

摘 要

半色调技术是图像处理领域历史最悠久的技术之一。数字半色调技术是基于人眼的视觉特性和图像的成色特性,利用数学、计算机等工具,在二值设备或多色二值设备上实现图像再现的一门技术,是将连续调图像经过处理后再输出以实现图像阶调再现的基础性研究。半色调技术应用于印刷工业已有一个多世纪,应用在数字输出设备上也有 40 多年,如今它已广泛应用于打印、印刷、显示以及数字图像的压缩存储等诸多领域,并且发挥着极大的作用。因此,研究数字半色调技术具有重要的现实意义和应用价值。

本文从数字图像处理的角度,对数字半色调技术及其中的误差扩散算法进行了全面系统的研究。首先由图像处理与印刷的关系为出发点,详细介绍了数字半色调技术的研究背景、基本原理、发展过程和现存的主要方法。接着重点研究了近年最受瞩目的误差扩散算法,对算法的思想、原理、影响算法的主要因素都进行了深入研究,对其中的阈值调节过程和滤波器的稳定性问题进行了深入分析和讨论。在此基础上,建立了数字半色调算法实验平台,对几种传统误差扩散算法进行了实验、分析和比较,并提出了两种新算法:针对传统误差扩散在中色调区域存在严重结构纹理的缺点,提出了一种基于视觉差的误差扩散法(简称 PEB Error Diffusion),明显减少了结构性纹理的存在;基于人眼对亮度的视觉感受特性,提出了一种自适应反馈视觉感知差的误差扩散法(简称 PEF Error Diffusion),明显增强了图像的整体对比度和细节再现能力,提高了图像的主观视觉效果。

关键词: 数字半色调 误差扩散法 人眼视觉系统模型 视觉感知差

Abstract

Halftoning is one of the oldest applications of image processing, since it is essential for the printing process. Digital halftoning refers to the process of rendering continuous-tone images to binary images so that it can be printed or displayed with bi-level devices. Today, it plays a key role in almost every discipline that involves printing and displaying. All newspapers, magazines, and books are printed with digital halftoning. So the research on digital halftoning is of great significance for its wide application.

In this thesis, the author mainly studies digital halftoning and error diffusion algorithm, which is hotly discussed and proves to be one of the best halftoning methods available today.

First the author systematically discusses the digital halftoning theory. Not only the principle and its development are presented, but also some main methods available and key techniques. The second part focuses on error diffusion algorithm, which is the most important part of the thesis. The author analyzes the algorithm and discusses three key elements influencing halftoning process: error diffusion filter, threshold modulation and scanning path. Finally, the author builds a digital halftoning bench and presents two new error diffusion algorithms. In order to deeply understand error diffusion, the halftones with different filters and scanning paths are compared and analyzed, which lays a strong foundation for further study. One of the algorithms is named Perceived Error-Based Error Diffusion (PEB Error Diffusion), which efficiently reduces the structured artifacts in midtone area and results in higher visual quality. The other is Adaptive Error Diffusion with Perceived Error Feedback (PEF Error Diffusion), which enhances the overall contrast, gives more details, and displays better visual quality than traditional algorithm.

Keyword: Digital Halftoning Error Diffusion HVS Model Perceived Error

创新性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名： 叶正春

日期： 2006-1-10

关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属西安电子科技大学。本人保证毕业后离校后，发表论文或使用论文工作成果时署名单位仍然为西安电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。（保密的论文在解密后遵守此规定）

本人签名： 叶正春

日期： 2006-1-10

导师签名： 郭定邦

日期： 2006.1.10

第一章 绪论

1.1 图像处理与印刷

图像是人类用来表达和传递信息的重要手段，是大众传媒的主要对象，在人们的教育、日常生活、工业生产及经济发展等领域中有着举足轻重的作用。近二十多年来，印刷技术吸引着世界范围内电子工程师、计算机科学家、艺术家和图像处理工作者的注意，其主要原因是印刷的科学—艺术双重属性以及印刷业可产生的经济利益，正极大地刺激着现代技术在印刷领域的大量应用。

1.1.1 图像处理与印刷的关系

迄今为止，大多数永久性图像仍然用印刷方式获得。这里所说的永久性图像是指转移到纸张或其它介质上供人眼阅读或欣赏的图文。摄影技术、电视机和互联网的发展使图像的来源有了更多的渠道，但电视画面上提供的图像还称不上是永久性图像；照片大多由私人或某一团体摄影或保存，不具备能为公众阅读的属性；国际互联网要真正进入每个人的生活也还有很长的道路。因此，可以预计，在相当长的时间内，打印或印刷设备所产生图像、文字依然是人们获得信息的主要来源^{[1][2]}。

在图像处理技术发展的开始阶段，它主要用于科学研究、医学、遥感等领域，但随着个人计算机和信息技术的飞速发展，印刷工程已逐渐引起众多图像工作者的注意。美国麻省理工学院的 Schreiber 博士在他的著作《电子成像系统基础》(Fundamental Electronic Imaging System)一书中提到：“由印刷生产所导致的革命性变革绝对值得图像处理工作者重视和研究，没有一个领域可以象印刷技术这样，在教育和文化服务中提供艺术和科学的完美结合”。

1.1.2 图像复制是印刷的重点

印刷技术的主要目的就是将文字、图像和线条等信息复制到某种介质上，满足各种不同的用途。其中，信息的复制过程是关键。在上述三种复制对象中，文字和线条可以归为一类，它们由轮廓和填充构成，复制起来比较容易。图像则有颜色和浓淡（深浅）的变化，复制难度相对较大。因此，图像的复制又是印刷的

重点。

由于计算机技术、电子技术、激光技术和精密机械技术的高速发展，彩色桌面出版系统应运而生。它的出现促进了印刷业从传统的复制工艺向着技术和艺术相融合的方向发展，给印刷工业带来了革命性的进步。数字化技术的全面引入不仅带给印刷业新的作业方式，更重要的是由它引起的一系列变革导致了人们观念的变化：人们开始对印刷有了更广义的理解，她正被其它信息产业所承认和接受，真正成为信息产业领域的成员。

1.1.3 印刷业对图像处理的特殊要求

1) 处理对象

就处理对象而言，印刷行业对处理对象有着特别的要求。常规意义上的图像处理，其处理对象主要是灰度图像，从图像中提取某一相关特征并加以利用处理，达到预期的目标。印刷业要处理的大多是彩色图像，印刷复制的主要目的是忠实地还原原稿，同时还要考虑印刷工艺能否满足图像的要求。印刷业要求图像处理过程中色彩的损失要小，因为这是忠实还原原稿的重要条件。

2) 表现方法

在图像的表现方法上，印刷业也有所不同。同样一幅彩色图像，电子屏幕和计算机屏幕是用红、绿、蓝三只电子枪激发荧光粉发光叠加产生颜色（利用加色原理）的，并且通过电流的强弱控制由电子枪发出的电子束的强弱。这样，在屏幕的同一点上，不同强弱的电子束便产生深浅不同的颜色。因此，这类显示器可以看作是一种多值设备，它表达图像采用的是“一对一”的映射方式。

印刷机（包括数字印刷机和各种类型的打印机）是典型的二值设备，它在一个位置上只有打点或不打点两种状态。这样，就形成了印刷技术用大小不同的网点来模拟连续调原稿的特定表达方式。印刷图像时，每一个网点需要用一系列某一规则排列的、更小的设备像素点群构成，即数字图像中的一个像素需要用有限个设备像素来组成。因此，印刷机表示图像采用的是“一对多”的映射方式^[1]。

3) 呈色机理

印刷采用油墨表现颜色，在呈色机理上与采用加色显示的电视机、计算机屏幕是不同的^{[1][9]}。这些区别以及印刷设备的一些特性造成了印刷复制图像的复杂性和需要解决的一系列问题，本文对此也进行了一定研究。

4) 需要处理的信息量

科学研究中涉及的图像大多数都幅面较小，分辨率也不太高。但在印刷技术中，为了忠实地表现原稿，印刷要处理的图像需要较高的分辨率，甚至是很高的

分辨率,这使得图像的数据量按几何级数增加。因此,不但要求进行处理的计算机有很高的运算速度和数据交换速度,而且对图像处理算法的计算效率也有相应的要求。

1.2 数字半色调技术概况

1.2.1 半色调技术的历史

半色调技术,也称加网技术,是图像处理领域历史最悠久的技术之一。它最初始于19世纪晚期,当人们尝试着使用设备在纸张上印刷文字和图像时,这种方法应运而生了。自印刷工业诞生以来,它作为印刷过程中最核心的环节一直受到学术界和产业界的极大关注,并且经历了漫长的发展过程^{[6][6]}。

“加网”作为一个动词,最初来源于早期制版时需要将接触网屏挂(附着)在感光胶片上曝光,以将原稿中带有不同亮度级别的像素对应地转化为细小网点的面积变化^[3]。这里,网点是构成印刷图像的基础,其状态(大小和形状)和行为特征将影响着印刷品还原原稿阶调和色彩变化的效果。加网则是表现图像不同层次的重要环节。组成加网图像的像素,通过面积和墨量变化再现原稿浓淡效果。可见,对原稿加网的结果是使连续调图像某一小区域的平均亮度转化为一个网点,而大小不同的网点构成了加网图像。因此,在传统加网算法中,正是加网过程完成了原稿的离散化,它与现代技术中原稿数字化时的离散有异曲同工之妙,区别仅在于传统加网过程是用模拟方法实现原稿的离散化的。

传统加网过程完成后,连续调原稿被变换成加网图像。此时,像素值用网点面积的大小表示:像素值越高(亮),网点百分比越低;像素值越低(暗),网点百分比越高。从微观上看,加网图像是不连续的,但从宏观上看,当网点面积发生大小变化时,根据光的加色法原理,人眼视网膜中得到的是网点反射后的综合感觉,即加网后的图像在人眼视网膜中产生的综合效果是颜色和层次的逐渐变化。当图像画面是由无数个面积不等的网点组成时,肉眼观察到的将是有明暗层次变化的画面,但是这种画面的网点只是改变了自身的面积,而没有改变网点在单位面积的数量,因此称为模拟加网。此外,为了区别加网图像与原连续调图像,习惯上将加网后得到的图像称为网目调图像,或半色调图像^[1]。

1.2.2 数字半色调技术的研究目的及意义

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,当今的半

色调技术已经超越了传统的模拟方法，进入了一个崭新的发展领域——数字半色调技术。

数字半色调技术是基于人眼的视觉特性和图像的成色特性，利用数学、计算机等工具，在二值设备或多色二值设备上实现图像再现的一门技术，是将连续调图像经过处理后再输出以实现图像阶调再现的基础性研究^[4]。

今天，数字半色调技术在诸多工业领域都发挥着极大的作用，如印刷工业、出版业以及各种涉及显示印刷的行业。我们身边的各种报纸、杂志、书籍、广告牌等印刷制品都是数字半色调技术的产物，所以，这种技术目前应用于所有二值图像显示设备中，如激光打印机、照排机、数码印刷机等。除此之外，该技术还广泛应用于数字图像的压缩存储、图像的传输、纺织、医学等领域，因此，研究数字半色调技术具有重要的现实意义和应用价值^{[6][7]}。

1.2.3 数字半色调技术的研究现状

1) 国外的研究状况

当前，美国、日本、瑞典等国的数字半色调技术研究水平较高^[4]，尤其是美国，大部分研究成果主要集中在几所大学以及研发机构中，并表现出非常强的研究继承性的特点。例如，Purdue University 的 Allebach 及其众多学生，自 80 年代中期以来，在误差扩散法以及迭代方法的研究中，取得了非常多的研究成果，成为数字半色调技术的重要推动力量；除此之外，Hewlett-Packard 实验室、Bell 实验室也长期致力于相关技术的研究。目前可查阅到的相关文献有 200 多篇，还有相当一部分重要技术都已经成为美国专利。因此，这从一个侧面反映了打印和印刷设备的市场被国外厂商垄断的主要原因来源于国内外研究状况的巨大差距，进而从深层次上反映了研究数字半色调技术的重要意义。

2) 国内的研究状况

国内关于数字半色调技术的研究起步较晚，大约从 90 年代初才开始，而且相当长的时间内也仅限于对相关技术的介绍，很少触及核心技术。直到 90 年代末，才逐渐开始相关算法的研究，和国外的研究进程还有很大差距。众所周知，1976 年首次提出的误差扩散法，是数字半色调研究的里程碑^[8]。近三十年来，它始终是半色调技术最热门的研究领域，并且提出了许多有效的方法。而目前国内的研究还主要集中在随机抖动方法上，对误差扩散法的研究刚刚起步。

另一方面，近四十年来国外半色调技术的研究一直被看做是数字图像处理的一个重要方向，几乎所有专家学者都出身于信息处理、图像处理或计算机应用等专业。目前我国半色调技术的研究只集中在极少数的几所设有印刷专业的大学中，

