

融合模糊色彩思维建模的马赛克风格渲染技术

律睿懋, 徐曼頔, 刘 渊*, 陈 伟, 孟 磊, 吴中浩, 郝豪杰

(江南大学数字媒体学院 无锡 214122)
(lyuan1800@sina.com)

摘 要: 为了在非真实感绘制中模拟画家色彩思维的主观模糊性, 研究了融合模糊色技术马赛克风格渲染. 该技术首先对输入图像按局部细节层次进行三角剖分, 得到不同大小的三角面片集合, 模拟画家对景物的结构分析思维; 然后对源图像的色彩信息进行转化, 获得每个三角面片上的模糊色, 模拟画家观察景物色彩时的主观模糊性; 最后采取可订制的模糊赋色策略渲染为马赛克风格图像, 模拟画家赋色时的主观模糊性. 结果显示, 提出的技术可以较好地模拟不同艺术家的赋色思维. 同时还构建了一个马赛克渲染原型英语, 用户可通过选取预设的赋色策略快速获得大量不同结果.

关键词: 非真实感绘制; 模糊色; 马赛克渲染; 三角化; 图像处理
中图法分类号: TP391.41

Artistic Mosaic Rendering Using Fuzzy Color Modeling

Lyu Ruimin, Xu Mandi, Liu Yuan*, Chen Wei, Meng Lei, Wu Allen C H, and Hao Haojie

(School of Digital Media, Jiangnan University, Wuxi, 214122)

Abstract: This paper presents a non-photorealistic rendering method combining fuzzy color models with mosaic rendering to emulate the fuzziness of color usage. The method first triangulates the source image based on its local details, to emulate artists' methods of observing and analyzing the image structures. Then, it converts the color from the source image to obtain the fuzzy color for every triangle. Finally, it renders the triangles by a customizable fuzzy coloring strategy to emulate artists' painting methods. The results show that the proposed method achieves good simulation of different artists' coloring strategies. Using the rendering application based on the proposed method, the user can quickly achieve many renderings in different coloring strategies by our mosaic rendering prototype.

Key words: non-photorealistic rendering; fuzzy color; mosaic rendering; triangulation; image processing

传统绘画创作中的色彩思维具有模糊性, 其通常流程如图 1 所示. 艺术家首先通过观察景物获得关于画面的结构及色彩构成的主观模糊印象, 然后根据主观表达意图进行赋色. 然而, 至今仍缺

少一种数学模型, 能够良好、广泛地表达该流程中色彩思维的主观模糊性. 这既不利于理性地解析艺术家的思维方式, 也不利于开发图像处理应用. 于是, 本文意在色彩思维的模糊性进行建模, 并

收稿日期: 2015-10-23; 修回日期: 2016-08-26. 基金项目: 国家自然科学基金(61103223); 江苏省自然科学基金(BK20130157); 2015 年度教育部人文社科青年基金课题(15YJCZH115). 律睿懋(1982—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为数字绘画与游戏化; 徐曼頔(1992—), 女, 硕士, 主要研究方向为计算机图形学、人机交互; 刘 渊(1967—), 男, 硕士, 教授, 博士生导师, CCF 会员, 论文通讯作者, 主要研究方向为数字媒体技术、计算机网络应用与安全; 陈 伟(1986—), 男, 博士, 讲师, CCF 会员, 主要研究方向为计算机图形学、图像处理; 孟 磊(1984—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为数字媒体展示设计; 吴中浩(1957—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为 CAD; 郝豪杰(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为人机交互, 计算机图形学, 数字绘画.

尝试运用于非真实感绘制(non-photorealistic rendering, NPR).

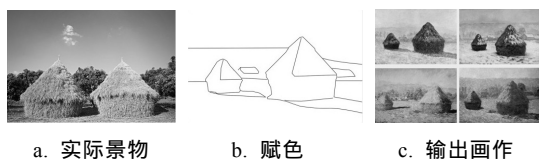


图 1 艺术家创作过程

模糊色彩技术能够一定程度地模拟人类的色彩主观模糊性, 却暂未用于构建艺术家的模糊色彩思维. 近年来, 部分学者基于模糊色彩技术先后提出了不同模型, 并实际应用于图像处理^[1-3]、图像检索^[4-5]、配色设计^[6]和色彩表征^[7]等领域, 且有良好的发展, 但还未在 NPR 领域中发挥作用. 模糊色彩技术是利用模糊集理论的隶属函数将色彩进行不同方式的颜色聚类或分类, 它的模型是抽象的, 为了产生艺术化的绘制效果, 必须融入一种特定的 NPR 方法中, 才能体现其实际用途. 为此, 选用了马赛克渲染技术. 这是由于马赛克渲染涉及的图像剖分技术能够较好地模仿艺术家对形态构成的观察和分析方法^[8], 并且由此得到的结果还可以作为其他 NPR 技术(如油画效果、水粉效果等)在取色时所用的源图像.

目前在马赛克渲染技术中, 还未尝试融入模糊色彩技术. 本文融合这 2 种技术, 提出可以广义上模拟不同艺术家的色彩思维赋色的方法. 图 2 和图 3 对比了传统的马赛克渲染方法和本文方法. 如图 2 所示, 传统的马赛克渲染主要关注于对源图像的分区. 本文改造了马赛克渲染技术, 重点加入了

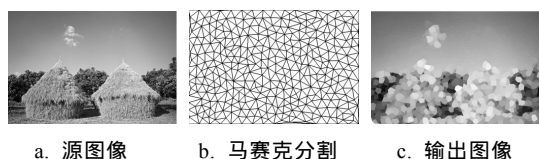


图 2 传统的马赛克渲染流程

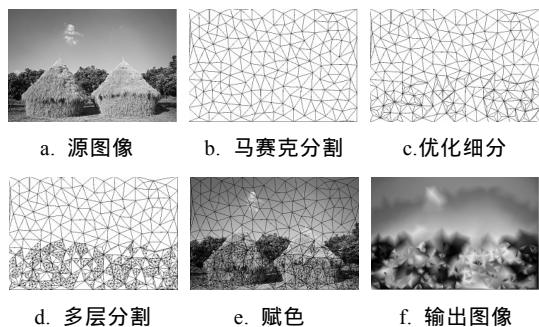


图 3 本文采用技术流程

模糊色技术, 以模拟艺术观察色彩和运用色彩时的模糊思维, 并且在图像分区的流程里实现了层次细分优化, 以模拟艺术家对形态的观察分析方法.

