

基于邻域优先搜索的快速图像色彩转移算法

朱明, 赵兴运, 杨晶琨

引用本文:

朱明, 赵兴运, 杨晶琨. 基于邻域优先搜索的快速图像色彩转移算法[J]. 液晶与显示, 2020, 35(8): 877–884.

ZHU Ming, ZHAO Xing-yun, YANG Jing-kun. Fast color transfer algorithm based on neighborhood-first searching[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(8): 877–884.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203508.0877>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于图像分割和区域匹配的灰度图像彩色化算法

Gray image colorization algorithm based on image segmentation and region matching

液晶与显示. 2019, 34(6): 619–626 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193406.0619>

基于邻域灰度信息误差扩散算法的电润湿电子纸研究

Error diffusion algorithm based on neighborhood gray information in electrowetting electronic paper research

液晶与显示. 2019, 34(3): 317–323 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193403.0317>

基于Bayer格式图像的实时色彩还原算法

Real-time color reduction algorithm based on Bayer format

液晶与显示. 2019, 34(3): 310–316 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193403.0310>

基于HLS的色彩插值算法硬件设计与实现

Hardware acceleration design and implementation of color interpolation algorithm based on HLS

液晶与显示. 2020, 35(6): 595–603 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203506.0595>

本征图像分解的稀疏表示彩色图像去噪算法

Color image denoising algorithm based on intrinsic image decomposition and sparse representation

液晶与显示. 2019, 34(11): 1104–1114 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193411.1104>

文章编号:1007-2780(2020)08-0877-08

基于邻域优先搜索的快速图像色彩转移算法

朱 明*, 赵兴运, 杨晶琨

(河南工程学院 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450007)

摘要:提出了一种基于邻域优先搜索和纹理相似度匹配的色彩转移算法。首先设计了邻域搜索方案在彩色图像中寻找目标灰度像素的候选匹配像素,然后基于纹理相似度计算候选像素与目标像素之间的匹配误差,并据此确定最终匹配像素。对于不满足邻域匹配条件的目标像素,通过对彩色参考图像进行边缘保持平滑滤波并设置采样间隔的手段,提高其全图搜索和匹配速度。针对全局匹配后图像中出现的失真区域,在彩色图像中设置对应的样窗与其进行单独匹配,以进一步提升色彩转移效果。主观评价结果显示:在 4 个测试案例中,本文算法与经典 Welsh 算法具有相似的色彩转移效果,但在计算效率上,本文算法比 Welsh 算法具有较大优势。借助一个色彩构成较为复杂的灰度图像彩色化案例,验证了样窗匹配在色彩转移和色域再现方面的改进效果。

关键词:色彩转移;邻域优先匹配;纹理相似度;引导滤波

中图分类号:TP391; TP37 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203508.0877

Fast color transfer algorithm based on neighborhood-first searching

ZHU Ming*, ZHAO Xing-yun, YANG Jing-kun

(School of Materials and Chemical Engineering, Henan University of Engineering,
Zhengzhou 450007, China)

Abstract: A new, general, fast and user-friendly method to solve the problem of colorizing grayscale images is proposed. The neighborhood-first searching scheme is designed firstly to find the candidate matching pixels of a target grayscale pixel. Then, the final matching pixels are determined by calculating matching error between the candidates and the target pixels based on the texture similarity. For the pixels that don't meet the neighborhood matching criterion, the whole image searching and matching can be sped up by using edge-preservation smooth filter to smooth the color reference image and setting sampling interval. To address the problem of image distortion occurred after global matching, our method conducts one or more swatch matching procedures to transfer the desired color moods from groups of swatch regions in the color reference image to the distortion regions of the colorized image. The subjective evaluation results show that in four test cases, the proposed algorithm has simi-

收稿日期:2020-02-16; **修订日期:**2020-04-24.

基金项目:2017 年度河南省高等学校青年骨干教师培养计划(No. 2017GGJS154);2020 年度河南工程学院科研培育基金项目(No.2020010);2019 年河南省高等学校大学生创新训练计划项目(No.S201911517005)

Supported by 2017 Training Plan for Young Backbone Teachers of Colleges and Universities in Henan Province (No. 2017GGJS154); 2020 Scientific Research Cultivating Foundation of Henan University of Engineering(No.2020010);2019 Innovation Training Program for College Students in Henan Province (No. S20191517005)

* 通信联系人, E-mail:zhuming_printing@haue.edu.cn

lar performance to the classical Welsh algorithm on the color transfer quality, but in the aspect of computing efficiency, the proposed algorithm has a great advantage over Welsh algorithm. By means of a test case of colorizing a grayscale image with complex color composition, the improvement of the swatch matching in color transfer and gamut reproduction is verified.