如北京印刷学院、武汉大学、西安理工大学等，还没有得到其它工科专业研究人员的足够关注，因而发展缓慢，技术较为落后。

1.3 研究工作概况及论文结构

1.3.1 主要研究工作

本文首先深入研究了数字半色调技术的相关理论，包括数字半色调技术的原理、发展、方法分类以及涉及的关键技术。接着深入研究了近年来最受学术界瞩目的误差扩散方法，尤其对其算法原理和稳定性能进行了深入分析。在理论研究的基础上，建立了数字半色调算法实验平台，对传统的误差扩散算法进行了实现和对比分析，并提出了两种新的基于人类视觉模型的误差扩散算法。

本人的研究工作主要分为以下五个阶段进行：

- 1) 认真阅读了国内外有关数字半色调技术的相关文献，对相关技术的背景、理论框架、国内外研究现状进行全面的了解。
- 2) 认真研究了各种半色调方法的基本原理、应用场合、算法特点，并确定将误差扩散算法作为进一步研究的重点。
- 3) 深入研究了误差扩散算法的基本原理、算法特征、关键技术及稳定性，深入了解国内外学者在相关领域所做的工作，寻找深入研究的突破口。
- 4) 利用 VC++ 6.0 建立了数字半色调算法实验平台，对几种传统的误差扩散算法进行了实验和比较。
- 5) 在深入研究的基础上，提出两种新的基于人类视觉模型的误差扩散算法，通过与传统算法进行比较，验证了算法的有效性。

1.3.2 本文的主要贡献

- 1) 从数字图像处理的角度，对数字半色调技术进行了全面系统的研究，介绍了它的原理、发展、主要方法及涉及的关键技术，建立了较为清晰的理论框架。
- 2) 对半色调技术中最具有影响力的误差扩散算法进行了深入的研究，在基本原理的基础上，深入分析了影响算法的主要因素以及算法的稳定性能。
- 3) 在深入研究的基础上，结合误差扩散算法和 DBS 算法的特点，提出两种新的基于人类视觉模型的误差扩散算法，通过与传统算法进行比较，验证了算法的有效性。

1.3.3 论文章节安排

论文全文共分为五章。

第一章为绪论，由图像处理与印刷的关系入手，概括介绍了数字半色调技术的历史、研究目的和意义及发展现状，并简要介绍了作者的主要工作。第二章详细介绍了数字半色调技术的基本概况，包括它的定义、分类、发展过程和主要的方法，此外，还介绍了数字半色调研究中涉及的几方面关键技术。第三章重点研究了半色调技术中最具有影响力的误差扩散算法，涉及了其基本理论的各个方面，包括基本原理、算法分析、影响算法性能的主要因素及算法的稳定性等内容。第四章在对误差扩散法深入研究的基础上，在实验平台上对几种传统误差扩散算法进行了实现，并提出了两种新算法：针对传统误差扩散在中色调区域存在严重结构纹理的缺点，提出了一种基于视觉差的 PEB Error Diffusion 算法，并进行了实验和分析；基于人眼对亮度的视觉感受特性，提出了一种自适应反馈视觉感知差的 PEF Error Diffusion 算法，通过实验与传统算法进行了比较，验证了算法的有效性。第五章对论文所有工作进行了总结，并展望了进一步研究的方向。

第二章 数字半色调技术概况

2.1 数字半色调技术的概念、原理及发展

2.1.1 数字半色调技术的概念

半色调技术，也称加网技术，是图像处理领域历史最悠久的技术之一。加网技术最初始于19世纪晚期，当人们尝试着使用设备在纸张上打印文字和图像时，这种技术应运而生了。尤其是印刷工业诞生以来，它作为印刷过程中最核心的环节一直受到学术界和产业界的极大关注，并且经历了漫长的发展过程。由于人们把这个由灰度图像得出二值图像的过程看作是在原始图像上增加了一个网屏进行处理，因此称其为“加网技术”，又因为在激光印字、照相复制及各种印刷中，由于要用二值输出表示图像的阶调层次，故又称半色调技术。

下面先给出数字半色调技术的英文定义，它简明准确地阐述了数字半色调技术的核心理念。

Digital halftoning refers to the process of rendering continuous-tone images to binary images so that it can be printed or displayed with a bi-level device.

更为具体的中文定义是，数字半色调技术是基于人眼的视觉特性和图像的成色特性，利用数学、计算机等工具，在二值设备或多色二值设备上实现图像再现的一门技术，是将连续调图像经过处理后用二值图像实现图像阶调再现的基础性研究^[4]。半色调技术应用于印刷工业已有一个多世纪，应用在数字输出设备上也有40多年，如今已广泛应用到打印、印刷、显示设备以及数字图像的压缩存储、图像的传输等领域，所以研究数字半色调技术具有重要的现实意义和应用价值。

2.1.2 数字半色调技术的原理

通过上述定义可以知道，数字半色调技术是一种与计算机应用相结合的技术，用来在单色显示打印设备上产生不同灰度的视觉效果，或在彩色显示打印设备上产生彩色视觉效果。这种技术主要取决于如何更合理地对图像区进行分组，并更合理地在每一个由多个像素组成的分组中分配黑白像素比例（对单色显示打印设备）或几种彩色像素比例（对彩色显示打印设备）。由于这些分组很小（通常仅仅是几个像素的级别），因此人眼会将其视为一种由分组中几种颜色共同混合而

成的某种单一颜色。这就解决了如何在 8 位显示设备上显示 24 位或 32 位颜色的问题。由于彩色图象的半色调处理通常是将颜色的各个分量独立地进行单色半色调处理，因此本文暂且只研究灰度图象的半色调处理，它是彩色半色调研究的重要基础。

不妨先来考虑这样一个问题：普通的黑白针式打印机能打出灰度图来吗？如果说能，从针式打印机的打印原理来分析，似乎是不可能的，因为这个过程是靠撞针击打色带在纸上形成黑点的，不可能打出灰色的点来；如果说不能，但的确见过用针式打印机打印出来的灰色图像。那么，这到底是怎么回事呢？

如果可以，不妨用放大镜仔细观察一下那些打印出来的所谓的“灰色图像”。于是发现，这些灰色图像其实都是由一些黑点组成的，黑点多一些，图像就暗一些；黑点少一些，图案就亮一些。



(a) Lena 原图

(b) 有序抖动

(c) Stucki 扩散

图 2.1 Lena 灰度图像及其半色调图像

图 2.1 的(a)图是一幅真正的 256 色灰度图，(b)图和(c)图为两种不同半色调方法的处理结果，分别为有序抖动和误差扩散。可以看出，(b)图中图像颗粒度严重，丢失了部分信息，而(c)图纹理更加均匀细腻，更好地保持了原图信息。尽管这两种处理结果有所差异，但它们都表现了半色调技术的确能够通过黑白二值图像来表现灰度图像。

由二值图像来表现灰度图像的效果，就是半色调技术的目的。单色二进位打印机（例如单色喷墨打印机或激光打印机）的点只能是开或关两种状态，不能打印一个点的一部分，或降低点的强度。在纸上的每一个点的位置（像素），要么打印点，要么“无点”。对于纯黑色的文本打印来说，这就足够了。但是要打印不同深浅的灰度图像时，软件驱动程序必须使用半色调技术。它与印照片所用的技术是相同，印出来的图像虽然是一些深浅不同的黑点，但根据人的视觉特征，这些点可以构成具有整体感、层次感的图像。

为了得到半色调图像，软件驱动程序需要先把页分割成单元。一个像素就是一个点位置，一个单元就是一个矩形的像素矩阵。在一个单元中打印黑色时，该单元中所有的点位置都以黑色打印。要打印一个白色空间时，所有点位置都不打印。打印不同深浅颜色时，该单元中只有一些点位置被打印。颜色越浅，单元中

被打印的点数就越少。如要表示 25% 的灰度时，单元中只有四分之一的点被打印成黑色，而 50% 的灰度时，将有一半的点被打印成黑色。接着在纸上平铺这些单元，就能够得到相应的半色调图像，其中，单元中像素的数量决定了在这个单元中能够打印的灰度级别的多少。如一个 4×4 的单元可以有 $16+1$ 级灰度， 8×8 的矩阵可以有 $64+1$ 级不同的灰度。所以单色半色调能够仅用黑色墨水再现不同深浅的图像。

正如单色半色调能够仅用黑色墨水再现不同深浅的图像一样，彩色半色调能够仅用三种颜色的墨水再现丰富的色彩。彩色半色调与单色半色调类似，但彩色半色调不是用单一黑点模式创建的，而是用三个不同的层或颜色平面创建的：一个是青色点平面，一个是品红点平面，一个是黄色点平面。把这三种平面放在纸上，外加上黑色，就可以再现几乎无限的色彩。彩色半色调需要较为复杂的软件算法，对图形质量要求也更高，因此，不同品牌的彩色喷墨打印机打印质量很大差别。

2.1.3 数字半色调技术的发展

由于半色调技术主要应用于印刷工业，且一般称为“加网技术”，所以在研究半色调技术的发展时，我们暂且如此称呼。

随着印刷工业及数字化的发展，人们早已从传统的模拟加网方法中解放了出来，进入了数字加网阶段。数字加网的出现给一成不变的印刷加网方法注入了新的活力，并极大地推动了印刷产业的发展。其发展过程如下：

1) 调幅加网 (Amplitude Modulation Screening)

调幅加网的主要特征是：网点之间的中心距离保持不变，通过改变网点本身的大小，来再现原图像的深浅浓淡。

其方法是把一个固定大小的网目调单元，平均分成若干个小方块的栅格，然后根据像素的灰度值对网目调单元格中的栅格涂黑。涂黑的网点形状有一定规则，其网点结构如图 2.2。

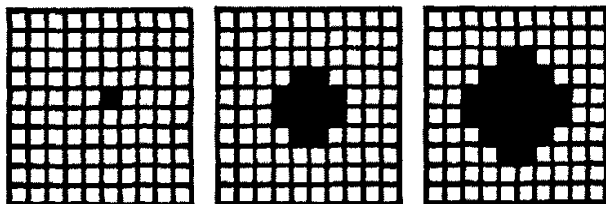


图 2.2 从左至右分别为 1%、12% 和 24% 的调幅网点结构

目前的大多数印刷工艺都使用这种加网方法。它的优点是网点间的间距和角

度都是固定的，算法简单，运算快速，并且能够稳定地表现图像的阶调变化（特别是中间调部分）。如今，调幅加网技术已经比较成熟，但依然存在着一一些难以避免的缺陷：a)由于每个色版的加网都有着固定的间距和角度，对于彩色印刷来说，如果各个色版没有严格的套准，或是网线角度与原稿中的景物纹理发生冲突，很容易导致龟纹的出现^[9]；b)容易出现线条的锯齿化和断裂，或是渐变色区域的阶调跳跃等现象；c)有时高光部分会因为网点过小，产生网点丢失。

这里的龟纹现象其实是物理光学中的莫尔条纹现象，故有时也称莫尔条纹。在物理光学中，把由两个由透光和不透光部分构成的物体重叠而产生的有规律的条纹都称作莫尔条纹。印刷技术中，龟纹的定义是：“由于各色版所用的网点角度安排不当等原因，在印刷图案中出现的人眼能观察到的不理想花纹。”

2) 调频加网 (Frequency Modulation Screening)

1993 年底，Linotype-Hell 公司和 Agfa 公司相继推出他们各自的随机加网，随机加网就开始被大家熟知。为了在本质上和调幅加网相区别，随机加网又称调频加网。

调频网点有两种基本类型。第一种调频网点是：每个网点大小（面积）一定，仅网点的空间分布随机变化，这称为一级调频网点 (First Order FM Dot)；另一种是网点的大小（面积）和空间分布频率均在变化，被称为二级调频网点 (Second Order FM Dot)。

一级调频网点中，每个网目调单元也是分成若干个小的栅格，而每个栅格中被涂黑的点的数量由图像像素的灰度值决定。把每个被涂黑的孤立的小点作为一个网点来看，就是用网点分布的频率来表现不同阶调的变化。调频加网的一级调频网点结构如图 2.3 所示。

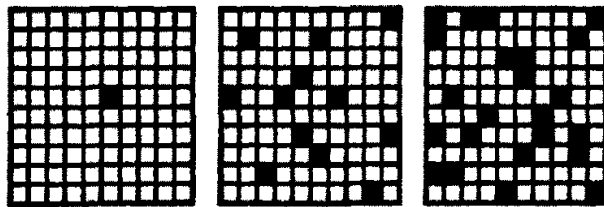


图 2.3 从左至右分别为 1%，12% 和 24% 的一级调频网点结构

调频加网的出现引起了人们的极大关注，因为它具有许多调幅加网没有的优点：a)由于整个网点都是一种无序的随机排列，从根本上消除了由于固定形状和角度而产生的玫瑰纹和龟纹；b)小网点在中间调部分能够再现更多的细节，而在亮调部分，比调幅应有的网点都大，因而不会产生网点丢失现象；c)由于不是某个特定形状的网点的逐渐扩大，所以在特定阶调处不会出现阶调跳跃；d)因为没有网角的限制，可以实现多色叠印，配合高保真色彩，使用七色的分色技术，在色彩范围、印刷密度、清晰度方面都有显著提高。特别是二阶调频加网，它与原稿表现阶调