通过主观问卷实验的方法, 本文证明所提出模型能够广义地、良好地表达不同艺术家的赋色策略. 最后, 基于本文方法开发了一款马赛克艺术渲染原型应用, 其体现出了 2 个优点: 1) 用户可从预设的大量图像赋色策略中快速获取到采取不同赋色方案的大量结果, 并从中选取符合自身艺术审美的结果; 2) 用户可了解每个赋色结果对应的赋色规则, 学习到一种可运用于实际绘画的、接近艺术家实际思维模型的赋色策略.

1 相关工作

以往已有一些研究涉及了模拟艺术家的赋色思维, 但对于色彩的主观模糊性建模却显得不足. Zeng 等^[9]基于图像解析技术的语义驱动方法模仿了画作的形态构成, 将图像进行分割分类并实现不同类别的笔刷艺术渲染. Guo 等^[10]运用输入图像生成的结构描述映射图并建立对象轮廓描述, 模仿画作形态构成, 再通过一种色彩转换算法模仿水墨画赋色风格. Zang 等^[11]将艺术性增强和色彩调和结合运用到图像增强技术, 在 Lab 色彩空间实现了模仿艺术家真实主观调色的思维. 赵叶峰等^[12]在 HSL 色彩空间利用色彩调和和技术提取油画的主题色, 得到视觉相对明显的像素色彩. 色彩调和和技术需要结合对人心理感知概念, 一定程度上模拟了艺术家主观调色. 然而, 这些技术大多在常见的色彩空间如 HSV^[13-14], HSL^[15], Lab^[16], LMS 锥彩色空间^[17]等中实现, 而且模拟赋色的主要途径是色彩调和和技术, 却未利用模糊色彩进行实践, 也就未能很好地模拟艺术家色彩思维的主观模糊性.

模糊色彩技术对人的色彩认知模糊性具有良好的表达力, 但还未能用于辅助数字艺术创作. Chang 等^[1-2]相继提出在 2 种不同的模糊色彩分类方法条件下基于参考图像对源图像的色彩进行转换, 得到符合人类感知的图像. Alarcón 等^[3]结合贝叶斯方法和模糊色彩模型提出一种色彩图像语义分割的方法, 对图像进行不同风格的处理. 刘炯宙等^[6]给出了基于色彩语义且综合色彩调和度、色彩语义和用户交互评价的产品交互式遗传配色设计方法, 把模糊语义应用到了配色设计, 通过用户交互符合其个人心理感知, 值得借鉴. 张全等^[7]提出

能够在不同维度和粒度层上实现色彩空间与情感语义空间的复杂映射的色彩表征方法,在语义层面上实现了模糊色彩渲染,渲染得到的色彩也更符合人的心理感知.不过,这些方法至今还未应用于模拟艺术家的色彩思维,也未运用于 NPR 领域.

马赛克渲染风格方法^[18](晶格化马赛克(crystallization mosaic)^[19]、古风马赛克(ancient mosaic)^[20-21])中,晶格化马赛克采用计算几何方法和图像处理技术相结合进行处理,得到类似彩色玻璃的效果.古风马赛克充分保留了源图像信息,着色的碎片形状大小多样.这 2 种都是模仿传统马赛克艺术,在马赛克碎片排布上做研究. Faustino 等^[19]对基本的马赛克分割思想进行了改进,得到的马赛克图像具有边缘信息. Hausner^[20]使用重心 Voronoi 图重现拟真的古代马赛克风格. 陈中贵等^[22]基于测地距离度量下的 Voronoi 图结构,提出一种保持特征的自适应马赛克图像生成方法. Han 等^[21]提出一种在移动设备上实时、快速地生成彩色纸形状的马赛克的方法. 上述马赛克技术大多侧重于对马赛克碎片的分割方法、形状、大小、排列方式和算法效率的研究^[23-25],只有极少研究关注于颜色调整对生成的马赛克图像视觉效果的影响^[26]. 通常取源图像对应像素进行赋色,且采用较简单传统的颜色校正,如均值调整、方差调整^[26]. 这些技术没有涉及如何模仿艺术家思维对马赛克碎片赋色,但其中对于图像的区域分割技术可用于模拟艺术家对画面的结构进行观察与分析的技巧,因此可结合模糊色技术,对画家的绘画思维过程进行完整模拟.

2 技术框架及实现

图 4 示意了本文的系统框架:虚线框内为系统的主流程,虚线框外左侧示意系统流程与艺术家的创作过程的对应关系,虚线框外右侧表达了原形系统的交互接口.

本文技术均围绕基于模糊色彩的马赛克模型展开,其主流程读取用户指定的一幅图像,经过图像的模型转化、图像赋色策略和图像渲染,得到风格化的马赛克图像.

上述流程模仿了艺术家的创作过程.其中三角剖分与模糊色彩识别模仿了艺术家的观察方法,相当于艺术家通过分析想象获得的主观图像分区和色彩构成;而图像赋色策略模仿了艺术家创作时的主观赋色.

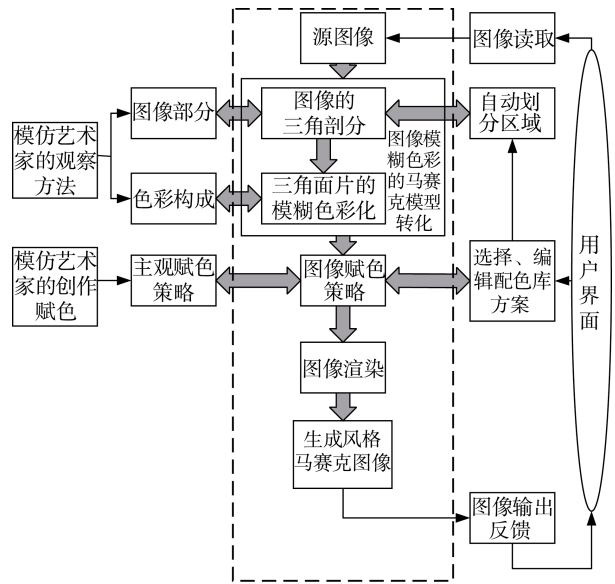


图 4 系统框架图

在原型系统中,用户能够通过用户界面处理图像的三角剖分和赋色,从而加入一定的自主创作意图,生成符合个人偏好的马赛克图像.

2.1 马赛克模型

基于模糊色彩的马赛克模型是本文技术的基础.本节阐述马赛克碎片模型,并引出本文定义的详细模糊色彩概念.