Key words: color transfer; neighbourhood-first matching; texture similarity; guided filtering

1 引言

色彩转移是指将一幅彩色图像中的色彩信息按照某种模型算法转移到另一幅灰度图像中,因此又称为灰度图像彩色化。使用这种技术可以增强诸如黑白照片、科研图像、电影电视等灰度图像和视频的视觉表现效果。尤其对于科研用途的灰度图像而言,通过色彩转移技术可以增强图像中蕴含的信息内容,提高图像的使用价值^[1]。随着数字成像技术的发展,色彩转移技术在电影电视、图像修复、医学成像、空间成像等领域有着重要应用。

在当前色彩转移算法中,最为经典的就是 Welsh 等人提出的算法^[1-2],他们通过使用像素的亮度值及其所在邻域的亮度标准差的加权均值来进行彩色像素和灰度像素之间的匹配,并在初次匹配后针对色彩转移不理想的区域再进行一次或若干次样窗匹配以进一步改善效果。Welsh 等人提出的算法为之后研究提供了很大的参考意义。其后出现的色彩转移算法大致分为 3 类:第一类为纹理特征匹配^[3-7],这类方法主要从提高匹配准确性入手,通过设计像素的纹理特征描述模型,并将其作为像素匹配的重要指标,其缺点是计算量较大。第二类为邻域搜索匹配^[8-10],这类方法首先从待匹配灰度像素的邻域像素集合中确定若干个候选匹配像素,然后再进行匹配误差的计算和判断,目的是缩小色彩转移过程中的像素搜索范围,提高计算效率。第三类是近几年出现的基于深度学习的图像色彩转移算法,该类算法又可分为自动化和基于参考图像的彩色化方法,前者需要利用图像间语义上的紧密对应,使用神经表征实现精确的颜色传递^[11-17]。后者需要在大量图像彩色化案例中进行深度学习,在色彩匹配中训练目标函数,并通过最小化目标函数来彩色化灰度图像^[18-19]。

本文研究分析了现有各类算法,提出了一种

基于邻域优先搜索的快速色彩转移算法。该算法包含以下 3 个特征:(1)邻域优先搜索:在进行像素匹配时,首先在当前像素的邻域范围内搜索匹配像素,当邻域范围内没有匹配对象时再进行全图搜索,以缩小搜索范围,提升算法效率。(2)基础层着色:利用边缘保持平滑滤波将目标灰度图像和彩色参考图像都分解为描述边缘轮廓的基础层和描述纹理细节的细节层。由于基础层图像更平滑,颜色分布更均匀,因此在基础层图像之间进行色彩转移不仅可以有效降低全局采样密度,提高匹配速度,还可使着色效果更平滑。(3)允许样窗匹配:初次匹配后,针对色彩转移不理想的区域再进行单独匹配。

2 算法流程

本文提出的图像色彩转移算法的整体框架如图 1 所示。首先将目标灰度图像和彩色参考图像从 RGB 颜色空间转换至明度与色度通道各自独立的 CIELAB 颜色空间,便于以明度通道作为桥梁进行色彩转移,这个转换过程可以借助 RGB 显示设备的 ICC 特性文件完成^[17]。

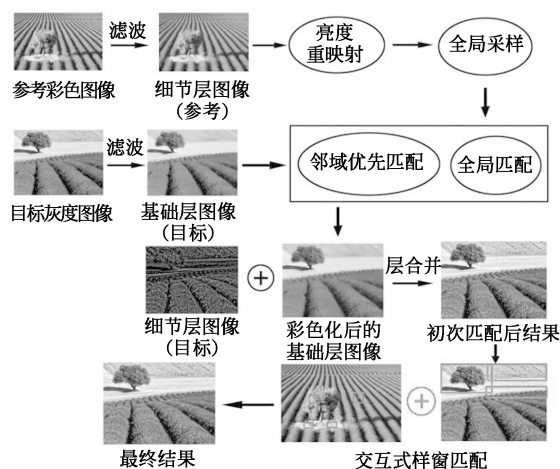


图 1 算法流程图

Fig.1 Flowchart of the proposed algorithm

2.1 图像分层

图像分层即利用边缘保持滤波技术将彩色参考图像和目标灰度图像分解为基础层图像(描述图像边缘轮廓信息)和细节层图像(描述图像的纹理细节信息)。边缘保持滤波器可以选择双边滤波器或图像引导滤波器,由于后者比前者能够更好地抑制光晕效应的产生^[20-22],因此本文选择引导滤波器进行图像分层,如式(1)所示。

