

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.01.012

# 基于查找表的彩色逆半调改进方法

李永前, 张二虎

(西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为克服基于查找表的逆半调方法生成的连续调图像质量不高的问题,提出一种改进的基于查找表和基于高斯滤波相融合的逆半调方法。首先,对于查找表中空值项拟合不够准确的问题,提出基于超限学习机的空值项拟合模型;其次,针对最优模板的选择问题,结合粒子群优化方法寻求最优模板,优化时考虑了图像像素与其邻域像素的相关性,使求得的最优模板不仅有相对位置关系,而且也加入了相对顺序;最后,为解决基于查找表方法生成的连续调图像在平缓部分存在噪声的问题,将改进的基于查找表的和基于高斯滤波的逆半调结果相融合,实现了彩色图像的逆半调。实验结果表明,最终的逆半调图像不仅在图像的边缘部分具有较好的细节,而且在图像的平缓区域具有较好的平滑特性。

**关键词:** 查找表; 超限学习机; 粒子群优化; 高斯滤波; 彩色逆半调

**中图分类号:** TP391.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2019)01-0073-07

## An improved color inverse halftoning method based on lookup-table

LI Yongqian, ZHANG Erhu

(School of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** To improve the quality of a continuous-tone image generated by the inverse halftoning method based on look-up table (LUT), a novel inverse halftoning method is proposed by fusing the modified look-up table method with the Gaussian filtering method. First, with regard to the problem of the inaccurate estimation of the null terms in look-up table, an estimated model based on the extreme learning machine(ELM) is presented. Second, in view of the selection of the optimal template, the particle swarm optimization method is used to find out the optimal template. The optimization takes into account the correlation between the image pixel and its neighborhood pixels, and thus the obtained optimal template not only has the relative position relationship, but also adds the relative order relationship. Finally, to remove noise existing in the smooth area of the image generated by the improved look-up table method, a fusion method is proposed by combining the improved look-up method with the Gaussian filtering method. The experimental results show that the final inverse halftoning image not only has better detail in the edge of the image, but also has better smoothness in the flat region of the image.

**Key words:** LUT; ELM; PSO; Gaussian filtering; color inverse halftoning

半调技术被广泛应用于印刷、出版及电子显示等领域,它是将连续调图像转换为二值图像的一项技术,转换后的二值图像在一定距离观察下可近似为连续调图像。由于半调图像仅包含 0 或 1 两个阶

调,而现有的图像处理技术大多是针对连续调图像的,因此,如何实现半调图像的连续调恢复,即逆半调技术,成为了数字印前系统、半调图像转换加网、数字化档案管理、印刷图像分类识别等具体应用领

**收稿日期:** 2018-01-29

**基金项目:** 陕西省自然科学基金重点资助项目(2017JZ020);西安市科技计划资助项目(2017080CG/RC043(XALG020))

**作者简介:** 李永前,男,硕士生,研究方向为图像处理。E-mail:2287229899@qq.com

**通讯作者:** 张二虎,男,教授,博导,博士,研究方向为图像处理、模式识别与智能信息处理。E-mail:eh-zhang@xaut.edu.cn

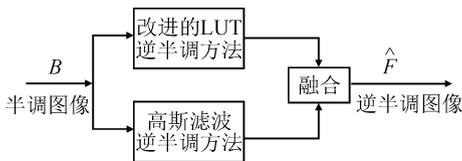
域的重要研究课题。

逆半调技术的研究始于 20 世纪 90 年代<sup>[1]</sup>,按照其实现原理,可分为以下几类:滤波法、反褶积法、迭代法、机器学习法、矢量法等<sup>[2]</sup>。在现有的方法中,基于查找表(Lookup-table,简称 LUT)的逆半调方法属于机器学习法<sup>[3]</sup>,它通过训练集建立半调图像值与连续调图像值之间的查找表,然后通过查表的方法重构出连续调图像。相对于其它逆半调方法,该方法充分利用了原有连续调图像特征以及先验知识,减少了逆半调图像信息的损失和信息失真度,而且这个方法可以分区并行操作,处理速度高于其他方法,所以具有更高的研究价值<sup>[4-6]</sup>。

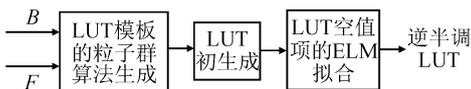
基于 LUT 的逆半调方法的关键在于模板的设计与表中空值项的估计,模板的大小、形状以及模板中有效像素的相对顺序直接影响了图像的重建质量。近几年,国内外学者提出了多种改进的基于 LUT 的逆半调方法,如利用图像纹理信息、神经网络等改进的逆半调方法,但对直接影响逆半调图像质量的模板选择问题却很少研究。2001 年 Mese 等<sup>[7,8]</sup>提出了一种基于贪心算法的模板选择方法,此后该模板的选择一直沿用该方法,但该方法并不能求得全局最优模板,存在一定缺陷。在空值项估计方面,提出的方法有低通滤波法、汉明距离法、最佳线性估计法<sup>[3]</sup>。2007 年,孔月萍等<sup>[9]</sup>采用 Elman 神经网络方法进行了空值项估计的研究,取得了一定的改进效果,但估计精度仍然有待提高。