图 5 所示为带有模糊色的马赛克模型,其以带有模糊色彩信息的三角面片 ω 作为整幅画面的基本部件,三角面片集合构成马赛克模型 Ω 表达为 $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$. 其中, n 为三角面片的总和. 每个三角面片 ω 带有信息如下: 顶点集合 Q , 三角面片对应的原图三角形中所有像素的图像梯度的平均值 $grad. Q$ 可表达为

$$\begin{cases} Q = \{q_0, q_1, q_2\} \\ q_i = \{(x_i, y_i), (r_i, g_i, b_i), (c_i, d_i, v_i)\} \end{cases}$$

其中, q_0, q_1 和 q_2 分别是三角面片的 3 个顶点; 每个顶点 q_i 包含源图像对应的像素点坐标值 x_i, y_i ; 色彩值 r_i, g_i, b_i 和模糊色彩值 c_i, d_i, v_i . 模糊色彩具体定义在下一节描述.

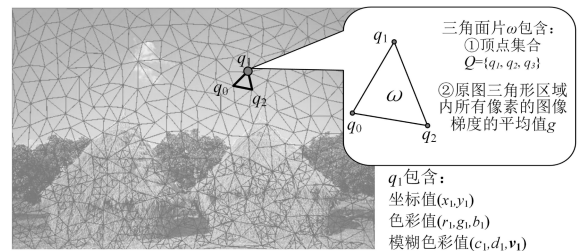


图 5 本文的三角面片模型图

2.2 模糊色彩概念及表达方法

模糊色彩是指对每个颜色, 用其所属的基本色和其对该基本色的隶属度来重新描述得到的颜色. 模糊色彩集合是由模糊色合成的关于色彩隶属度的色彩空间集合. 本模型选取模糊色彩子集的代表色为 Berlin 和 Kay 的 11 种基本色彩(白色、黑色、红色、绿色、黄色、蓝色、褐色、粉红、紫色、橙色和灰色)^[27], 以及在笛卡尔坐标系下的色彩空间 XYZ(RGB 色彩空间), 生成模糊集

$$\begin{cases} \widetilde{XYZ} = \{\widetilde{C}_1, \widetilde{C}_2, \dots, \widetilde{C}_{11}\} \\ \widetilde{C}_i = (c_i, d_i, v_i) \end{cases}$$

其中, \widetilde{C}_i 为模糊子集; c_i 为 \widetilde{C}_i 的代表色. 每个模糊子集中的色彩都有和这个代表色 c_i 相关的隶属度 d_i , 其中 d_i 取值范围为 $[0, 1]$. 这 11 种代表色在 ISCC-NBS 色彩空间^[28] 中的位置如图 6 所示.

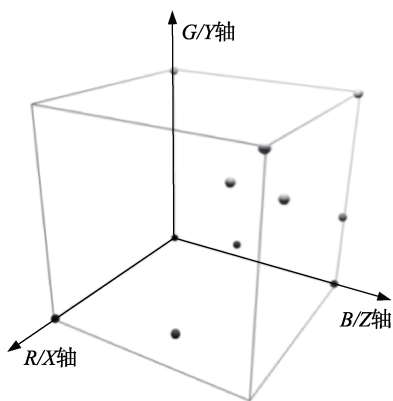


图 6 代表色在 ISCC-NBS 色彩空间里的位置图

如图 7 所示, 采用 Soto-Hidalgo 的模糊色彩分类方法^[29], 在三维 RGB 色彩空间中自动生成模糊色彩空间, 每个模糊色集合 \widetilde{C}_i 都是以其代表色 c_i 为质心的凸包范围, 其中距离 c_i 越远, 则隶属度越低. 图中突出显示的是代表色为紫色的模糊色彩子集. 这种模糊色空间模型模拟了艺术家认识色彩的方式, 即记忆一系列基本色彩^[27], 将所有色彩归于这些基本的色彩, 并用隶属度表达了色彩的主观模糊性.

2.3 图像的模糊色彩马赛克模型转化

将图像进行模型转化是指将像素化表达的图像转化为上述包含模糊色的马赛克模型, 其过程分为图像三角剖分和三角面片的模糊色彩化.

2.3.1 图像的三角剖分

艺术家在观察和分析景物的构成时并非以数

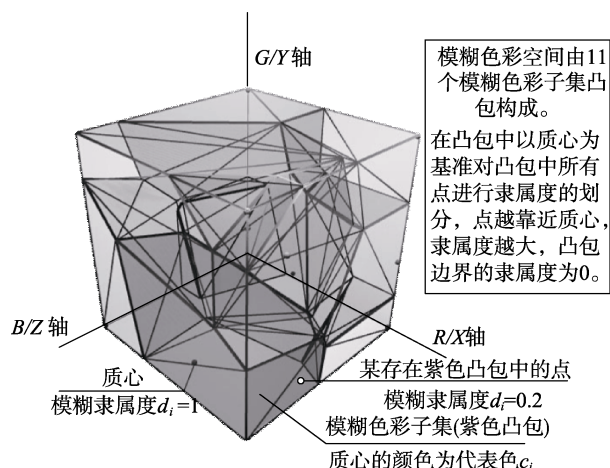


图 7 基于 Voronoi 多面体的模糊色彩空间架构图

码摄影的方式逐像素地获取颜色, 而是将景物理解为大小不一的、具有一定比例和位置关系的区域. Xu^[8]介绍的一种通过分析景物的关键结构特征和细节层次进行多分辨率三角细分的观察方法, 较好地总结了这种思维模式. 本节通过三角剖分的方式将源图像划分为大小不一的三角面片区域, 模仿了这种艺术家对景物的观察分析方法.

细分算法将这源图像不断细分, 生成一系列三角面片. 这一算法对 Shewchuk 提出的经典 Delaunay 三角剖分细化算法^[30]进行了改进. 算法如下所述.

输入. 需要细分的面片 ω , 最初即整幅图像; 细分级别 n ; 包含 n 个参数的集合 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 即一系列“细分度”, 预设为一组从小到大排列的数值, 用于控制分割的三角面片的大小和数目, 数值越大则生成面片越少、面片面积越大, 其具体含义可参考二维平面下生成 Delaunay 三角网格的算法^[30]; 用于判断某个面片是否需要细分的全局阈值 Y .

输出. 输出的三角面片集合 Ω , 最初为空集合.

Step1. 计算面片 ω 内对应源图像内所有像素的平均梯度 g .

Step2. 如果平均梯度 g 大于等于全局阈值 Y , 取集合 T 中第 n 个细分度 t_n , 按照 Delaunay 三角剖分细化算法, 将 ω 分为 m 个面片 $\{\omega_0, \dots, \omega_m\}$, 并对于细分出来的每个子面片 ω_i , 按照 Step1~Step3 进一步细分.

Step3. 如果平均梯度 g 小于全局阈值 Y , 则将面片 ω 存入集合 Ω .

2.3.2 三角面片的模糊色彩化

艺术家观察分析景物时, 对于每个区域的色彩认知并非按数字摄影那样获得精确的色彩值, 而是将色彩归于某种基本色彩^[27]. 为了模仿这种

色彩观察方法, 本节对在 2.3.1 节中得到的每个三角面片赋以模糊色, 相当于将这每个三角形区域中的色彩归于基本色彩, 并用隶属度来标记该处色彩符合该基本色彩的程度.

