

文章编号:1007-2780(2019)06-0619-08

基于图像分割和区域匹配的灰度图像彩色化算法

黄冠婷, 韩学辉*, 龚晓婷, 王晓宇, 祝 勇, 段 锦

(长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:针对传统颜色传递算法只进行全局颜色传递,未考虑图像局部特征,出现颜色误传递的问题,提出了一种基于 Graph-Based 图像分割与区域匹配的灰度图像彩色化算法。利用 Graph-Based 图像分割将目标图像和参考图像分割为若干个亮度和纹理特征一致的子区域。根据本文提出的思想,认为“具有相似亮度和纹理的子区域具有相似的颜色分布”,对目标图像和参考图像的子区域建立匹配关系,利用亮度特征和 LBP 局部纹理特征对子区域进行匹配。最后,在 YCbCr 颜色空间中对相匹配子区域利用亮度和纹理特征进行颜色传递。实验结果证明,在该算法中其参考图像无需和目标图像配准,只需特征相近,就可以对目标图像实现全自动的彩色化技术并有效克服了颜色误传递的现象,彩色化结果图像在色彩分布和主观视觉上都有明显的提高。

关键词:图像分割;区域匹配;彩色化;颜色传递;灰度图像

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193406.0619

Gray image colorization algorithm based on image segmentation and region matching

HUANG Guan-ting, HAN Xue-hui*, GONG Xiao-ting, WANG Xiao-yu, ZHU Yong, DUAN Jin

(College of Electronic Information Engineering Changchun University of
Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the problem of the color mistransmission of the traditional color transfer algorithm which only carries out the global color transfer and doesn't consider the local features of the image. A gray image colorization algorithm based on Graph-Based image segmentation and region matching is proposed. The target image and the reference image are segmented into a plurality of sub-regions whose luminance and texture features are consistent by using Graph-Based image segmentation. According to one idea presented in this paper, it is considered that "sub-regions with similar brightness and texture have similar color distributions", a matching relationship is established between the target image and the sub-region of the reference image, and the sub-region is matched by using the luminance feature and the LBP local texture feature. Finally, the color matching is performed on the matching sub-regions using luminance and texture features in the YCbCr color space. The experimental results show that the reference image does not need to be registered with the target im-

收稿日期:2019-01-28;修订日期:2019-03-05.

基金项目:吉林省科技厅重点科技攻关项目(No.20160204066G X)

Supported by Key Scientific and Technological Project of Jilin Province Science and Technology Department(No.20160204066G X)

* 通信联系人, E-mail:2523865781@qq.com

age in the algorithm, and only the features are similar, the automatic colorization technology can be realized for the target image and effectively overcome the phenomenon of color mistransmission. The colorized result image has a significant improvement in color distribution and subjective visuals.

Key words: image segmentation; region matching; colorization; color transfer; grayscale image

1 引言

彩色化是一个给灰度图像、黑白图像、黑白电影等添加色彩的处理过程。现阶段,彩色化技术是计算机视觉领域的热门课题之一,被广泛应用于视频编辑、古画修复以及工业和军事等多个工程领域。彩色化算法是在给定图像亮度值的情况下计算颜色值的过程。依据规整化形式可将彩色化分为基于颜色传递与基于颜色扩展的这两类处理方法。

颜色传递是近年来兴起的计算机图像处理热门技术。Ruderman 等^[1]通过对图像的颜色分布数据统计,提出了 $l\alpha\beta$ 颜色空间,与 RGB 颜色空间不同之处在于,在 $l\alpha\beta$ 空间中,每个通道间的数据相关性较小。在此基础上,Reinhard 等^[2]根据颜色空间的抗相关性,有效地完成了彩色图像间的颜色传递工作,但该算法只适用于具有整体基调的单一颜色图像。Welsh 等^[3]提出了对灰度图像进行色彩迁移的彩色化算法,将彩色图像中的颜色传递到需要着色的灰度图像上。但这类方法会出现图像颜色在空间中不连续的问题,即像素点颜色与其邻域的颜色差值过大。随着颜色迁移的发展,胡国飞等^[4]提出了一种自适应的颜色传递算法。