针对以上问题,本文提出了相应的改进方法。

首先,针对基于 LUT 逆半调方法恢复出的图像在平缓区域存在噪声的问题,提出基于查找表和基于高斯滤波相融合的方法,其框架如图 1(a)所示。



(a) 基于查找表和基于高斯滤波相融合的方法



(b) 改进的 LUT 逆半调方法

图 1 基于改进查找表和基于高斯滤波相融合的方法

Fig. 1 Method based on improved LUT and Gaussian filter fusion

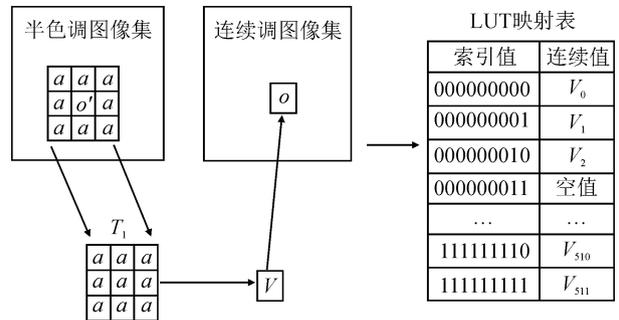
子群的最优模板优化方法。

最后,采用超限学习机(Extreme Learning Machine,简称 ELM)<sup>[10,11]</sup>作为空值项拟合模型,以提高空值项的拟合精度。

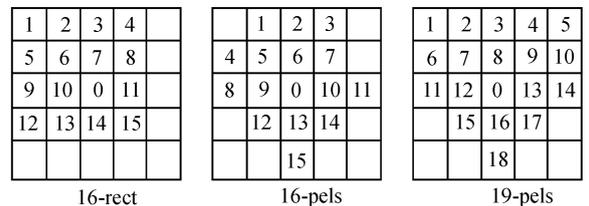
改进后的逆半调方法如图 1(b)所示,图 1 中  $B$  表示半调图像, $\hat{F}$  表示逆半调图像, $F$  表示连续调图像。

## 1 基于 ELM 的空值项拟合方法

经典 LUT 逆半调方法的原理如图 2 所示,它以多组半调图像及其连续调图像作为学习样本,学习之后形成一张半调模式值与连续值之间的映射表,从而可根据该映射表来估计半调图像对应的连续值,完成半调图像的逆半调处理。在图 2 中,对训练集中的半调图像,由任一像素点  $o'$  及其周围像素点  $a$  的不同组合可以形成不同的模板  $T_1$ ,典型的模板如图 2(b)所示,其中模板的不同取值形成了图 2(a)中 LUT 映射表的索引值,其在对应连续调图像中的值  $o$  作为 LUT 映射表的连续值  $V$ 。



(a) 基于 LUT 的逆半调原理图



(b) 三种经典模板

图 2 经典 LUT 逆半调方法原理

Fig. 2 The principle of the classical inverse halftoning method based on LUT

经典 LUT 逆半调算法由建表和逆半调值生成两个阶段构成。建表阶段需要多组半调图像及其对应的连续调图像作为学习样本,利用模板滑动读取半调图像的模板像素值和对应的连续调值,建立初始的查找表。建表阶段有两种情况:一是相同的索引值对应不同的连续调值,对此采用这些不同连续调值的均值作为该索引值对应的连续调值;二是学习样本有

其次,针对最优模板的选择问题,提出了基于粒

限时,许多索引值没有其对应的连续调值,造成表中出现空值项的现象。对于空值项,提出基于 ELM 的空值项拟合方法,以提高拟合的精准程度。

超限学习机<sup>[10-11]</sup>是一种针对单隐藏层前馈神经网络的算法,其网络结构如图 3 所示,其中输入层  $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$  与隐藏层的连接权值  $\mathbf{W}$  以及偏置  $\mathbf{b}$  是随机产生,在训练过程中无需调整,只需要对隐藏层与输出层  $\mathbf{Y}$  之间的连接权重  $\boldsymbol{\beta}$  进行训练学习(可利用广义逆完成隐藏层与输出层的连接权重矩阵的求解),故 ELM 具有较快的学习速度、良好的鲁棒性和泛化能力、较高的拟合精度。在所设计的 ELM 网络结构中,以初始建立的 LUT 中非空值项数据训练 ELM 模型,其中输入  $\mathbf{X}$  为 LUT 中的索引值,输出只有一个节点,为 LUT 中的连续调值  $y_0$ ,隐藏层节点数为 50。构建 ELM 空值项拟合模型:

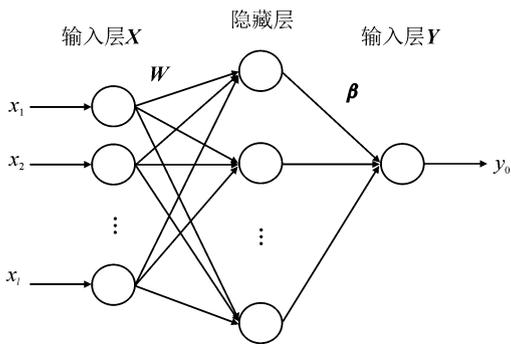


图 3 ELM 网络结构  
Fig. 3 ELM network structure

$$g(|\mathbf{W}\mathbf{X} + \mathbf{b}|) * \boldsymbol{\beta} = \mathbf{Y} \quad (1)$$

式中，“\*”代表卷积运算符； $g(x)$  为激活函数，常用硬限幅函数、Sigmoid 函数或傅里叶函数，通过实验比较逆半调图像的效果，选择 Sigmoid 函数作为激活函数，其计算公式为：

$$g(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (2)$$

实验中,提取初始 LUT 中非空值项的索引值和对应的连续值作为输入层和输出层样本,按照训练样本和测试样本数量比为 9:1,对隐藏层与输出层的连接权重进行学习,完成基于 ELM 空值项拟合模型参数的求解。对于 LUT 表中的空值项,将其索引值作为输入层,利用训练好的 ELM 空值项拟合模型,就可估计出对应的连续值,从而得到完整的 LUT 映射表。

## 2 基于粒子群的最优模板优化方法

在基于 LUT 的逆半调方法中,形成索引值的

模板设计非常重要,模板的大小和其中有效像素数目与 LUT 的长度成正比关系,与模板优化运行效率成反比关系,而且直接影响着逆半调图像的质量<sup>[12]</sup>。如何求取全局最优的模板是当前该领域研究的一个重要问题,文中采用粒子群优化方法,构建了一种最优模板。

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization,简称 PSO)的基本核心是利用群体中的个体对信息的共享,使整个群体的运动在问题求解空间中产生从无序到有序的演化过程,从而获得问题的最优解。基于粒子群的最优模板优化方法步骤为:

### 1) 初始化粒子种群

由于 LUT 最优模板选择是一个非连续的问题,因此要先对粒子群算法的初始种群  $T$  进行随机编码。在编码时,针对有效像素数目为  $M$  的 LUT 表中的模板,可看作在  $N \times N$  的窗口中选取  $M$  个位置。首先,模板中心点的目标像素位置选定为“0”;其次,模板的其他位置随机赋值为  $1 \sim (N^2 - 1)$ ,而数值为  $0 \sim (M - 1)$  的位置即为 LUT 模板的有效像素。对于编码的顺序,从模板左上角开始,按照自左向右、自上而下的顺序对 LUT 模板进行扫描,得到种群个体。例如,  $N$  为 5、 $M$  为 16 时,由于目标像素“0”位置不变,所以只需要  $1 \sim 24$  的位置,就可形成不同的模板,编码得到粒子个体的过程如图 4 所示。

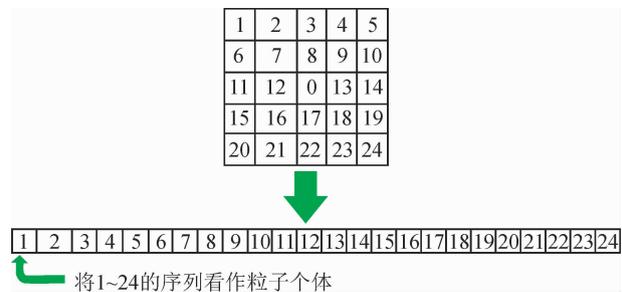


图 4 一个 LUT 模板编码过程  
Fig. 4 A LUT template encoding process

### 2) 计算个体的适应度值

峰值信噪比(PSNR)是评价重建图像质量的最常用的指标。由于逆半调与图像压缩编码均涉及重建问题,故用峰值信噪比作为计算适应度的函数:

$$P_{\text{PSNR}} = 10 \lg \frac{mn \times D^2}{\sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} (f(x, y) - \hat{f}(x, y))^2} \quad (3)$$