$$\begin{aligned} I_{\text{ref_base}} &= \text{GuidedFiltering}(I_{\text{ref}}, r, \epsilon), \\ I_{\text{target_base}} &= \text{GuidedFiltering}(I_{\text{target}}, r, \epsilon), \\ I_{\text{target_detail}} &= I_{\text{target}} - I_{\text{target_base}}, \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, I_{ref} 和 I_{target} 分别代表彩色参考图像和目标灰度图像,“ r ”和“ ϵ ”是引导滤波的两个参数,分别代表滤波窗口的半径和平滑控制参数。 $I_{\text{ref_base}}$ 和 $I_{\text{target_base}}$ 代表引导滤波后的基础层图像。由源图像减去基础层图像得到目标图像的细节层 $I_{\text{target_detail}}$ 。

2.2 明度重映射

本文算法需要将灰度图像和彩色图像的基础层像素之间的明度值(L 通道)作为匹配依据。考虑到两者之间的整体明度差异,为了方便像素间匹配误差的计算,在此之前需要对彩色基础层图像 $I_{\text{ref_base}}$ 进行明度映射,使它的明度直方图与灰度基础层图像 $I_{\text{target_base}}$ 相匹配,映射方法如式(2)所示。其中, $I_{\text{ref_base_mapped}}$ 为映射后的彩色像素明度值, $L_{\text{ref_base_max}}$, $L_{\text{ref_base_min}}$, $L_{\text{target_base_max}}$, $L_{\text{target_base_min}}$ 分别为彩色基础层图像和灰度基础层图像的明度最大值和最小值。

$$\begin{aligned} L_{\text{ref_base_mapped}} &= (L_{\text{ref_base}} - L_{\text{ref_base_min}}) / \\ & \quad (L_{\text{ref_base_max}} - L_{\text{ref_base_min}}) * \\ & \quad (L_{\text{target_base_max}} - L_{\text{target_base_min}}) + L_{\text{target_base_min}}, \\ d_c &= L_{\text{ref_base_max}} - L_{\text{ref_base_min}}, \\ d_g &= L_{\text{target_base_max}} - L_{\text{target_base_min}}. \end{aligned} \quad (2)$$

2.3 全局采样

全局采样的目的有两个:一是特殊位置的像素匹配,即在逐点扫描目标灰度图像时,如果待匹配像素位于灰度图像的第一行,第一列或最后一列,那么以其为中心寻找相邻像素时,可能会发生像素越界的问题,这时就需要在全图范围内进行搜索并寻找与该灰度像素相匹配的彩色像素;二是当邻域像素匹配的误差较大时,转而进行全局搜索与匹配。此时,如果对彩色基础层图像中的所有像素逐一搜索,可能需要花费较长的计算时间,因此为了提高匹配效率,尽可能设置一定的采

样间隔。

需要注意:全局采样的采样间隔与基础层图像的平滑度密切相关。图 2 显示了彩色参考图像(图 2(a))经过不同参数的引导滤波处理后得到的基础层图像,通过增大引导滤波的窗口半径“ r ”和平滑控制参数“ ϵ ”都可以在一定程度上增强基础层图像的平滑度,图 2(b)和(c)分别显示了使用滤波参数($r=18, \epsilon=18^2$)和($r=36, \epsilon=36^2$)得到的基础层图像。基础层的平滑度越高,颜色分布越均匀,采样间隔就可以适当增大。图 2(b)和(c)中的白点为采样点,采样间隔分别设置为 150 和 200 个像素。但采样间隔设置过大也会影响匹配精度,由于特殊位置的像素和邻域匹配未成功的像素具有相当一部分数量,因此合理设置采样间隔能够在保证着色效果的前提下,提高算法效率。

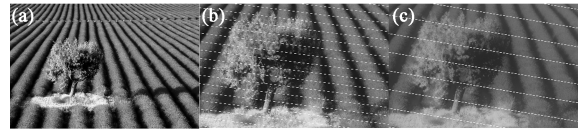


图 2 彩色基础层图像的全局采样。(a)彩色参考图像;(b)基础层图像($r=18, \epsilon=18^2$)(全局采样间隔为 100 像素);(c)基础层图像($r=36, \epsilon=36^2$)(全局采样间隔为 200 像素)。

Fig.2 Global sampling of the color base-layer image. (a) Color reference image; (b) Base layer image($r=18, \epsilon=18^2$)(Global sampling interval of 100 pixels); (c) Base layer image($r=36, \epsilon=36^2$)(Global sampling interval of 200 pixels).