的机制非常相似（原稿是由距离不等、大小相同的银粒或染料微粒来形成阶调或色彩的），因此只要硬件许可，在理论上印刷品可以充分接近原稿。

虽然调频加网相对于调幅加网有着这么多优点，近年来也相继有许多公司推出自己的调频加网技术，但是调频加网在目前想广泛推广开来，还有一定的限制：
a)容易产生粗糙、颗粒感。因为调幅加网具有规律性，因而产生的噪音很容易过滤掉，而调频加网具有随机性，随机噪声是不可过滤的。1/4 阶调区域的网点尤其容易引起人视觉上的注意，产生颗粒状外观；b)由于网点扩大只发生在网点边缘，在相同密度下，调频加网的周长更大，网点扩大也更严重，因此需要高精度和苛刻性的印刷条件；c)尽管生成的加网文件较小，但由于较细的网点结构及随机网点所增加的计算复杂度，对系统的软硬件都提出了更高要求。

为了更好地理解两种技术的差异，表 2.1 对调频加网和调幅加网的技术特征简单作以比较。

表 2.1 调幅加网和调频加网的特征比较

	调幅加网技术	调频加网技术
英文名称	Amplitude Modulation (AM)	Frequency Modulation (FM)
基本原理	网点的密度(即单位面积内点的数量)一定, 调节网点的大小	网点的大小一定, 调节网点的密度(或称相对位置)
优点	1)算法简单, 计算复杂度低 2)网点形状稳定, 可以有效克服打印过程中的网点扩大	1)不存在龟纹 2)不容易产生网点丢失、阶调跳跃 3)比调幅加网的空间分辨率高、视觉效果好
缺点	1)容易产生龟纹 2)容易出现线条的锯齿化和断裂, 及渐变区域的阶调跳跃现象 3)有可能出现网点丢失	1)随机噪声难以过滤 2)网点扩大现象要求更高的印刷条件 3)计算复杂度较高

3) 混合加网

目前还没有哪一种技术可以完全取代另一种来统一印刷世界的加网界，于是就有了不少取两家之长的综合利用方法。这里简要介绍两种主要方法：

一种是在中间调部分完全使用真正的调幅，而在高光和暗调部分完全使用真正的调频。由于调频加网和调幅加网在本质上完全不同，如何使它们之间有一个平滑的过渡，是这种混合加网最需要关注的问题。

另一种就是对所有的网点同时使用调频调幅两种算法特征来进行加网。其中最具代表性的是调频/调幅加网技术，详见 2.2.4 节。

2.2 数字半色调技术的主要方法

半色调技术应用于印刷工业已有一个多世纪，应用在数字输出设备上也有 40 多年。数字半色调技术经过 40 多年的发展已建立了较为完善的理论体系，并根据不同特性和应用领域，提出了许多方法。

目前学术界公认且广为流传的分类方法是，按照算法的处理方式分为抖动法、误差扩散法和迭代法三大类。

2.2.1 抖动法 (Dithering)

1) 有序抖动 (Ordered Dithering)

有序抖动是一种最简单的临域处理方法。它利用一个抖动矩阵将一个灰度图像转换成二值图像。设 $g(m,n)$, $b(m,n)$, $T(m,n)$ 分别表示输入灰度图像、输出二值图像及抖动矩阵 (也可代表象素)，则其数学表达式为：

$$\begin{cases} b(m,n) = 1, & g(m,n) > T(m,n) \\ b(m,n) = 0, & g(m,n) \leq T(m,n) \end{cases} \quad (2-1)$$

这里， $b(m,n)=0$ 表示输出为“白点”，反之， $b(m,n)=1$ 表示输出为“黑点”。如图 2.4 给出了一个象素块的抖动过程。一般来说，抖动矩阵象素的分布决定了和矩阵大小相同的图像块内的输出结果，也决定着整幅图像的输出效果。

根据抖动矩阵的不同，半色调图像会表现出不同的特点。最简单的抖动矩阵是常值抖动矩阵，即 $T(m,n)=0.5$, $\forall m,n$ 。这种方法相当于使用一个阈值对图像进行简单的二值化。由于这种方法丢失了大部分细节信息，故图像效果最差。

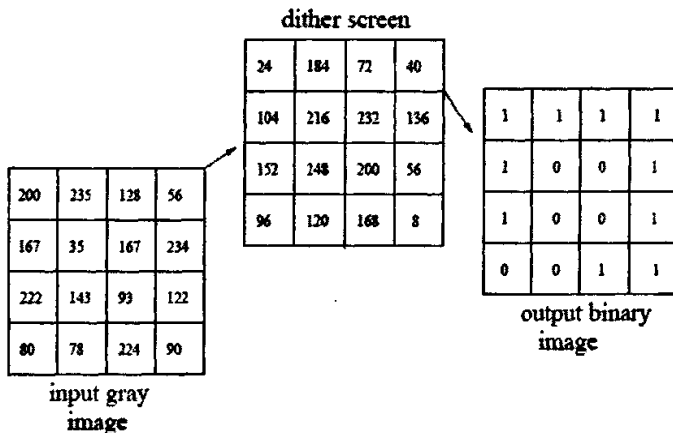


图 2.4 有序抖动原理示例

有序抖动的主要过程如下。首先，原始连续调图像被分割成与抖动矩阵大小

相同的多个矩阵单元，接着通过抖动过程确定每一单元中的点模式，最后所有的矩阵单元共同组成半色调图像。

其中抖动矩阵的设计最为重要。下面介绍一种设计抖动矩阵的算法，是由 Limb 在 1969 年提出的。以一个 2×2 的矩阵开始，

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

利用下面的递归关系求解

$$M_{n+1} = \begin{bmatrix} 4 \times M_n & 4 \times M_n + 2 \times U_n \\ 4 \times M_n + 3 \times U_n & 4 \times M_n + U_n \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

其中 M_n ， U_n 都是 $2n \times 2n$ 的方阵，所有元素都是 1。根据这个算法，可得

$$M_2 = \begin{bmatrix} 0 & 8 & 2 & 10 \\ 12 & 4 & 14 & 6 \\ 3 & 11 & 1 & 9 \\ 15 & 7 & 13 & 5 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

为 16 级灰度的抖动矩阵。 M_3 (8×8 阵) 比较特殊，就是即将提到的著名的 Bayer 抖动矩阵。

有序抖动又分为两类。

第一类是点聚集态有序抖动 (Clustered Ordered Dithering)。这种抖动矩阵的设计考虑了调幅加网的处理过程。因此，当连续调图像的象素密度减少时，就令一个单独点的周围再增加一些点。这种抖动能够有效地缓解“点增益”现象——由各种光学及机械特性引起的，网点向周围的网格扩散的现象，这部分内容将在 2.3 节深入讨论。

另一类是点离散态有序抖动 (Dispersed Ordered Dithering)。最具代表性的是由 Bayer 提出的含有 8×8 个不同元素的 Bayer 抖动矩阵。他在不同亮度条件下，通过对点的模式进行傅立叶分析，测量了各类人工纹理的视觉可见性，并得出了这样的结论：当一个图像块的点的模式具有许多不同波长的分量时，那些具有最长波长的分量最容易被眼察觉。基于这样的结论，Bayer 设计了最优的有序抖动矩阵，即上面提到的 M_3 。这种方法得到的加网图像比利用点聚集态有序抖动的处理结果能够保留更多的细节信息，视觉效果更好。

有序抖动的优点是算法简单，易于实现；缺点是容易产生人眼可以辨识的有规律的结构性纹理。为了得到视觉效果更真实的图像，误差扩散方法开始引起人们的足够关注。

2) 随机抖动 (也称“随机加网” Stochastic Screen)

“随机”一词来自希腊语，17 世纪就已出现在英语中。在印刷业中，通常用来表示“不确定”的涵义。广义上，随机加网指传统分类方法中的调频加网，而狭义上，它仅指随机抖动。由于即将在后面进一步介绍误差扩散等方法，这里就

把它作为抖动算法的一种进行介绍。它是一种每个网点尺寸保持不变，通过控制给定面积内网点的密集程度来表现图像密度和色彩的半色调方法。当欲减少特定面积中的某种颜色时，就可采用较少数量的网点，而不是较小面积的网点。

随机加网技术的主要优点之一就是采用了大量细小的网点来表现图像，从而获得比调幅加网更为精细的复制图像。除此之外，随机加网还能够有效地减弱常见的龟纹现象，特别是在不同色彩分色片之间形成的龟纹。

2.2.2 误差扩散法 (Error Diffusion)

误差扩散法是由 Floyd 和 Steinberg 于 1976 年首次提出的，并一举成为当时处理效果最好的半色调方法^[9]。误差扩散法的出现是半色调技术史上重要的里程碑，它带来了革命性的技术变革，并促进了半色调技术的飞速发展。误差扩散处理后的半色调图像中像素点的分布是各向异性和无规律的，因而色调丰富，视觉效果好。直到今天，它依然以其视觉效果好、易于实现等特征被认为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区域。每个像素的误差扩散过程包括如下三个步骤。第一，将原灰度图像在此处的像素值与之前被扩散到此处的误差相加，得到当前输入；第二，将当前输入与阈值相比较得到一个二值输出（0 或 1）；第三，将输入与输出的误差值按照一定的规律扩散到未经处理的区域。图 2.5 为误差扩散算法的原理框图。

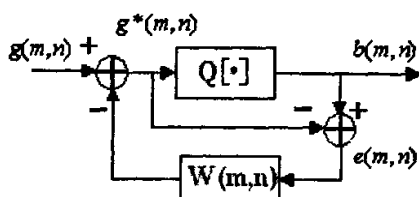


图 2.5 误差扩散法的原理框图

设 $g(m,n)$, $g^*(m,n)$, $b(m,n)$, $e(m,n)$ 分别表示输入灰度图像、上一步扩散后的输入图像、输出二值图像以及 (m,n) 处的量化误差，则误差扩散法可用如下方程表示：

$$g^*(m,n) = g(m,n) + \sum_{k,l} w(k,l) \cdot e(m-k,n-l) \quad (2-5)$$

$$b(m,n) = Q[g^*(m,n)] = Q \left[g(m,n) + \sum_{k,l} w(k,l) \cdot e(m-k,n-l) \right] \quad (2-6)$$

$$e(m,n) = b(m,n) - g^*(m,n) \quad (2-7)$$

这里, $w(k,l)$ 是误差扩散滤波器在 (k,l) 位置的误差扩散权值, $Q[\bullet]$ 代表阈值量化操作。在大部分传统算法中, 阈值通常取归一化后的 0.5 (即 128)。半色调技术中的“半”正来源于此阈值, 它依然保留着最初的含义。

近 30 年来, 误差扩散法成为数字半色调技术中最热门的研究领域, 并取得了诸多的研究成果, 极大地推动了半色调技术的研究和应用。本论文的第三章将进一步系统地研究这种方法。

2.2.3 迭代法 (Iterative Processes)

迭代法, 也称基于搜索的算法 (Search-based Processes), 其主要思想是通过多条路径来决定最终的输出。它们通过最小化连续调图像和二值图像之间的误差, 来寻找可能存在的最优的二值输出。这种方法是三类方法中计算复杂度最高的, 然而, 它输出的处理结果却优于抖动和误差扩散^{[13][14]}。

迭代算法以直接二值搜索算法为代表。直接二值搜索算法 (DBS: Direct Binary Search) 是为连续调图像寻找最优的半色调图像的一种方法, 是一种基于人类视觉模型 (HVS 模型) 的搜索算法。它通过最小化人眼观察到的连续调图像和人眼观察到的二值图像之间的均方误差, 对当前像素的二值输出不断进行矫正以得到最优的处理结果。图 2.6 为 DBS 算法的原理框图。

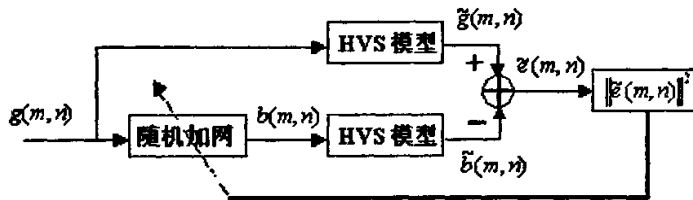


图 2.6 DBS 算法的原理框图

该方法首先利用随机抖动得到一幅半色调图像, 然后使用“贪心法”对二值图像的每一个像素点进行考察, 使得每个像素被处理后误差图像的局部均方误差值最小。该方法是一种没有因果性条件限制的迭代法, 其优点是: 产生的半色调图像的视觉效果最令人满意, 基本上没有结构性的龟纹和人工痕迹; 能够正确地再现图像的色调, 特别是在灰暗处再现丰富的色调; 该方法在桌面印刷应用中具有很大的潜力。但是由于它的计算复杂度非常高, 故很难用于实时处理场合。表 2.2 对三大类主要方法的优缺点进行了对比。