式中,  $D$  代表信号峰值,对于数字图像一般取  $D = 255$ ;  $f(x, y)$ 、 $\hat{f}(x, y)$  分别代表原始连续调图像与逆半调处理后的连续调图像;  $m$ 、 $n$  分别代表图像的宽和高。

### 3) 更新粒子个体

在计算完当前粒子种群  $T$  的适应度后,首先比较选出当前种群中的最大适应度作为个体最优  $P_{best}$  和全局最优  $G_{best}$ ; 然后对当前粒子种群进行交叉和变异操作,产生新的种群  $T$ ,使种群进化。交叉和变异的具体操作为:

#### ① 交叉操作

交叉操作产生新种群分为两个阶段:一是与个体最优进行交叉;二是与全局最优进行交叉。首先,在  $P_{best}/G_{best}$  产生交叉位,交叉位的起始位置及长度均为随机获得,提取出交叉位上的数字,如图 5 中  $P_{best}/G_{best}$  红色标记出的 14、9、22、3、4; 然后对当前粒子个体,删除与交叉位上相同数字的元素,如图 5 中“粒子个体”中红色标记出的元素; 最后,将剩余的元素按照相对位置不变依次排列,得到新的粒子个体,并将交叉位的元素插入到新的粒子个体最后,保证粒子个体的数目不变(如图 5 中“新的粒子个体”中红色标记出的元素)。

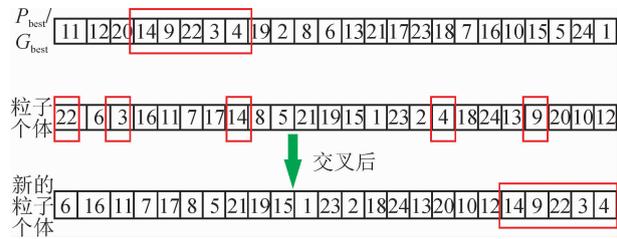


图 5 交叉过程  
Fig. 5 Cross process

#### ② 变异操作

首先,随机产生变异位  $c_1$ 、 $c_2$ ,其值在 1 到  $N^2 - 1$  之间,而且  $c_1$  和  $c_2$  不能相同; 然后对变异位  $c_1$  和  $c_2$  的元素进行交换,产生新的粒子个体。变异过程如图 6 所示。

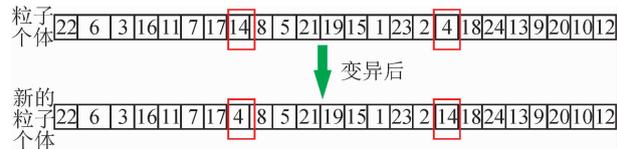


图 6 变异过程  
Fig. 6 Variation process

对于更新后的粒子种群,计算其中各个个体的适应度,选出当前种群中的最大适应度作为个体最优  $P_{best}$ ,比较当前个体最优和上代个体最优,取最大的适应度作为当前全局最优  $G_{best}$ 。

#### 4) 终止条件

通过实验,设定最大进化次数  $g_{MAX}$ ,当达到最大进化次数时,优化结束。

实验中设置最大进化次数  $g_{MAX} = 150$ ,种群数目为 20。考虑到 LUT 的大小及运行效率,选择模板大小  $N = 5$ ,模板中有效像素点数目  $M = 16$ 。

## 3 逆半调图像的融合

基于 LUT 的逆半调方法产生的连续调图像具有较好的细节保留能力,但在图像平缓区域容易产生噪声,而高斯滤波可起到平滑的作用,为此,提出将基于查找表和基于高斯滤波的逆半调图像进行融合。

### 3.1 基于高斯滤波的逆半调方法

高斯滤波是一种适用于消除高斯噪声的线性平滑滤波,可以消除数字半调图像中的噪声,获得具有较好平滑区的高斯逆半调图像  $I_G(x, y)$ :

$$I_G(x, y) = (G * I_H)(x, y) \quad (4)$$

式中,  $I_H$  为数字半调图像;  $G$  表示高斯核函数;  $(x, y)$  表示目标像素。

### 3.2 逆半调图像的融合

通过基于 PSO 算法得到的最优模板建立初始 LUT,由 ELM 完成空值项拟合,通过查表的方式获得基于 LUT 的逆半调图像  $I_L(x, y)$ ,将其与高斯滤波获得的逆半调图像  $I_G(x, y)$  进行融合,得到最终的逆半调图像  $I(x, y)$ ,该方法简称基于融合的算法,其公式为:

$$I(x, y) = \omega(x, y)I_L(x, y) + [1 - \omega(x, y)]I_G(x, y) \quad (5)$$

$$\omega(x, y) = \tanh(v_L(x, y)/\theta) \quad (6)$$

式中,  $\omega(x, y)$  为融合的权值系数;  $\theta$  为正值参数;  $v_L(x, y)$  是以目标像素  $(x, y)$  为中心的  $n \times n$  区域的方差,取  $n = 5$ 。使用  $\tanh$  函数既可以保证融合的权值系数在  $0 \sim 1$  之间,而且可以区分出图像的细节和平滑区域。

