

基于显著性加权随机优化的快速响应码美化方法

杨俊丰^{①②} 林亚平^{*①②} 欧 博^① 蒋军强^{①②} 李 强^{①②}

^①(湖南大学信息科学与工程学院 长沙 410082)

^②(湖南省可信系统与网络重点实验室 长沙 410082)

摘 要: 随着移动终端和移动互联网的发展,快速响应(QR)码被广泛运用于移动信息交互。但是,标准的 QR 码是由均匀分布的黑色与白色模块组成,外观类似噪声信号,缺乏视觉美感,限制了 QR 码的应用。针对此问题,该文提出一种提高 QR 码视觉效果的美化方法。该方法将给定的彩色图像进行显著性检测和半色调处理,得到相应的显著性矩阵和半色调图像,然后根据半色调图像上的网点分布,对 QR 码的模块分布进行优化。为了提高优化效率,该文提出一种显著性加权随机优化算法,将优化后的 QR 码和半色调图像进行融合,得到与半色调图像最相似的半色调 QR 码。在图像渲染阶段,该文提出一种基于二分搜索的色彩调整算法,得到具有色彩信息和视觉美感的彩色 QR 码。实验分析表明,该方法生成的 QR 码不仅保留了与标准 QR 码一样的抗遮挡、快速解码等特性,还有效地提升了视觉效果,具有很好的视觉吸引力。

关键词: 快速响应码; 视觉美感; 显著性; 加权随机抽样; 非系统编码

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)02-0289-09

DOI: 10.11999/JEIT170521

A Quick Response Code Beautification Method Based on Saliency Weighted Random Optimization

YANG Junfeng^{①②} LIN Yaping^{①②} OU Bo^① JIANG Junqiang^{①②} LI Qiang^{①②}

^①(Collage of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

^②(Hunan Key Laboratory of Dependable System and Networks, Changsha 410082, China)

Abstract: With the development of smart phones and mobile internet, Quick Response (QR) codes are widely applied to mobile information interaction. However, the appearance of the standard QR code is similar to the noise signal. It is lack of visual aesthetics, easy to damage the overall aesthetic of the publicity materials so that the promotional effect will be affected. To solve this problem, this paper proposes a beautification approach for embedding a color image in a QR code. At first, the method processes the given color image with saliency detection and halftoning techniques to acquire the corresponding saliency image and halftone image. Then, the modules distribution of QR code is optimized by according to the halftone image. In order to improve the optimization efficiency, a saliency weighted random sampling algorithm is proposed. Finally, a binary search based color adjustment algorithm is proposed in color rendering. Experimental results show that the color QR code generated by the proposed method can be correctly decoded. At the same time, it improves the visual appearance, increases the visual aesthetics, and possesses more visual appeal.

Key words: Quick Response (QR) code; Visual aesthetic; Saliency; Weighted random sampling; Non-systematic encoding

1 引言

快速响应(Quick Response, QR)码作为一种数

据信息的表现媒介,由于其简单、方便且准确的特点,被广泛的应用于物流、制造、零售、广告等行业,如网站访问、文档下载、支付等等。借助 QR 码,用户可以方便地获取数据信息,从而避免了在智能手机狭小屏幕上繁琐的输入。传统的 QR 码将信息转化为机器可读的图像并进行信息的传递,通过对图像的扫描解码获取信息。此外高质量的图像也能传递信息,如公司的 Logo,个人头像。但 QR 码生成的图像由均匀分布的黑色与白色模块组成,外观

收稿日期: 2017-05-31; 改回日期: 2017-10-27; 网络出版: 2017-12-11

*通信作者: 林亚平 yplin@hnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(61472125); 教育部-中国移动科研基金(MCM20122061)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61472125), The Ministry of Education-China Mobile Science Foundation (MCM20122061)

类似噪声信号,缺乏视觉美感。因此如何在不影响 QR 码解码的前提下,提高 QR 码的视觉质量成为目前的研究热点。

现有的 QR 码美化算法主要可以分为基于模块分布调整的美化方法和基于图像嵌入的美化方法。前者利用 QR 码中的填充码字不携带任何有效信息和改变填充码字并不影响正常编码和解码的特性,通过修改填充码字和纠错码字来达到美化效果。由于 QR 码可修改的填充码字和纠错码字数量是由信息码字数量决定,信息码字数量越少则可修改的填充码字和纠错码字越多,反之越少。因此这类方法的美化效果受到信息量的限制,而且不能携带特定的图像信息。基于图像嵌入的美化方法将特定的图像信息嵌入到 QR 码,不仅可以美化 QR 码,同时也能携带特定的图像信息。因此,本文主要研究如何将一张特定的图像嵌入到标准的 QR 码中。

基于图像嵌入的美化方法的难点在于如何在得到合法 QR 码的前提下使 QR 码与嵌入图像的视觉效果最接近。LIN 等人^[1]提出一种基于图像内容的优化 QR 码方法,但这种方法只适用于尺寸小的图片。LI 等人^[2]提出了结合文献[3]和显著性检测的方法,通过调整非显著性区域上的像素的亮度提升视觉效果。文献[4]结合图像的显著性检测技术和边缘检测技术确定优化区域,在重复非系统编码过程中,使用模拟退火优化算法有效地降低了显著性区域和边缘区域上的视觉失真,美化效果得到了很好的提升,但也使得算法耗时明显增加。文献[5,6]提出的方法部分改善了 QR 码的外观,但破坏了原有的纠错能力。文献[3,7,8]提出的方法提升了 QR 码的视觉效果,但嵌入图像上的视觉失真明显;文献[9]提出的方法较好地增加了 QR 码的视觉美感,但算法复杂度高。ZHANG 等人^[10]提出了基于 2 维高斯分布的美化方法,先根据 2 维高斯分布确定模块上每个像素的权重,权重越大则调整的幅度越大。文献[11,12]提出了彩色 QR 码的生成算法,但这些算法的性能很大程度上依赖于灰度阈值。近年来,一些基于半色调图像的 QR 码美化方法被陆续提出^[9,10],在这些算法中,嵌入图像被转换为半色调图像,然后根据半色调图像来调整像素。这些方法得到的彩色 QR 码视觉效果良好,但算法复杂度较高,耗时较长。