2.4 像素匹配和层合并

逐行逐点扫描目标灰度图像。对于当前灰度像素来说,其像素匹配过程如图 3 所示。如果待匹配像素位于灰度图像的第一行,第一列或最后一列,进行全局采样匹配;否则进行邻域优先搜索,并判断待匹配像素是否满足邻域匹配条件,如果满足条件则完成邻域匹配。否则,表明邻域像素匹配误差较大,转而进行全局采样匹配。

完成基础层图像的彩色化后,需要将其与细节层进行合并。色彩传递后图像可能会出现不同程度的细节丢失问题,因此也可以在层合并之前对细节层进行增强,以获得较好的图像显示效果。层合并的过程如式(3)所示,其中, $I_{\text{colorized}}$ 为最终

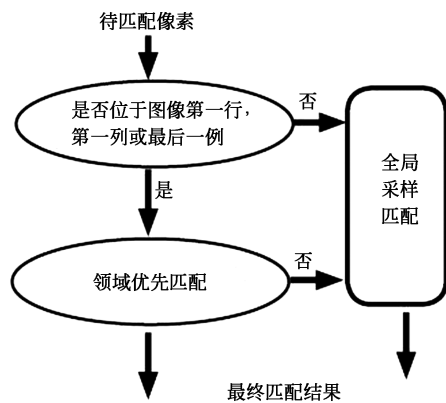


图 3 像素匹配过程

Fig.3 Pixel matching process

的结果图像, $I_{\text{targetbase_colorized}}$ 为彩色化后的基础层图像, k 为细节增强因子。

$$I_{\text{colorized}} = I_{\text{targetbase_colorized}} + I_{\text{target_detail}} \cdot k \quad (3)$$

2.5 交互式样窗匹配

进行像素匹配时,有时待匹配像素与某个彩色邻域像素之间虽然满足邻域匹配条件,但两者的实际色彩特征却有很大不同。如果仍按此进行颜色传递,就会发生因色彩误传而导致的图像失真。因此在邻域匹配后,还需要将彩色化后图像中的失真区域与彩色图像中颜色特征相近的区域作为样窗,在样窗之间进行单独匹配。根据实际情况可以进行一次或多次样窗匹配,直到获得满意的色彩转移效果。图 4 描述了一个样窗匹配案例。在图 4(a)中,“树木”和“草地”区域都被错误地传递了紫色。此时可以在失真区域设置采样窗口 G1、G2 和 G3,这 3 个样窗相互之间可能存在一定重叠,以保证样窗边界处色彩的平滑过渡。样窗 G1 和 G2 涉及绿色为主的“树木”和“草地”,它们首先与彩色参考图像中相应内容的 C1、C2 和 C3



图 4 样窗匹配过程。(a) 彩色化后目标图像中的样窗;(b) 彩色参考图像中的样窗;(c) 最终匹配结果。

Fig.4 Swatch matching process. (a) Swatch in the target image after colorization; (b) Swatch in the color reference image; (c) Final match results.

样窗进行匹配。由于样窗 G3 内既有绿色“草地”也有紫色“薰衣草”,因此在 C1、C2 和 C3 的基础上加上 C4 窗口(该样窗内容为“薰衣草”),再与 G3 窗口进行匹配,如图 4(b)所示。图 4(c)显示了样窗匹配后的最终结果图像。样窗中的像素数量一般远小于图像总像素数,因此样窗匹配的搜索时间一般较短。

3 像素匹配

邻域优先搜索的原理如图 5 所示。例如,当沿着目标灰度图像的扫描行搜索到待匹配像素 P 时,首先找出之前已经匹配过的 P 的 4 个相邻像素 A、B、C 和 D,找出它们在彩色参考图像中的匹配像素 A'、B'、C' 和 D'; 然后根据灰度图像中中心像素和相邻像素间的关系,在彩色参考图像中,找出 A'、B'、C' 和 D' 对应的中心像素 A''、B''、C'' 和 D'' 作为候选匹配像素;最后设定一个匹配条件,并将上述 4 个候选像素分别与 P 比较,从中挑选最能满足匹配条件的像素,将该像素的色度值(a , b 通道值)转递给待匹配像素。只有当 4 个候选像素都不满足匹配条件时,才进行全局采样匹配,这样就可以大幅节省像素搜索时间。