### 3.3 彩色半调图像的逆半调方法

大多数的彩色图像半调处理是对色彩空间内图像所具有的各个颜色通道分别进行处理,然后再将各通道结果叠加得到彩色半调图像。对于彩色图像逆半调,本文也是将彩色半调图像的 R、G 和 B 三个颜色通道分别进行逆半调处理,实现彩色半调图像的逆半调化。

## 4 实验结果与分析

本节对所提出的基于 ELM 的空值项拟合、基于 PSO 的模板优化和逆半调图像融合进行实验,实验全部在 Matlab R2014a 环境下完成。

#### 4.1 基于 ELM 的空值项拟合实验

本小节的实验图像均为灰度图像,首先由 15 对大小为  $512 \times 512$  的误差扩散半调图像和对应的连续调图像集作为训练样本,完成初始 LUT 表的建立及基于 ELM 的空值项拟合模型的建立,LUT 表的模板采用 16pels 的形式;然后由 8 对大小为  $512 \times 512$  的误差扩散半调图像和对应的连续调图像集作为测试样本,采用 PSNR 对生成的逆半调图像质量进行评价。

对 ELM 中采用的不同激活函数进行实验,实验结果如表 1 所示,表 1 给出的是测试样本的平均  $P_{\text{PSNR}}$  值。从表 1 的  $P_{\text{PSNR}}$  值可以看出,采用 Sigmoid 激活函数具有最好的效果。

表 1 不同激活函数得到的  $P_{\text{PSNR}}$  值

Tab.1  $P_{\text{PSNR}}$  of different activation functions

| 激活函数    | $P_{\text{PSNR}}/\text{dB}$ |
|---------|-----------------------------|
| Sigmoid | 28.613                      |
| 傅里叶     | 28.244                      |
| 硬限幅     | 28.554                      |

对于空值项的拟合精度,采用平均相对误差 (Average Relative Error, 简称 ARE) 进行评价,其计算公式为:

$$E_{\text{ARE}} = \frac{1}{u} \sum_{i=1}^u \frac{|I_Z - I_N|}{I_Z} \quad (7)$$

式中,  $u$  表示图像中空值项数;  $I_Z$  表示图像中空值项的真实连续调值;  $I_N$  表示空值项的拟合值。

表 2 给出了 8 幅测试图像的空值项数和平均相对误差值。从表 2 可以看出,每幅测试图像都有较多的空值项,拟合后的空值项的平均相对误差都在 0.1 左右,说明 ELM 拟合达到了较高的精度。

表 2 测试图像拟合值的平均相对误差

Tab.2  $E_{\text{ARE}}$  of test images

| 测试样本序号 | 空值项数  | 平均相对误差 |
|--------|-------|--------|
| 1      | 481   | 0.103  |
| 2      | 949   | 0.115  |
| 3      | 1 451 | 0.097  |
| 4      | 912   | 0.088  |
| 5      | 954   | 0.091  |
| 6      | 1 194 | 0.089  |
| 7      | 1 383 | 0.104  |
| 8      | 724   | 0.099  |

#### 4.2 求取最优模板的算法比较

为了提高训练与测试的速度,实验采用灰度图

像。训练样本为 15 对大小为  $512 \times 512$  的误差扩散半调图像和对应的连续调图像集,测试样本为 8 对大小为  $512 \times 512$  的误差扩散半调图像和对应的连续调图像集,训练样本和测试样本互不相同。

为体现 PSO 算法的优势,同时采用差分进化算法<sup>[12]</sup> (Differential Evolution Algorithm, DE)、精英遗传算法<sup>[13]</sup> (Elitist Genetic Algorithm, EGA) 求取最优模板,并对比其结果。实验中各种算法的最大进化次数均为 150,种群规模均为 20。

图 7 是各算法的收敛速度,可以看出,本文提出的基于 PSO 算法的收敛速度最快,其次是 DE 算法和 EGA 算法。图 8 是各算法求得的模板,其中图 8 (b)和(c)是实现文献[12]和[13]算法得到的最优模板,图 8(a)是 PSO 算法求得的最优模板,它与另外两个最优模板相近,但是更能体现有效像素相对顺序的影响。表 3 给出的是由不同模板生成的逆半调图像的平均  $P_{\text{PSNR}}$  值,可以看出,本文 PSO 算法获得的最优模板是最好的。