针对以上问题,本文提出一种高效的 QR 码美化方法。该方法从区域结构和色彩两方面来美化 QR 码,对于区域结构,结合图像显著性和半色调技术对 QR 码的模块分布进行优化,保留最大的图像显著区域。随后对每个模块进行色彩渲染,得到具有

色彩信息和视觉美感的彩色 QR 码。本文的主要贡献如下:(1)现有的 QR 码美化方法将显著性区域作为优化的目标,而没有在优化过程中考虑显著性区域的作用,不同于这些方法,本文首先将显著性区域与半色调图像结合对 QR 码的模块分布进行优化,然后对区域进行显著性加权处理,并提出了一种基于显著性加权随机抽样优化方法,缩小了优化目标函数范围,加速了优化迭代过程。(2)在色彩渲染阶段,提出了一种基于二分搜索的色彩调整算法,实验表明本文提出的 QR 码美化方法在视觉和编码效率上均优于其他同类算法。

2 标准 QR 码简介

QR 码由黑白模块组成,模块是其中的最小单位。其中黑色模块表示二进制 1,白色模块表示二进制 0。标准的 QR 码的编码过程主要有以下 5 个步骤:(1)数据编码:将数据转换为包含结束符和填充字段的二进制序列。(2)纠错编码:将数据码字序列分块,并生成对应的纠错码,将纠错码添加到对应的数据码序列后。(3)模块放置:构造空白的方形矩阵,在功能图形区域相应的位置分别布置位置探测图形、定位图形以及校正图形。(4)掩膜处理:在标准 QR 码指定的 8 种掩膜处理方式中找到使黑白模块分布最均匀的最优掩膜方式。(5)生成图像:生成 QR 码必要的格式信息和版本信息,并将生成的模块绘制成 QR 码图像。

3 基于显著性加权随机优化的 QR 美化方法

QR 码中编码区域主要由数据码字和纠错码字组成,其中数据码字可以分为信息码字和填充码字。纠错码字是采用系统编码方式通过数据码字计算得来,并排列在数据码字之后。数据码字序列和纠错码字序列按块交替排列,一个标准的 n 位的 RS 码 (n, k, t) 由 k 位数据码和 t 位的纠错码组成,其中 k 位的数据码包含信息码,结束符和填充码。标准的解码算法并未对填充码字进行检查,任意的填充码字都不会影响 QR 码的正确译码。在不改变信息码的前提下,通过改变填充码和纠错码可以得到与图像视觉效果最接近的 QR 码。因此,QR 码美化可以被转换成一个优化问题,由于 RS 编码的算术运算定义在有限域 F ,因此通常的凸优化方法并不适用,文献[4]使用模拟退火算法搜索最优解,能得到较高的视觉效果,但是算法复杂度大大提高。

QR 码美化的目的是提高 QR 码的视觉美感,基于此,本文提出基于显著性加权随机抽样优化方法提高 QR 美化算法的编码速度,首先通过对显著性区域进行加权处理,在每一次搜索迭代过程中,

权重值决定初始值的选择概率，权重值越高，概率越高。通过加权随机抽样算法按权重概率地选取数据码字集合缩小了优化目标函数范围，加速了优化迭代过程，同时降低了陷入局部最优的概率。

本文方法的主要流程如图 1 所示。该方法主要分为 4 个步骤：第 1 步，对给定的彩色图像进行显著性区域检测和半色调处理，得到相应的显著性矩阵和半色调图像；第 2 步，根据码字分布规则，结合显著性矩阵和半色调图像分别计算码字的权重和采样值；第 3 步，结合码字的权值序列，对采样得到的码字序列进行加权随机抽样优化；最后，根据彩色图像和半色调图像，确定黑白模块的灰度阈值，调整每个模块的亮度，并对每个模块进行色彩渲染。

3.1 图像显著性区域检测及半色调处理

美化后的 QR 码保留显著性区域越大，给人的视觉感知越好，基于这个思想，我们首先对图像进行显著性检测，然后根据检测结果将图像分割为前景区域(显著性区域)和背景区域(非显著性区域)，最后根据显著性对图像的每个像素进行加权处理。图像显著性区域指的是图像中最具有视觉信息的前景区域。经过近 20 年的发展，现已有多种显著性模型^[13-16]广泛应用于图像分割、目标识别、图像检索、视频追踪等多个领域。图像的显著性区域检测问题可以转换为图像分割问题，即把图像分割成两个部分：显著性的前景区域和非显著性的背景区域。就显著性计算单元的粒度而言，可以分为基于像素级和基于超像素或更大区域级。基于超像素或更大区域级的显著性检测虽然能更加精确地分割显著性前景区域^[15,16]，但是其算法复杂度较高，不能满足 QR 码实时性的需求，因此本文采用基于像素级的显著性检测，结合最大内间差阈值法来分割显著性前景和背景。

