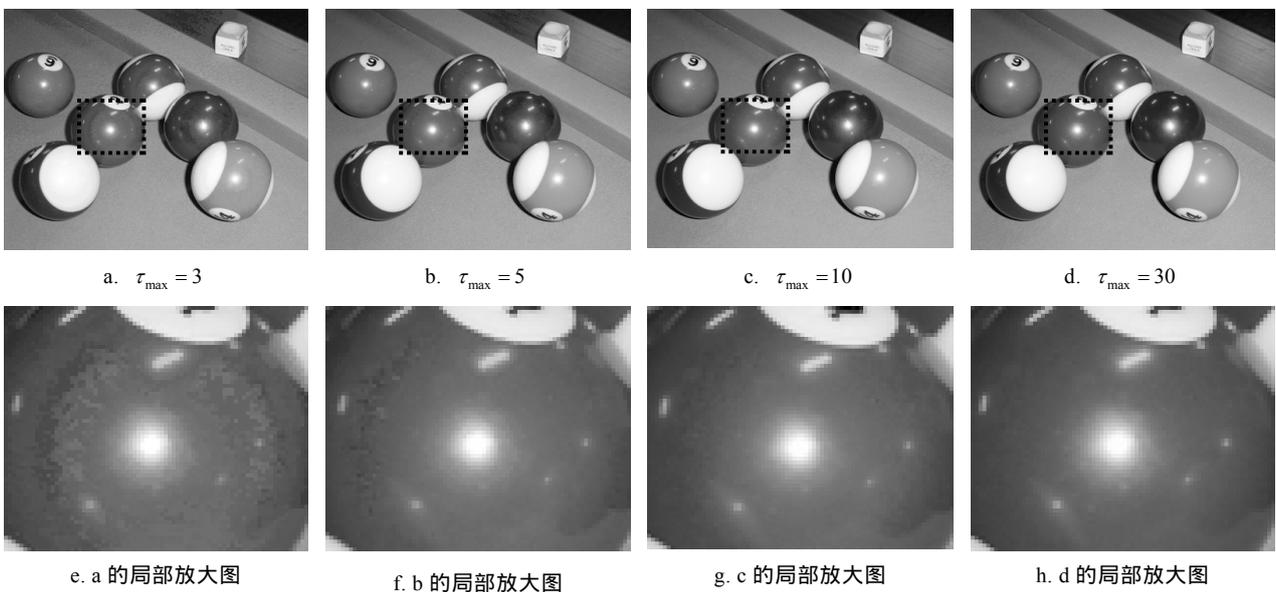


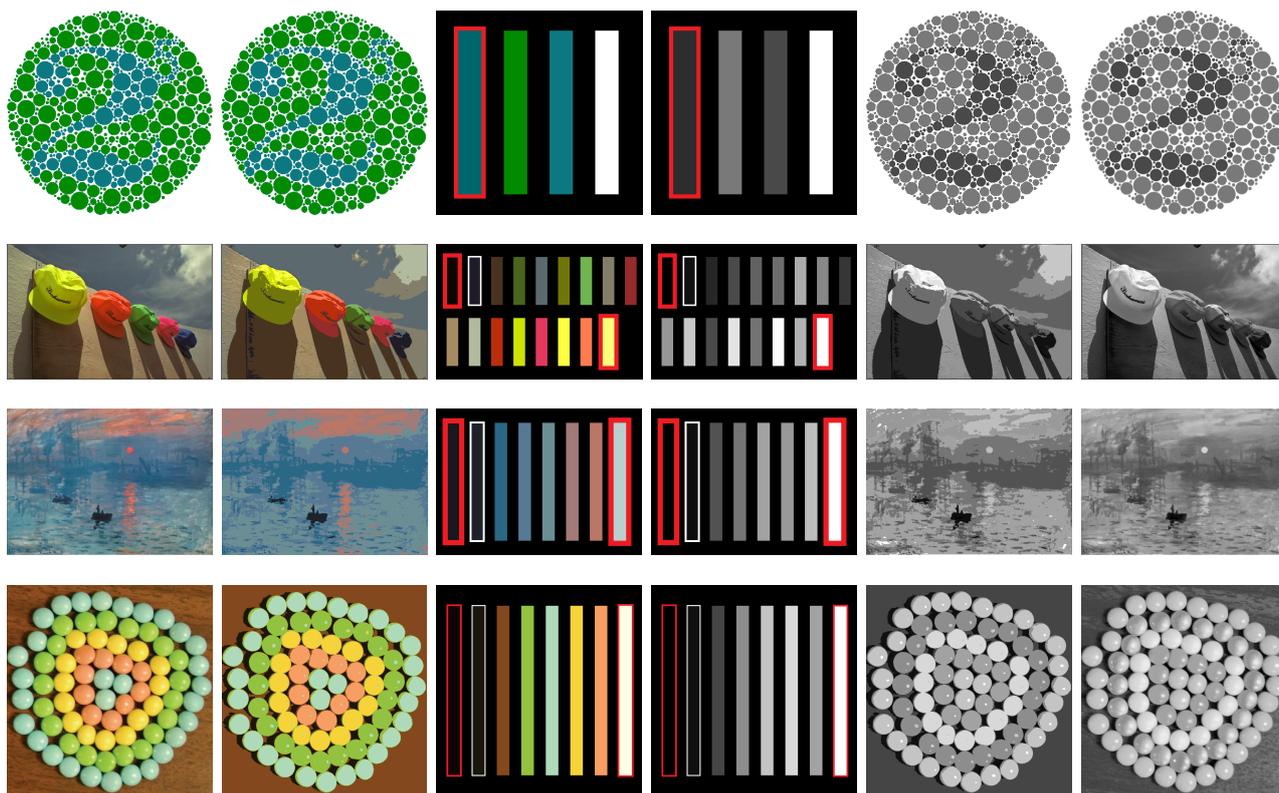
图 4 不同  $\tau_{max}$  阈值下的灰度化结果

### 3 实验与讨论

本文方法的实现平台为 Inter® Core™2 Duo CPU E8400 @3.00GHz, 3.00GB 内存, 开发环境为 Matlab R2010a.

实验结果如图 5~7 所示. 图 5 中, 4 组测试实例均采用阈值  $\tau_{max} = 30$ , 基于局部线性嵌入的灰度传播方法能够将所有像素进行灰度化. 对于实例中的主色图像, 第 1 幅中背景、墨绿的和草绿的圆, 第 2 幅中每顶帽子的颜色, 第 3 幅中太阳以及黑船、蓝湖的特征颜色, 第 4 幅中每一类珠子的颜

色均得到了保持, 即主色图像保持了较好的原图特征信息. 将主色灰度化后得到的主色灰度图也保持了较好的全局对比度, 最后通过基于局部线性嵌入的灰度传播方法进行灰度传播, 较好地保持局部的纹理特征. 图 6~7 分别是本文方法与文献 [5] 和文献 [7]、文献 [6] 和文献 [3] 的灰度化效果比较实例. 从图 6 可以看出, 第 1 组实例, 图 6b, 6c 中花的红色部分与白色部分均无法很好地区分开来, 图 6d 中花瓣的白色部分和红色部分均得到了较好的区分; 第 2 组实例, 图 6b, 6c 中青椒的高亮部分对比度保持不理想, 图 6d 则较好地保持该部分的



a. 输入图像      b. 主色图像      c. 主色标签      d. 主色灰度标签      e. 主色灰度图      f. 灰度化结果

图 5 实例 2



a. 输入图像      b. 文献[5]方法      c. 文献[7]方法      d. 本文方法

图 6 灰度化方法比较 1



图7 灰度化方法比较2

对比度. 从图7可以看出, 第1组实例, 图7b, 7c中白色的背景色均没有得到保持, 而图7d则保持了白色背景的灰度值. 综上, 本文方法对输入图像中的灰度像素灰度值具有较好的保持作用.

