

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)07-1297-06

论文索引信息: 刘世光, 张翔, 吴婧婷, 孙济洲, 彭群生. 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

单参数控制的灰度图像着色

刘世光¹⁾, 张翔¹⁾, 吴婧婷¹⁾, 孙济洲¹⁾, 彭群生²⁾

¹⁾(天津大学计算机科学与技术学院, 天津 300072) ²⁾(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 灰度图像着色是计算机图形学和计算机图像处理等领域的研究热点, 在影视制作、数字照片编辑、动漫艺术等方面具有重要的应用价值。传统的方法通过大量的交互操作实现灰度图像中不同区域的聚类或者色源图像和灰度图像之间的匹配, 大大降低了着色的效率。提出一种新的基于单参数控制的灰度图像着色方法。首先, 利用球体几何理论建立色彩变换模型。其次, 基于线性回归的方法, 对色源图像和灰度图像的直方图分别进行多项式拟合建模。用户输入拟合多项式的阶数之后, 可以实现色源图像和灰度图像的自动聚类并建立它们之间的匹配关系。最后, 通过色源图像和灰度图像之间的颜色映射实现灰度图像的着色。该方法无须烦琐的用户交互, 使得着色过程更为方便快捷。

关键词: 着色; 灰度图像; 色源图像; 多项式拟合

Gray-scale image colorization based on the control of single-parameter

Liu Shiguang¹⁾, Zhang Xiang¹⁾, Wu Jingting¹⁾, Sun Jizhou¹⁾, Peng Qunsheng²⁾

¹⁾(School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072 China)

²⁾(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027 China)

Abstract: Gray-scale image colorization is a hot topic in both computer graphics and image processing. It can be widely applied in film and television production, digital photo editing, animation industry, etc. A great number of user interactions, which greatly reduces the efficiency of colorization, are involved in conventional methods to achieve clustering of the gray-scale image or the matching between the gray-scale image and the source image. This paper presents a novel gray-scale image colorization method based on the control of single-parameter. Firstly, colorization model based on the theory of analytic geometry is presented. Secondly, based on the linear regression method, we calculate the polynomial fitting model of the histograms of the source image and the gray-scale image respectively. After users input the order of the polynomials, the clustering and matching of the source image and the grayscale images could be achieved automatically. Finally, the colorization is realized by transferring the color of source image to its corresponding area of the gray-scale image. This method greatly eliminates the user interactions, making the process of colorization more convenient and efficient.

Keywords: colorization; gray-scale image; source image; polynomial fitting

0 引言

灰度图像着色指采用计算机处理技术使灰度图

像具有彩色效果, 其研究可以广泛用于黑白照片/电影的彩色化、漫画彩色化及数字图像增强等领域。早期的方法首先对图像进行分割, 然后对不同的区域着不同的色彩。由于现有的图像分割技术很难准

收稿日期: 2010-07-09; 修回日期: 2010-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(60803047); 教育部博士点基金项目(200800561045); 北京大学数字中国研究院新研究基金项目(W09HP01-1); 空间信息集成与3S工程应用北京市重点实验室(北京大学)开放基金项目(SHBK109-1-02)。

第一作者简介: 刘世光(1980—), 男, 副教授, CCF 会员。2007年于浙江大学CAD&CG国家重点实验室获得计算机图形学博士学位, 主要研究方向为计算机图形学、计算机动画、可视化仿真等。E-mail: lsg@tju.edu.cn。

确分割图像的不同区域,这类方法的处理效果存在一些问题。为了提高分割的质量,用户交互的方法逐渐成为主流。然而,大量的交互操作无疑限制了这类方法的应用范围。如何方便有效地实现灰度图像着色一直是人们研究的热点和难点之一。