本文采用 Spectral Residual^[17]对给定图像进行

显著性区域检测，得到相应的显著性矩阵 p 。由于 p 是一个归一化的灰度矩阵，因此我们需要将其转换为前景区域和背景区域的二值矩阵。首先使用最大内间差算法计算最佳阈值 G 。对于显著性矩阵 p ，其内间方差可以定义为

$$\sigma = \omega_0 \times \omega_1 \times (\mu_0 - \mu_1)^2 \quad (1)$$

式中， σ 为内间方差， ω_0 和 ω_1 分别为前景区域和背景区域占图像的比例， μ_0 和 μ_1 分别为前景区域和背景区域的显著平均值。得到最大类间方差的阈值即为最优的全局阈值。然后使用最优阈值将图像分割为前景区域和背景区域，定义如式(2)：

$$S(i, j) = \begin{cases} 1, & p(i, j) > G \\ 0, & p(i, j) \leq G \end{cases} \quad (2)$$

式中， G 为阈值，大于 G 的为前景区域标记为 1，小于 G 的为背景区域标记为 0。

标准的 QR 码符号被定义成二值化的形式，只包含黑色或白色模块，所以标准的解码算法会在译码前将输入的彩色 QR 码图像灰度化后再阈值化成二值图像。数字半色调技术即是连续灰度图像转化成只含 0 和 1 两种像素值的图像的技术，利用人眼的低通特性，当在一定距离下观察时，人眼将图像中空间上接近的部分视为一个整体，不能辨别出半色调图像包含的细小单元，以至于产生连续色调的感觉。常见的数字半色调方法可以分为有序抖动算法、误差扩散算法、迭代法 3 类^[18]，其中误差扩散算法因能较好的权衡图像质量和计算复杂度之间的关系^[19]，在实际应用中被广泛使用，本文采用误差扩散算法将嵌入图像转换为二值矩阵 B ，该矩阵按式(3)计算得到。

$$B(i, j) = \begin{cases} 0, & l(i, j) \leq T \\ 1, & l(i, j) > T \end{cases} \quad (3)$$

$$l(i, j) = x(i, j) + x'(i, j)$$

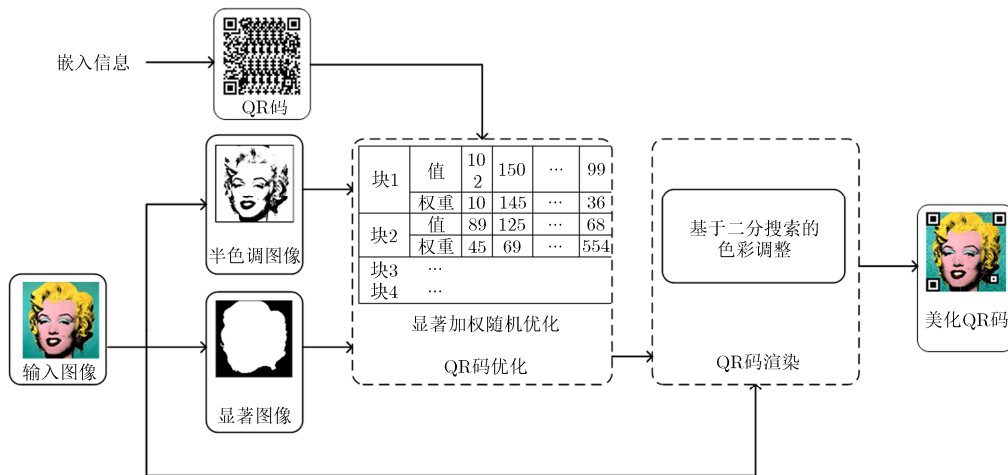


图 1 算法流程图

其中, $x(i, j)$ 为当前处理的像素点, $x'(i, j)$ 为邻域误差, $l(i, j)$ 为邻域已处理像素传递的误差总和, T 表示该像素点所采用的阈值。

3.2 统计码字的值及权重

结合彩色图像的二值矩阵及显著性矩阵分别计算码字的值以及权重。标准 QR 码规定了模块的宽度和高度必须一致, 本文用 B_a 来表示模块的尺寸。为了保证解码的鲁棒性, 每个模块一般会占据 2×2 以上的像素区域。由于一个模块对应多个像素, 因而需要对每个模块的取值进行采样。本文统计模块在二值矩阵上对应 $d \times d$ 窗口中黑色像素的个数, 如果超过窗口大小的一半, 该模块即采样为 1, 否则采样为 0, 计算公式如式(4)和式(5):

$$N_{x,y} = \sum_{(i,j) \in R_{x,y}} B(i,j) \quad (4)$$

$$M_{x,y} = \begin{cases} 1, & N_{x,y} > \frac{d \times d}{2} \\ 0, & N_{x,y} \leq \frac{d \times d}{2} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $M_{x,y}$ 表示在 QR 码符号的模块阵列中位于 (x, y) 的模块, $R_{x,y}$ 为该模块在二值矩阵上对应的像素区域, $N_{x,y}$ 为相应像素区域上黑色像素的个数。由于二值矩阵中黑色像素的值为 1, 白色像素的值为 0, 累加区域上所有值即为黑色像素的个数。为消除掩模处理过程中对彩色图像视觉信息的干扰, 对采样后的模块再进行掩膜处理得到新的模块值。每个码字由 8 个相邻的模块组成, 这 8 个相邻的模块组成的 8 位二进制即是该码字的值。