在颜色扩展图像彩色化技术方面,Levi 等^[5]认为若相邻像素的灰度值相似,则就应该有相近的颜色值,因此提出了能量最优化算法。Yatziv 等^[6]在局部色彩扩展的图像彩色化方面,有着代表性的研究,他们提出了在确定颜色混合的权值时引入了测地距离,算法处理速度快于 Levin 算法,但当初始着色位置发生变化时,经常会出现错误的着色结果。Gastal 等^[7]设计边缘保持的主域变换滤波器,由灰度图像的边缘信息来扩散颜色,也得到了高质量的彩色化图像。

虽然全局颜色传递算法已经取得了很大的进步,但在实际问题中仍然存在很多问题。本文针对全局颜色传递算法在处理图像时出现颜

色误传递以及太过于依赖参考图像等问题,提出了基于 Graph-Based 图像分割和区域匹配的灰度图像彩色化算法。所采用的参考图像不需要和目标图像配准,只需要图像特征相近似,就可以对目标图像实现彩色化,在减少了颜色误传的现象的同时又提高了颜色传递的准确度,彩色化效果更理想。

2 灰度图像彩色化算法的实现

Graph-Based 图像分割和区域匹配的灰度图像彩色化算法流程如图 1 所示。算法的实现主要包括以下几个步骤,首先,利用基于 Graph-Based 图像分割对目标图像和参考图像进行分割,得到图像亮度和纹理一致性的子区域,在此基础上,本文提出了“具有相似亮度和纹理的子区域具有相似的颜色分布”的这一假设,利用亮度和纹理信息对目标图像和参考图像进行子区域匹配,最后在

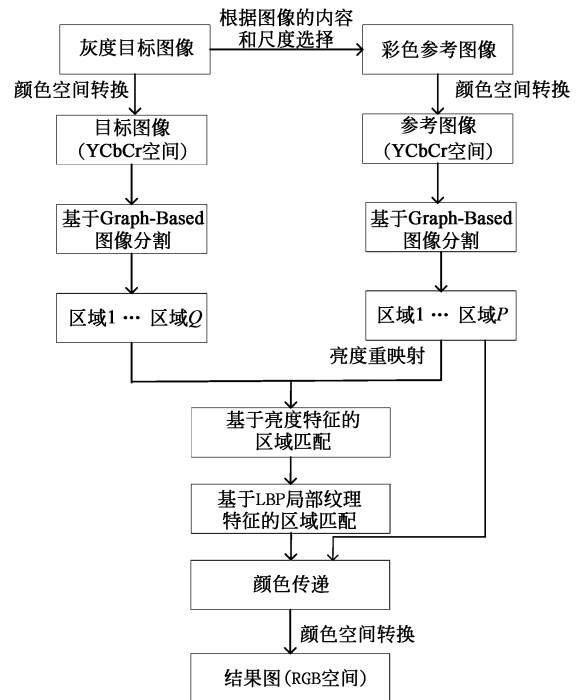


图 1 算法流程图

Fig.1 Algorithm flowchart

更适合进行彩色化的 YCbCr 颜色空间中,对相匹配的子区域中利用亮度和纹理特征进行颜色传递,从而实现灰度图像彩色化过程。

2.1 Graph-Based 的图像分割

Graph-Based 的图像分割^[8]思想是将一幅图像表示为包含有 n 个顶点和 m 条边的带权无向图 $G=(V,E)$ 。其中,所有结点 $v_i \in V$, 结点 v_i 和 v_j 之间所有的边 $e_{ij} \in E$, 根据一定的准则,为每一条边计算一个边权值 $w((v_i, v_j))$, 利用一定的最优化准则使分割结果区域 S 内的边有较低的权值,而区域之间的边有较高的权值。算法的具体步骤如下:

- (1) 计算每个像素点与其领域的不相似度;
- (2) 根据边的权重将边集合 E 进行非降序排序为 $e_1, \dots, e_m$, 选择 e_i ;
- (3) 构建初始分割 S^0 , S^0 中的每个顶点构成一个区域 C_0 ;
- (4) 对于 $q=1, \dots, m$, 重复步骤(3);
- (5) 定义 v_i, v_j 为第 q 个边所连接的顶点, C_i^{q-1} 为 S^{q-1} 中含 v_i 的区域, C_j^{q-1} 为 S^{q-1} 中含 v_j 的区域, 若 $C_i^{q-1} \neq C_j^{q-1}$, 且 $D(C_i^{q-1}, C_j^{q-1}) = \text{false}$, 即合并区域 C_i^{q-1} 和 C_j^{q-1} , 否则 $S^q = S^{q-1}$;
- (6) 返回 $S = S^m$ 。

我们在实现 Graph-Based 图像分割时,选用了文献[9]提出的改进算法,对子区域进行小波变换,提取小波能量直方图,从而提取图像纹理特征,因此可以直接获得亮度和纹理一致性的子区域,且在设置关键的阈值参数时,综合考虑了图像内容和纹理等来选择合适的参数,以此获得合适的分割区域。

2.2 基于区域匹配的彩色化算法

本文提出了一种思想,认为“具有相似亮度和纹理的子区域具有相似的颜色分布”。基于这种思想,本文利用亮度和纹理特征来建立目标图像和参考图像子区域匹配关系,最后在更适合进行彩色化的 YCbCr 颜色空间中利用亮度和纹理特征对相匹配的子区域进行颜色传递。

2.2.1 基于亮度特征的区域匹配

为了目标图像和参考图像子区域之间能够达到最佳匹配,首先对参考图像进行亮度重映射,具体公式如下:

$$\bar{Y}_s = \frac{\sigma_T}{\sigma_S} (Y_s - \mu_S) + \mu_T, \quad (1)$$

其中: $\bar{Y}_s$ 为重映射后的像素亮度值, Y_s 为参考图像像素点亮度值, μ_T 和 μ_S 分别为目标图像和参考图像的亮度均值, σ_T 和 σ_S 分别为标准差。

我们利用亮度特征对目标图像子区域和参考图像子区域进行匹配预处理。假设目标图像为 T , 大小为 $I \times J$, 参考图像为 S , 大小为 $M \times N$ 。首先,用 Y^* 表示每个子区域中所有像素点的亮度值之和:

$$Y^* = \sum_{Y \in Q} Y(i, j), \quad (2)$$

再计算目标图像和参考图像分割后子区域的亮度均值及标准差:

$$M = \frac{1}{N_Q} \sum_{Y \in Q} Y(i, j), \quad (3)$$

式中, M 为亮度均值, N_Q 为图像块子区域 Q 中像素点总数, $Y(i, j)$ 为子区域 Q 中像素点的亮度值。

$$\mu = \frac{1}{N_Q} \sum_{Y \in Q} (Y(i, j) - M)^2, \quad (4)$$

其中, μ 是亮度标准差。设定目标图像分割子区域数为 Q , 参考图像分割子区域数为 P 。对于目标图像中的每一个子区域,以扫描线的顺序遍历计算出目标图像和参考图像子区域统计信息的匹配误差,表示如下:

$$R(S, T) = \frac{1}{2} | \bar{Y}_{S_p} - Y_{T_q}^* | + \frac{1}{2} | M_{S_p} - M_{T_q} | + \frac{1}{2} | \mu_{S_p} - \mu_{T_q} |, \quad (5)$$

其中, $q=1, 2, \dots, Q$, $p=1, 2, \dots, P$ 。

设置阈值 E , 若 $R(S, T) \leq E$, 说明目标图像子区域和参考图像子区域之间亮度特征相似, 则我们将对应的目标图像和参考图像子区域分别保留到集合 $T_i = \{S_1, S_2, \dots, S_j\}$, $i=1, 2, \dots, q$, $j=1, 2, \dots, p$ 中。其中, 阈值 E 表示如下:

$$E = \frac{1}{2MN} \sum_{k=1}^Q R(S, T). \quad (6)$$

将目标图像所有子区域遍历完成后,得到了目标图像每个子区域对应的小于阈值 E 的参考图像子区域的集合。在这一步骤中,我们预先处理了亮度特征,得到了与目标图像每个子区域亮度特征相似的参考图像子区域的集合。之后,我们在已经得到的亮度特征相似的两幅图像子区域中,利用纹理特征完成整个匹配过程。