邻域匹配条件用待匹配像素与候选像素之间的匹配误差描述,如式(4)所示,其中 C 代表候选

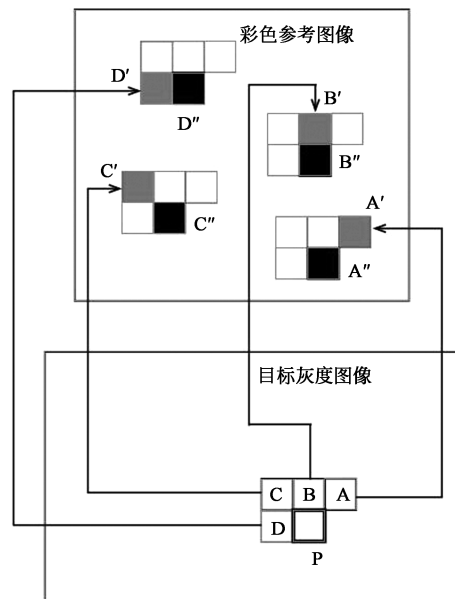


图 5 邻域优先搜索的原理

Fig.5 Principle of the neighborhood-first searching

像素集合, $Error(C)$ 为所有候选像素与待匹配像素之间的匹配误差集合, 最佳匹配像素 m 表示为候选像素集合中具有最小匹配误差, 且误差值小于设定阈值 (Threshold) 的匹配像素。考虑到像素本身及其邻域特征之间的联系, 候选像素与待匹配像素之间的匹配误差 $Error(C)$ 用式 (5) 计算, L_g 和 D_g 分别表示待匹配灰度像素的明度值和邻域明度方差值, L_c 和 D_c 分别表示候选像素的明度值和邻域方差值。本文通过大量测试发现: 权重值的分配对色彩转移结果的影响不大, 本文将明度与方差的权重值确定为 0.5, 邻域尺寸设置

为 5×5 像素大小。

$$m = \{\underset{x \in C}{\operatorname{argmin}}(Error(C))\} < \text{Threshold}, \quad (4)$$

$$Error(C) = |L_g - L_c| \times 0.5 + |D_g - D_c| \times 0.5. \quad (5)$$

误差阈值 (Threshold) 的设定对色彩转移效果影响较大。当某个候选匹配像素的匹配误差在所有候选像素中最小, 且小于误差阈值时, 视为满足邻域匹配条件, 可将该候选像素的颜色传递给待匹配像素。否则无法进行邻域匹配, 转而进行全局搜索和匹配。

表 1 不同误差阈值对匹配速度的影响

Tab.1 Influences of different error threshold values on the matching speed

	误差阈值				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
参加邻域匹配的像素数/%	19	27	52	59	83
参加全局匹配的像素数/%	81	73	48	41	17
不设置全局采样间隔的匹配时间/s	359	302	187	142	48
采样间隔设置为 150 像素的匹配时间/s	65	54	25	18	6

表 1 和图 6 借助一个图像彩色化案例分别解释了不同误差阈值对匹配速度和匹配效果的影响。图 6(a) 和 (b) 分别为目标灰度图像和彩色参考图像。在表 1 中, 随着误差阈值从 0.5 增大到 2.5, 越来越多的像素会满足邻域匹配条件并参与邻域匹配过程, 而参与全局匹配的像素则变得越

来越少, 因此匹配时间也随着误差阈值的增大越来越短。另外, 从表 1 后两行数据可以看出, 在设定全局采样间隔的情况下, 全局匹配时需要搜索的像素数量大幅减少, 因此匹配时间大幅缩短。在实际应用中, 误差阈值也不能设置过大, 否则将允许更多的像素参与邻域匹配过程, 即使匹配误差大到足以产生图像失真。正如图 6(c) 和 (d) 所示的图像区域, 在该案例中, 最佳误差阈值设置为 1.5 时该区域的色彩转移效果较好, 但当阈值增大到 2.5 时就会产生明显的图像失真。本文基于大量测试结果, 综合考虑了图像质量与计算效率之间的平衡, 将误差阈值设定为 1~2 个 CIELAB 明度值之间对于大多数类型的图像来说是比较合适的。



图 6 不同匹配误差阈值对色彩传递结果的影响。
(a) 目标灰度图像; (b) 彩色参考图像; (c) 阈值为 1.5 的色彩转移结果; (d) 阈值为 2.5 的色彩转移结果。

Fig.6 Influences of different error threshold values on the color transfer results. (a) Target gray image; (b) Color reference image; (c) Color transfer results with threshold of 1.5; (d) Color transfer results with threshold of 2.5.