码字的权重反应了码字与图像显著性区域的关联性。码字在显著性矩阵上相应区域中显著性区域的像素越多, 则该码字的权重越大。计算公式为

$$W_c = \sum_{(i,j) \in R_c} S(i,j) + 1 \quad (6)$$

其中, R_c 为码字 c 在显著性矩阵上相应的像素区域, W_c 为其权重值。在显著性矩阵中, 1 表示前景像素, 0 表示背景像素, 所以对码字区域上的显著性标记值求和即能得到前景像素数量。式(6)中的常量 1 是为了避免码字完全位于背景区域时权重为 0。对于模块宽度为 d 的 QR 码, 码字的权重取值范围为 $[1, d \times d \times 8 + 1]$ 。

3.3 基于加权随机抽样优化方法

根据 QR 码版本和纠错等级所对应码字分块规则, 将取样得到的原始码字序列划分成 m 个码字块, 用 $b_a(n_a, k_a)$ 表示 ($1 \leq a \leq m$, n_a 为该块的总码字数, k_a 为数据码字数)。为确保最后生成的 QR 码能够被正确解码, 需要对每一个码字块 b_a 进行非系统编码修正。经过非系统编码修正后的新码字块 B_a

与原始的码字块 b_a 存在一定的差异性, 从而引起生成 QR 码图像的视觉失真。定义视觉失真量化函数如式(7):

$$E(B_a, b_a) = \lambda_1 \cdot D_h(B_a, b_a | S = 1) + \lambda_2 \cdot D_h(B_a, b_a | S = 0) \quad (7)$$

其中, D_h 表示两个码字序列的汉明距离, λ_1 为编码后的新码字序列 B_a 与原码字序列 b_a 在显著性区域上的汉明距离的权重系数, λ_2 为非显著性区域上的权重系数。为了得到可解码的美化 QR 码, QR 码符号的功能图形、格式信息和版本信息区域上的模块在美化过程中不能被改变, 因此生成的 QR 码在这些模块区域上的视觉失真固定不变的, 加之每个码字块之间的编码是独立的, 所以对于给定的图像 I , 所生成的 QR 码图像的视觉失真函数定义如式(8):

$$E(I, I_Q) = \sum_{a=1}^m E(B_a, b_a) + C \quad (8)$$

其中, C 为常量, 表示功能图形、格式信息和版本信息区域上的视觉失真。从式(8)中可以看出, 降低每个码字块区域上的局部视觉失真, 即能够降低 QR 码图像的整体视觉失真。QR 码美化的目的在于在确保生成的 QR 码在能被正确解码的前提下得到最佳的视觉效果, 因此, QR 码美化可以被转换成一个优化问题, 定义如式(9):

$$\min_{R_c} E(I, I_Q) \quad (9)$$

其中, I 是给定的图像, I_Q 是生成的 QR 码, $E(\cdot)$ 是视觉失真函数。由于 RS 编码的算术运算定义在有限域 F , 因此通常的凸优化方法并不适用, 文献[4]使用模拟退火算法在 R_c 空间内搜索最优解, 在一定程度上改善了视觉, 但是算法复杂度过高。针对这个问题, 本文提出基于显著性加权随机优化方法提高 QR 美化算法的编码速度, 主要由码字序列优化算法和加权随机抽样算法两部分组成, 通过加权随机抽样算法按权重概率地选取数据码字集合, 使得每次的迭代优化过程能够有效地控制图像在显著性区域上的视觉失真, 同时能够加快图像完整区域的视觉失真收敛。码字序列优化算法的详细描述如下: 首先使用大顶堆排序算法选取前 k_a 个权重最高的码字, 计算初始的码字块 B_a 以及相应的视觉失真度作为当前最小的视觉失真度, 然后结合加权随机抽样算法迭代搜索最优的码字块 B_a 。由于码字块的编码是互相独立的, 为了提高算法的运行效率, 在运算过程中, 可以对 m 个码字块进行并行计算。算法整体结构如表 1 的算法 1 所示。

表 1 码字序列优化算法

算法 1 码字序列优化算法	
输入：	原始码字块序列 b_a ，码字权重序列 w ，数据码字数量 k_a ，搜索次数 N
输出：	最优的合法码字块 B_a
步骤 1	$D_c = \text{findTopK}(b_a, w, k_a)$ 使用大项堆排序算法选取前 k_a 个权重最高的码字；
步骤 2	$B_a = \text{nonSystematicEncoding}(D_c)$ 非系统编码得到初始的合法码字序列 B_a ；
步骤 3	根据式(8)计算当前视觉失真度 $E(I, I_Q)$ ；
步骤 4	设置迭代次数 $T_{\text{iter}} = 100$ ；
步骤 5	while($k < T_{\text{iter}}$ and $\text{minEnergy} > 0$) do
	$R_c = \text{weightedRandomSample}(b_a, w, k_a)$ 加权随机抽样选取 k_a 个码字
	重复步骤 2: $B_k = \text{nonSystematicEncoding}(R_c)$
	使用 B_k 重复步骤 3 得到 E_k
	if $E_k < \text{minEnergy}$ then
	$B_a = B_k$
	$\text{minEnergy} = E_k$
	end if
	end while