2.2.2 基于 LBP 局部纹理特征的区域匹配

在目标图像和参考图像亮度特征相似的子区域进行局部纹理匹配阶段,本文提出了利用 LBP^[10]局部纹理特征进行区域匹配。

LBP 算子是一种对图像中局部邻域的纹理描述算子。以 g_c 为图像局部邻域的中心点的灰度值,图像局部邻域的纹理 T_c 表示如下:

$$T_c = (g_c, g_0, \dots, g_{P-1}) \quad c \in \Omega, \quad (7)$$

其中: Ω 表示整个图像的像素域。 g_p ($p = 0, \dots, P-1$) 表示邻域上均匀分布的像素点 P 的灰度值。 g_p 的坐标表示为:

$$g_p(x_c, y_c) = \left(x_c + R \cos\left(\frac{2\pi p}{P}\right), y_c - R \sin\left(\frac{2\pi p}{P}\right) \right). \quad (8)$$

为了实现纹理特征对图像灰阶单调变换的鲁棒性与对灰度的不变性,得到新的纹理特征量化公式如下:

$$T_c = t(s(g_0 - g_c), \dots, s(g_{P-1} - g_c)), \quad (9)$$

$$s(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}. \quad (10)$$

在式(8)的基础上,为了能够下文更加简单地描述,我们采用的表达式如下:

$$L_{P,R}(\alpha, c) = T_c \quad c \in \Omega, \quad (11)$$

且在本章节中固定 P, R 取值: $P = 8, R = 1$, 我们可以将上式进一步简化为 $L(\alpha, c)$ 。

分别计算目标图像和参考图像每个子区域的 LBP 值,再计算目标图像各个子区域和由 2.2.1 节中得到的与目标图像每个子区域亮度特征相似的参考图像子区域的转移距离 $D(t, s)$, 其中转移距离定义如下:

$$\forall t \in \Omega_t, s \in \Omega_s$$

$$D(t, s) = d_{\text{hamming}}(L(\alpha, t), L(\alpha, s)), \quad (12)$$

式中: Ω_t 表示目标图像中所有子区域的集合, Ω_s 表示与每个目标图像子区域亮度特征相似的参考图像子区域的集合。转移距离 $D(t, s)$ 表示目标图像子区域的 LBP 值 $L(\alpha, t)$ 和具有相似亮度特征的参考图像子区域的 LBP 值 $L(\alpha, s)$ 的汉明距离。 $D(t, s)$ 越小,表明两个图像块的纹理越相似,利用相似度判别方法对目标图像子区域一一找到具有相似纹理的参考图像子区域。因此,我们获得了与目标图像子区域的亮度和纹理都相似的参考图像子区域。

2.3 颜色传递

针对传统的全局颜色传递算法中存在的缺

点,本文在更适合进行彩色化的 YCbCr 颜色空间中提出了改进的颜色传递算法,即在相匹配的子区域中利用亮度和纹理特征进行颜色传递。算法具体步骤如下:

(1) 计算目标图像子区域和匹配的参考图像子区域中每个像素点的亮度均值 M_Y^{Ti} 、 M_Y^{Si} 和纹理均值 M_{LBP}^{Ti} 、 M_{LBP}^{Si} , 邻域一般选取 3×3 。这里我们也采用 LBP 算子来描述纹理。

$$L_{P,R} = 2^p \times \sum_{p=0}^{P-1} s(g_p - g_c), \quad (13)$$

式中, g_c 为中心像素点, $L_{P,R}$ 为中心像素点的 LBP 值;

(2) 利用最小欧式距离法来寻找图像子区域中每个像素点 i 在相匹配的参考图像子区域中最相似的像素点 j , 计算公式如下:

$$d = \sqrt{(M_{\text{LBP}}^{Ti} - M_{\text{LBP}}^{Si})^2 + (M_Y^{Ti} - M_Y^{Si})^2}, \quad (14)$$

d 越小,证明这两个像素点越相似,根据相似准则,为目标图像子区域中像素点匹配参考图像子区域中最佳像素点;

