

多级半色调技术在电纸书显示优化中的应用^①

林夏薇, 林 东

(福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350108)

摘要: 针对电纸书显示屏灰度等级不足的问题, 提出了利用半色调图像处理技术的改进算法实现电纸书显示优化的方法. 在阐述半色调技术与电子纸特点的基础上, 介绍了抖动算法和误差扩散算法, 通过对这两种算法进行改进提高电纸书显示的灰度级数及视觉效果. 其中重点对误差扩散算法中的阈值、滤波器及扫描方式的设定进行设计, 并提出一种基于误差动态检测的新的改进算法, 能有效提高图像灰度级数, 改善电纸书的图像显示质量. 最后在电纸书系统平台上实现仿真, 通过质量评价参数客观地评测了各种算法.

关键词: 电纸书; 半色调; 误差扩散; 电子纸驱动

Multitoning Technology Application in the Electric Paper Books Display Optimization

LIN Xia-Wei, LIN Dong

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to solve the problem that electric paper books have insufficient gray-scales, the improvement algorithm of halftone image processing technology is proposed to realize electric paper books display optimization. On the basis of halftone technology and characteristics of electronic paper, this paper introduces the dithering algorithm and error diffusion algorithm. By improving this two algorithms, the electric paper books can display more gray-scales and have better visual effect. The research is focused on threshold, filter and specific scanning mode of the error diffusion algorithm. A new improved algorithm based on dynamic error detection is put forward in the paper which can effectively improve image gray-scales and greatly improve the image display quality of the electric paper books. Finally, the simulation in the electric paper books system platform is realized and the algorithms mentioned are evaluated by objective image quality assessment.

Key words: electric paper book; halftone; error diffusion; electronic paper driver

电纸书, 即电纸书阅读器的简称, 是一种专用电子书的掌上阅读器, 它采用电子纸显示技术, 具有辐射小、功耗低、无背光、携带轻便和类纸化阅读效果好等优点.

电子纸技术是一种基于电子纸的提供类纸化阅读效果的显示技术, 与其它显示技术相比较, 它具备不反光、低功耗等优点. 作为该技术的载体, 电子纸可被看成一种类似纸张的显示器, 除了具有传统纸柔韧、轻薄的特性外, 它还可灵活改变显示内容, 并对环境比较友好. 目前主流的电子纸显示技术主要有 E-ink 微胶囊、电子粉流、胆固醇液晶显示和电湿润显示技

术等^[1], 其中 E-ink 公司的微胶囊电泳技术最为成熟, 应用最为广泛, 在当前电纸书显示市场上占据比较大的份额.

本文中的电纸书显示屏采用的是 E-ink 微胶囊电泳技术电子纸, 微胶囊中包含许多带电的染色粒子, 所以我们形象地称之为电子墨水. 其中电子墨水的每个微囊体都包含带正电的白色粒子及带负电的黑色粒子, 加上电场后, 受电场力的驱动, 微囊体会按照特定的规则运动, 即可以在表面看见白色或黑色的影像. 因此电子纸的显示特性与普通纸张很相似, 它的显示原理与打印、印刷设备的显示原理也十分类似.

^① 收稿时间:2014-07-03;收到修改稿时间:2014-07-28

由于设备的限制,电子纸显示屏大多为 8 级或 16 级灰度,灰度等级的降低必然会造成显示图像的失真,会出现相邻灰阶间跳变过于明显的情况.在打印、印刷设备中,控制打印油墨的大小或疏密程度可以满足人眼的视觉特性,达到在二值设备上呈现出多灰度等级图像的视觉效果.在电子纸显示设备中,通过电子纸系统控制黑色和白色带电粒子在微胶囊中的分布情况,可以实现提高灰度级数的同时符合人眼的视觉特性^[2].所以本文利用半色调技术在原来 8 级灰度的基础上实现更高灰度等级视觉效果的电子纸图像显示.

1 基于半色调技术的优化算法

数字半色调技术是基于人眼的视觉特性(HVS, Human Visual System)和图像的呈色特性,利用数学、计算机等工具,在呈色或显示设备上实现图像优化的技术^[3].数字半色调技术利用了人眼的低通特性,当人眼与显示设备像素点之间的距离达到一定比例的时候,人眼会将相邻像素点当做一个整体来看待.利用此特性,多灰度等级图像通过半色调处理,使人眼观察到的半色调图像局部平均灰度近似于原始图像的局部平均灰度值,所以从整体上让人眼感觉是连续色调的效果.