现有的灰度图像着色方法可以分为不基于色源图像的着色和基于色源图像的着色两种。前者根据经验对图像的不同区域进行着色,使用范围较广;后者基于一幅和灰度图像内容相近的色源图像对其着色,着色信息更为可信。Welsh 等人^[1]改进 Reinhard 等人^[2]提出的彩色图像间颜色传递的方法,使其适用于灰度图像的着色。该方法需要用户采用窗口交互选择着色区域。Levin 等人^[3]提出了一种基于优化的灰度图像着色方法,将着色过程转化为优化求解过程。其中,用户的交互操作成为优化过程的约束条件。国内也有不少灰度图像着色的相关工作。赵国英等人^[4]研究了脸部黑白图像的着色方法。贾云涛等人^[5]提出了一种基于图切分技术的交互式图像着色方法,该方法将着色问题转化为一个全局能量函数的构造和优化,并通过图切分技术求得最佳的图像分割块。然而,基于图切分的分割方法使得图像中不同区域之间颜色没有过渡。胡伟等人^[6]提出了基于最优化着色的金字塔模型的高分辨率灰度图像着色方法。该方法能够控制矩阵计算的规模,适合图形硬件加速。此外,还有研究者将灰度图像着色推广到卡通艺术和动漫领域。Hertzmann 等人^[7]和 Irony 等人^[8]分别研究了基于图像类比和基于样本的着色算法。自然景物图像是内容最为复杂的图像种类之一,Luan 等人^[9]提出了一种基于笔画交互分割的自然景物图像着色新方法。该方法需要大量的笔画输入来实现对自然景物图像较为准确的分割。Liu 等人^[10]利用互联网上丰富的图像资源,从中分析得到若干参考图像用于灰度图像的上色。Qu 等人^[11]进一步将图像着色推广到漫画领域,提出一种基于纹理的水平集方法的黑白漫画着色方法。尽管前人对灰度图像着色进行了不少研究,大多数方法需要较多的用户交互操作,这在一定程度上限制了它们的应用。本文提出一种基于单参数控制的灰度图像着色新方法。该方法无须用户的交互式笔画处理,使得着色过程更为简捷方便。首先建立基于球体解析几何理论的色彩变换模型。再基于线性回归的方法,对色源图像和灰度图像的直方图分别进行多项式拟合建模。用户输入

拟合多项式的阶数之后,可以实现色源图像和灰度图像的自动聚类并建立它们之间的自动匹配。最后,通过色源图像和灰度图像之间的颜色映射完成灰度图像的着色。

1 基本思想

黑白图像的着色实际上是一个从 1 维的灰度域到 3 维的 RGB 彩色域的映射问题。因此,具有不同色度和饱和度的颜色可能对应于同一个灰度值,也就是说,该映射过程并非一一映射,从而导致了着色问题的不唯一性。记灰度图像中像素 (i, j) 的灰度为 $L(i, j)$,着色后对应像素的颜色为 $(R(i, j), G(i, j), B(i, j))$,它们之间的映射关系可以表示为

$$L^2(i, j) = (R^2(i, j) + G^2(i, j) + B^2(i, j))/3 \quad (1)$$

由式(1)可以看出,对于灰度图像上的每一个像素,如果将其置于 RGB 颜色空间中,则具有相同的灰度值 L 的点将分部在以 $\sqrt{3}L$ 为半径、以原点为球心的球面上。由于这些点只分布在第 1 卦限,可以将这种分布看做是一个由许多 1/8 球面层组成的几何结构。图 1 表示了灰度值和颜色的映射关系。灰度是 1 维的,从上述分析可知它是第 1 卦限的对角线(图 1 中蓝线)。由此可见,如果对一幅彩色图像进行灰度化,则某一球面上所有颜色点在经过去色计算之后将会聚于该球面与灰度线的交点上。

基于上述分析,发现如果能够采用统计模型对这些球面的颜色分布进行聚类分析建模,则可以解决着色过程中需要考虑的图像分割问题;其次,结合上述聚类分析,并对这种灰度的计算过程进行逆向建模即可实现灰度图像中不同区域的着色。图 2 为