2.2.4 其它方法

除了以上三大类方法, 学术界还提出了许多其它的半色调方法, 它们分别具

表 2.2 三类主要半色调方法的优缺点对比

方法名称		优点	缺点
抖动法	点聚集态 有序抖动	能够较好地减弱“点增益”现象	半色调图像色调不丰富，视觉效果不够好
	点离散态 有序抖动	比点聚集态的处理结果保留更多的细节信息，视觉效果更好	不能克服“点增益”现象，实际应用场合较少
	随机加网	有效减弱龟纹的影响	半色调图像色调依然不够丰富
误差扩散法		1) 得到的半色调图像色调丰富 2) 像素点的分布是各向异性和无规律的 3) 原理简单，算法效率高	1) 有龟纹现象 2) 在高光和暗调部有与处理方向相关的滞后现象 3) 有不连续的过渡现象
迭代法		1) 视觉效果最令人满意，基本上无结构性的龟纹和人工纹理 2) 能够正确再现图像的色调	计算复杂度太高，很难用于实时处理场合

有不同的算法特点及适用性。下面对几种具有代表性的方法简要作以介绍。

1) 点扩散算法 (Dot Diffusion)

点扩散方法是由 Knuth 最早提出的^[5]，它结合了抖动法和误差扩散法的算法特征，具有平行处理的特点。

点扩散方法只涉及到一个参数——分类矩阵 C。分类矩阵 C 通常是一个 $N \times N$ 的矩阵，元素的值从 1 到 N^2 ，它们决定了象素处理的顺序。

点扩散算法主要分为两步。第一步，将象素进行归类。设灰度图像的象素坐标为 (m, n) ，按照 $(m \bmod N, n \bmod N)$ 的准则，将整幅图象的所有象素归入 $N \times N$ 个类中，其中 N 都为常数。图 2.7 就是一个分类矩阵，这里 $N = 8$ ，表示一个分类矩阵中共有 64 个元素，各位置的数值表示了象素处理的顺序。分类完成后，每个类都是一个和分类矩阵大小相同的象素矩阵。第二步，按照分类矩阵规定的顺序，对各个象素依次进行误差扩散处理。这里的误差扩散与传统算法有所区别，下面举例说明。

37	41	34	14	60	61	7	9
16	12	36	59	48	17	50	24
45	27	33	58	5	3	42	48
29	2	57	30	43	15	20	11
26	18	55	49	4	32	10	54
25	21	53	40	38	6	64	52
8	28	35	13	39	22	63	56
51	44	19	23	31	62	1	47

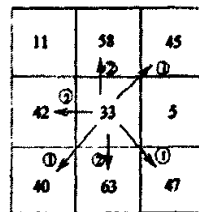
图 2.7 8×8 的优化分类矩阵

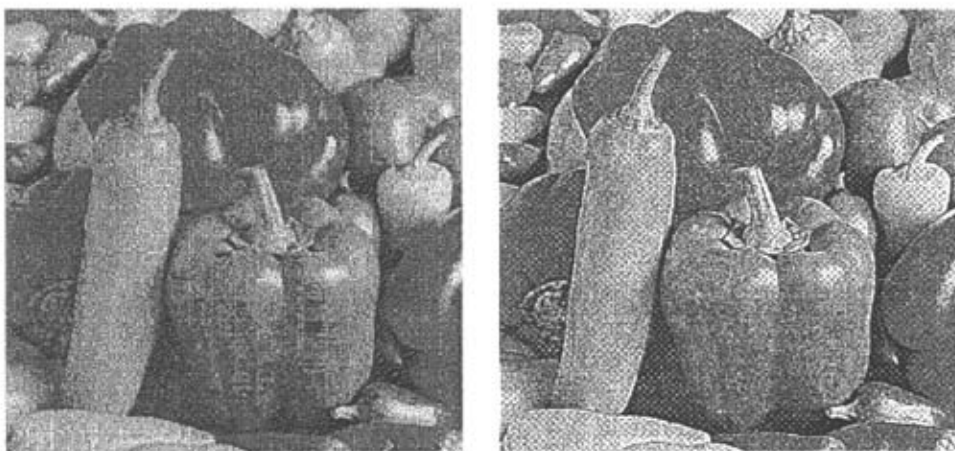
图 2.8 扩散过程示意图

如图 2.8 对应分类矩阵的一部分, 图中的 9 个数值为分类矩阵的元素, 并不代表当前的灰度值; 圆圈内的数字代表扩散的系数, 这是因为人眼对于水平、垂直方向的误差比较敏感, 所以水平、垂直方向上分配的误差是对角线上的 2 倍。下面以 33 为例介绍扩散过程。首先, 类似于误差扩散对 33 位置的灰度值进行阈值处理, 得到一个二值输出, 计算出此处的误差值 $e(m,n) = g(m,n) - b(m,n)$; 接着, 找出其 8 邻域中所有序号大于 33 的元素, 分别为 58, 45, 42, 40, 63 和 47; 然后将此处的误差按照所有系数之和 ($2+1+2+1+2+1=9$) 除以 9; 最后将这个商乘以相应位置的扩散系数, 并加到对应位置的灰度值上。如果分类矩阵如图 2.7, 那么完成一个类中的点扩散就需要进行 64 次上述过程。

一般来说, 在点扩散之前, 通常会进行图像增强的处理过程, 即将当前像素 $g(m,n)$ 用 $g'(m,n) = (g(m,n) - \alpha \cdot \bar{g}(m,n)) / (1 - \alpha)$ 代替, 这里

$$\bar{g}(m,n) = (\sum_{u=m-1}^{m+1} \sum_{v=n-1}^{n+1} g(u,v)) / 9 \quad (2-8)$$

因此, 参数 α 决定着图像的增强程度。如果 $\alpha = 0$, 表示没有增强, 并且图像的增强程度随着 α 的增加而增强。



(a) Floyd-Steinberg 误差扩散

(b) 点扩散算法

图 2.9 误差扩散算法与点扩散算法的效果比较

图 2.9 给出了 512×512 的 Pepper 灰度图像经误差扩散法和点扩散方法的半色调调结果, 这里点扩散采用了 Knuth 的分类矩阵。可以看出, 该方法处理后得到的半色调图像具有较多的龟纹, 整体视觉效果并没有误差扩散好。为了减少龟纹, 也提出了一些改进的点扩散方法, 它们对等级矩阵进行了优化, 使该矩阵具有蓝噪声特征, 改进后得到的图像龟纹有所减少, 更接近于误差扩散的结果。但是至今为止, 关于这方面的研究还非常有限, 能够有效改善点扩散视觉效果的方法还不多见。

2) 调频/调幅半色调 (FM/AM)

正如 2.1 节, 半色调技术传统上主要分为两大类, 一类是调幅半色调技术, 另一类是调频半色调技术。前者通过调节簇点的大小来控制输出图像的质量, 它的优点是计算复杂度小, 易于实现, 具有良好的打印稳定性; 不足之处是处理后的图像会损失很多空间分辨率, 并常出现龟纹现象。而后者不改变簇点的大小, 而是通过改变簇点之间的相对位置来表现连续调图像, 它的优点是具有较高的空间分辨率, 龟纹现象少; 但不足之处是它的打印稳定性较差, 容易受打印设备本身的非线性特性影响。

为了克服调幅半色调和调频半色调的不足, 2002 年, Purdue 大学的 Zhen He 提出了一种新的方法, 即调频/调幅半色调方法^[15]。该方法将调幅、调频半色调方法结合起来, 通过同时调节点的大小以及点的相对位置实现图像再现。图 2.10 表示了调频/调幅半色调的基本原理。首先通过一种离散点半色调算法控制点的相对位置并得到基于原始图像灰度级的点密度曲线, 然后根据得出的点密度曲线调节点的大小, 最后输出结果图像。

这种算法的优点是: 第一, 在图像的暗调区域具有更好的稳定性, 细节丰富; 第二, 具有较高的空间分辨率, 视觉效果良好; 第三, 具有平滑的半色调纹理; 第四, 基本消除了龟纹。

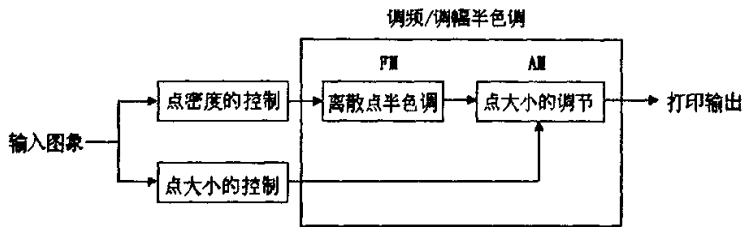


图 2.10 调频/调幅半色调的原理框图

3) 基于 LUT 即 TLUT 的半色调方法

LUT 半色调方法^[17]的主要原理为, 先对连续调图像使用任意一种半色调方法得到一幅半色调图像, 再采用局部平均值法得到每一像素的最终半色调值, 然后将原灰度图像的像素值与最终的半色调值放在一个表中, 通过查表的方法实现图像再现。该方法的优点是: 中间灰度处产生的效果与误差扩散法一样; 运算速度快。不足之处在于: 在暗调和高光区域, 细节再现不足; 半色调图像中存在局部性纹理; LUT 表所占的存储空间较大。为了提高半色调图像的质量, 减少 LUT 表的存储空间, [文献 15]又提出了 TLUT 半色调方法。

TLUT 半色调方法是以树型结构来存储 LUT 表的, 每个树叶存放相应像素的半色调值。由于在 LUT 算法中, 存在许多非法的半色调值, 而在 TLUT 中不存在非法的半色调值, 所以占用空间较小, 计算量也小, 图像的质量明显优于 LUT 算法的结果。这种方法的计算复杂度低于 DBS, 但依然高于误差扩散法。

4) 蓝噪声及绿噪声半色调算法

最早把噪声引入半色调技术的是白噪声半色调方法。所谓“白噪声半色调”是指由于白噪声的低频成分相当多，而人眼对于低频成分又相当敏感，所以该方法得到的半色调图像龟纹较多，图像有所变形。后来根据人眼是低通滤波器的特征，提出了蓝噪声数字半色调方法^[19]。这两种方法处理后的图像具有蓝噪声特点，没有结构性的龟纹，整体效果良好，不足之处是对图像灰度等级的变化不敏感。在蓝噪声技术中，通过使黑点尽可能独立且均匀地分布，得到点离散态的抖动矩阵，这样产生的模板就只含有高频分量，因而半色调图像纹理细腻，视觉效果很好。蓝噪声技术主要用于能够产生孤立网点的显示设备，如视频显示设备以及一部分打印设备（如喷墨打印机）。

对于那些不支持孤立网点的显示设备，点离散半色调技术就不合适了。这时，必须采用点聚集态半色调技术来减弱“点增益”的影响。绿噪声的概念是由 Daniel 于 1998 年首次提出的^[20]，他通过谱分析的方法得出，绿噪声半色调图像就是一种点聚集态的蓝噪声模板。它具有蓝噪声模板的一致性，没有低频纹理，但在每个蓝噪声的中心却表现出点聚集的状态。事实上，绿噪声仅由中频分量组成，由它处理后的半色调图像具有绿噪声的特点，对图像灰度级的变化不敏感，并能有效抵制由打印设备的非线性特性所引起的图像畸变^[21]。

目前，蓝噪声和绿噪声方法是半色调研究中一个热点方向，文献[22]对它们进行了较为详细的介绍。

2.3 半色调研究中的关键技术

当人眼观察印刷制品时，有两个过程主要影响着观察者最终的判断，分别是显示或打印设备的处理过程以及人眼的观察过程。因此，深入研究半色调算法必然要涉及到对人眼视觉模型和打印机模型的研究。

尽管所有的半色调算法都或多或少地依赖于人眼特性和显示设备的特性，基于模型的半色调技术（Model-based Digital Halftoning）却旨在建立较为准确的视觉系统模型和打印机模型，进一步优化半色调算法的精确性^[24]。图 2.11 表示了这种半色调技术的处理流程。本节将对这两种模型简要作以介绍。

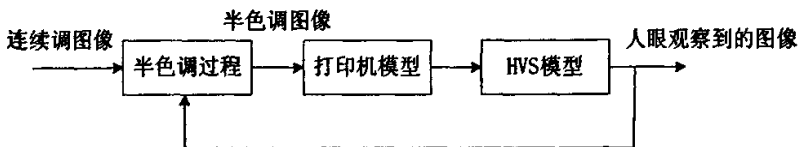


图 2.11 基于模型的半色调技术

2.3.1 人眼视觉系统模型 (HVS 模型)