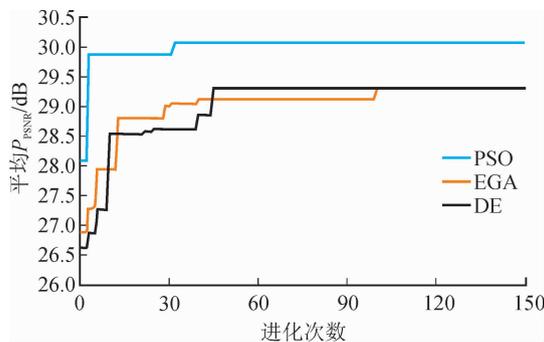


图 7 各算法进化次数与  $P_{\text{PSNR}}$  关系

Fig. 7 Relationship between the evolution times and  $P_{\text{PSNR}}$  of each algorithm

|   |   |    |    |    |  |  |  |  |  |
|---|---|----|----|----|--|--|--|--|--|
| 2 | 1 | 14 | 15 | 3  |  |  |  |  |  |
| 9 | 5 | 0  | 13 | 11 |  |  |  |  |  |
| 8 | 6 | 4  | 10 | 7  |  |  |  |  |  |
|   |   |    | 12 |    |  |  |  |  |  |

(a) 本文 PSO 算法

|    |    |    |    |   |  |  |  |  |  |
|----|----|----|----|---|--|--|--|--|--|
| 1  | 2  | 3  | 4  | 5 |  |  |  |  |  |
| 6  | 7  | 0  | 8  | 9 |  |  |  |  |  |
| 10 | 11 | 12 | 13 |   |  |  |  |  |  |
|    |    | 14 | 15 |   |  |  |  |  |  |

(b) DE

|    |    |    |    |   |  |  |  |  |  |
|----|----|----|----|---|--|--|--|--|--|
| 1  | 2  | 3  | 4  | 5 |  |  |  |  |  |
| 6  | 7  | 0  | 8  | 9 |  |  |  |  |  |
| 10 | 11 | 12 | 13 |   |  |  |  |  |  |
|    |    | 14 | 15 |   |  |  |  |  |  |

(c) EGA

图 8 各算法求得最优模板

Fig. 8 The best template of all algorithms

表 3 不同算法下最优模板的  $P_{\text{PSNR}}$  值

Tab.3  $P_{\text{PSNR}}$  of different best templates

| 算法                     | $P_{\text{PSNR}}/\text{dB}$ |
|------------------------|-----------------------------|
| 本文 PSO 算法              | 30.054                      |
| DE 算法 <sup>[12]</sup>  | 29.294                      |
| EGA 算法 <sup>[13]</sup> | 29.294                      |

### 4.3 彩色逆半调图像效果评价

实验中学习样本为 60 对大小为  $256 \times 256$  的彩色误差扩散半调图像和相应的连续调图像集,测试样本为 10 对大小为  $256 \times 256$  的彩色误差扩散半调图像和相应的连续调图像集,学习样本和测试样本互不相同。实验首先确定相关参数,然后对最终生成的彩色逆半调图像质量进行评价分析。

图 9 是学习样本数量对逆半调图像质量的影响。实验中学习样本的数量  $S$  从 15 变化到 60,变化的步长为 5,测试样本数量为 10。从图 9 可以看出,当学习样本数量逐渐增加到 50 时,平均  $P_{\text{PSNR}}$  值是逐渐增大的,超过 50 时,平均  $P_{\text{PSNR}}$  值减小,故选择学习样本数量为 50。

图 10 是高斯滤波逆半调处理中参数  $\sigma$  的选择实验。 $\sigma$  值从 0.6 变化到 2.4,变化步长为 0.2,计算 10 对测试样本的平均  $P_{\text{PSNR}}$  值作为评价标准。从图 10 可以看出, $\sigma = 1.2$  时平均  $P_{\text{PSNR}}$  值最大。

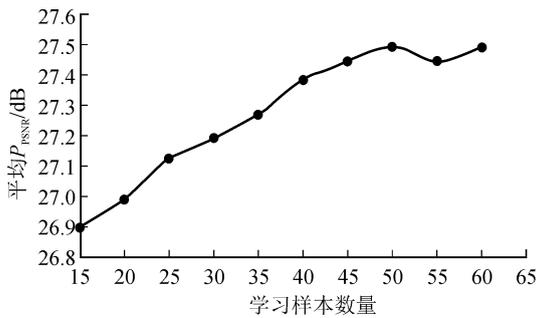


图 9 学习样本数量与平均  $P_{\text{PSNR}}$  的关系  
Fig. 9 Relationship between the number of learning samples and the average  $P_{\text{PSNR}}$