如图 8 所示, 模糊色彩空间模型由一系列代表色生成的三维 Voronoi 凸包构成. 在同一代表色的三维凸包中, 若把带有相同隶属度的模糊色彩点投影在 XYZ 空间中, 得到的结果是连续的三维闭环(图 8 中深色多面体表示“紫色”对应的模糊集, 其表面即隶属度为 0 的三维闭环), 说明一个仅带有代表色 c 和相应隶属度 d 属性的模糊色彩点不是单独唯一的. 为了在计算机上渲染得到确定的模糊色彩值, 本文在原模糊色彩定义上增加了一个额外属性, 即从凸包质心指向该色彩点的三维向量 v_i , 从而解决了 2 个属性带来的模糊色彩点的不确定性, 并借助 RGB 空间把模糊色彩属性转化为 RGB 属性. 于是, 每个模糊色彩值包括模糊代表色 c_i , 隶属度 d_i 和三维向量 v_i , $d_i \in [0, 1]$, v_i 为在 XYZ 空间下的单位长度向量. 对应于 RGB 属性, 称模糊色彩的色彩属性为 CDV 属性. 示例点属性(紫色, 0.2, (0.9, 0.3, -0.3))表示该点所属代表色为紫色, 与紫色相关隶属度为 0.2, 以紫色质心为相对坐标系的方向三维向量为(0.9, 0.3, -0.3).

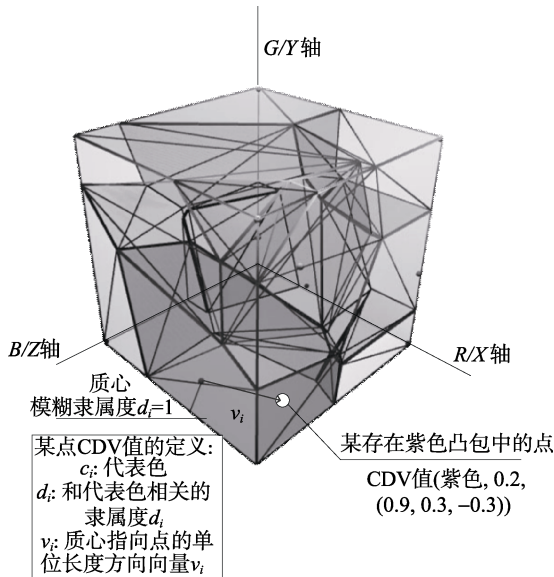


图 8 模糊色彩的 CDV 属性在空间中的表达图

模糊色彩化即将集合 Ω 中每个三角面片的每个顶点对应的源图像上的色彩值转化为模糊色. 设某顶点处对应源图像上的色彩值为位于 RGB 空间中的点 q , 则它的模糊色 c_q, d_q, v_q 值分别按如下

方法计算:

c_q 的计算方法. 找到 q 所属的模糊色彩集, 则该点的模糊色彩值即为该模糊色彩集的代表色 c_q . d_q 的计算公式为

$$d_q = \begin{cases} 1, & t_q \leq t_1 \\ \frac{2 \cdot t_2 - t_q - t_1}{2 \cdot (t_2 - t_1)}, & t_2 \leq t_q < t_1 \\ \frac{t_3 - t_q}{2 \cdot (t_3 - t_2)}, & t_3 \leq t_q < t_2 \end{cases}$$

其中, t_1, t_2 和 t_3 分别为在 $c_q q$ 方向上隶属度分别为 0, 0.5, 1 的点和 c_q 的距离; q 和 c_q 的距离为 t_q . 比较 t_q 和 t_1, t_2, t_3 的相互关系, 根据公式求得隶属度 d_q .

v_q 的计算方法. 即从 c_q 朝向 q 点的单位矢量 $v_q = n(q - c_q)$; 其中 $n()$ 函数将矢量转换为单位矢量.

2.4 图像赋色策略

艺术家在对画面赋色时并不会完全再现最初的主观色彩印象, 而是会采取主观变色处理, 并往往会尝试不同色彩搭配效果; 然后从中选取满意的配色效果, 形成个人的色彩风格. 其中变色方法通常是将色彩在其同一色系范围内随机变化. 这种随机性在不同艺术家的创作中又具有不同的特性, 相当于每个艺术家采取了具有个人特色的概率密度函数来随机变色. 本节的图像赋色策略模仿了艺术家创作的主观赋色, 并基于每个三角面片的模糊色彩, 采取随机化的色彩搭配对应艺术家思维. 用户可从得到的一系列赋色策略中选择最符合自身偏好的策略参数.

在模糊色彩空间 CDV 中, 代表色 c 决定色彩所处的语义环境, 隶属度 d 和三维向量 v 的不同决定了同一色彩语义对应多种色彩值. 本节利用模糊色彩这一特性, 分别构造针对隶属度 d 和三维向量 v 的函数作用于三角面片, 从而更改三角面片顶点的模糊色彩值. 经模糊色彩化的三角面片 ω 中每个顶点 q 包含一组 CDV 值(c_q, d_q, v_q), 经赋色策略参数处理后的顶点的 d_q 和 v_q 值改变为

$$\begin{cases} d'_q = \varepsilon \cdot d_q + \lambda \\ v'_q = n(\eta \cdot v_q + \mu) \end{cases}$$

其中, 第一式表示以参数 ε 和 λ 对原隶属度 d_q 进行线性变换; 第二式表示对原来的模糊色属性 v_q 按参数 η 和 μ 进行线性变换后再用函数 $n()$ 将其转换为单位矢量. 其取值范围限定为 ε 和 λ 可取任意实数; $\eta \in [-0.5, 0.5]$; μ 的 3 个分量 μ_1, μ_2 和 μ_3 的取值

范围均为 $[-1, 1]$; 这些参数的取值由用户手动选择或者系统随机生成, 其各自的名称如表 1 所示。

表 1 模糊赋色策略参数组含义

控制原隶属度 d 比例	添加新的可随机隶属度	控制原向量 v 比例	添加新随机 μ 分	添加新随机 μ 分	添加新随机 μ 分
	隶属度		量值 1	量值 2	量值 3
ε	λ	η	μ_1	μ_2	μ_3

由此, 根据 $\{\varepsilon, \lambda, \eta, \mu\}$ 的取值得到一系列随机类赋色策略组。参数取值的相互独立和灵活的取值范围决定模糊赋色策略组数的多样性, 并可以组合出多种可能性。