1) HVS 模型的特性

由于图像的最终接受端是对光刺激具有感觉的人眼视觉系统, 所以了解 HVS 模型的基本特性, 对于研究基于主观判断的图像处理是非常有益的。

半色调技术属于图像复制的一种, 而图像复制的主要目的, 就是使复制图像的视觉感受同原图像尽可能地相同。由生理解剖学可知, 视网膜是眼睛中把光学信号转变为生理反应的重要器官, 它直接感受外界光刺激, 产生的生物电脉冲信号经神经纤维传递到视神经中枢, 最后在大脑中形成景像。所以, 研究人类视觉系统模型 (HVS 模型) 对于半色调技术的研究具有重要价值^{[24][27]}。

在图像处理中, HVS 模型具有很多特性, 如对亮度反应的非线性特性、频域特性、时间频率特性 (针对视频) 及图像类型特性等等。在半色调技术的应用中, 通常主要研究前两种特性。

一、视觉对亮度反应的灵敏度是非线性的。例如, 人眼视觉系统对于黑暗背景的微小亮度变化比较敏感, 而对于明亮背景下的微小变化则较难察觉, 这从一个侧面反映出 HVS 有其特定的亮度反映曲线, 并且这条曲线是非线性的。根据实验得出的结论, 在人眼适应了某一平均亮度后, “黑”和“白”感觉对应的亮度范围将有所缩小。因此以人眼观察为目的重现数字图像时, 重现图像的亮度不必等于实际景物的亮度, 只要保持二者的对比度及亮度差的级别相同, 就能给人以真实的感觉。所以在考虑图像的亮度再现时, 要特别注意保持图像不同灰度级的对比度。

二、视觉有其本身特有的空间频域特征。F.W.Cambell 早在 1974 年发表的“空间信息通过视觉系统的传输”一文就指出, 视觉系统呈多频道性, 每频道对应不同的空间频率调制, 且各频道带宽不超过一个倍频程。形成视觉系统的这种带通特性, 并不是眼球的屈光系统, 而是视网膜。其中视网膜中 Y 型神经节细胞对空间频率呈低通特性, 而 X 型神经节细胞也呈低通特性, 但低频部分下降很快, 高频部分延伸。大脑视觉区中简单细胞呈窄带通特性, 复杂细胞呈宽带通特性, 其调制传递函数曲线具有带通滤波的特性。然而, 在数字半色调研究中, 通常忽略视觉特性在低频部分的快速下降, 而将它看作具有低通特性。因此, 如果将图像从空间域变换到频域, 那么频率越高, 人眼的分辨能力就越低; 频率越低, 人眼的分辨能力就越高。由此可知人眼对高频细节其敏感性较低, 即人眼相当于一个低通滤波器。正是基于人眼在实际观察过程中相当于低通滤波器的事实基础, 才使通过二值图像来实现灰度图像阶调再现成为可能, 因此这也成为数字半色调技术的理论基础^{[31][24]}。

2) HVS 模型在半色调技术中的应用

自数字半色调技术出现以来,几乎所有的算法都直接地或间接地考虑到了 HVS 模型^[3]。如 Bayer 抖动矩阵是考虑到将二值图像中纹理的频谱能量从原点移到更高频部分而设计的; Floyd-Steinberg 误差扩散滤波器能够有效地扩散误差也是基于它的权值分布相当于一个低通滤波器; 还有, Ulichney 的 void and cluster 算法也引入了一个 Gaussian 滤波器来决定半色调图像中空白区和簇点的位置。所有上述算法都有一个共同的前提,即把人眼的观察过程看作一个低通滤波过程。然而,在这些算法中, HVS 模型并不是算法的一个具体组成部分,因而它们并不属于基于模型的半色调算法范畴。

在过去 25 年中,尽管在建立人类视觉模型方面已取得了巨大成就,但目前用于半色调技术的 HVS 模型还只限于对比度敏感函数(CSF,对于观察者而言)是线性时不变滤波器(Linear Shift-invariant)的情况^[3]。

目前,半色调技术应用背景下 HVS 模型的系统性研究才刚刚开始。文献[3]指出,现在广泛应用于图像处理领域的 HVS 模型主要是 Näsänen、Mannos、Campbell 和 Daly 提出的四类模型。Sang Ho Kim 通过将规一化的四类 HVS 模型用于 DBS 算法中,分析了不同模型的半色调处理效果,并得出了一些结论。如, Näsänen 模型产生的图像纹理比 Campbell 模型更加光滑,但 Campbell 模型在中频区域表现出更一致的纹理;从理论上很难决定四种模型中哪种方法效果最佳,但对于数字半色调技术, Näsänen 模型具有较好的低通特性,通过它产生的半色调图像具有最好的主观视觉效果。事实上,这与 Alford 和 Mitsa 关于 HVS 模型的研究结论是一致的,即低通视觉模型产生的主观视觉效果比带通视觉模型更好。因此,研究基于 HVS 模型的半色调技术时, Näsänen 模型通常被作为首选。

由于 HVS 模型具有圆对称性特点,而这是模拟人眼视觉系统很重要的一个方面,因此常用 Gaussian 函数来代替 HVS 模型^[3]。这是因为, Gaussian 函数不但是可分离的且具有圆对称性,而且还有许多适合半色调处理的特征,如光滑的单峰曲线使其具有很理想的低通特性,其滤波器的傅立叶反变换也是高斯的,参数容易控制且没有振铃等,因此实际应用中它常被作为 Näsänen 模型的代替。

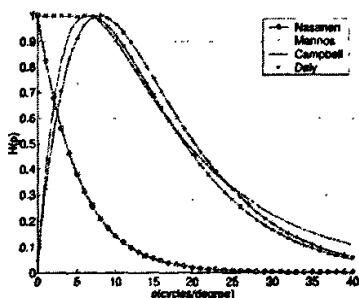


图 2.12 四类 HVS 模型的 CSF 曲线

2.3.2 点增益原理

1) 点增益现象

在研究打印机模型之前，让我们先来谈谈时常提及的“点增益现象”。因为提出打印机模型的目的，正是为了减弱这种现象对半色调结果的影响。我们知道，半色调算法的一个基本要求就是打印出来的二值图像的平均灰度应该尽可能地接近连续调图像，通俗地讲，即它们“黑”的程度应该相当。

众所周知，在数字图像处理中，一般都假设图像的像素点为正方形，然而，实际打印过程中所显示的黑点都呈现近似的圆形，而并不是正方形。这包括多方面的原因：光学效应（不同颜料对于光强的敏感性）、机械效应（纸张的物理特性、墨水的扩散特性等）以及打印设备的非线性特性（实际打印出的黑点的大小、形状、颜色密度都会有所不同）等。此外，目前的部分显示设备还具有网点调节能力，如改变黑点的形状区域等。因此，准确地说，打印设备的任何一个网点都有可能表现出上百种不同的状态。由于上述客观因素，实际打印出的网点不仅接近圆形，而且，若理想像素边长为 T ，实际墨点的直径还会略大于正方形的对角线，使得墨点的着色面积大于正方形面积 T^2 ，这就是所谓的“点增益现象”^{[24][25]}。所以，实际打印出的黑点比理想情况下覆盖了更多的白色面积，打印出的二值图像灰度级也有所降低，视觉上比原灰度图像整体偏黑。

图 2.13 表示了点增益现象的主要失真状态。一方面，打出的黑点呈圆形而不是正方形；另一方面，黑点的直径要略大于正方形网点的对角线。当然，实际打印中还有其他形式的失真，如受温度、光反射等引起的失真现象。因此，打印后当前像素的灰度值受当前网点及周围网点的共同影响，且它们的关系非常复杂。所以，建立打印机模型的目的就是利用这些关系更好地优化半色调技术。

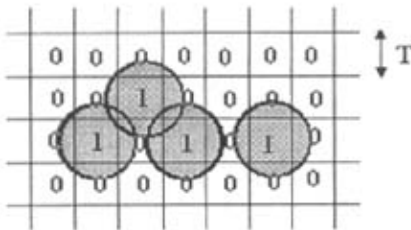


图 2.13 点增益现象示意图

2) 解决方法

最传统的减弱“点增益”的方法就是点聚集技术，即令单独的黑点尽可能地聚集在一起成为簇点。这样，对于同样数量的黑点，就可以通过减少其总周长，进而减弱“点增益”现象对处理结果的影响。这种传统方法对于“点增益现象”及

其它设备失真有较强的鲁棒性，但它得到的半色调图像在空间分辨率和图像纹理方面不是很理想^[24]。

除此之外，即将谈到的打印机“点扩散模型”和 3.2 节的基于输出的误差扩散法都是具有代表性的重要方法。

2.3.3 打印机模型

在讨论打印机模型时，主要针对高分辨率的激光打印机。建立打印机模型的目的在于准确地预测实际打印过程对于再现灰度值的影响。当然，这里还得考虑它必须能够以较为简单可行的方式纳入半色调算法当中。有了此模型，就可以利用打印机的特性产生视觉效果更优的半色调图像。

1) 点扩散模型

对于激光打印机来说，打印可以看作是在纸张上连续产生黑点或白点的过程。首先假设所有的点都是标准的矩形，水平和垂直距离分别为 T_x 和 T_y 。 T_x 和 T_y 的倒数分别是水平方向和垂直方向上打印机的分辨率（单位：dpi）。象素 (i, j) 就是以 (x_i, y_j) 为中心，面积为 T_x 乘以 T_y 大小的矩形，这里， $x_i = iT_x + T_x/2$ ，表示距图像左侧边缘距离为 $iT_x + T_x/2$ 的位置，同理， $y_j = jT_y + T_y/2$ ，表示距图像上边缘距离为 $jT_y + T_y/2$ 的位置。于是，整个图像可以看作是一个所有矩形象素点组成的网格状集合。打印机的状态通过一个 $N_x \times N_y$ 的二值矩阵 $[b_{i,j}]$ 控制，这里， $b_{i,j} = 1$ 表示以 (x_i, y_j) 为中心的点被赋予黑点，而 $b_{i,j} = 0$ 表示以 (x_i, y_j) 为中心的点不打点（即为白色）。

接着假设需要进行半色调处理的连续调图像先被进行量化采样，每一个象素对应一个网点，否则，还需要相应的插值运算。于是，同样定义一个 $N_x \times N_y$ 的矩阵 $[z_{i,j}]$ ，每一个矩阵元素的值都界于 $[0,1]$ ，假设它们的值（即象素值）表示此点的吸收率。因此，黑点的吸收率为 1，白点的吸收率为 0。反射系数则定义为：1-吸收率。所以，所有连续调图像的象素就转化为一个图像网点矩阵。

由 2.3.2 可知，打印后 (x_i, y_j) 处的灰度值受当前网点及周围网点的共同影响，而且它们的关系非常复杂。为此，让我们设 $u(s, t)$ 表示打印机在 (s, t) 处打点后的灰度值，于是

$$u(s, t) = f(s, t; B_{s,t}), \quad 0 \leq s \leq N_x T_x, \quad 0 \leq t \leq N_y T_y \quad (2-9)$$

这里， $B_{s,t}$ 表示 (s, t) 的所有相邻象素点的集合， f 表示某个函数。这里，函数 f 可以是一个确定的函数或是一个概率函数。然而，由于这些点在空间上相邻距离非常近，而且人眼的分辨率也很有限，因此可以把 $u(s, t)$ 在当前网点区域内的灰度近似为一个常值 $p_{i,j}$ ，即

$$\tilde{u}(s,t) = p_{i,j}, \quad |x_i - s| < \frac{T_x}{2}, \quad |y_i - t| < \frac{T_y}{2} \quad (2-10)$$

同样, (x_i, y_i) 为当前象素的中心。尽管实际灰度值并不是一个常值, 但是从人眼的实际观察效果来看, 近似为一个平均灰度值是完全合理的^[27]。 $p_{i,j}$ 恰恰代表了这一个平均灰度值, 它表示函数 $f(s,t; B_{s,t})$ 在当前象素面积中的平均灰度。因此, 这个平均灰度 $p_{i,j}$ 可以通过这样的形式表示

$$p_{i,j} = P(W_{i,j}), \quad 0 \leq i \leq N_x, \quad 0 \leq j \leq N_y \quad (2-11)$$

这里, $W_{i,j}$ 是一个窗函数, 包含所有与 $b_{i,j}$ 相邻的象素点, P 为某一函数形式。需要指出的是, P 完全取决于某一特定的打印机模型, 正如 (2-9) 式中的 f 一样, 它也可以是某一确定函数或是概率函数。于是, 如果已知二值矩阵 $[b_{i,j}]$ 表示了将要被打印的点模板, 打印机模型将得到一个新的矩阵 $[p_{i,j}]$, 它与 $[b_{i,j}]$ 具有相同的大小和维度。值得注意的是, 所有过程必须基于离散域进行, 不需要任何重复取样。我们把这个模型称为采样灰度打印机模型 (Sampled Grayscale Printer Model, SGPM)。