4 算法评价

4.1 图像质量评价

图 7 分 4 行显示了 4 个灰度图像彩色化案例, 用于测试在不使用样窗匹配情况下本文算法和经典 Welsh 算法的色彩转移效果。每一行从左到右依次显示了这 4 个案例的彩色参考图像,

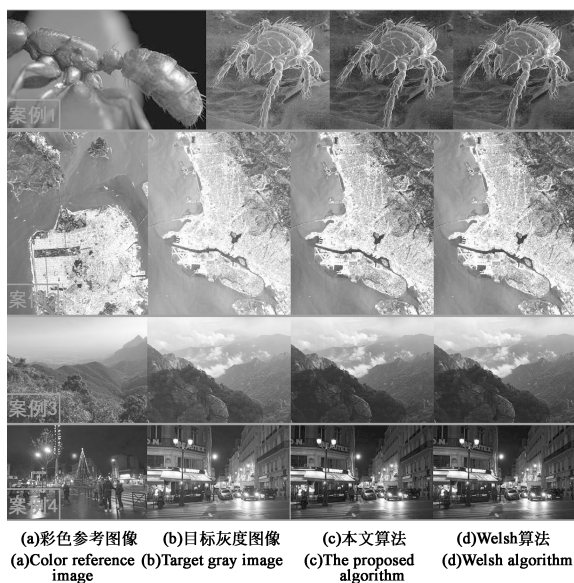


图 7 本文算法和 Welsh 算法的 4 个测试案例
Fig.7 Four test cases for the proposed algorithm and Welsh algorithm

目标灰度图像,本文算法结果图像和 Welsh 算法结果图像。从图中可以看出,本文算法和经典 Welsh 算法的色彩转移效果基本相当。目标图像与参考图像的内容越相似,色彩转移效果就越好。如果目标图像的色彩构成较为复杂,则需要借助样窗匹配来获得满意的效果。

图 8 所示的案例 5 测试了使用样窗匹配对色彩构成较为复杂的图像进行色彩转移的效果。图 8(a)和(b)分别代表彩色参考图像和目标灰度图像;图 8(c)代表本文算法进行全局匹配后的结果,可以明显看出图像中的“交通指示牌”、“草地”以及“沥青马路”等区域均没有正确上色;图 8(d)、(e)、(f)显示了 3 次样窗匹配后的效果。图 8(c)、(d)、(e)中的虚线框代表需要进行单独匹配的样窗区域,他们分别与图 8(a)中的 3 个样窗区域依次进行匹配。每次匹配的样窗之间可以存在一定重叠,以保证样窗边界处颜色的平滑过渡。第一次样窗匹配后图像中的“草地”和“广告牌”虽然被正确着色,但也造成了部分“天空”区域的失真,这是因为该区域的部分像素与图 8(a)样窗 1 中的绿色像素具有更接近的匹配误差,因此在第二次样窗匹配中,将该失真区域与样窗 2 进行匹配。第三次样窗匹配将图 8(e)中的“沥青马路”区域与样窗 3 进行匹配,匹配后图像的“马路路面”略微偏蓝,这是因为样窗 3 中一些色度值(CIELAB 中的 a 和 b 值)偏

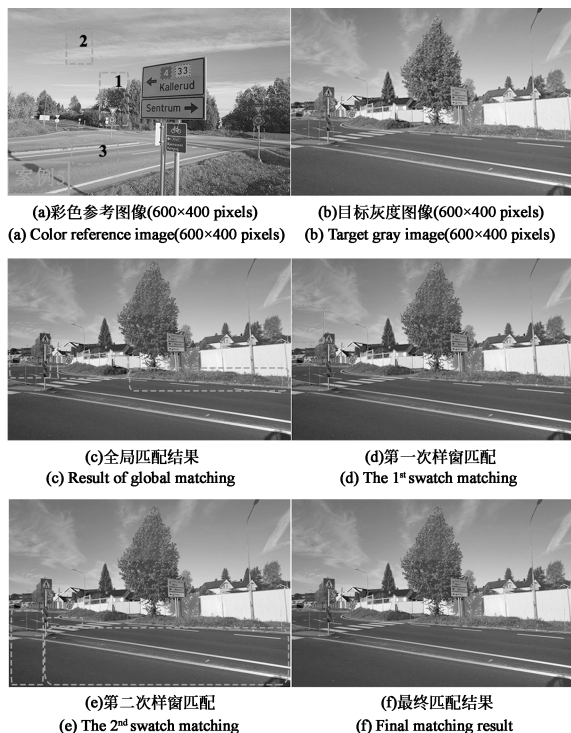
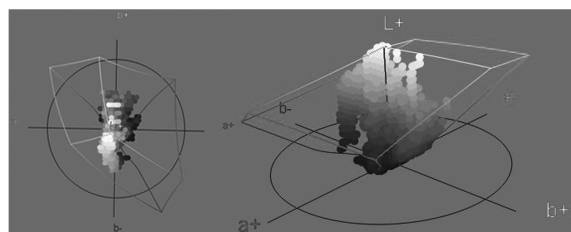
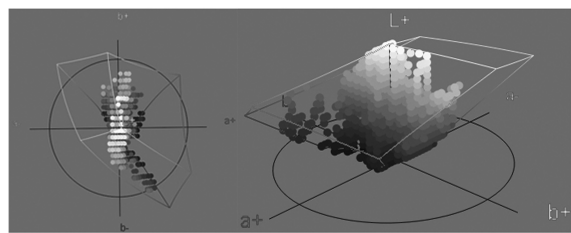