2.5 图像渲染

模糊色彩模型是一种主观的色彩模型, 需要由某种方式转化为精确的色彩值, 才能实际显示出来。本节实现将三角面片的色彩从模糊色空间 CDV 转化到 RGB 空间。本文参考 Soto-Hidalgo 的理念^[29]构造了从模糊色彩 CDV 值 (c_i, d_x, v_x) 转换为 RGB 值的公式, 如 $(r_x, g_x, b_x) = c_i + t_x \cdot v_x$ 。其中, t_x 的计算公式为

$$t_x = \begin{cases} r(0, t_1), & d = 1 \\ (1 - 2d)t_1 + 2(1 - d)t_2, & 0.5 \leq d < 1 \\ 2t_2 + (1 - 2d)t_3, & 0 \leq d < 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

其中, c_i 为质心, $c_i = (c_r, c_g, c_b)$, t_x 是在隶属度 d_x 下对应生成的三维向量 v_x 方向上的数量长度; t_1, t_2, t_3 分别为模糊色彩子集在 1, 0.5 和 0 隶属度下三维向量 v_x 方向上的数量长度。当隶属度 $d_x=1$ 时, 执行函数 $r(0, t_1)$ 生成 $[0, t_1]$ 区间内的均匀分布随机数。将式(1)运用于每个三角面片, 可将所有模糊色彩值转化为能够显示 RGB 值。

3 实验结果分析

本文基于 OpenFrameworks 框架, 用 C++ 语言实现了马赛克渲染原型系统。系统可以通过更改赋色策略, 快速生成大量不同风格的马赛克图像。用户可以从其中挑选符合自身艺术审美的方案, 并且可以查看每一种渲染结果采取的赋色策略, 从而了解并学习到这种赋色方式。

本节介绍了赋色策略组的参数分析、模拟艺术家主观化赋色思维的可行性分析。实验环境为 Intel Core i5-2450M CPU 2.50 GHz, 4 GB RAM。所有实验图像均不超过 600×600 的大小, 细分度预设位 $T_d = \{1200, 600, 100\}$, 平均运行时间为 3.2 s。

3.1 赋色策略组的参数分析

模糊赋色策略参数组 $\{\varepsilon, \lambda, \eta, \mu\}$ 中, ε 和 λ 作用于隶属度 d , 决定实际绘画渲染中色彩的鲜艳度; η 和 μ 作用于三维向量 v , 决定实际渲染中色彩的偏向性。色彩的偏向性由其所属代表色和其在图 4 所示三维空间所处的位置所决定。例如, 由图 6 中示例点(紫色, 0.2, (0.9, 0.3, -0.3))与代表色质心所处关系可知, 示例点色彩偏向灰色和橙色, 因此, 要通过实际空间对应关系才能具体分析色彩的偏向性。

下面对一系列模糊赋色策略参数进行实验, 以展现这些参数的赋色效果。以下每个实验结果都是由同一组策略参数对图像所有三角面片的 CDV 值进行处理, 且保证了相同细分度 $T = \{1200, 600, 100\}$ 。

3.1.1 ε 值和 λ 值变化对图像的影响

因为 ε 值的变化结果和 λ 值相似, 实验中只选取了对 λ 值变化的图像结果, 用以分析 ε 和 λ 值。

表 2 和图 9 a~9i 组分别比较了 ε, η, μ 相同的情况下, $\lambda=0.1, 0.5, 1$ 的图像渲染情况。3 组图像表明, λ 对图像起一定变化作用: 在相同代表色和同一向量方向上, λ 值越小, 图像色彩越明亮; λ 值越大, 图像色彩越暗。

3.1.2 η 值变化对图像的影响

表 2 和图 9 j~9l 组分别比较了 $\varepsilon, \lambda, \mu$ 相同的情况下, $\eta=0.1, 0.5, 1$ 的图像渲染情况。图像表明, 在相同代表色和同一向量方向上, η 值越大, 图像色彩越明亮; η 值越小, 图像色彩越暗。且在 η 大于某一个值后图像变化不太明显, 因此本文在辅助系统中选取 $[-0.5, 0.5]$ 作为 η 的变化范围。

3.1.3 μ 值变化对图像的影响

表 2 和图 9 m~9t 组分别比较了在 $\varepsilon, \lambda, \eta$ 相同的情况下不同向量 μ 值对图像的影响效果。实验使用了 8 个代表不同方向的参数组, 通过表 2 和图 9 可以得知, 向量 μ 的不同取值影响图像效果显著: 在相同代表色和相同隶属度的情况下, 图 9 m 色调偏淡偏粉, 图 9 n 主色调偏黄, 图 9 o 和 9 r 主色调偏绿, 图 9 p 主色调偏蓝, 图 9 q 主色调偏紫, 图 9 s 主色调偏红, 图 9 t 主色调偏深绿。向量主要由实际代表色所在三维空间位置所控制, 因此, 可根据对应表图上的 μ 值选择相近取值, 从而得到相近的图像渲染效果。更多不同向量对图像的影响有待用户探索。

3.1.4 小结

上述对比分析很好地体现了艺术家赋色中的主观变色, 并进一步得出, 在模糊赋色策略参数组

表 2 比较不同 λ, η, μ 值的模糊赋色策略参数组

序号	ε	λ	η	μ_1	μ_2	μ_3
a	0	0.1	0	0	1	1
b	0	0.1	0	1	0	1
c	0	0.1	0	1	1	0
d	0	0.5	0	0	1	1
e	0	0.5	0	1	0	1
f	0	0.5	0	1	1	0
g	0	1.0	0	0	1	1
h	0	1.0	0	1	0	1
i	0	1.0	0	1	1	0
j	0	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1
k	0	0.1	0.5	-0.1	-0.1	-0.1
l	0	0.1	1.0	-0.1	-0.1	-0.1
m	0	0.1	0	0.1	0.1	0.1
n	0	0.1	0	0.1	0.1	-0.1
o	0	0.1	0	0.1	-0.1	0.1
p	0	0.1	0	-0.1	0.1	0.1
q	0	0.1	0	-0.1	-0.1	0.1
r	0	0.1	0	-0.1	0.1	-0.1
s	0	0.1	0	0.1	-0.1	-0.1
t	0	0.1	0	-0.1	-0.1	-0.1