一种最常见也较为简单的打印机模型, 是假设打印机打出的点呈现圆形点扩散状态, 其模型如图 2.14。为简化起见, 假设象素为正方形, 即 $T_x = T_y = T$ 。通常情况下, 黑点均会出现点增益现象, 并部分覆盖其临域的白点, 黑点的半径至少为 $T/\sqrt{2}$ 。于是, 这就意味着总是存在黑点覆盖周围白点的现象, 并且导致这些白点的灰度值变小。于是, 打印后的图像将会出现明显的失真——整体灰度偏黑。上述情况下, 圆点的面积为 $1.57T^2$, 比原正方形面积大了 57%, 然而绝大部分打印机打出的圆点面积要大于这个最小圆, 这更加剧了打印后的灰度失真。

2) 点扩散模型方程

针对上述圆形点扩散模型, 文献[25]提出了相应的打印机模型来进行补偿。其主要思想就是在一定模型下, 根据将要被覆盖的面积的百分比, 估测出打印后每个象素的灰度值。

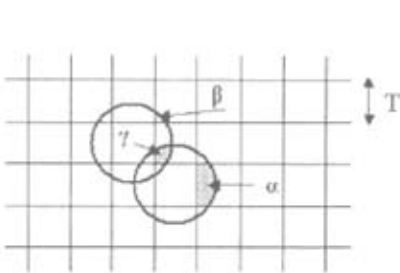


图 2.14 打印机模型中 α , β , γ 的定义

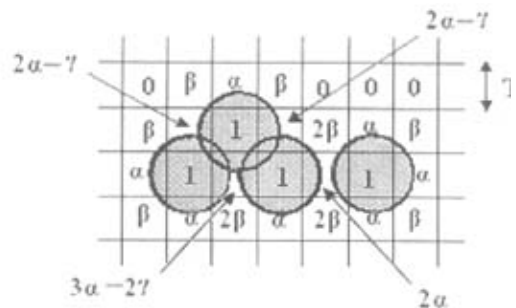


图 2.15 点增益效果分析图

如图 2.15,

$$p_{i,j} = P(W_{i,j}) = \begin{cases} f_1\alpha + f_2\beta - f_3\gamma, & b_{i,j} = 0 \\ 1 + f_1\alpha + f_2\beta - f_3\gamma - f_4\beta, & b_{i,j} = 1 \end{cases} \quad (2-12)$$

这里, f_1 为水平或垂直有侵入的个数, 即一个为 1, 一个为 0 的个数;

f_2 为斜方向有侵入, 但是水平与垂直均无侵入的点的对数;

f_3 为水平和垂直均为黑点的对数;

f_4 为当斜向为 1 时, 水平与垂直方向上为 0 的点数;

f_5 为当斜向为 0 时, 水平与垂直方向上只有一个为 1 的点数;

α, β, γ 为点与点相交时不同情况的面积, 如图 2.14。 α, β, γ 分别按下面的公式计算:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{4}\sqrt{2\rho^2-1} + \frac{\rho^2}{2}\sin^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{2\rho}}\right) - \frac{1}{2} \\ \beta = \frac{\pi\rho^2}{8} - \frac{\rho^2}{2}\sin^{-1}\sqrt{\frac{1}{\sqrt{2\rho}}} - \frac{1}{4}\sqrt{2\rho^2-1} + \frac{1}{4} \\ \gamma = \frac{\rho^2}{2}\sin^{-1}\sqrt{\frac{\rho^2-1}{\rho^2}} - \frac{1}{2}\sqrt{\rho^2-1} - \beta \end{cases} \quad (2-13)$$

其中, $\rho = \sqrt{2}R/T$, R 为实际打印网点半径, T 为正方形边长。

由上可见, ρ 完全控制着整个打印机模型。对于典型的二值打印设备, ρ 一般位于 1.0~1.7 之间。图 2.15 的 SGPM 输出的点模型中, $\rho = 1.25$ 。通常, ρ 的数值有较小波动并不会对模型有所影响, 即 $\rho = 1.25$ 可以用于大多数打印设备, 此时 $\alpha = 0.33, \beta = 0.029, \gamma = 0.098$ 。

当然, 如果精度要求不是非常高时, 此模型还可以简化为下列形式:

$$p_{i,j} = P(W_{i,j}) = \begin{cases} f_1\alpha + f_2\beta - f_3\gamma, & b_{i,j} = 0 \\ 1, & b_{i,j} = 1 \end{cases} \quad (2-14)$$

在实际操作时, 可以把窗口 $W_{i,j}$ 的各种情况与对应的打印模型输出做成查找表, 这样算法在处理某个点时, 只需通过查找表就可以得到当前点的着墨面积, 进而提高运算的速度。

第三章 误差扩散算法的理论研究

误差扩散法是由 Floyd 和 Steinberg 于 1976 年首次提出的^[6]，并一举成为当时处理效果最好的半色调方法。误差扩散法的出现是半色调技术史上重要的里程碑，它带来了革命性的技术变革，并促进了半色调技术的飞速发展。误差扩散处理后的半色调图像中像素点的分布是各向异性和无规律的，因而色调丰富，视觉效果好。直到今天，它依然以其视觉效果好、易于实现等特征被认为是最理想的半色调算法之一。

3.1 误差扩散算法的原理概述

3.1.1 误差扩散算法的基本原理

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区域。

每个像素的误差扩散过程包括如下三个步骤：

第一，将原灰度图像在此处的像素值与之前被扩散到此处的误差相加，得到当前输入；

第二，将当前输入与阈值相比较得到一个二值输出（0 或 1）；

第三，将输入与输出的误差值按照一定的规律扩散到未经处理的区域。

以灰度图像的误差扩散为例。设 $g(m,n)$ ， $g^*(m,n)$ ， $b(m,n)$ ， $e(m,n)$ 分别表示输入灰度图像、经过上一步扩散后的输入图像、输出二值图像以及 (m,n) 处的量化误差，则误差扩散法的数学表达如下：

$$g^*(m,n) = g(m,n) + \sum_{k,l} w(k,l) \cdot e(m-k,n-l) \quad (3-1)$$

$$b(m,n) = Q[g^*(m,n)] = Q\left[g(m,n) + \sum_{k,l} w(k,l) \cdot e(m-k,n-l)\right] \quad (3-2)$$

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

这里， $w(k,l)$ 是误差扩散滤波器在 (k,l) 位置的误差扩散权值， $Q[\bullet]$ 代表阈值量化操作。在大部分传统算法中，这个阈值通常取归一化后的 0.5（即 128）。半色调技术中的“半”正来源于此阈值，它依然保留着最初的含义。

误差扩散算法的原理图如下：

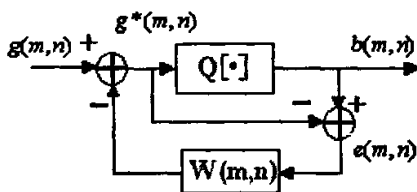


图 3.1 误差扩散法的原理图

3.1.2 误差扩散原理的算法分析

为了便于对算法进行分析,也可以将(3-3)式写成如下形式

$$\begin{aligned}
 e(m,n) &= g^*(m,n) - b(m,n) \\
 &= g(m,n) + \sum_{k,l} w(k,l) \cdot e(m-k,n-l) - b(m,n) \\
 &= g(m,n) - b(m,n) + \sum_{k,l} w(k,l) \cdot e(m-k,n-l)
 \end{aligned} \tag{3-4}$$

这里的 $e(m,n)$ 与(3-3)取反,但对于误差扩散算法来说,它们的影响是一样的。然而,上式却更好地描述了误差扩散和其它非迭带半色调方法之间的差异。从循环部分很容易看出,当前像素位置的量化误差 $e(m,n)$,不仅决定于此位置输入输出的像素值,而且依赖于已经处理的区域对当前像素的影响。这就决定了误差扩散法是一种基于区域的半色调算法,而不是一种点处理过程。另一方面,(3-4)式很好地反映了两种误差之间的差异。第一种误差 $g(m,n) - b(m,n)$ 仅仅是原始输入与输出像素值的差值;而第二种误差 $e(m,n)$ 则是被扩散后的输入与输出像素值的差值,即所谓的“量化误差”。

对(3-4)式进行Z变换,得其频域表达式为:

$$E(z_1, z_2) = [G(z_1, z_2) - B(z_1, z_2)] + \sum_{k,l} w(k,l) E(z_1, z_2) z_1^k z_2^l \tag{3-5}$$

$$\text{或} \quad [G(z_1, z_2) - B(z_1, z_2)] = F(z_1, z_2) E(z_1, z_2) \tag{3-6}$$

$$\text{这里,} \quad F(z_1, z_2) = 1 - \sum_{k,l} w(k,l) z_1^k z_2^l \tag{3-7}$$

是一个有限冲激响应滤波器,它的频率特性仅由误差扩散滤波器的权值决定。

在多数二值化问题中,其目的都是对某一个 z 的量化误差进行最小化。在图像处理领域,通常的作法是最小化 $G(z_1, z_2) - B(z_1, z_2)$ 的低频差异,尤其是其直频分量 $G(1,1) - B(1,1)$ 。在其它相关领域中,关于如何最小化误差还有其它的一些准则。在传统的误差扩散法中,所有的权值均为正数且总和为1,那么滤波器 $F(z_1, z_2)$ 就是一个高通滤波器,且在单位园内只有一个零点($z_1 = 1, z_2 = 1$),因此,这能够保证

最小化直频分量 $G(1,1) - B(1,1)$ 。这种高通特性还解释了误差扩散中的噪声在本质上属于高频噪声或是所谓的“蓝噪声”。通常，所有的滤波器都试图重新分布噪声的频谱，并在某一个频率段内令误差最小化。

现在，对(3-6)式作如下变化，得

$$E(z_1, z_2) = H(z_1, z_2)[G(z_1, z_2) - B(z_1, z_2)] \quad (3-8)$$

$$\text{这里} \quad H(z_1, z_2) = \frac{1}{F(z_1, z_2)} = \frac{1}{1 - \sum_{k,l} w(k,l)z_1^k z_2^l} \quad (3-9)$$

由于 $H(z_1, z_2)$ 是 $F(z_1, z_2)$ 的逆滤波器，因而对于传统的误差扩散，它在直流部分只有一个极点。之所以变换(3-6)式，一方面因为(3-8)式比(3-6)式更便于后面的稳定性分析，另一方面，(3-8)式还可以引导从另一个方面来理解误差扩散。既然量化可以被看作是一个误差最小化的过程，滤波处理也可看作一个加权求和，那么(3-8)式表现了误差扩散正是以一种加权的形式来最小化输入输出之间的误差。传统误差扩散中的加权操作正是优先处理低频（尤其是直流分量），恰恰验证了这一点。

上面的分析很容易扩展到彩色图像处理中。与灰度图像不同，彩色图像误差扩散中的输入、扩散后输入、输出、以及量化误差都是颜色空间中的颜色矢量。通常，对于特定的颜色空间（一般来说是输出设备的彩色空间），由于其维数一般是三维或四维的，因而矢量也具有相同的维数。这里，一个颜色分量中产生的误差通常不会扩散到其他的颜色分量中。然而，彩色半色调处理中滤波器的权值 $w(k,l)$ 却都是标量。尽管也有人曾经提出过矢量权值，但目前还仅限于纯理论的研究。在彩色图像的应用领域中，量化的研究更为广泛和深入，可以选择先对各个颜色分量独立进行量化，得到各自的误差标量，再进行合成，也可以对多维颜色分量一起进行量化直接得到矢量误差。

3.1.3 影响算法性能的主要因素

1) 误差滤波器的结构和权值

由(3-9)可知，正是误差扩散滤波器的权值决定了最终的滤波器响应函数 $F(z_1, z_2)$ 。因此，误差滤波器的结构和权值是影响误差扩散性能最重要的因素。截至目前，各种文献资料中提到的误差扩散滤波器主要有：Floyd-Steinberg 滤波器、Stucki 滤波器、Jarris-Judice-Ninke 滤波器、Burkes 滤波器、Serra 滤波器、Stenenson 滤波器等，其中前三种最为常见。它们的结构形式如图 3.2 所示。

下面对这些滤波器的性能简要作以分析。最早出现的是 Floyd-Steinberg 滤波器，由于它的权值分布相当于一个低通滤波器，因而整体处理效果好，主观视觉

序扫描（也称光栅扫描），由于误差扩散的算法特征，半色调结果中容易出现与处理方向有关的滞后纹理。于是，提出了改进的“S形（蛇形）”扫描方式。实验表明半色调图像中拖尾现象有所改善，图像质量明显优于前者^[32]。

此外，还相继提出了许多其它的扫描方式。Hilbert 曲线扫描方式，根据处理图像大小确定图像的 Hilbert 曲线，然后沿着 Hilbert 曲线逐个量化处理每一个像素。这种方法能够有效改善与方向相关的滞后现象，规律性的纹理也大大减少，但是曲线的扫描顺序使得图像的边缘处有许多十字交叉^[32]。基于上下文相关的空间填充曲线^[33]是根据图像相邻像素灰度值之间的内在关系来寻求最佳扫描路径的方式。另外还有随机空间填充卷积、自适应阈值调节^[35]等等方法。