(3) 将与之匹配的参考图像像素点 j 的颜色信息 Cr 和 Cb 的值传递到目标图像子区域的像素点 j 上,同时,保留像素点 i 的亮度值不变。

(4) 以扫描线的顺序遍历目标灰度图像的每个区域,对每一个区域重复执行上述步骤。

(5) 最后将结果转换到 RGB 颜色空间,显示结果图。

本文中提出的灰度图像彩色化方法是在相匹配的区域之间进行颜色传递,能够有效地减少颜色误传的现象;另一方面由于是在相匹配的区域中搜索匹配像素点,从而加快了搜索的速度并且匹配精准度有明显提高。

3 实验结果与分析

为了证明我们算法的优势,本文选取了不同风格的彩色参考图像和灰度目标图像,按照图 2 所示的算法处理过程进行实验,再与全局颜色传递中几种有代表性的文献的算法做比较。实验的中间过程和最终结果的对比如图 2~图 5 所示。

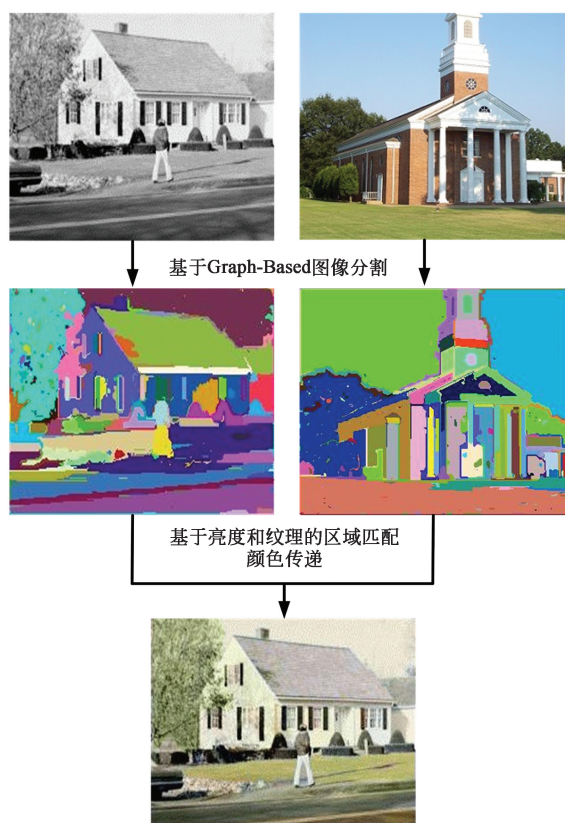


图 2 算法处理过程

Fig.2 Algorithm processing

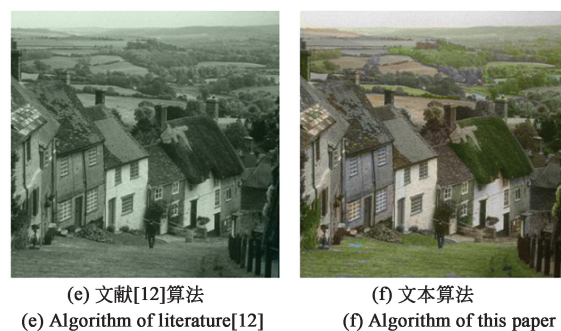


图 3 不同算法的彩色化结果对比图

Fig. 3 Comparison of colorization results for different algorithms

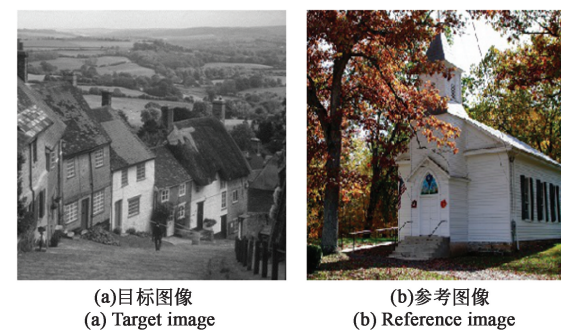


图 4 不同算法的彩色化结果对比图

Fig. 4 Comparison of colorization results for different algorithms

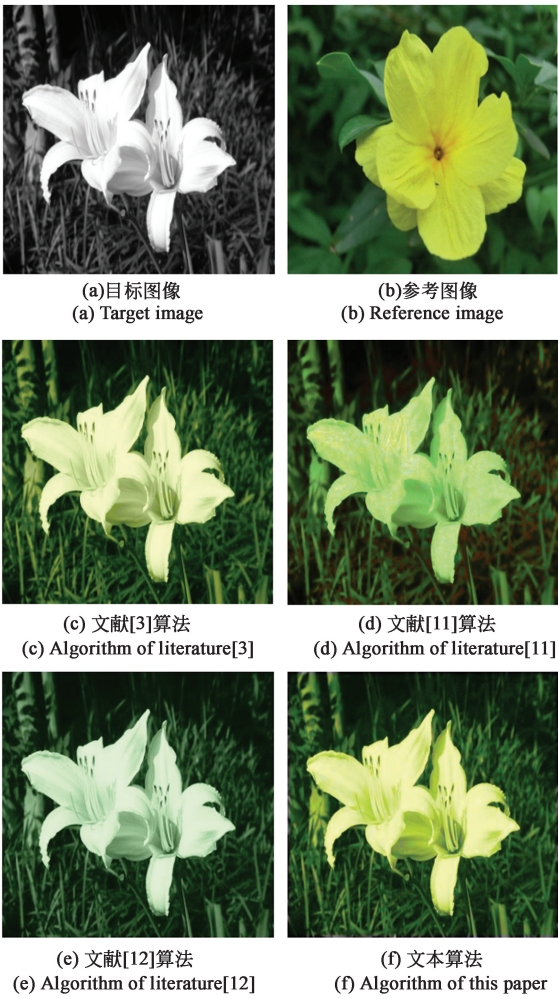


图 5 不同算法的彩色化结果对比图
Fig. 5 Comparison of colorization results for different algorithms