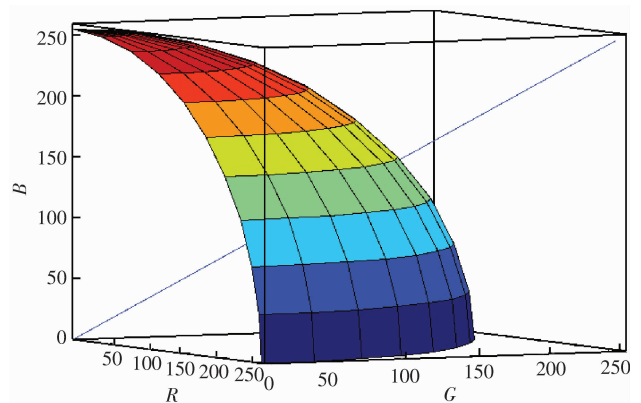


图 1 灰度值和颜色的映射

Fig. 1 The mapping between grey values and colors

算法流程图。

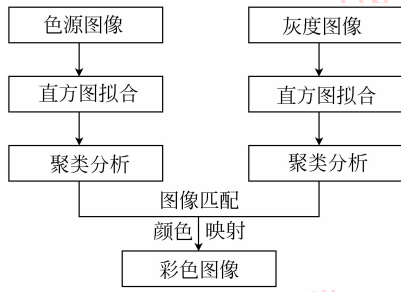


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the algorithm

2 基于多项式拟合直方图的图像聚类

采用基于多项式拟合直方图的图像聚类方法实现图像中不同区域的划分。首先,求取图像的直方图。再采用线性回归的思想,应用最小二乘法对直方图进行多项式拟合。然后求取拟合后多项式的极值,并把极小值作为图像不同区域划分的分界值。其中,拟合多项式的阶数需要用户根据不同的图像设定。

图像的直方图是将灰度信息按照统计学中的直方图方法绘制的统计图像。将这个数据对象从数学的角度定义为 $h(x)$, 其中, $x = 1, 2, \dots, 255$ 表示区间标记, 函数值 $h \in \mathbf{N}$ 表示不同区间内的像素点个数。得到图像的直方图之后, 将直方图中的极小值视为得到图像颜色划分的拆分点。极小值的确定方法如下: 首先, 应用最小二乘法 (LSE) 对直方图数据进行多项式的拟合, 其中拟合多项式函数 $g(x)$ 的阶数需要手工输入。其次, 求取拟合多项式函数为 $g(x)$ 在 $(0, 255)$ 区间内的极小值, 即求出 $(0, 255)$ 内同时满足 $g'(x) = 0$ 和 $g''(x) > 0$ 的值, 将极小值点的集合记为 \mathbf{M} 。最后, 依照得出的极小值点, 对整个图像进行拆分, 在拆分过程中从 $\mathbf{M} \cup \{0, 255\}$ 中取相邻的点构成区间 $\mathbf{G}_n, n \in \mathbf{N}, L$ 值落在同一个区间内的像素点为同一区域内的像素点, 即若

$$\sqrt{(R^2(i, j) + G^2(i, j) + B^2(i, j))} / 3 = L \in \mathbf{G}_n \quad (2)$$

则 $(R, G, B) \in \mathbf{G}_n$ 。最小二乘拟合过程的数学表达式为

$$g(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 \quad (3)$$

$$(a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0) =$$

$$\operatorname{argmin} (g(x) - h(x))^2 \quad x \in [1, 255] \quad (4)$$

图 3 是一幅灰度图像及其直方图的多项式拟合

结果。其中, 图 3 (b) 中的蓝线为多项式拟合曲线, 该多项式的阶数是 4。

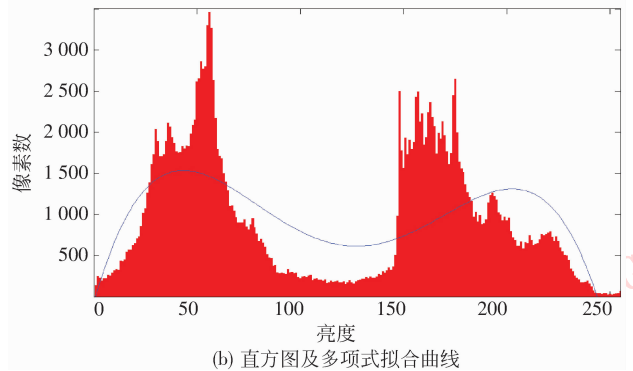


图 3 灰度图像及其直方图的多项式拟合

Fig. 3 Polynomial fitting of the greyscale image and its histogram

3 图像匹配及颜色映射

得到色源图像和灰度图像的聚类之后, 需要建立两幅图像不同区域之间的匹配关系, 从而实现颜色映射。

3.1 图像匹配

通过两个序列 Z 和 T 记录直方图多项式曲线的极值点。其中, Z 称为极点序列, 记录极值的大小; T 称为极值交替序列, 记录极大值点与极小值点的交替顺序, 即当 $T_i = 1$ 时, Z_i 是局部极大值点, 当 $T_i = -1$ 时, Z_i 是局部极小值点。记 Z_s 和 T_s 表示色源图像聚类后的区域序列, Z_T 和 T_T 表示灰度图像聚类后的区域序列, S_s 和 S_T 分别表示色源图像和灰度图像的直方图。