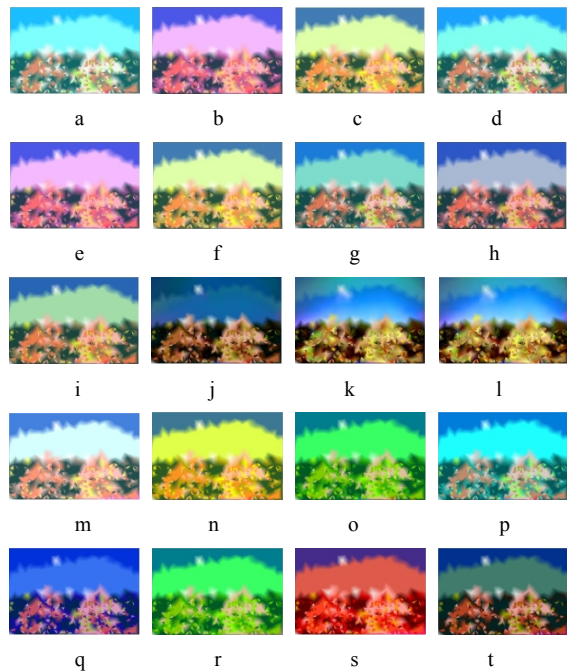


图 9 与表 2 相对应模糊赋色策略参数组示意图

$\{\varepsilon, \lambda, \eta, \mu\}$ 中, 掌管色彩鲜艳度的 ε 和 λ 的值越接近 1, 与代表色越相近; 越接近 0, 越偏向其他代表色大类. 而负责色彩偏向性的 η 和 μ 值的选取需要考虑所属代表色和其在三维空间所处的位置关系. 因此, 若要在渲染中提升鲜艳度, 则应该更改赋色

策略组中的 ε 或 λ 值; 若要更改图像的主色调, 则根据空间结构调节 η 和 μ 值; 对于如何精确选取色彩偏向性, 原型系统中提供代表色的可视化关系位置可供用户选择.

通过上述数据对比, 本节也进一步确定了 2.4 节中的所提到的 $\{\varepsilon, \lambda, \eta, \mu\}$ 参数范围.

3.2 模拟艺术家主观化赋色思维的可行性

3.2.1 模拟艺术家色彩思维的方法

由于艺术家创作时不采用单一的赋色策略, 模拟艺术家的赋色思维更确切地体现在模拟他们的代表作品的赋色策略. 如图 10 所示印象派画家莫奈就曾用不同的赋色效果描绘相同光照下的相同景物(图中对相同的睡莲进行了不同的赋色描绘).

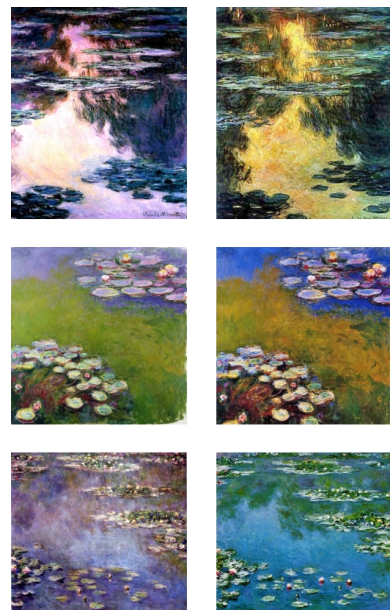


图 10 莫奈《睡莲》系列

本文提出的模糊色彩思维模型力图从渲染效果上逼近艺术家的真实赋色策略, 而非从某个单独艺术家的思维出发模拟. 图 11 示意了本节验证赋色策略可以模拟艺术家的赋色思维的实验流程.

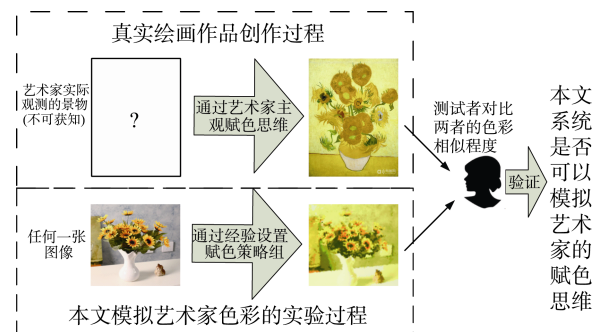


图 11 真实绘画作品创作过程和本文模拟艺术家色彩的实验过程对比示意图

其中有几点需要说明: 1) 为了验证本文方法具有较大的广义性, 模拟对象选取了如图 12 所示印象派绘画时期多个画家的代表作品; 2) 由于不可能还原出艺术家作画时观察到的实际景物, 因此获得其赋色策略不能通过比较实际观察景物与完成作品的差异来实现, 而只能经验式地反复调整参数来获得渲染效果上较为贴近的赋色策略; 3) 实验对比选择与艺术家原图进行对比, 是因为目前研究领域还未曾有使用模糊色彩技术实现 NPR 的相关文献, 而且通过实验图像与原作品直接对比是最简单和最直观的; 4) 对于验证具有主观性的色彩心理作用评价研究, 本文选择了主观调查

的手段, 并按统计学方法进行归纳定性分析. 这与本文技术主题——为用户提供符合自身主观色彩感受(艺术审美)的结果是相一致的.

3.2.2 相似程度对比实验

本节通过志愿者评分的形式, 从模拟程度和广义性 2 个测试指标上证实本文提出的方法可以模拟艺术家的典型赋色思维. 模拟程度表现了赋色策略对绘画原作有多高的逼近程度, 广义性衡量了模型是否能够模拟较多不同艺术家的不同赋色策略, 而非单一艺术家.

本文选取了图 12 中的印象派作品作为样本, 分别通过大量主观实验得到较符合作品色彩的赋色策略组. 为了验证赋色策略参数组可以模拟艺术家赋色思维, 本文邀请了 80 位从事艺术相关的志愿者对这些组合的模拟相似度进行主观评分. 每位志愿者都对给定的实验原图尝试 10 种赋色策略参数组(分别对应图 10 的每幅作品效果), 并在告知分值语义的情况下对结果打分. 分值对应的语义程度如下: 0~2 分为“极不符合”; 3~4 分为“比较不符合”; 5~6 分为“基本符合”; 7~8 分为“较好地符合”; 9~10 分为“很符合”. 分值越高, 代表用户认为两者之间色彩相似程度越大. 通过概率统计得到最终结论如表 3 所示.



图 12 用于实验的一些画家的代表作品

表 3 图 12 所示画作与其模拟图的相似程度

艺术家作品	相似程度 平均值	相似程度 方差	相似程度 置信区间($p=0.95$)
a	5.54	7.57	[5.35, 5.73]
b	5.98	7.72	[5.78, 6.17]
c	5.30	6.82	[5.12, 5.48]
d	5.53	7.23	[5.33, 5.71]
e	8.28	2.75	[8.16, 8.39]
f	5.85	6.51	[5.67, 6.02]
g	6.79	4.47	[6.64, 6.93]
h	6.31	5.28	[6.15, 6.47]
i	6.83	4.15	[6.68, 6.97]
j	7.89	3.21	[7.76, 8.01]
全部样本	6.43	6.44	[6.25, 6.60]

对上述表 3 分析如下:

1) 实验图像的模拟程度

根据表 3 可知, 每幅图对应的赋色策略均高于 5 分, 即全部达到了“基本符合”的程度, 部分图像赋色策略平均相似程度分数高达 8 分左右, 全部样本的平均相似程度在 6.43, 数据的方差总体比较平均. 因此, 上述数据能够证实, 本文赋色策略组

较好地模拟了艺术家的色彩思维.