半色调技术最早应用于印刷行业,随着计算机的出现、信息技术的广泛应用和印刷工业的飞速发展,半色调技术已进入数字半色调技术全新的时代.现在,数字半色调技术已经不单单局限于打印和印刷领域,已广泛应用于数字图像的复制、显示、和存储等许多领域.

数字半色调技术按照对图像的处理方式一般可分为:抖动法,误差扩散法和迭代法.本文主要分析抖动法和误差扩散法.

由于传统的半色调技术都是将灰度图像转换为二值图像,半色调技术在多级灰度图像显示中的应用还比较少.因此本文提出了应用于电子纸的改进的半色调算法.

1.1 抖动算法

抖动法是一种点处理方式,输出值仅与图像中对应的输入值有关.抖动法主要又分为有序抖动法和随机抖动法.有序抖动(ordered dither)利用输入图像与一个周期阈值矩阵比较产生二值图像.随机抖动通过控制一定区域内图像白色和黑色点密度来控制图像灰度.

在抖动法中,图像实际像素与抖动矩阵中对应的数值进行比较,如果大于抖动矩阵中的数值,就取白点;否则,取黑点.本文利用这样的原理,采用图 1 的模板可以在两个灰度级之间新产生 3 个灰度级,以此类推即可在 8 灰度级的任意两个相邻灰度级中间插入 3 个灰度等级达到增加灰度级的效果.灰度用一定比例的黑白点组成的区域表示,若为白块取较大的灰度值,若为黑块取较小的灰度值.从而达到整体图像的灰度感.



图 1 抖动算法模板

实现过程是通过构造类似图 1 的不同灰度等级的模块去替换原图像中的像素.提取模板中每个像素的值,求像素块的平均值.将平均值与设定的阈值进行比较,根据比较结果,选择相应的模板替换原来像素块的值.这样就提高了显示屏的灰度级数,即可实现用 8 级灰度值模拟 32 级灰度值的图像显示效果.

1.2 误差扩散算法

误差扩散法是最理想的半色调算法之一.误差扩散法的基本思想是将灰度图像的当前像素值与一个阈值相比较,得到一个二值输出,然后将输入与输出的像素差以一定的方式扩散到未经处理的邻近区域.图 2 为误差扩散算法的原理框图.

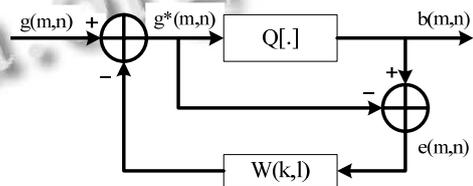


图 2 误差扩散算法原理框图

每个像素的误差扩散过程包括如下三个步骤^[4]:

将原图像在点(m,n)的灰度值 g(m,n)与之前扩散到此处的误差相加,得到一个新的灰度输入:

$$g^*(m,n) = g(m,n) + \sum_{k,j} w(k,l) \times e(m-k,n-l) \quad (1)$$

新的灰度输入值与阈值 Q[l] 进行比较,得到一个二值输出或者是规定的有限灰度值输出 b(m,n):

$$b(m,n) = Q[g^*(m,n)] = Q\left[g(m,n) + \sum_{k,j} w(k,l) \cdot e(m-k,n-l)\right] \quad (2)$$

输出的灰度值 $b(m,n)$ 与输入值 $g^*(m,n)$ 的差值 $e(m,n)$ 以一定的比例扩散到邻近未处理的区域。

$$e(m,n) = b(m,n) - g^*(m,n) \quad (3)$$

其中, $w(k,l)$ 为误差扩散滤波器, 即误差扩散滤波器在 (k,l) 位置的误差扩散系数, $Q[\cdot]$ 代表阈值量化操作。

根据误差扩散算法的原理框图, 及式(1)(2)(3), 可以分析出阈值的选取方法、误差滤波器系数的选取以及处理过程中扫描路径的选取是影响误差扩散算法的主要因素。

1) 阈值的选取

本文采用的电纸书显示屏为 8 灰度等级, 传统的误差扩散算法通常为二值阈值, 多级误差扩散的关键就是要合理地设计多个阈值进行量化操作^[5,6]。在多级阈值量化中, 设 n 为设备可以输出的灰度级数, T_n 表示第 n 级阈值, q_i 表示第 i 级输出灰度值, 则阈值量化的过程可以用以下公式表示:

$$\begin{aligned} p_o(i,j) &= q_1 && \text{if } p'(i,j) < T_1 \\ p_o(i,j) &= q_2 && \text{if } T_1 \leq p'(i,j) < T_2, \\ p_o(i,j) &= q_3 && \text{if } T_2 \leq p'(i,j) < T_3, \\ &\dots && \\ p_o(i,j) &= q_{n-1} && \text{if } T_{n-2} \leq p'(i,j) < T_{n-1}, \\ p_o(i,j) &= q_n && \text{if } T_{n-1} \leq p'(i,j). \end{aligned} \quad (4)$$

根据电纸书的显示特性, 第 i 级输出灰度值 q_i 分别取电纸书可以显示的 8 个灰度等级, 阈值 T_n 则取相邻两个灰度级的中值, 即 $T_n = \frac{q_n + q_{n+1}}{2}$ 。最后将原始灰度值与 7 个阈值对应的灰度区间进行比较, 得到新的灰度值, 将新的灰度值与原始灰度值进行对比即可得到需要扩散的误差。

2) 滤波器系数的选取

在误差扩散过程中, 选取的误差滤波器系数不同, 得到半色调图像的质量也不同。经典的滤波器有: Floyd-stein 滤波器, Stucki 滤波器, Jarvis 滤波器等。如图 3 是几种常见滤波器误差传递系数。可以看出离像素点的距离越近, 被分配的误差系数越大。这样分配的原因是人眼是一个低通滤波器, 低频区域是图像能量主要的集中区域, 并且能量主要分配在水平和垂直方向, 这样的设计比较符合人眼的视觉特性。

	X	7/16
3/16	5/16	1/16

(a) Floyd-stein 滤波器系数

		X	8/42	4/42
2/42	4/42	8/42	4/42	2/42
1/42	2/42	4/42	2/42	1/42

(b) Stucki 滤波器系数

		X	7/42	5/42
3/42	5/42	7/42	5/42	3/42
1/42	3/42	5/42	3/42	1/42

(c) Jarvis 滤波器系数

图 3 三种误差滤波器系数

一种方法是直接采用 Floyd-stein 滤波器, 如图 3(a)所示, X 为当前处理像素, 该像素产生的误差分别向右、向下、向左下和向右下扩散, 其比例分别为 7/16、5/16、3/16 和 1/16。

$$\text{即式中 } w(k,l) = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7 \\ 3 & 5 & 1 \end{bmatrix} \text{ 且 } \sum w(k,l) = 1.$$

3) 滤波器扫描路径的选取

扫描路径同样也会影响半色调图像质量。Floyd-Stein 算法的不足之处在于易在亮光和暗调部位出现龟纹现象以及与处理方向有关的滞后现象^[7]。导致这些现象的主要原因是扫描像素的方式是逐行扫描。本文采用“蛇行”扫描方式, 即在奇数行和偶数行采用相反的扫描路径, 可以改善这样的情况。其他的改进的扫描方法如 Hilbert 曲线扫描方式和基于上下文相关的空间填充曲线的扫描方式在实现上相对比较复杂。

1.3 本文新算法

本文提出一种新的算法, 在误差扩散算法的基础上加以改进, 即动态的误差扩散算法。根据检测的误差值大小来确定是否要将误差进行扩散。

由公式(2)(3)已知 $e(m,n)$ 为输出的灰度值 $b(m,n)$ 与输入值 $g^*(m,n)$ 的差值, $w(k,l)$ 为误差扩散滤波器系数, E 为设定的临界误差值, 则:

$$w(k,l) = \begin{cases} 0 & e(m,n) \leq E \\ \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7 \\ 3 & 5 & 1 \end{bmatrix} & e(m,n) > E \end{cases} \quad (5)$$

即当误差值较大, 超过设定的误差值 E , 则按照图 3(a)的 Floyd-stein 滤波器将误差进行扩散; 若误差值较小, 小于设定的误差值 E , 则不将误差进行扩散,

即扩散系数为 0, 减少不必要的误差积累造成的图像质量降低, 减少图像的失真.