如果 $T_s = T_T$, 那么色源图像和灰度图像的内容是相似的, 它们的聚类自然而有序地匹配。如果 $T_s \neq T_T$ (如图 4 所示), 我们需要调整序列 T 和 Z , 使它们匹配而便于着色。具体方法如下: 首先, 检测两

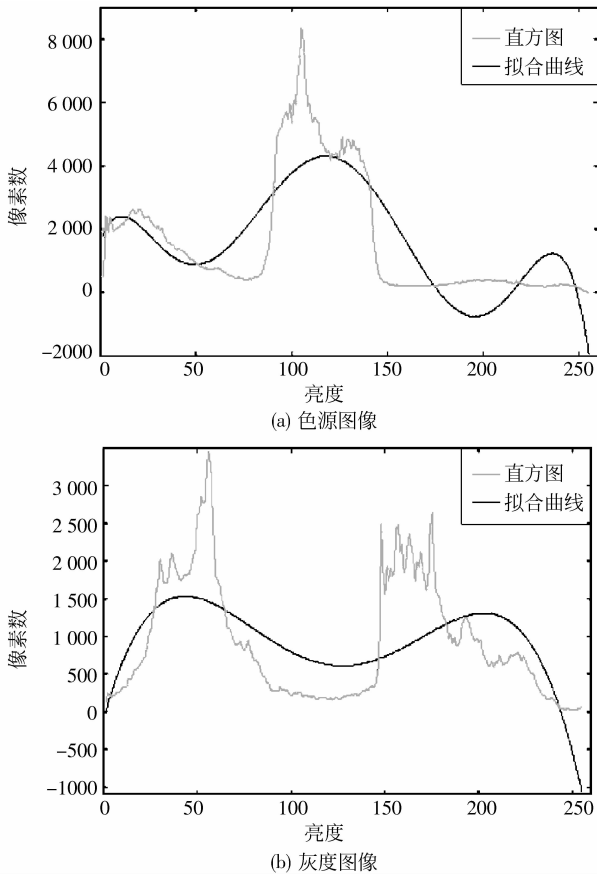


图 4 灰度图像与色源图像的多项式拟合结果比较

Fig. 4 Contrast of the multinomial fitting results between the grayscale image and the source image

个序列长度的差是否为奇数,如果是奇数,则去掉处于序列之首的点或末尾的点。然后,找出极值点数目较大的一个序列。接下来,算法将比较两个序列的首和尾,只要首或尾任意一个不相等,算法就会在较大序列里去掉了它。上述步骤可以使两个序列长度的差为偶数。首尾匹配之后,就有了首和尾匹配的极值点序列。然而,两个序列本身可能还不匹配,但序列大小相差是偶数。这时可以从较大的序列中删除偶数个点,最终使两个序列匹配。我们提出一个带有循环的算法实现上述过程,在每一次循环计算中删除两个相邻的点。我们称之为循环配对算法,伪代码如下所示,其中 δ 表示序列中包含元素的数目。