本文，我们将主要关注前两个因素，即误差扩散滤波器和阈值量化过程。由于对误差扩散滤波器结构的研究已经相对成熟，目前的研究重点已逐渐深入到对其稳定性能的分析。由于稳定性讨论需要涉及部分阈值处理的内容，因此首先讨论阈值量化过程。

3.2 误差扩散算法中的阈值调节

阈值量化也称阈值调节，是影响误差扩散法的第二个重要因素，它直接决定着输出结果。最早研究阈值调节的是 Fawcett 和 Schrack，他们的目的是以此来消除半色调图像中的部分纹理^[35]。随着对误差扩散算法的深入研究，阈值调节已经引起众多学者的关注。本节将对各种阈值调节方法简要论述和分析。

3.2.1 阈值调节的算法分析

为了便于研究，可以将阈值量化过程表示成如下形式：

$$Q[x] = \text{step}[f\{x\}] \quad (3-10)$$

这里 $f\{x\}$ 是一个任意形式的函数，它可以表示误差扩散处理前的任意状态。在这种形式下，阈值定义了决定输出结果的边界条件，因此，它也就成为一个自由参数。为了更好地理解，先来看看下面这个式子：

$$b(m, n) = \text{step}[g^*(m, n) - t(m, n) - 1/2] \quad (3-11)$$

这里 $t(m, n)$ 代表 (m, n) 位置处的阈值函数。事实上，(3-11)式是(3-2)式单步量化的另一种形式。

把误差扩散中的阈值与频率调节中的相角联系起来，将有助于我们更好地理解阈值调节的函数表达形式。根据 Knox 和 Eschbach 的研究结果^[36]，对于阈值调节来说，(3-6)式是始终保持不变的，但二值输出和量化误差却要受到影响。如果进一步假定：阈值调节后的输出二值图像与标准误差扩散的输出二值图像是一样的，

并且(3-11)式的单步量化的参数保持不变,便可引入这样一个中间图像 g_{equiv} :

$$\begin{aligned} g_{equiv}(m,n) &+ \sum_{k,l} w(k,l) \cdot e(m-k,n-l) - 1/2 \\ &= g_T(m,n) + \sum_{k,l} w(k,l) \cdot e_T(m-k,n-l) - t(m,n) - 1/2 \end{aligned} \quad (3-12)$$

$$\begin{aligned} [G_T(z_1, z_2) - B(z_1, z_2)] &= F(z_1, z_2) E_T(z_1, z_2) \\ [G(z_1, z_2) - B(z_1, z_2)] &= F(z_1, z_2) E(z_1, z_2) \end{aligned} \quad (3-13)$$

这里的下标 T 表示阈值调节。对第一个式子进行 Z 变换,并带入后两式的 E 和 E_T ,可以得到 g_{equiv} 的表达式:

$$G_{equiv}(z_1, z_2) = G_T(z_1, z_2) + F(z_1, z_2) T(z_1, z_2) \quad (3-14)$$

分析可知,经过阈值调节的二值输出图像可以通过对 g_{equiv} 运用标准误差扩散得到,而滤波器的权值则完全一样。或者也可以这样分析,

$$b(m,n, g(m,n), t(m,n)) = b(m,n, g_{equiv}(m,n), t=0) \quad (3-15)$$

这里需要指出,(3-2)式中的 $b(m,n)$ 是一个以输入图像 $g(m,n)$ 、阈值函数 $t(m,n)$ 、权值 $w_{k,l}$ 和量化器 Q 为变量的隐式函数。再分析(3-14)式, g_{equiv} 也可以看作原始图像与阈值调节函数通过高通滤波器后的和,而此过程并不影响图像的平均灰度值。

另外,(3-14)式还有利于讨论是否可以在输入信号或阈值上增加一些信号。例如,如果能在阈值上增加一些噪声,便可以改变噪声的均值,进一步减小噪声的低频分量。

3.2.2 基于输出反馈的阈值调节



图 3.3 一种基于扫描路线距离估算的输出反馈阈值调节

误差扩散中最早提出的阈值调节方法,是基于输出的阈值调节(Output Dependent Threshold Modulation)。在此类方法中,阈值随具体的输出而变化(可遵循的

方法很多), 其数学表达式为

$$t(m,n) = t\{b(m,n)\} \quad (3-16)$$

一般来说, 这种方法基于输出图像 $b(m,n)$ 的某一区域而不是某一位置的像素。最初, 阈值调节的函数仅是简单的 switch 函数, 针对不同的输出像素值, 在几个预先设定好的阈值中进行选择。在此基础上, 随后一些算法又考虑了高光区和阴暗区的不同特点, 在提前设置好的阈值间进行选择, 以便在不同的色调区域获得更好的脉冲分布函数。

另一类方法利用已处理的像素集合, 试图在各个区域获得更均匀的纹理和更好的视觉效果。Levien 利用一个设定好的距离函数来计算阈值; Marcu 也是通过一个距离函数计算阈值, 但其扫描方式为 S 型顺序^[35]。图 3.3 给出了传统阈值处理与 Marcu 的阈值处理后, 同一误差扩散滤波器的处理结果。可以看出, 后者的处理结果中纹理更加均匀, 视觉效果更好。

此外, 这种方法可以用于调节打印后图像的视觉粗糙度。由于它可以尽可能减少输出的独立黑点(或白点)的个数, 因此可以有效改善点增益现象。一般来说, 它并不最适合在喷墨打印机或静电打印设备中使用, 因为这类设备本身就具有相当精准的打印性能, 不需要考虑激光打印设备存在的非线性失真。

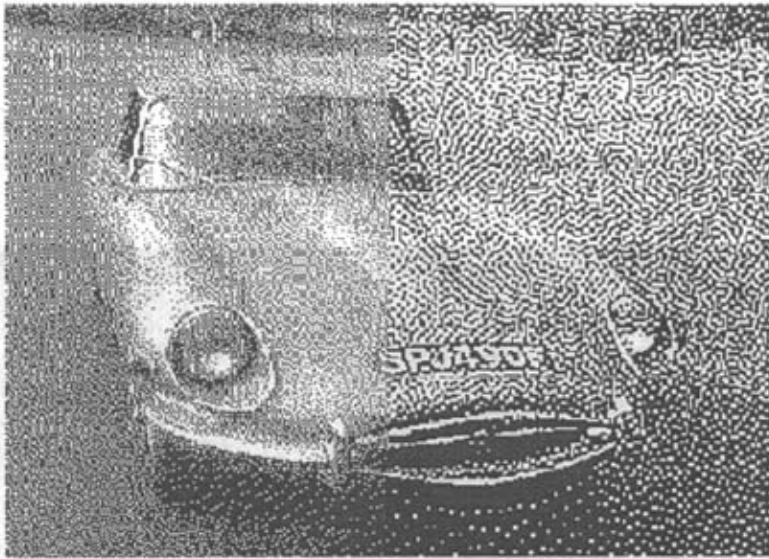


图 3.4 点聚集前后的效果对比

图 3.4 是 Levien 提出的基于输出反馈的阈值调节处理结果。左半部分为传统误差扩散的处理结果, 而右半部分为引入输出反馈后的效果。显而易见, 这种阈值处理的确可以增强像素的点聚集能力。在此方法中,

$$t(m,n) = c_H \cdot b(m-1,n) + c_V \cdot b(m,n-1) \quad (3-17)$$

作为阈值函数, c_H 和 c_V 分别代表水平和垂直方向的系数。尤其需要指出的是, 这种方法的目的是得到像素块较为聚集的输出图像, 改善打印输出图像的效果, 而

不是在显示设备上得到视觉效果更佳的二值图像。

3.2.3 基于输入的阈值调节

基于输入的阈值调节 (Input Dependent Threshold Modulation) 是阈值调节的第二种重要方法。它利用原始输入图像的信息对阈值进行调节, 其数学表达式为

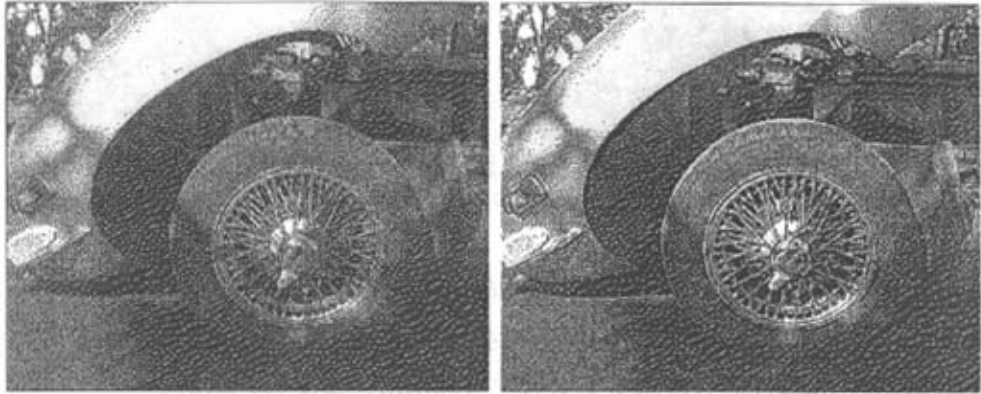
$$t(m, n) = t\{i(m, n)\} \quad (3-18)$$

这里的 $i(m, n)$ 通常是输入图像的某一区域。

此算法最早的一种简单形式为

$$t(m, n) = t_0 + K \cdot i(m, n) \quad (3-19)$$

它非常简单且效率很高, 主要作用是增强输出二值图像的边缘效果。图 3.5 表示了边缘增强前后的效果, (b) 图中, $K = 3$ 。



(a)传统误差扩散

(b)边缘增强后的效果

图 3.5 边缘增强前后的效果

(3-14)式可以解释此算法的边缘锐化效果。将阈值调节函数代入(3-14)式可得

$$G_{equiv}(z_1, z_2) = G(z_1, z_2) [1 + K \cdot F(z_1, z_2)] \quad (3-20)$$

于是, g_{equiv} 可以看作是输入原始图像通过一个高通滤波后的结果。由于高通滤波后的细节重建效果是相当明显的, 因此基于输入的阈值调节误差扩散可以作为一个“锐化滤波器”用于图像半色调算法之中。

3.2.4 其它的阈值调节

如前所述, 最早研究阈值调节的是 Fawcett 和 Schrack, 他们提出一种由输出二值像素决定阈值的方法, 即 $t(m, n) = t\{b(m, n)\}$, 以此来消除部分纹理^[35]。Billotet-Hoffman 和 Bryngdahl 提出利用一个抖动矩阵作为阈值, 这种方法也可以消除一些误差扩散引起的纹理^[36]。图 3.6 的(a)图为利用 Billotet-Hoffmann 算法处理后的效果,

这里

$$t(m,n) = 0.3 \cdot \text{dot}(m,n) \quad (3-21)$$

$\text{dot}()$ 表示一个标准的阈值矩阵。从图 3.6(a)可以看出, 输出图像基本不存在结构性纹理, 视觉效果非常细腻光滑。



(a) $t(m,n) = 0.3 \cdot \text{dot}(m,n)$

(b) $t(m,n) = 9 \cdot i(m,n) + 6 \cdot \text{dot}(m,n)$

图 3.6 Billoter- Hoffmann 算法及其改进算法的处理效果

除此之外, 为了在某些应用中改善误差扩散象素明显的特性, 使之具有有序抖动的处理效果, $\text{dot}()$ 函数被赋予了更大的动态范围。在图 3.6 的(b)中,

$$t(m,n) = K \cdot i(m,n) + \lambda \cdot \text{dot}(m,n) = 9 \cdot i(m,n) + 6 \cdot \text{dot}(m,n) \quad (3-22)$$

这里, $\text{dot}()$ 函数的系数 6 是第一种算法的 20 倍, 因此它对于阈值的影响也大大增强, 所以输出图像表现出更规律的点聚集特征, 更接近有序抖动的效果。 $i(m,n)$ 的系数 9, 又使输出图像能够更好地保持其锐化效果。然而, 此处阈值函数的系数为 15, 是否能够依然保持算法的稳定性我们并未提及, 这也是 3.3 节即将深入的另一主题。

3.3 误差扩散算法的稳定性分析

像许多反馈系统一样, 稳定性是误差扩散算法最基本的要求。由 Floyd 和 Steinberg 提出的经典误差扩散算法以及其后几种传统算法都表现出很好的稳定性。这是因为: 1) 这些滤波器的权值都为正数, 且和为 1; 2) 量化过程一般都采用常数阈值; 3) 输入象素值受限于输出象素值, 或者说, 输入范围受限于输出范围。然而, 随着对误差扩散算法的不断研究, 各种各样的算法正在逐渐打破上述条件, 于是,

误差扩散算法的稳定性开始引起学者的极大关注。本节将对此问题展开深入分析。根据误差扩散的算法特征，引起算法不稳定的原因主要有三方面：

第一，各种不同的滤波器被提出，滤波器的权值条件逐渐被破坏。主要包括权值之和不为“1”、权值含有负数或复数等情况。在一些特殊条件下，这些滤波器的确可以消除部分纹理，但大多数情况下，这些滤波器的存在给稳定性造成很大威胁。