加权随机抽样算法的详细描述如下：每一次码字的选取分为 3 个步骤：步骤 1：从剩余码字集合中等概率地选择一个码字 c_i 。步骤 2：产生一个在 0 到剩余码字权重之和 totalWeight 之间的随机权重数 weight 。步骤 3：如果随机权重数 weight 小于码字权重 $w(c_i)$ ，则将该码字添加到数据码字集合，并把它从剩余码字集合中剔除，避免重复选择；否则返回步骤 1。步骤 3 中码字 c_i 被选取的概率为

$$P_{c_i} = \frac{1}{n} \cdot \frac{w(c_i)}{\text{totalWeight}} \quad (10)$$

其中， n 为剩余码字数量， $1/n$ 为步骤 1 中选择码字 c_i 的概率， $w(c_i)/\text{totalWeight}$ 为步骤 2 中产生的随机数 weight 小于 $w(c_i)$ 的概率。在每一次码字选取中， n 和 weight 是不变的，只和码字自身的权重相关，因此本算法在选择数据码字集合时，能够保证权重越大的码字被选取的概率越大，从而使得算法 1 中的优化搜索很好地与显著性结合起来。码字块区域上的视觉失真度是通过式(7)计算得到，为确保最后生成的彩色 QR 码在显著性区域上的视觉失真较少，式(7)中的权重系数 λ_1 的值要大于 λ_2 。

3.4 模块灰度调整及色彩渲染

色彩变化能够有效地提高图像对人的吸引力，因此，在得到了优化后的 QR 码图像后，对其进行色彩渲染。在模块渲染过程中，为了使彩色 QR 码图像能被正确解码，渲染后的彩色图像的灰度值必

须与像素的原始亮度一致。RGB 与灰度的转换公式定义为

$$\text{gray} = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (11)$$

从式(11)中可以看出，在保证灰度值不变的情况下，通过优化模块渲染后的 QR 码图像与背景图像 R, G, B 3 个通道的值可以得到与背景图像最接近的色彩分布。为了得到最优的色彩分布，本文通过 HSL 色彩模式来确定每个模块像素对应的 R, G, B 通道的值。首先，将嵌入图像从 RGB 色彩空间转换到 HSL 色彩空间，为了保障生成的 QR 码图像的最优色彩分布，保持 HSL 空间中的色相分量和饱和度分量不变，通过调整亮度分量 L 使生成的彩色 QR 码与嵌入图像的色彩分布最为相似。亮度分量 L 为

$$L = \frac{\min + \max}{2} \quad (12)$$

其中， \min 和 \max 分别为 R, G, B 3 个颜色通道值的最小值和最大值。由于 RGB 色彩模式中每个颜色通道取值范围为 $[0, 255]$ ，所以 L 在归一化前的取值为 $[0, 510]$ 区间的整数。结合亮度与色彩灰度之间的单调线性关系以及亮度归一化前的取值范围，本文设计了一种基于二分搜索的色彩调整算法(表 2)。该算法可以更快地确定模块像素的渲染色彩。

4 实验与分析

为验证本文提出的美化方法的有效性，选取了 50 张彩色图像作为实验数据，从主观视觉效果和客

表 2 基于二分搜索的色彩调整算法

算法 2 基于二分搜索的色彩调整算法	
输入：	初始颜色 (R,G,B)，目标灰度 G ；
输出：	渲染色彩 (R',G',B')
步骤 1	(H,S,L) = transform(R,G,B) //把初始颜色转换成相应的 HSL 颜色
步骤 2	初始化 left = 0; right = 510
步骤 3	while left < right do
	mid = (left+right)/2
	$L' = \text{mid}/510$ //计算当前中值所对应的亮度
	$(R',G',B') = \text{backward_transform}(H,S,L')$ //计算 (H,S,L') 所对应的 RGB 颜色
	根据式(10)计算新的 RGB 颜色的灰度 gray
	if gray = G then
	return (R',G',B')
	else if gray < G then
	left = mid + 1
	else
	right = left
	end if
	end while

观评价两方面对其进行了验证。本文实验均是在操作系统为 64 位的 Windows 10 专业版的计算机上进行, 硬件配置 Intel(R) Core(TM) i7 处理器、大小为 10 GB 的内存以及 4 个安卓智能手机(小米 4、魅蓝 note、HTC One 和 华为 荣耀 4C), 编程语言为 Java, 标准 QR 码符号版本为 5, 纠错等级为 L 。实验中生成的 QR 码图像大小为 333×333 像素。在对比实验中, 与文献[2]方法、文献[4]方法以及文献[10]的方法进行了视觉质量对比。其中的编码信息为“<http://www.hnu.edu.cn>”。

4.1 性能检测实验

主观视觉效果: 为了验证本文算法的主观视觉效果, 我们邀请了 30 个人(22 名男性, 8 名女性)对生成的 QR 图像与原始图像的相似度进行评价, 相似度分为了 10 级, 1 分为相似度最低, 10 分为相似度最高。表 3 给出了与图 2 中对应的图片的主观相似度对比实验结果, 实验结果显示本文算法在主观视觉效果上明显优于其他算法。

客观评价: 为了量化分析对比结果, 本文用结构相似性(SSIM)^[20]来评价计算美化后的 QR 码图像与原始图像之间的相似性。SSIM 通过计算图像的局部亮度、对比度和结构相似度来评价图像质量。对于给定的参考图像 r 和对应的失真图像 d , 图像局部质量评价 LSSIM 的定义如下:

$$LSSIM(r_i, d_i) = [l(r_i, d_i)]^\alpha \cdot [c(r_i, d_i)]^\beta \cdot [s(r_i, d_i)]^\gamma \quad (13)$$

其中, $l(r_i, d_i)$ 表示局部强度相似度, $c(r_i, d_i)$ 表示局部对比度相似度, $s(r_i, d_i)$ 表示局部结构相似度,

表 3 主观相似度对比实验结果

图像编号	文献[2]	文献[4]	文献[10]	本文方法
图 2(a)	5.42	3.57	6.85	9.00
图 2(b)	5.14	2.71	6.42	9.14
图 2(c)	5.28	3.50	6.42	8.28
图 2(d)	5.85	3.42	6.71	8.57
图 2(e)	5.57	2.92	7.42	8.85
图 2(f)	5.57	4.00	7.14	9.14
图 2(g)	5.71	4.00	7.28	9.00
平均值	5.51	3.44	6.89	8.85