经过实验分析, 本文将动态误差扩散的临界值 E 设为 8, 即当误差值小于等于 8 时, 直接将灰度值进行量化, 不将量化值与原像素值的误差向外扩散, 当误差大于 8 时, 按照 Floyd-stein 滤波器的扩散系数将误差向周围进行扩散.

通过上述描述, 本文应用于电子纸显示屏的新算法的具体流程如下:

首先, 读取原始图像数据, 并判断图像是否为灰度图, 若为灰度图则直接进行下一步处理, 否则将彩色图转换为灰度图.

其次, 进行阈值的设定, 确定阈值量化后的灰度值, 将新的灰度值与原始灰度值进行对比即可得到需要扩散的误差值, 根据检测的误差值大小来确定是否要将误差进行扩散, 若需要扩散则将误差以一定系数扩散到相邻像素点.

最后, 利用蛇形扫描方式对整个图像进行优化处理, 将优化后的图像进行存储并显示.

2 实验过程设计

以基于 ARM 内核开发的 32 位高性能处理器 S3C2440 为主处理器, 整体电子纸硬件平台可以大致分为以下几个模块: 核心处理器、系统存储模块、输入模块、电子纸驱动模块、网络模块等.

本文采用的电子纸显示屏分辨率为 800*600, 支持 8 级灰阶显示. 电子纸显示屏的数据扫描通过源极驱动器和栅极驱动器实现. 其中电子纸驱动板是以 Giga-Device 公司生产的 GD6201E 芯片为核心. GD6201E 芯片是用于控制电子纸显示的芯片, 能够为电子纸显示材料提供高性能、低成本的显示解决方案.

基于 GD6201E 方案的电子纸驱动控制电路如图 4 所示.

数据经 GD6201E 缓存处理后, 通过栅极驱动器 (gate driver) 和源极驱动器 (source driver) 传入电子纸显示屏幕上显示.

软件方面, 在 Linux 操作系统下, 利用 Qt Creator 图形界面开发工具, 设计图片浏览器, 实现对图形图像文件的读取、优化等操作. 针对电子纸图像浏览器的显示特点, 可以采用 QImage 类与 QPixmap 类实现对图形图像文件的读取显示. 通过 QImage 的构造函数

数、load()函数、loadFromData()几种方法可以读入图像文件数据, 通过 QImage 的静态函数 fromData()由指定数据构造一个 QImage 对象, 再转换为 QPixmap 在屏幕上显示, 并在 QLabel 控件上显示图形图像. 并添加图像优化显示模块, 在优化模式下即通过本文提到的优化算法对像素点进行逐一处理.

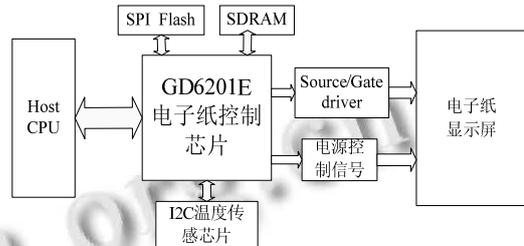


图 4 电子纸驱动电路系统框图

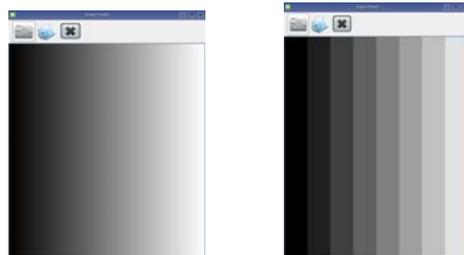
在 X86 调试版本下编写代码, 调试通过后调在虚拟帧缓冲 qvfb 上模拟电子纸显示屏显示.

3 实验结果与质量评价

3.1 仿真结果

用 MATLAB 生成一幅 256 级灰度值的索引图像作为测试图像, 分别在软件中模拟只有 8 灰度级和采用半色调技术优化算法的情况.