图 8 样窗匹配的测试案例(案例 5)
Fig.8 Test case for swatch matching(Case 5)



(a) 全局匹配后的图像色域
(a) Image gamut after global matching



(b) 样窗匹配后的图像色域
(b) Image gamut after the swatch matching

图 9 全局匹配和样窗匹配后图像的色域比较(案例 5)
Fig.9 Image gamuts after global matching and swatch matching(Case 5)

向蓝青色的像素具有最小的匹配误差。经过 3 次样窗匹配后的最终结果如图 8(f)所示,总的来

说,色彩转移效果得到明显改进。从色域方面也可以看出^[20-21]:与全局匹配后的图像色域相比,经过3次样窗匹配后的图像尤其在蓝色和黄绿色区域的色域扩展非常明显,如图9所示。

4.2 计算效率

表2列出了不同算法对上述5个测试案例进行全局匹配的计算时间(不考虑样窗匹配)。由论文第二部分对全局采样的分析可知,对彩色参考图像进行边缘保持平滑滤波后,可以在不影响色彩转移效果的情况下增大全局采样间隔,提高计算速度。从表2可以看出:对于所有

测试案例来说,设置全局采样间隔情况下(基础层图像设置150像素间隔采样,对应引导滤波参数 $r=18$, $\epsilon=18^2$)的计算速度明显高于不设置采样间隔的情况。在无采样间隔的情况下,本文算法的计算速度与同类型的邻域优先搜索算法类似^[8],且远低于Welsh算法,而在设置采样间隔的情况下,本文算法的效率优势明显显现。本部分实验的测试平台为MATLAB 2014版本,测试环境为Win7,64位操作系统,处理器:Inter(R) Core(TM) i5-7500 CPU@3.40 GHz,内存:8 G。

表2 四种算法对5个测试案例的计算时间

Tab.2 Computing times of the four algorithms for the five test cases

(s)

		测试案例				
		1	2	3	4	5
本文算法	不设置全局采样间隔	144	134	159	147	181
	设置采样间隔:150像素	23	19	34	36	44
Welsh 算法		72	68	77	91	83
邻域优先搜索算法 ^[8]		147	138	155	153	177

5 结 论

本文提出了一种基于邻域优先搜索的快速算法用以解决灰度图像彩色化的问题。首先设计了邻域搜索方案在彩色图像中寻找目标灰度像素的候选匹配像素,然后基于纹理相似度计算候选像素与目标像素之间的匹配误差,并据此确定最终匹配像素。对于不满足邻域匹配条件的目标灰度像素,通过对彩色参考图像进行边缘保持平滑滤波并设置采样间隔的手段,提高其全图搜索和匹配速度。论文详细分析了不同的匹配误差阈值对色彩转移

结果的影响,以指导用户合理设置匹配参数。针对全局匹配后出现的图像失真问题,执行了一次或多次样窗匹配过程,在彩色参考图像中合理选取样窗,并将理想的颜色传递给彩色化后图像的失真区域。本文通过5个灰度图像彩色化案例来测试方法的效果,测试结果显示:在色彩转移质量方面,本文算法与经典Welsh算法效果相当;但在计算效率上,本文算法具有较大优势。另外,针对色彩构成较为复杂的灰度图像,借助一次或多次样窗匹配,本文算法的色彩转移效果更加明显。这说明通过加入一些用户交互,本文方法对于大部分类型的图像都是适合的。