$\alpha = \beta = \lambda = 1$ 。对局部 LSSIM 取平均得到全局 SSIM, 定义如式(14):

$$SSIM(r, d) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M LSSIM(r_i, d_i) \quad (14)$$

部分评价结果如表 4 所示。表 4 列出了图 2(a)-图 2(g)7 张彩色图像与其对应的彩色 QR 码图像之间的 SSIM 值, 从 SSIM 值的比较结果可以看出, 相比文献[2]、文献[4]以及文献[10]所提出的方法, 本文方法生成的彩色 QR 码图像与原彩色图像的结构相似度更高, 具有更好的视觉美感, 达到了美化效果。

4.2 解码实验

为验证本文算法所生成的彩色 QR 码解码鲁棒性, 采用不同的手机和扫码应用对所生成的 50 张彩色 QR 码进行扫码实验。对于一次扫码实验, 如果

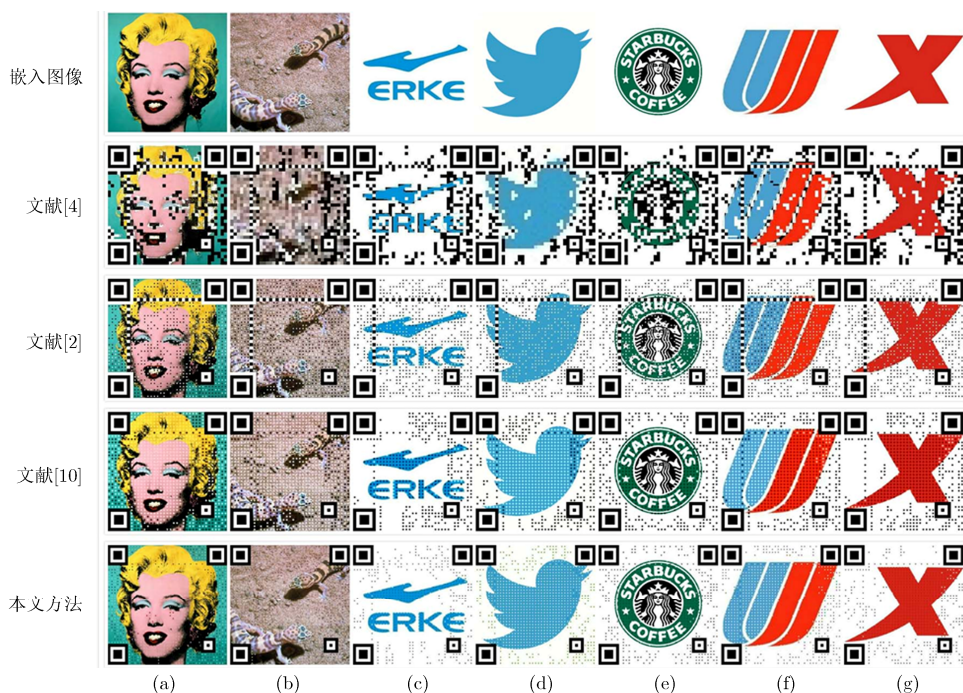


图 2 QR 美化结果对比图

表 4 客观相似度对比实验结果

图像编号	文献[2]	文献[4]	文献[10]	本文方法
图 2(a)	0.5731	0.1332	0.5114	0.6545
图 2(b)	0.3981	0.1089	0.3744	0.4660
图 2(c)	0.2814	0.1001	0.3049	0.4694
图 2(d)	0.3207	0.2271	0.6659	0.7292
图 2(e)	0.5826	0.1365	0.4657	0.5911
图 2(f)	0.4107	0.2579	0.5738	0.6678
图 2(g)	0.4541	0.1332	0.5114	0.6545
平均值	0.4315	0.1818	0.5157	0.6269

2 s 以内完成解码则判定为解码成功，否则解码失败。实验统计结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出，除了 I-nigma 和 HTC One 手机上的 QR 码扫描器上没有全部解码成功(解码成功率分别为 94%和 98%)，本文算法生成的 QR 码在被其他解码器解码的成功率均为 100%。

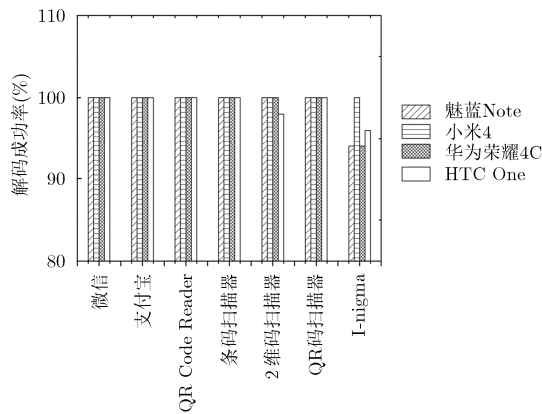


图 3 在不同手机和应用上的解码成功率

为测试本文方法所生成的彩色 QR 码对噪声干扰的鲁棒性，我们在生成的 50 张彩色 QR 码添加不同强度的高斯噪声。使用的高斯噪声的均值为 0，方差在 0.05 与 0.20 之间。图 4 为添加了不同强度的高斯噪声的彩色 QR 码。表 5 为在不同强度的高斯噪声的干扰下，彩色 QR 码的解码成功率。从表 5 中可以看出，随着高斯噪声的强度增加，彩色 QR 码的解码成功率降低。解码成功率降低的原因在于高斯噪声破坏了黑白模块的结构，影响了位置探测图形的检测和定位，造成 QR 码符号无法定位或者数据码字被错误采样。但当高斯噪声的方差 δ 在 0.05 以下时，所有的彩色 QR 码都能够被正确解码。