输入: δ, g, T, Z

输出: T_s, T_r, Z_s, Z_r

While $\delta > 0$

do $index \leftarrow 0$

$minval \leftarrow \infty$

for $i \leftarrow 2$ to $\delta(T) - 2$

```

do if  $g(Z(i)) < g(Z(i+1)), g(Z(i)) > g(Z(i+2)),$ 
 $g(Z(i-1)) < g(Z(i+1)), g(Z(i)) - g(Z(i+1)) < minval,$ 
then  $index \leftarrow i$ 
 $minval \leftarrow g(Z(i)) - g(Z(i+1))$ 
if  $g(Z(i)) < g(Z(i+1)), g(Z(i)) > g(Z(i+2)),$ 
 $g(Z(i-1)) > g(Z(i+1)), g(Z(i)) - g(Z(i+1)) < minval,$ 
then  $index \leftarrow i$ 
 $minval \leftarrow g(Z(i)) - g(Z(i+1))$ 
if  $index = 0$ 
then for  $i \leftarrow 2$  to  $\delta(T) - 2$ 
do if  $g(Z(i)) - g(Z(i+1)) < minval$ 
then  $index \leftarrow i$ 
 $minval \leftarrow g(Z(i)) - g(Z(i+1))$ 
    
```

3.2 颜色映射

由于图像的颜色和其亮度之间的关系符合球面几何模型,同一球面上的颜色值可以用亮度值和其角度值来表示(如图 5 所示),即

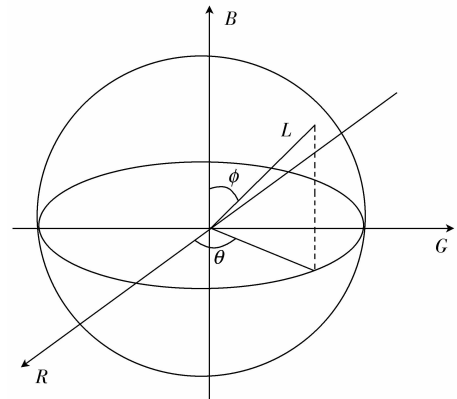


图 5 颜色和灰度的转换示意图

Fig. 5 The illustration of conversion between grey values and colors

$$\begin{aligned}
 R &= \sqrt{3}L\cos(\theta)\sin(\varphi) = L\alpha \\
 G &= \sqrt{3}L\sin(\theta)\sin(\varphi) = L\beta \\
 B &= \sqrt{3}L\cos(\varphi) = L\gamma
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

假设对于匹配区域 F_1 和 G_2 , F_1 来源于色源图像, G_2 源于灰度图像, F_1 中 3 个通道的平均值为 \bar{R}_1, \bar{G}_1 和 \bar{B}_1 , 则有

$$\begin{aligned}
 \bar{R}_1 &= \sqrt{E(R_1^2)} = \bar{L}_1\bar{\alpha}_1 \\
 \bar{G}_1 &= \sqrt{E(G_1^2)} = \bar{L}_1\bar{\beta}_1 \\
 \bar{B}_1 &= \sqrt{E(B_1^2)} = \bar{L}_1\bar{\gamma}_1
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

于是,可以得到

$$\bar{\alpha}_1 = \bar{R}_1/\bar{L}_1, \bar{\beta}_1 = \bar{G}_1/\bar{L}_1, \bar{\gamma}_1 = \bar{B}_1/\bar{L}_1
 \tag{7}$$

对于 $L_2 \in G_2$,

$$\begin{aligned}
 R_2 &= L_2 \bar{\alpha}_1 = L_2 \bar{R}_1 / \bar{L}_1 \\
 G_2 &= L_2 \bar{\beta}_1 = L_2 \bar{G}_1 / \bar{L}_1 \\
 B_2 &= L_2 \bar{\gamma}_1 = L_2 \bar{B}_1 / \bar{L}_1
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

式中, $(R_2, G_2, B_2) \in F_1$ 是对应生成的彩色图像区域中的像素。

4 实验结果与分析

基于上述模型,在配置为 Athlon64 3200 + ,2 G 内存, GeForce 8800 GT 显卡的微机上对不同的灰度图像进行了着色实验,实验平台为 Mathworks Matlab