2) 赋色策略组的广义性

因为 10 幅作品来自不同的艺术家,且模拟赋色策略都能较好地模拟作品,由此证实本文的模拟赋色策略组是在广义上模仿不同艺术家的不同作品的色彩风格.

3.2.3 模拟艺术家赋色思维的局限性

本节通过对比相同赋色策略参数组,总结了一些本文存在的限制.表 4 左栏对应图 12 中分图号,右 6 栏给出了其赋色策略组具体参数值.

表 4 图 12 中渲染图的赋色策略参数组

序号	ϵ	λ	H	μ_1	μ_2	μ_3
a	0.5	0.1	0.1	0.5	0.2	-0.3
b	1.0	1.0	0.5	-0.1	-0.1	-0.1
c	1.0	1.0	0.1	0.1	0.5	-0.3
d	0.1	0.0	1.0	0.1	0.1	0.1
e	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.2
f	1.0	1.0	0.3	-0.1	0.1	0.2
g	1.0	1.0	0.5	-0.2	0.1	0.1
h	0.3	0.1	0.5	-0.2	-0.1	0.1
i	0.1	0.1	0.0	0.5	0.7	0.2
j	0.3	0.1	0.5	-0.2	-0.1	0.2

图 13 示意了画家原作与渲染作品的效果对比,其左中右 3 组分别对应于表 3 中的 c, b 和 e,即模拟效果最差、中等和最好的 3 组.通过 3 组对比图,可以总结出以下局限性:

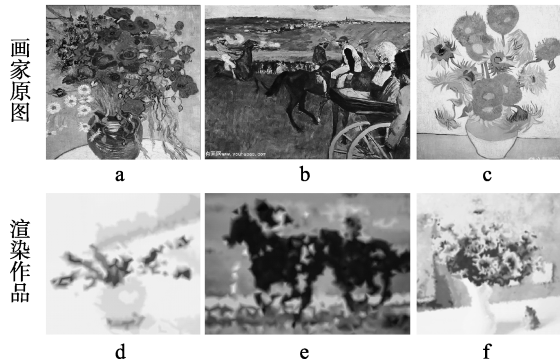


图 13 画家作品与渲染作品效果对比

1) 实验图像局限

由于实验图像内容、色彩与艺术家原始景物有所区分,且不同实验图像存在不同的色彩偏向,例如,图 13d 的原图中花朵偏红,图 13e 的原图偏蓝,于是添加相同的赋色策略后产生的渲染色彩会有所不同.相比而言,图 13f 的原图和艺术家的原图色彩偏向较一致,因此在色彩相似性上优于其他的实验图像效果.

2) 赋色策略模型局限

艺术家在绘画时会根据观察到的景物本身的色彩分布来决定自己的赋色策略,但由于本文模型没有对这种思维方式进行模拟,因此相同的赋色策略对任何原图的作用方式都完全一样.这在很大程度上归因于艺术家作画时的原始景物未知,使得本文只能基于研究者自身的经验,仿造艺术家作品的色彩风格来主观设置赋色策略,这导致得到的色彩渲染结果与作品相似而不等同.

3) 模糊色彩集划分的局限

在生成的作品中,有些位置的色彩过大地偏离了其对应的模糊色概念;其中重要原因是当前的模糊色彩集定义在 RGB 空间.目前有关模糊色的研究中,大都是在 RGB 色彩空间中定义模糊色彩集,本文采用 Soto-Hidalgo 的模糊色彩分类方法^[29]亦是如此,还较少尝试在其他色彩空间中定义.然而,RGB 空间并不具有视觉等距的属性,因此,生成的 11 个模糊色彩集范围与艺术家认知的色彩就会有较大差异.

3.2.4 小结

本节主要印证了本文赋色策略组可以模拟出多种不同经典作品的赋色策略,和能够广义地模拟不同艺术家的赋色思维.也存在一些局限,包括本文并未能够实现直接从艺术家的作品中识别出它的真实赋色策略,因此不涉及从经典作品提取出赋色策略的技术;在实验图像选取过程中存在色彩偏向的局限,导致图像渲染效果不一致.

3.3 用户评价

本节展示了原型系统和相应的用户评估内容.

图 14 示意了原型系统的用户界面,并标注了通常的使用流程.

Step1. 用户在风格选择栏选择一种预设好的赋色策略.

Step2. 在“阈值”和“细分度”中选择三角剖分参数,参数可累计 3 层,达到马赛克有疏有密的效果.



图 14 本文的原型系统

Step3. 选择预设好的需要处理的图像或在本地打开一幅需处理的图像.

Step4. 在“赋色策略参数调整模板”中选择需要更改的参数, 在本例中借助了“向量偏色性”栏更改了可随机向量和可随机隶属度.

80 位志愿者在原型系统上进行实际的自主渲染操作, 并填写相关表格进行打分. 最终分数整理如表 5 所示.

由表 5 可知, 用户对软件启动时间、界面美观、系统流畅度满意度较高, 都能达到 80% 以上. 而对系统的提示信息及渲染等待时间较不满意, 尤其是帮助提示, 不满意度也高达 70% 以上. 因此, 本文在优化系统上应该着重增加用户对帮助提示的需求, 尤其要加快图像渲染的等待时间. 等待时间长度有 2 个决定性因素, 一个是细分度的不同会改变运行时间; 另外一个算法本身需要进一步优化. 用户对应用实用性的认可也证明了本文方法有着一定的价值.

表 5 本文原型系统的用户评估结果 %

选项	满意	比较满意	较不满意	不满意
软件启动时间	93.75	6.25	0	0
界面美观	63.75	20.0	13.75	2.5
帮助提示	7.5	18.75	47.5	26.25
图像渲染时间	17.5	30.0	46.25	6.25
系统功能友好	25.0	52.5	16.25	6.25
系统流畅	61.25	20.0	17.5	1.25
图像渲染效果	25.0	53.75	18.75	2.5
实用性	12.5	65.0	13.75	8.75

4 结 语

本文提出了一种基于模糊色彩集分类的马赛克图像渲染技术, 可模仿艺术家创作思维, 快速渲染大量不同赋色策略方案的马赛克图片供给用户选择. 经验证, 本文提出的技术渲染效率较高, 赋色多样化且始终符合色彩的模糊主观感受, 较好地模拟了艺术家的模糊色彩思维.