表 5 不同高斯噪声强度的 QR 码解码成功率

噪声方差	0.05	0.10	0.15	0.20
成功率(%)	100	74	48	26

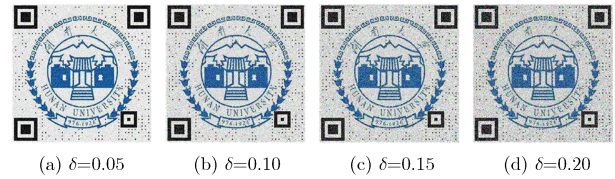


图 4 本文方法在不同高斯噪声强度下的生成的 QR 码

4.3 算法计算时间实验

为了验证本文算法的高效性，分析了本文算法的时间开销。实验计算 50 张图像的平均时间开销，为了详细的分析算法的时间开销，将算法分为标准 QR 码编码、QR 码优化和颜色渲染 3 个阶段，分别计算这 3 个阶段的平均计算时间，结果如表 6。从表 6 中可以看出，算法的主要时间开销在优化阶段。同时，图 5 给出了本文算法与标准 QR 码、文献[2]、文献[4]和文献[10]的运行时间和 SSIM 性能比较，从图 5 中可以看出，标准 QR 码、文献[2]和文献[4]的计算时间均低于本文算法，但是这 3 种方法的视觉效果均远低于本文算法。文献[10]的方法的视觉效果与本文方法相近，但是其运行时间大大高于本文算法。

表 6 本文方法计算时间分析

方法	标准 QR 码编码	QR 码优化	颜色渲染	总时间
时间(s)	0.087	0.141	0.063	0.291
时间比(%)	29.8	48.4	21.8	100

4.4 半色调阈值选择策略

半色调的阈值 G (式(2))的选取直接影响输出半色调图像的视觉质量，因此选择合适的 T 能有效的提高 QR 码图像的视觉美感。图 6 中给出了不同的阈值 T 与其对应生成的半色调图像质量的关系。其中，使用 SSIM 来量化图像质量，SSIM 值越大则图像质量越高。观察发现，当 T 值较小的时，SSIM 值较小，这是因为当阈值较小时半色调图像会丢失大量的结构信息，而当 T 值过大的时候，SSIM 值也会变小，这是因为当阈值过大时产生了新的噪声。因此选择合适的 T 值能有效的提升输出图像的视觉美感。本文使用基于图像质量的阈值选择策略，选择输出图像质量最高的阈值 T 。对于输入图像 R ，美化 QR 码图像定义为 D ，使用 SSIM 作为图像质量评价的指标，SSIM 的值越大，表示图像质量越高，美化 QR 码的图像质量定义为

$$SSIM(R, D) = \frac{\sum_{i=1}^{k_1} LSSIM(R_i, D_i) + \sum_{j=1}^{k_2} LSSIM(R_j, D_j)}{M} \quad (15)$$

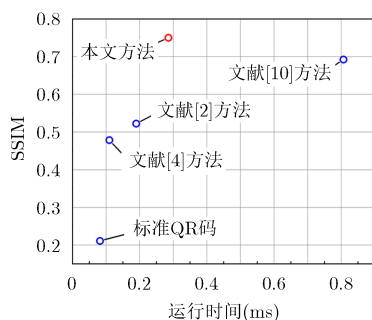
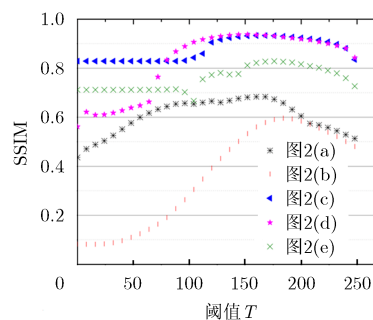


图5 本文方法与其他4种QR编码算法比较

图6 阈值 T 与半色调图像 SSIM 的关系

其中, k_1 表示 QR 系统编码所占的像素, k_2 表示剩余的半色调图像的像素, $M = k_1 + k_2$, $LSSIM(\cdot)$ 是局部结构相似度函数, 具体定义见式(13)。 k_1 部分由 QR 系统编码确定, 与 T 值无关, k_2 部分与 T 值相关, 要得到最大的图像质量值, 也就是最大化 k_2 部分的图像质量, 因此最大化半色调图像的质量能近似得到图像质量最高的美化 QR 码图像。

5 结束语

针对标准 QR 码缺乏视觉美感信息的缺点, 本文提出了一种彩色图像与标准 QR 码混合的美化方法, 通过加权随机抽样算法按权重概率地选取数据码字集合, 来使得每次的迭代优化过程能够有效地控制图像在显著性区域上的视觉失真, 同时能够加快图像完整区域的视觉失真收敛。实验结果表明, 对比标准的 QR 码, 在不破坏其自身的纠错容量的前提下, 本文方法生成的彩色 QR 码不仅可被常见的扫码应用正确解码, 而且包含美感信息, 更具有视觉吸引力。

本文算法虽然对 QR 的美化取得了良好的效果, 但是仍然存在一些问题需要解决。首先, 本文使用的显著性区域检测方法是基于像素的, 当显著对象表现不均匀的时候, 尤其是与背景具有相似表现的时候, 现有的方法倾向于将显著对象部分区域高亮, 而不是整个显著对象区域。利用超像素或者更大的区域作为计算单元能更精确地分割显著性区域, 因此设计一种高效的基于超像素或区域的显著性区域检测算法能进一步提高 QR 码的美化效果。现有的 QR 码美化算法的优化过程只考虑了图像的结构信息, 没有考虑色彩信息, 色彩渲染都是在优化以后进行, 在优化过程中同时考虑结构和色彩信息也是未来的一个研究方向。

参考文献

[1] LIN Yishan, LUO Shengjie, and CHEN Bingyu. Artistic QR code embellishment[J]. *Computer Graphics Forum*, 2013,

32(7): 137–146. doi: 10.1111/cgf.12221.