#### 4 结 语

本文提出的基于主色检测与灰度传播的彩色图像灰度化方法有机地结合了全局灰度化和局部灰度化, 能够较好地保持输入图像的全局和局部对比度以及灰度像素的灰度值.

由于本文在实现主色提取方法时没有考虑代码效率, 再加上引入了局部线性嵌入模型, 因此当前基于本文方法实现的代码运行时间较长. 对于一幅尺寸为 $312 \times 225$ 的图像, 运行时长为90 s. 未来将在优化算法效率上开展工作.

致谢. 感谢北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室邹冬青博士在局部线性嵌入模型方面提供的帮助!

#### 参考文献(References):

- [1] Bala R, Eschbach R. Spatial color-to-grayscale transform preserving chrominance edge information[C] //Proceedings of the 12th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings. Scottsdale: Society for Imaging Science and Technology, 2004: 82-86
- [2] Neumann L, Čadik M, Nemcsics A. An efficient perception-based adaptive color to gray transformation[C] //Proceedings of the 3rd Eurographics Conference on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization and Imaging. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2007: 73-80
- [3] 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
- [4] Wu Z R, Robinson J. Edge-preserving colour-to-grayscale conversion[J]. IET Image Processing, 2014, 8(4): 252-260
- [5] Gooch A A, Olsen S C, Tumblin J, *et al.* Color2gray: saliency-preserving color removal[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 634-639
- [6] 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
- [7] Grundland M, Dodgson N A. Decolorize: fast, contrast enhancing, color to grayscale conversion[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(11): 2891-2896
- [8] Kim Y, Jang C, Demouth J, *et al.* Robust color-to-gray via nonlinear global mapping[J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(5): Article No.161
- [9] Wang Hui, Chen Xiaodiao, Wang Yigang. The improved color-to-gray via nonlinear global mapping[J]. Journal of Com-

- puter-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(10): 1476-1479(in Chinese)  
(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)
- [10] Zhu Wei, Liu Ligang. Decolorize nonlinear tri-mapping in IHLS color space[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(2): 154-159(in Chinese)  
(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)
- [11] Cui M, Hu J X, Razdan A, *et al.* Color-to-gray conversion using ISOMAP[J]. The Visual Computer, 2010, 26(11): 1349-1360
- [12] Kuk J G, Ahn J H, Cho N I. A color to grayscale conversion considering local and global contrast[M] //Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2011, 6495: 513-524
- [13] Lu C W, Xu L, Jia J Y. Contrast preserving decolorization[C] //Proceedings of IEEE International Conference on Computational Photography. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2012: 1-7
- [14] Zhu W, Hu R Z, Liu L G. Grey conversion via perceived-contrast[J]. The Visual Computer, 2014, 30(3): 299-309
- [15] 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
- [16] 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
- [17] Yang N C, Chang W H, Kuo C M, *et al.* A fast MPEG-7 dominant color extraction with new similarity measure for image retrieval[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2008, 19(2): 92-105
- [18] Min R, Cheng H D. Effective image retrieval using dominant color descriptor and fuzzy support vector machine[J]. Pattern Recognition, 2009, 42(1): 147-157
- [19] Shao H, Wu Y S, Cui W C, *et al.* Image retrieval based on MPEG-7 dominant color descriptor[C] //Proceedings of the 9th International Conference for Young Computer Scientists. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2008: 753-757
- [20] Jiang J M, Weng Y, Li P J. Dominant colour extraction in DCT domain[J]. Image and Vision Computing, 2006, 24(12): 1269-1277
- [21] Li A G, Bao X Y. Extracting image dominant color features based on region growing[C] //Proceedings of International Conference on Web Information Systems and Mining. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2010, 2: 120-123
- [22] Roweis S T, Saul L K. Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding[J]. Science, 2000, 290(5500): 2323-2326
- [23] Chen X W, Zou D Q, Zhao Q P, *et al.* Manifold preserving edit propagation[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6): Article No.132