本文分别与文献[3]、[11]、[12]提出的算法进行比较,如图 3~图 5 所示。图 3(a)是目标图像,图 3(b)是参考图像,图 3(c)、(d)、(e)分别是文献[3]、[11]、[12]的处理结果,图 3(f)为本文的算法结果。从图 3 可以看出,文献[3]、[11]、[12]的方法中房屋和草地的颜色并没有明显的区分,出现了严重的颜色误传现象,而本文的算法有效克服了颜色误传递的现象,图像的房屋和草地颜色区分明显,着色效果更自然,色彩的合理性更好。

在图 3、图 4 中,我们选用了目标图像相同,但参考图像不同来进行彩色化实验。从实验结果可以看出,图 3 中参考图像的风格是春意盎然的季节,显然人眼主观看到目标图像的着色后的风格也是在春天。而图 4 中参考图像是在秋风落叶的季节,目标图像着色后的风格则是秋天的感受。因此可以看出本文的彩色化算法利用特征相近但风格不同的参考图像,可以生成不同效果的彩色化结果图,不需要配准就可以实现灰度图像彩色化。图 5 中文献[3]、[11]、[12]也是出现了严重的颜色误传现象,本文算法则避免了这种缺点,颜色传递的效果明显高于前几种算法。除了主观视觉上色彩分布更加合理外,我们也采用了客观评价指标(表 1),从信息熵、平均梯度以及 PSNR 对以上 4 种算法进行了详细的对比分析。

表 1 算法评价指标

Tab.1 Algorithm evaluation index

图像	评价指标	文献[3]算法	文献[11]算法	文献[12]算法	本文算法
图 3	信息熵	11.608 9	11.089 3	8.812 2	13.845 8
	平均梯度	7.287 0	3.675 8	8.236 7	8.102 2
	PSNR/dB	28.102 2	25.221 1	28.481 9	29.832 2
图 4	信息熵	12.655 0	13.334 1	8.523 0	14.536 4
	平均梯度	7.310 1	4.108 2	8.302 8	8.588 4
	PSNR/dB	21.533 3	24.355 1	28.442 6	29.663 0
图 5	信息熵	12.665 1	14.165 2	10.479 2	15.258 9
	平均梯度	5.679 3	4.375 5	6.586 2	6.324 3
	PSNR/dB	18.683 6	15.771 6	20.591 3	22.021 3