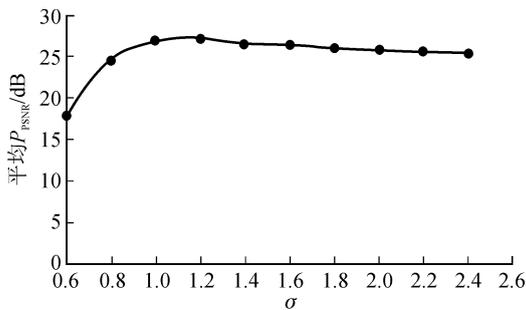


图 10  $\sigma$  与平均  $P_{\text{PSNR}}$  的关系  
Fig. 10 Relationship between  $\sigma$  and average  $P_{\text{PSNR}}$

对于式(6)中  $\theta$  的取值,图 11 给出了参数  $\theta$  从 100 变化到 5100,变化步长为 100 时,10 对测试样本平均  $P_{\text{PSNR}}$  值随  $\theta$  变化的情况。可以看出,随着  $\theta$  值的增大,平均  $P_{\text{PSNR}}$  值逐渐增大,当达到 5000 时基本趋于稳定。

根据以上实验,最终选择的参数为  $S = 50$ 、 $\sigma =$

1.2、 $\theta = 5000$ 。在这组参数下,实验对 4 种方法生成的彩色逆半调图像的质量进行评价。

表 4 给出了各种方法的实验结果,其中“LUT(空值未补)”表示基于 LUT 逆半调方法,空值项未作处理;“LUT(ELM 补全空值)”表示基于 LUT 逆半调方法,空值项由 ELM 拟合。表 4 给出的是 10 幅彩色逆半调图像的平均  $P_{\text{PSNR}}$  值,从表中可以看出,本文基于融合的算法是最优的,取得了最高的  $P_{\text{PSNR}}$  值。

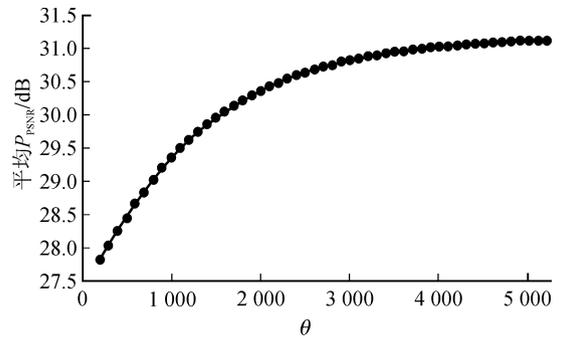


图 11  $\theta$  与平均  $P_{\text{PSNR}}$  的关系  
Fig. 11 Relationship between  $\theta$  and average  $P_{\text{PSNR}}$

表 4 各算法求得的  $P_{\text{PSNR}}$   
Tab. 4 The  $P_{\text{PSNR}}$  obtained by each algorithm

| 算法            | $P_{\text{PSNR}}/\text{dB}$ |
|---------------|-----------------------------|
| LUT(空值未补)     | 26.296                      |
| LUT(ELM 补全空值) | 27.492                      |
| Gaussian 滤波法  | 26.046                      |
| 本文基于融合的算法     | 31.115                      |

图 12 给出了一幅用于测试的彩色半调图像由不同方法处理的结果。

从视觉效果来看,图 12(c)LUT(空值未补)方法恢复出的图像达到了一定的去噪效果,但是有较明显的白色斑点;图 12(d)LUT(ELM 补全空值)方法恢复出的图像在眼睛部分的瞳孔和瞳仁处有很高的区分度,但是仍有较不明显的白色斑点,且在图像的平缓区域存在着均匀分布的噪声;图 12(e)基于 Gaussian 滤波方法恢复出的图像虽然有较好的平滑效果,但该图像的细节部分却没有图 12(d)好,眼睛部位较模糊,区分度不高;图 12(f)是文中所提基于融合的方法恢复出的图像,可以看出,其与原连续调图像有较高的相似度,人物的头发和眼睛部位等细节处有较高的还原度,且滤除了平缓区域的噪声及其它的斑点,取得了最好的视觉效果。



图 12 各种不同算法的处理后的彩色图像比较

Fig. 12 Comparison of inversed color image restored by different algorithms

## 5 结 论

本文提出了一种改进的基于查找表的彩色逆半调方法,其改进之处包括:

1) 采用基于粒子群的优化方法获得了最优模板,并与差分进化算法、精英遗传算法进行比较,结果表明,本文算法求得的最优模板对半调图象恢复有更好的效果,求得的最优模板更加符合数字图像像素之间的相关性,而且较其它两种算法有更快的收敛速度;

2) 提出了基于 ELM 的空值项拟合方法,有效地消除了恢复图像中的斑点;

3) 提出了一种融合 LUT 逆半调图像和高斯滤波逆半调图像的算法,在保留图像细节的同时去除了平缓区域的噪声,在客观评价和主观评价方面均取得了最好的效果。

### 参考文献:

- [1] MICELI C M, PARKER K J. Inverse halftoning[J]. Journal of Electronic Imaging, 1992, 1(2): 143-151.
- [2] 张燕,张二虎. 图像逆半色调技术研究[J]. 西安理工大

学学报,2017,33(3): 282-289.