- [2] LI Li, QIU Jinxia, LU Jianfeng, *et al.* An aesthetic QR code solution based on error correction mechanism[J]. *Journal of Systems and Software*, 2015, 116(C): 85–94. doi: 10.1016/j.jss.2015.07.009.
- [3] NEVO A. Visualead[OL]. <http://www.visualead.com/>, 2013.
- [4] LIN Y H, CHANG Y P, and WU J L. Appearance-based QR code beautifier[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2013, 15(8): 2198–2207. doi: 10.1109/TMM.2013.2271745.
- [5] ONO S, MORINAGA K, and NAKAYAMA S. Animated two-dimensional barcode generation using optimization algorithms[J]. *Scis*, 2009, 2008: 1232–1237. doi: 10.14864/softscis.2008.0.1232.0.
- [6] ONO S, MORINAGA K, and NAKAYAMA S. Barcode design by evolutionary computation[J]. *Artificial Life and Robotics*, 2008, 13(1): 238–241. doi: 10.1007/s10015-008-0587-4.
- [7] ONO S, MORINAGA K, and NAKAYAMA S. Two-dimensional barcode decoration based on real-coded genetic algorithm[C]. 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE, 2008: 1068–1073.
- [8] Denso Wave Inc. Logoq[OL]. <http://www.qrcode.com/en/codes/logoq.html>, 2013.
- [9] GARATEGUY G J, ARCE G R, LAU D L, *et al.* QR images: Optimized image embedding in QR codes[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(7): 2842–2853. doi: 10.1109/TIP.2014.2321501.
- [10] ZHANG Y, DENG S, LIU Z, *et al.* Aesthetic QR codes based on two-stage image blending[C]. International Conference on Multimedia Modeling. Springer International Publishing, Sydney, Australia, 2015: 183–194. doi: 10.1007/978-3-319-14442-9_16.
- [11] LIN S S, HU M C, LEE C H, *et al.* Efficient QR code beautification with high quality visual content[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2015, 17(9): 1515–1524. doi: 10.1109/TMM.2015.2437711.
- [12] KURIBAYASHI M and MORII M. Enrichment of visual

- appearance of aesthetic QR code[C]. International Workshop on Digital Watermarking. Tokyo, Japan, 2015: 220-231. doi: 10.1007/978-3-319-31960-5_18.
- [13] 罗会兰, 万成涛, 孔繁胜. 基于 KL 散度及多尺度融合的显著性区域检测算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(7): 1594-1601. doi: 10.11999/JEIT151145.
- LUO Huilan, WAN Chengtao, and KONG Fansheng. Salient region detection algorithm via KL divergence and multi-scale merging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(7): 1594-1601 doi: 10.11999/JEIT151145.
- [14] 徐威, 唐振民. 融合相位一致性与二维主成分分析的视觉显著性预测[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(9): 2089-2096. doi: 10.11999/JEIT141478.
- XU Wei and TANG Zhenmin. Integrating phase congruency and two-dimensional principal component analysis for visual saliency prediction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(9): 2089-2096. doi: 10.11999/JEIT141478.
- [15] 唐红梅, 吴士婧, 郭迎春, 等. 自适应阈值分割与局部背景线索结合的显著性检测[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(7): 1592-1598. doi: 10.11999/JEIT160984.
- TANG Hongmei, WU Shijing, GUO Yingchun *et al.* Saliency detection based on adaptive threshold segmentation and local background clues[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(7): 1592-1598. doi: 10.11999/JEIT160984.
- [16] 蒋寓文, 谭乐怡, 王守觉. 选择性背景优先的显著性检测模型[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(1): 130-136. doi: 10.11999/JEIT140119.
- JIANG Yuwen, TAN Leyi, and WANG Shoujue. Saliency detected model based on selective edges prior[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(1): 130-136. doi: 10.11999/JEIT140119.
- [17] HOU X and ZHANG L. Saliency detection: A spectral residual approach[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Minneapolis, Minnesota, USA, 2007: 1-8.
- [18] LIU Y F and GUO J M. Dot-diffused halftoning with improved homogeneity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(11): 4581-4591. doi: 10.1109/TIP.2015.2470599.
- [19] WANG Z, ARCE G R, and CRESCENZO G D. Halftone visual cryptography via error diffusion[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2009, 4(3): 383-396. doi: 10.1109/TIFS.2009.2024721.
- [20] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612. doi: 10.1109/TIP.2003.819861.
- 杨俊丰: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为图像处理、计算机视觉.
- 林亚平: 男, 1955 年生, 教授、博士生导师, 研究方向为网络安全、云计算安全、图像处理.
- 欧 博: 男, 1985 年生, 博士, 研究方向为图像处理、信息隐藏.
- 蒋军强: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为云计算、并行计算.
- 李 强: 男, 1990 年生, 硕士, 研究方向为图像处理.