信息熵和平均梯度表现出图像的纹理、细节信息等,PSNR表示为RGB颜色空间中的平均值。从表1中可以看出在客观指标上,本文算法更优于文献[3]、[11]、[12]中的算法。以此,更有力地证明了本文算法的优势。

4 结 论

本文针对全局颜色传递算法在处理图像时常出现参考图像匹配不准确和颜色误传递等问题,提出了基于Graph-Based图像分割与区域匹配的灰度图像彩色化算法,来实现无须配准的全自动的灰度图像彩色化技术。同时,本文提出了一种思想,认为“具有相似亮度和纹理的子区域具有相

似的颜色分布”,基于这种思想来建立目标图像和参考图像子区域匹配的准则。最后,在更适合进行彩色化的YCbCr颜色空间中对相匹配的子区域利用亮度和纹理特征进行颜色传递,完成灰度图像彩色化。实验结果表明,本文彩色化方法的图像色彩真实,纹理清晰,获得了更好的主观视觉效果。本文提出的算法是对灰度图像彩色化传统方法之外的一种探索和补充。对将来的研究工作,我们有如下计划:(1)在保证目标图像彩色化结果准确性的前提下,提高算法的处理速度;(2)对图像的分割算法和颜色传递方法做进一步的研究与改进;(3)建立色彩转移算法的全面的客观评价标准,通过全面的客观评价系统来完善现阶段的彩色化技术。

参 考 文 献:

- [1] RUDERMAN D L, CRONIN T W, CHIAO C C. Statistics of cone responses to natural images: implications for visual coding [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, 15(8): 2036-2045.
- [2] REINHARD E, ADHIKHMN M, GOOCH B, et al. Color transfer between images [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, 21(5): 34-41.
- [3] WELSH T, ASHIKHMN M, MUELLER K. Transferring color to greyscale images [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(3): 277-280.
- [4] 胡国飞,付健,彭群生.自适应颜色迁移[J].*计算机学报*,2004,27(9):1245-1249.
HU G F, FU J, PENG Q S. Adaptive color transfer [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2004, 27(9): 1245-1249. (in Chinese)
- [5] LEVIN A, LISCHINSKI D, WEISS Y. Colorization using optimization [C]//*Proceedings of ACM SIGGRAPH 2004 Papers*. Los Angeles, California, USA: ACM, 2004: 689-694.
- [6] YATZIV L, SAPIRO G. Fast image and video colorization using chrominance blending [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(5): 1120-1129.
- [7] 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.
- [8] FELZENSZVALB P F, HUTTENLOCHER D P. Efficient graph-based image segmentation [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 59(2): 167-181.
- [9] 孟庆涛,龚声蓉,刘纯平,等.一种基于图的颜色纹理区域分割方法[J].*中国图象图形学报*,2009,14(10):2092-2096.
MENG Q T, GONG S R, LIU C P, et al. A graph-based color texture region segmentation method [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(10): 2092-2096. (in Chinese)
- [10] 姚晨.彩色化和色彩转移图像处理关键技术研究[D].上海:上海交通大学,2012.
YAO C. Study of vital technologies of image colorization and color transfer [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese)
- [11] 和晓军,乔寅.基于Welsh算法的灰度图像彩色化的研究[J].*计算机应用与软件*,2014,31(12):268-271.
HE X J, QIAO Y. Research on Welsh algorithm-based grayscale image colourisation [J]. *Computer Applications and Software*, 2014, 31(12): 268-271. (in Chinese)
- [12] HE L, QI H, ZARETZKI R. Image color transfer to evoke different emotions based on color combinations [J]. *Computer Science*, 2014: 1-9.

作者简介:



黄冠婷(1994—),女,吉林省吉林市人,硕士研究生,2016 年于济南大学获得学士学位,主要从事图像处理方面的研究。E-mail:2523865781@qq.com



韩学辉(1967—),男,吉林榆树人,硕士,副教授,2004 年于长春理工大学获得硕士学位,研究方向为模式识别与智能系统。E-mail:hxhrp@126.com