ZHANG Yan,ZHANG Erhu. A review of inverse halftoning techniques[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(3): 282-289.

- [3] MESE M, VAIDYANATHAN P P. Look-up table (LUT) method for inverse halftoning [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10 ( 10 ): 1566 -1578.
- [4] 卢永乐,王志强,黄丽君,等. 基于 LUT 的逆半调改进算法[J]. 湖南工业大学学报,2013,27(6): 57-61.
- LU Yongle, WEN Zhiqiang, HUANG Lijun, et al. An improved inverse halftoning algorithm based on LUT [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, 27(6): 57-61.
- [5] 郑海红,孔月萍,曾平,等. 误差分散类逆半调技术综述 [J]. 中国图象图形学报,2008,13(1): 1-6.
- ZHENG Haihong, KONG Yueping, ZENG Ping, et al. A review of inverse halftoning algorithms for error diffusion [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(1): 1-6.

(下转第 119 页)

- gorithm in intelligent color matching of wood dyeing [J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2017, 33 (5):2895-2901.
- [11] MOHARAMZADE N, FAROKHI F. Evolutionary design of ANN structure using genetic algorithm[C]// Second International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing. Wuhan, China, Sep 13-15, 2010: 219-224.
- [12] YANG J G, XIONG J W, LAN X. Worstest spinning process parameters inversion based on a mixed population genetic-ANN algorithm [C]//5th International Conference on Computer Sciences and Automation Engineering (ICCSAE), Sanya, China, Nov 14-15, 2016: 975-980.
- [13] MAJUMDAR A, DAS A, HATUA P, et al. Optimization of woven fabric parameters for ultraviolet radiation protection and comfort using artificial neural network and genetic algorithm[J]. *Neural Computing & Applications*, 2016, 27(8):2567-2576.
- [14] 高军舰, 陈卓. 人工神经网络在油墨配色中的研究与应用[J]. *科技信息*, 2014, (13):200-201.
- GAO Junjian, CHEN Zhuo. Research and application of artificial neural network in ink color matching[J]. *Science & Technology Information*, 2014, (13): 200-201.
- (责任编辑 周 蓓)
- 
- (上接第 79 页)
- [6] 黄丽君, 文志强. 基于色彩分类的查找表图像逆半调方法[J]. *湖南工业大学学报*, 2013, 27(5): 95-99.
- HUANG Lijun, WEN Zhiqiang. Image inverse halftone method of look-up table based on color block storage [J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2013, 27(5): 95-99.
- [7] MESE M, VAIDYANATHAN P P. Tree-structured method for LUT inverse halftoning and for image halftoning[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(6): 644-655.
- [8] MESE M, VAIDYANATHAN P P. Template selection for LUT inverse halftoning and application to color halftones [C]//Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on, June 5-9, 2000, Istanbul, Turkey, c2000: 2290-2293.
- [9] 孔月萍, 曾平, 何波, 等. LUT 与 Elman 网络相结合的图像逆半调算法[J]. *中国图象图形学报*, 2007, 12(11): 1988-1991.
- KONG Yueping, ZENG Ping, HE Bo, et al. Inverse halftoning algorithm based on look up table and Elman network [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(11): 1988-1991.
- [10] HUANG G B, ZHOU H M, DING X J, et al. Extreme learning machine for regression and multiclass classification[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 2012, 42(2): 513-529.
- [11] HUANG G B, CHEN L, SIEW C K. Universal approximation using incremental constructive feedforward networks with random hidden nodes [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2006, 17(4): 879-892.
- [12] 叶德刚, 文志强, 钟智彦. 基于差分进化算法的查找表逆半调模板选择[J]. *湖南工业大学学报*, 2015, 29(5): 82-87.
- YE Degang, WEN Zhiqiang, ZHONG Zhiyan. LUT inverse halftoning template selection based on differential evolution algorithm [J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2015, 29(5): 82-87.
- [13] WEN Z Q, LU Y L, ZENG Z G, et al. Optimizing template for lookup-table inverse halftoning using elitist genetic algorithm [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(1): 71-75.
- (责任编辑 周 蓓)