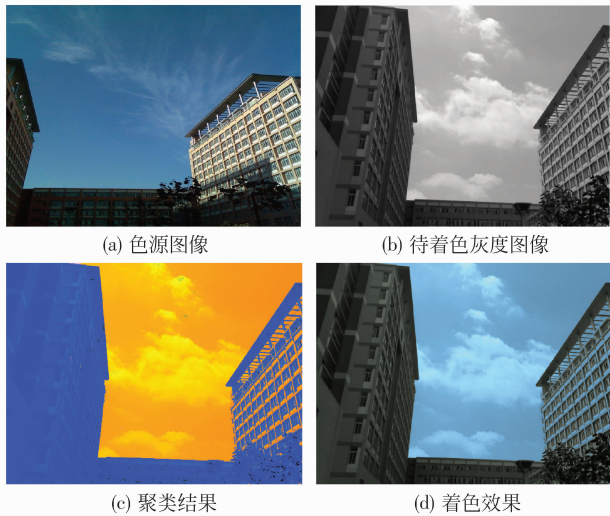


图 6 建筑物图像的着色结果
Fig. 6 The colorization result of a building image

2009。图 6 展示了一幅建筑物图像的着色结果。其中,图像的分辨率为 560×420 ,用户交互输入的拟合多项式的阶数为 3,处理时间为 0.2 s。

图 7 为本文算法和文献[1]中方法的着色结果比较。从图中可以看出,文献[1]方法没有很好地处理光照区域的颜色变化,本文方法的着色结果更接近于色源图像。图 8(a)(b)给出了白天建筑场景和黄昏沙漠景观的着色结果。从图中可以看出,本文方法较好地保持了灰度图像的特征并基于色源图像准确地表示出了不同区域的颜色。表 1 给出了实验中的有关数据及其取值。



图 7 实验结果比较
Fig. 7 The contrast of colorization results between different methods



图 8 其他灰度图像的着色结果
Fig. 8 More colorization results

表 1 实验参数及其取值

Tab.1 The parameters and their values in the experiments

图像	分辨率	拟合多项式的阶数	计算时间/s
图 7	560 × 420	4	0.2
图 8(a)	560 × 420	4	0.3
图 8(b)	1 008 × 740	5	1.0

5 结 论

针对现有的灰度着色算法中复杂的手工交互问题,提出一种基于单参数控制的灰度图像着色新方法。该方法只需要用户输入一个多项式阶数,然后系统可以自动地为一幅灰度图像着色,使得着色过程更为简捷方便。其中,拟合多项式的阶数为经验参数,一般为 4 或 5 时可以取得较为理想的效果。此外,采用多项式拟合图像直方图的方法分别对色源图像和灰度图像进行聚类并建立匹配关系。

本文方法需要用户提供一张内容和灰度图像相似的色源图像,这在一定程度上限制了该方法的应用范围。基于互联网图像数据库的搜索匹配技术可以帮助系统自动提供一张合适的色源图像,这是将来的研究方向之一。另外还将研究基于图像信息自动计算拟合多项式的阶数的方法,从而使算法能够实现灰度图像的自动着色。

参考文献 (References)

- [1] Welsh T, Ashikhmin M, Mueller K. Transferring color to grayscale images [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 277-280.
- [2] Reinhard E, Ashikhmin M, Gooch B, et al. Color transfer between images [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(5): 34-41.
- [3] Levin A, Lischinski D, Weiss Y. Colorization using optimization [C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH. Los Angeles, USA: ACM Press, 2004: 689-694.
- [4] Zhao Guoying, Li Hua. Improvement of colorizing algorithm for greyscale face image [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(8): 1051-1056. [赵国英, 李华. 人体脸部灰度图像上色的改进算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(8): 1051-1056.]
- [5] Jia Yuntao, Hu Shimin. Interactive graph cut colorization [J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(3): 508-513. [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): 508-513.]
- [6] Hu Wei, Qin Kaihuai. 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.]
- [7] Hertzmann A, Jacobs C, Oliver N, et al. Image analogies [C]// Proceedings of ACM SIGGRAPH, Los Angeles, USA: ACM Press, 2001: 327-340.
- [8] Irony R, Cohen-Or D, Lischinski D. Colorization by example [C]//Proceedings of Rendering Techniques. New York: IEEE Computer Society Press, 2005: 201-210.
- [9] Luan Q, Wen F, Cohen-Or D, et al. Natural image colorization [C]//Proceedings of Rendering Techniques. New York: IEEE Computer Society Press, 2007: 309-320.
- [10] Liu Xiaopei, Wan Liang, Qu Yingge, et al. Intrinsic colorization [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5): 152:1-152:9.
- [11] Qu Y, Wong T T, Heng P A. Manga colorization [J]. ACM Transaction on Graphics, 2006, 25(3): 1214-1220.