图 5(a)是在虚拟帧缓冲 qvfb 上, 图片浏览器中 256 级灰度值的原始图像的显示效果图. 图 5(b)是在虚拟帧缓冲 qvfb 上模拟电子纸显示屏显示原图像, 即原始图像在图片浏览器中不经过灰度优化算法时的八级灰度值显示效果图, 可以看到没有经过半色调处理的图片显示出灰度的阶梯变化, 人眼可以清楚分辨出 8 个灰度等级. 图 5(c)是在虚拟帧缓冲 qvfb 上模拟电子纸显示屏显示原图像经过抖动算法进行灰度优化后的 8 级灰度图, 经过优化处理后的图片灰度过度更加平滑. 图 5(d)是采用误差扩散算法优化后的 8 级灰度图, 误差扩散算法所得到的效果更加好, 像素点的分布带有一定的随机性、无规律性, 看起来更加连续, 能够体现更多的灰度级.



(a) 256 级灰度图像 (b) 未经优化的 8 级灰度图像



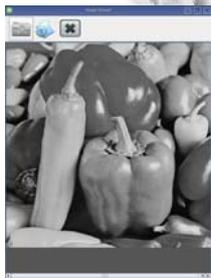
(c) 抖动算法后 8 级灰度图像



(d) 误差扩散算法后 8 级灰度图像

图 5 灰度图像对比

此外选取经典图像 Peppers 进行处理, 处理结果如图 6 所示, 其中图 6(a)是 256 级灰度图, 图 6(b)是未经优化的 8 级灰度图, 图 6(c)是采用抖动算法优化后的 8 级灰度图, 图 6(d)是采用误差扩散算法优化后的 8 级灰度图, 图 6(e)是采用本文算法优化后的 8 级灰度图.



(a) 256 级灰度图像及其局部放大图



(b) 未经优化的 8 级灰度图像及其局部放大图



(c) 抖动算法后 8 级灰度图像及其局部放大图



(d) 误差扩散算法后 8 级灰度图像及其局部放大图

(e) 本文算法处理后的 8 级灰度图像及其局部放大图
图 6 Peppers 图灰度图像及局部放大图对比

从图 6 的局部放大图中可以看出, 图 6(b)未经优化的 8 级 Peppers 图像有比较明显的色块及轮廓线, 而经过半色调算法优化处理的图片灰度过渡则更加柔和, 没有明显的因灰度级数过少而产生的色块. 从图 6(c)(d)(e)局部放大图可以看出, 采用抖动算法优化后的 Peppers 图像放大后会有明显的网格状痕迹, 相比之下采用误差扩散算法或本文算法优化后的图像效果会更加连续及柔和, 轮廓痕迹相对不明显, 有更好的人眼视觉效果.

3.2 质量评价

本文采用峰值信噪比(PSNR)和结构相似模型(SSIM)对半色调图像进行质量评价.

(1) 峰值信噪比(PSNR)是衡量原图像和被测图像之间的整体偏差的指标, 但无法反映出图像误差的客观特性及视觉特性^[8]. 其公式如下:

$$\text{PSNR} = \frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{M,N} (f(m,n) - b(m,n))^2} \quad (6)$$

其中 $f(m,n)$, $b(m,n)$ 分别为原图像像素和被测图像像素的灰度值, $M \times N$ 是原图像的大小. PSNR 值越大, 代表失真越少.

(2) 结构相似度(SSIM)是基于人眼视觉模型, 通过亮度、对比度和结构三个方面来评价原图像与处理图像的相似度^[9]. SSIM 表示为原图像与处理后图像的

相似度,能更好地评价半色调图像的质量,其值越大越好,最大为1.其公式为:

$$SSIM(x,y)=[I(x,y)]^\alpha [c(x,y)]^\beta [s(x,y)]^\gamma \quad (7)$$

其中 $[I(x,y)]$ 为亮度函数 $[c(x,y)]$ 为对比度函数, $[s(x,y)]$ 为相关性函数. α, β, γ 为亮度、对比度和相关性信息进行权值调整的系数.

对图6分别计算峰值信噪比(PSNR)和结构相似比(SSIM),质量评价结果如表1所示.