参 考 文 献:

- [1] WELSH T, ASHIKHMIN M, MUELLER K. Transferring color to greyscale images [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(3): 277-280.
- [2] REINHARD E, ADHIKHMIN M, GOOCH B, et al. Color transfer between images [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, 21(5): 34-41.
- [3] 王颖蓓.灰度图像颜色转移算法研究[D].西安:西安理工大学,2016.
WANG Y B. Algorithm research of color transfer between grayscale images [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [4] ZHAO Y M, WANG L X, JIN W Q, et al. A grayscale image color transfer method based on region texture analysis using GLCM [C]//*Proceedings of SPIE* 8193, *International Symposium on Photoelectronic Detection and*

- Imaging* 2011; *Advances in Infrared Imaging and Applications*. Beijing, China: SPIE, 2011: 9879-9891.
- [5] LIU S G, ZHANG X. Image colorization based on texture map [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2013, 22(1): 013011.
 - [6] ARBELOT B, VERGNE R, HURTUT T, et al. Local texture-based color transfer and colorization [J]. *Computers & Graphics*, 2017, 62: 15-27.
 - [7] WANG X S, CAO G, CHENG Y H. Multi-source local color transfer based on texture similarity [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2014, 23(4): 718-722.
 - [8] 李建明, 叶飞, 于守秋, 等. 一种快速灰度图像彩色化算法 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(3): 536-540.
LI J M, YE F, YU S Q, et al. A fast algorithm of transferring color to greyscale images [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(3): 536-540. (in Chinese)
 - [9] YOO J D, PARK M K, CHO J H, et al. Local color transfer between images using dominant colors [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2013, 22(3): 033003.
 - [10] CAO L Q, JIAO L, LI Z J, et al. Grayscale image colorization using an adaptive weighted average method [J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2017, 61(6): 060502.
 - [11] HE M M, LIAO J, CHEN D D, et al. Progressive color transfer with dense semantic correspondences [J]. *ArXiv*, 2017: 1710.00756.
 - [12] XIAO C F, HAN C, ZHANG Z M, et al. Example-based colourization via dense encoding pyramids [J]. *Computer Graphics Forum*, 2020, 39(1): 20-33.
 - [13] 李郁峰, 冯晓云, 徐铭蔚, 等. 结合快速融合与颜色传递的双波段图像染色 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(10): 1213-1221.
LI Y F, FENG X Y, XU M W, et al. vision dual-band images coloration using fast fusion and color transfer [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(10): 1213-1221. (in Chinese)
 - [14] 张引, 饶娜, 张三元, 等. 自动采集样本的图像颜色传递算法 [J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(10): 1258-1263. (in Chinese)
 - [15] ZHANG Y, RAO N, ZHANG S Y, et al. Color transfer between images with auto selecting swatches [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, 10(10): 1258-1263.
 - [16] DESHPANDE A, ROCK J, FORSYTH D. Learning large-scale automatic image colorization [C]// *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Santiago, Chile: IEEE, 2015: 567-575.
 - [17] DESHPANDE A, LU J J, YE H M C, et al. Learning diverse image colorization [C]// *Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Honolulu, Hawaii: IEEE, 2017: 2877-2885.
 - [18] ZHU M, WANG N, HARDEBERG J Y. Spatial gamut mapping based on guided filter to preserve spatial luminance variations [J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2017, 61(2): 20506.
 - [19] ZHU M, ZHUN T. A spatial gamut mapping algorithm based on adaptive detail preservation [J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2018, 62(1): 10505.
 - [20] HE K M, SUN J, TANG X O. Guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
 - [21] 朱明, 张志广, 田淮. “Windows”平台下显示器色彩再现机理的研究和分析 [J]. 液晶与显示, 2017, 32(11): 923-933.
ZHU M, ZHANG Z G, TIAN Z. Color reproduction mechanism of monitor based on “Windows” platform [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(11): 923-933. (in Chinese)
 - [22] 冀利利, 孔玲君, 刘真, 等. 基于区域分割法的图像色域边界描述 [J]. 包装工程, 2014, 35(9): 110-116, 121.
JI L L, KONG L J, LIU Z, et al. Image gamut boundary descriptor based on the segment maxima method [J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(9): 110-116, 121. (in Chinese)

作者简介:



朱 明(1983—),男,河南洛阳人,博士,副教授,2011 年于南京林业大学轻工科学与工程学院获得博士学位,主要从事颜色复制、色彩管理和印刷集成控制技术方面的研究。E-mail: zhuming_printing@haue.edu.cn