今后将尝试把色彩调和与模糊色彩相结合, 以更符合人的色彩思维; 尝试在具有视觉等距特性的 Lab 空间中定义模糊色彩集; 开放用户自主进行模糊色彩赋色功能, 增强用户体验. 此外, 还将尝试将这种模糊色彩模型与其他 NPR 渲染技术结合, 以呈现更好的艺术家色彩思维效果.

参考文献(References):

[1] Chang Y H, Uchikawa K, Saito S. Example-based color styli-

zation based on categorical perception[C] //Proceedings of the 1st Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization. New York: ACM Press, 2004: 91-98

- [2] Chang Y, Saito S, Nakajima M. A framework for transfer colors based on the basic color categories[C] //Proceedings of Computer Graphics International. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2003: 176-181
- [3] Alarcón T E, Marroquín J L. Linguistic color image segmentation using a hierarchical Bayesian approach[J]. Color Research and Application, 2009, 34(4): 299-309
- [4] Wang W N, Yu Y L. Image emotional semantic query based on color semantic description[C] //Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005, 7: 4571-4576
- [5] Xie Hongsheng, Wang Lianguo, Sun Yufang. Application of fuzzy color histogram in content-based image retrieval[J]. Computer System and Application, 2009, 18(5): 139-143(in Chinese)
(解洪胜, 王连国, 孙玉芳. 模糊颜色直方图在基于内容的图像检索中的应用研究[J]. 计算机系统应用, 2009, 18(5): 139-143)
- [6] Liu Jiongzhou, Li Jituo, Lu Guodong. Color scheme design through color semantic and interactive genetic algorithm[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(5): 669-676(in Chinese)
(刘炯宙, 李基拓, 陆国栋. 色彩语义驱动的产品交互式遗传配色设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(5): 669-676)
- [7] Zhang Quan, Lu Changde, Yu Suihuai, et al. Color representation method based on multidimensional emotion-semantic space[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(2): 289-294(in Chinese)
(张全, 陆长德, 余隋怀, 等. 基于多维情感语义空间的色彩表征方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(2): 289-294)
- [8] Xu W. Drawing in the digital age: an observational method for artists and animators[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2012: 1-85
- [9] Zeng K, Zhao M T, Xiong C M, et al. From image parsing to painterly rendering[J]. ACM Transaction on Graphics, 2009, 29(1): Article No.2
- [10] Guo F, Peng H, Tang J. A novel method of converting photograph into Chinese ink painting[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2015, 10(3): 320-329
- [11] Zang Y, Huang H, Li C F. Artistic preprocessing for painterly rendering and image stylization[J]. The Visual Computer, 2014, 30(9): 969-979
- [12] Zhao Yefeng, Hu Taocheng, Peng Ren, et al. Extraction of theme colors from oil paintings aided by color harmony modules[J]. Journal of Computer-Aid Design & Computer Graphics, 2014, 26(10): 1576-1582(in Chinese)
(赵叶峰, 胡桃成, 彭韧, 等. 利用色彩和谐模式辅助提取油画主题色[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(10): 1576-1582)
- [13] Ren Qi, Xu Yingqing, Zhuang Yueting, et al. AutoColor: an automatic color scheme generating and authoring system[J]. Journal of Software, 2005, 16(5): 691-699(in Chinese)
(任琦, 徐迎庆, 庄越挺, 等. 面向办公应用的自动配色方

- 案创作与应用系统[J]. 软件学报, 2005, 16(5): 691-699)
- [14] Cohen-Or D, Sorkine O, Gal R, *et al.* Color harmonization[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2006: 624-630
- [15] Hu G S, Pan Z G, Zhang M M, *et al.* An interactive method for generating harmonious color schemes[J]. Color Research and Application, 2014, 39(1): 70-78
- [16] Wang Ke, Lu Changde, Yue Wande, *et al.* Color harmony system based on lab perceptual uniform color space[J]. Journal of North Western Polytechnical University, 2005, 22(6): 695-699 (in Chinese)
(王 可, 陆长德, 乐万德, 等. 基于 Lab 均匀色彩空间的色彩调和系统[J]. 西北工业大学学报, 2005, 22(6): 695-699)
- [17] Kim M H, Weyrich T, Kautz J. Modeling human color perception under extended luminance levels[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2009: Article No.27
- [18] Battiato S, Di Blasi G, Farinella G M, *et al.* Digital mosaic frameworks—an overview[J]. Computer Graphics Forum, 2007, 26(4): 794-812
- [19] Faustino G M, de Figueiredo L H. Simple adaptive mosaic effects[C] //Proceedings of the 18th Brazician Symposium on Computer Graphics and Image. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 315-322
- [20] Hausner A. Simulating decorative mosaics[C] //Proceedings of the 28th Annual Conferen on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 2001: 573-580
- [21] Han M H, Kang D W, Yoon K. Efficient paper mosaic rendering on mobile devices based on position-based tiling[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2014, 9(3): 549-556
- [22] Chen Zhonggui, Ouyang Yongsheng, Cao Juan. Feature-serving method for mosaic image generation[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2014, 26(4): 520-527(in Chinese)
(陈中贵, 欧阳永昇, 曹 娟. 特征保持的马赛克图像生成方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(4): 520-527)
- [23] Park J W, Yoon K H, Ryoo S T. Multi-layered stack mosaic with rotatable objects[M] //Tomoyuki N. Advances in Computer Graphics, vol 1. Heidelberg: Springer, 2006: 12-23
- [24] Kang D W, Seo S, Ryoo S, *et al.* A study on stackable mosaic generation for mobile devices[J]. Multimedia Tools and Applications, 2013, 63(1): 145-159
- [25] Choi Y S, Jung S, Kim J W, *et al.* Real-time video photomosaics with optimized image set and GPU[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2014, 9(3): 569-578
- [26] Wu Xuhong, Chen Zhaojiang. Research on image mosaic algorithm based on color transfer[J]. Computer Engineering, 2010, 36(12): 219-223(in Chinese)
(吴旭虹, 陈昭炯. 基于色彩传递的图像马赛克算法研究[J]. 计算机工程, 2010, 36(12): 219-223)
- [27] Berlin B, Kay P. Basic color terms: their Universality and Evolution[M]. Berkeley: University of California Press, 1969
- [28] Kelly K L, Judd D B. Color: universal language and dictionary of names[M]. US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1976
- [29] Soto-Hidalgo J M, Chamorro-Martínez J, Sánchez D. A new approach for defining a fuzzy color space[C] //Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2010: 1-6
- [30] Shewchuk J R. Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation[J]. Computational Geometry, 2002, 22(1/3): 21-74