表1 Peppers图质量评价结果

算法	峰值信噪比	结构相似比
八级灰度	24.0209	0.8927
抖动算法	25.4808	0.9528
误差扩散算法	27.0883	0.9685
动态误差扩散	29.1677	0.9566

根据PSNR值越大代表失真越少和SSIM值越大代表图像越相似可知,采用半色调算法比没有采用优化算法的得到的结果要好,且采用误差扩散算法要优于采用抖动算法,这与我们直观观察到的结果相符合,说明采用半色调算法得到的图像质量较高.本文提出的算法得到的峰值信噪比相比于一般的误差扩散算法得到了较大的提高,说明动态地将误差扩散可以减少失真.

总的来说,抖动算法处理后的图像色调不够丰富,人工纹理明显,误差扩散算法通过将误差按一定的权重分配给周围的点,减少了处理后的图像与原图之间的误差,达到色调丰富,过渡更柔和的效果,且可以大大减少图像的失真,提高处理后图像与原图的相似度,整体视觉效果比较好.

3.3 实际测试

系统搭建完毕后,从设计的原始图片浏览器中加载测试图像,并采用抖动算法和本文算法进行优化,并在电子纸显示屏上显示,效果如图7所示.



(a) 未经优化效果图 (b) 抖动法优化后效果图



(c) 本文算法优化后效果图

图7 256级连续色调图效果对比图

图7(a)是图5(a)图像在电子纸显示屏上的显示的效果图,即未经优化的8级灰度图,采用抖动算法和本文算法后的图片在电子纸显示屏上显示效果分别如图7(b)和7(c)所示.从图7(a)中可以明显看到没有经过处理的图片显示出8个灰度的阶梯变化.图7(b)(c)经过优化处理后的图片灰度过度更加平滑,没有灰度级的明显跳跃,灰度级变化更加连续,能够体现更多的灰度级.

4 总结与展望

本文实现了多级半色调技术在电纸书显示设备中的应用.在电纸书设备中,通过利用半色调技术在只能呈现8级灰度的显示屏中实现了更多灰度等级的视觉效果,符合人眼的视觉特性,达到了优化的目的.并且通过比较发现,抖动算法处理后的图像会有明显的规律性图案,误差扩散算法实现了像素点分配的随机性,像素点的分布是各向异性和无规律的,灰度的变化更加柔和,但该算法仍有龟纹现象的存在,边缘会出现条纹等不理想的情况仍需要进一步改善.针对优化后图像中存在的龟纹现象,之后的设计上可以对滤波器和扫描方式做进一步改进.在滤波器的选择上,采用的系数矩阵的扩散范围应该更广,扩散的方向应该更多,并且滤波器的系数也可做一定的弱化处理,这样可以尽量减少龟纹现象.扫描方式的选择上可以采用“之字形”扫描方式或者是基于块的扫描.针对边缘出现的失真现象,设计上可以采用基于边缘检测的动态调整的误差扩散算法,尽量保留边缘信息,可以减少边缘出现伪轮廓等失真现象.

电纸书的发展仍有很大空间和广阔的前景,进一步提高其显示效果将有利于人们更好地接受电纸书,拥有更好的视觉效果和阅读体验,实现电纸书的更好的普及.

参 考 文 献

- 1 郑春辉,郑淑荣.电子纸的现状与未来.软件工程师,2012,(8): 52-55.
- 2 Kao WC, Ye JA, Lin C. Image quality improvement for electrophoretic displays by combining contrast enhancement and halftoning techniques. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 2009, 55(1): 15-19.
- 3 马利娟.彩色数字半色调技术的研究[学位论文].西安:西安电子科技大学,2010.
- 4 叶玉芬.数字半色调技术中的误差扩散算法研究[学位论文].西安:西安电子科技大学,2006.
- 5 Sarailidis G, Katsavounidis I. A multiscale error diffusion technique for digital multitone. IEEE Trans. on Image Processing, 2012, 21(5): 2963-2705.
- 6 刘真,刘长鑫,严爱国,杨晟炜.MED 数字半色调图像中伪轮廓现象的修正方法研究.包装工程,2012,33(9):118-119.
- 7 张寒冰,袁昕.数字半色调技术中的误差扩散算法的研究.计算机应用,2010,30(4):925-928.
- 8 赵小娥.半色调图像质量评价研究.西安工程科技学院学报,2006,20(3):347-351.
- 9 黄君.图像质量评价的研究[学位论文].杭州:浙江理工大学,2012.