第二，阈值量化过程变得越来越复杂。3.2 节提及的各种阈值调节方法及其它许多方法都是算法产生不稳定的潜在因素；彩色图像半色调中的各种矢量量化方法，令阈值量化过程更加复杂。

第三，输入输出图像的范围控制已不再那么严格。这种情况一般出现在考虑打印机模型的误差扩散算法中。

由于上述原因的存在，在这些非传统的误差扩散算法中，稳定性已无法完全满足。如图 3.7 所示，尽管所有权值之和依然为“1”，但由于其滤波器系数含有负数，输出半色调处理结果已经失真。

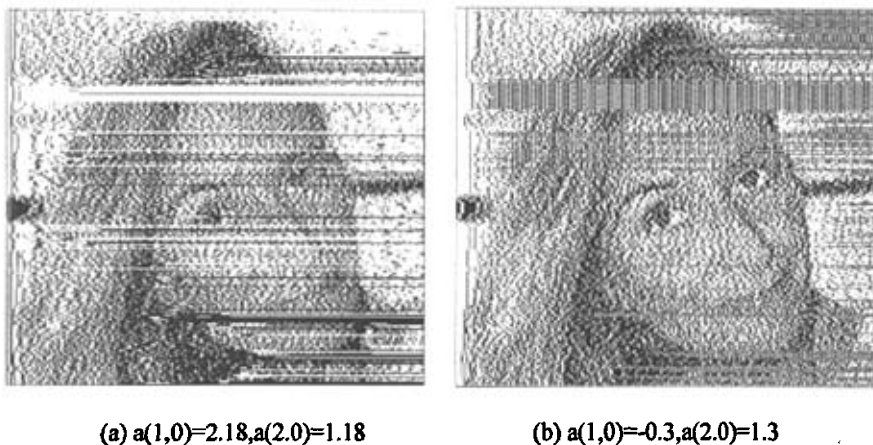


图 3.7 滤波器系数为负时的不稳定输出

关于稳定性的定义有很多说法,目前的研究尤其对“临界量化误差”感兴趣。类似于线性系统,先假设有界输入、有界输出的条件,那么,当且仅当这个系统的量化误差对于任意有界的输入序列都是有界的,这个误差扩散系统就是稳定的。根据(3-8)式,量化误差可以被看作是一个线性系统的输出响应,所以可以借用一些线性系统分析中的结论进行研究。但是,必须非常清楚,就系统的稳定性而言,误差扩散系统与一般的线性系统存在着本质的差别。第一,线性系统中的量化过程一般旨在减小或消除误差,相当于利用一个负反馈,使整个系统更加稳定;第二,误差扩散中的稳定性不仅取决于系统参数,如权值和量化参数,而且取决于输入输出的范围。这些差异都是由误差扩散的非线性特征决定的。

3.3.1 误差扩散滤波器的权值对系统稳定性的影响

首先我们来讨论误差扩散滤波器的权值对于系统稳定性的影响。

根据(3-9)式的定义, 权值直接决定着滤波器 $H(z_1, z_2)$ 。如果我们用 $h(m, n)$ 表示 $H(z_1, z_2)$ 的冲击响应, 则所有的滤波器可以分为三类:

$$I) \sum_{m,n} |h(m, n)| < \infty \quad (3-23)$$

$$II) \max_{m,n} |h(m, n)| = \infty \quad (3-24)$$

$$III) \sum_{m,n} |h(m, n)| = \infty \text{ and } \max_{m,n} |h(m, n)| < \infty \quad (3-25)$$

如果仅讨论所有权值都为正的情况, 则上述分类又可以简化为

$$I) \sum_{k,l} w(k, l) < 1 \quad (3-26)$$

$$II) \sum_{k,l} w(k, l) > 1 \quad (3-27)$$

$$III) \sum_{k,l} w(k, l) = 1 \quad (3-28)$$

这里, 滤波器 I 为“欠补偿滤波器”, 它只是把当前像素的部分误差扩散到周围区域; 滤波器 II 为“过补偿滤波器”, 它所扩散的误差比当前像素实际产生的误差要大; 只有在滤波器 III 的情况下, 当前像素向周围扩散的误差才与实际产生的误差大小相同。

文献[37]中提到, 包含了滤波器 I 的误差扩散系统通常都是稳定的, 而且其稳定性与量化的方法以及输出的范围都无关。包含了滤波器 II 的误差扩散系统一般来说都不稳定, 并且容易表现出失控特性。即使量化误差是有界的情况, 系统还是会对初始条件及各种扰动十分敏感, 很容易丧失稳定性。但是如果当输入范围比输出范围小很多时, 它也有可能是稳定的。所以, 绝大多数实际的误差扩散系统都采用第 III 类滤波器——前两者的临界形式。这类系统一般都是稳定的, 但是倘若量化过程的设计不理想或输出范围过小, 也会令这类系统变得不稳定。

这里需要强调的是, 第 II 类系统和第 III 类系统关于不稳定性的程度有着很大的不同。第一, 一般只有当输入序列十分特殊时 (这种情况在实际图像处理中非常罕见), 第 III 类系统才会变得不稳定。而对于前者, 许多普通的输入图像都可能引起系统的不稳定; 第二, 在第 III 类系统中, 误差通常以线性形式增长, 而在第 II 类系统, 误差的增长速度一般是多项式形式或指数形式。

图 3.8 是一些滤波器 II 的处理结果。

图 3.8(a)中的滤波器为:

	$g(m,n)$	1
0	1	-1.0343

规一化后为 0.9657。

图 3.8(b)中的滤波器为:

	$g(m,n)$	1
0	1	-1.0344

规一化后为 0.9656。



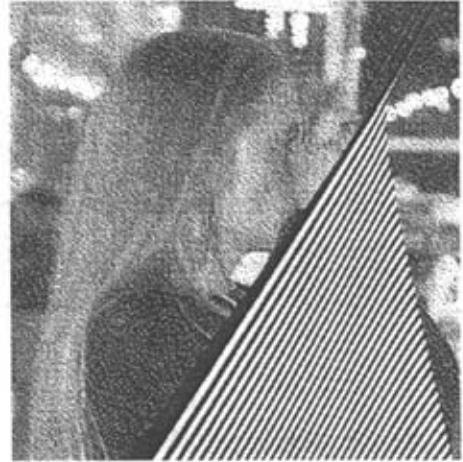
(a) 规一化值为 0.9657



(b) 规一化值为 0.9656



(c) 规一化值为 2.012



(d) 规一化值为 2.011

图 3.8 权值差异甚微时, 滤波器 II 的处理结果

可以看出, 二者的权值非常接近 (仅差 0.0001), 但是(a)图的结果还是稳定的, 但(b)图已经表现出明显的不稳定性。还有另一种形式的不稳定表现。

图 3.8(c)中的滤波器为:

	$g(m,n)$	1
1	1	-0.988

规一化后为 2.012。

图 3.8(d)中的滤波器为:

	$g(m,n)$	1
1	1	-0.989

规一化后为 2.011。

同样, 这里二者的权值差依然很小 (0.001), 但二者的处理结果也完全不同。按照权值的正负对滤波器进行分类非常直接明了, 但是如果滤波器的权值含有复数时, 这种分类方法就不那么有效了。所以, 当滤波器权值含有复数时, 还要根据具体情况加以分析讨论。由于这种情况并不常见, 暂不多作讨论。

为了考察式(3-23)~(3-25)的条件, 我们可以直接计算 $h(m,n)$ 或是在频域考察 $H(z_1, z_2)$ 的极点位置, 其中后者更利于为稳定性的讨论提供依据。然而, 极点位置的确定是非常困难的。实际中, 常用这种方法来确定一维滤波器的极点位置。对一维滤波器来说, 第 I 类滤波器的所有极点都在单位园外; 第 II 类滤波器至少有一个极点, 这个极点有可能是单位园上的一个多极点或是单位园内的一个极点; 其余的情况都属于第 III 类滤波器。

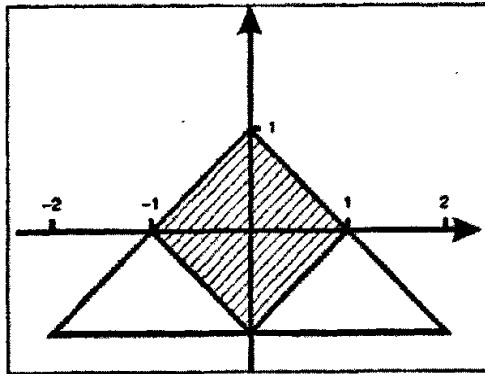


图 3.9 误差扩散稳定性的频域分析

图 3.9 形象地给出了具有两个实权值 $a(1,0)$ 和 $a(2,0)$ 的一维滤波器的稳定性条件^[36]。最大的三角形的内部 $[(0,1), (2,-1), (-2,-1)]$ 对应于第 I 类滤波器, 有两个极点位于单位园外。所有位于大三三角形外部的点都属于第 II 类滤波器, 它表明了至少有一个极点位于单位园内。大三三角形上的点至少有一个在单位园上, 且没有点在单位园内。此外, 除了 $(-2,-1)$ 和 $(2,-1)$ 两点外, 其它所有点都属于第 III 类滤波器。这两点对应于单位圆上的双极点, 它们属于第 II 类滤波器。

二维滤波器还可以按照下面的条件进行分类

$$\sum_{k,l} |w(k,l)| \leq 1 \quad (3-29)$$

上式的一维形式对应于图 3.10 中菱形的阴影部分。如果

$$\sum_{k,l} |w(k,l)| < 1 \quad (3-30)$$

则此系统为第 I 类系统，它对应于菱形的内部区域。如果

$$\sum_{k,l} |w(k,l)| = 1 \quad (3-31)$$

则有可能是第 II 类系统或第 III 类系统，这恰是菱形的边界。而对于

$$\sum_{k,l} |w(k,l)| > 1 \quad (3-32)$$

目前尚没有准确的定论。

对于二维滤波器来说，在时域进行分析和处理更为方便。原则上，系统的冲击响应 $h(m,n)$ 可以由 $H(z_1, z_2)$ 的逆变换得到。然而，这样的分析并不完全合理。不过值得庆幸的是， $h(m,n)$ 可以通过误差扩散的程序从数学上得到。从(3-8)式可以看出，如果 $i(m,n) - b(m,n)$ 是一个 δ 函数，则 $h(m,n)$ 和量化误差 $e(m,n)$ 相等。这可以通过构造一个具有 δ 函数特征的输入图像，并令输出图像的所有象素点为“0”来获得。例如，可以令阈值为 ∞ ，则输出都为“0”，之后运行误差扩散程序，产生的量化误差 $e(m,n)$ 就是 $h(m,n)$ 。

这里，如果 $|h(m,n)|$ 一直增长，则此系统为第 II 类系统。如果 $h(m,n)$ 始终在一定范围内，不论是有所下降还是最终越界，此系统都为第 III 类系统。如果当 m 和 n 都很大时， $h(m,n)$ 递减至 0，则是第 I 类或第 III 类系统。如果递减的速率小于等于 $1/(m+n)$ ，则为第 III 类；如果更快，则为第 I 类。为了区别这两种情况，我们需要记录下 $|h(m,n)|$ 的和。如果其和是有界的，则为第 I 类；如果和逐渐增加，则为第 III 类。

3.3.2 阈值调节对系统稳定性的影响

基于前面的研究，阈值调节的讨论将着重放在第 III 类误差扩散滤波器上。

在传统误差扩散中，阈值量化过程最小化量化误差 $e(m,n)$ ，这就保证了系统的负反馈，进而保证了其稳定性。然而，不断提出的各种阈值调节方法已开始变为最小化其它一些误差指标了，有时无法满足最小化量化误差 $e(m,n)$ 的要求。一般情况，这并不会导致整个系统呈现不稳定性。当我们讨论一个系统的稳定性时，不论是量化误差是逐渐减少，或是至少误差并不增大，我们都最关心当幅值增大

时它的渐进特性。阈值调节在某些象素有可能令量化误差有所增加，但是当误差逐渐增加时，它还是主要决定着输出的结果，并令总的误差趋于尽可能的小。因此，尽管带有阈值调节的误差扩散并不一定产生最小化的误差序列，但它依然能使系统保持稳定。

有了上面的讨论，我们来看一下具有病态特征的阈值函数。一个简单的例子如下

$$t(m,n) = -2 \cdot i(m,n) + 1 \quad (3-33)$$

在这种滤波器作用下，几乎每个象素都会得到一个错误的输出结果。这种不稳定性从图 3.10 可以明显看出，上半幅图是传统的误差扩散，下半幅图是增加了式 (3-33) 阈值函数的算法结果。显而易见，此式中的阈值破坏了函数的渐进条件。



图 3.10 病态阈值函数引起的不稳定状态

相似的渐进条件同样存在于彩色误差扩散的矢量量化中。特别对于每一个颜色分量，如果量化误差的幅值超过某一临界值，就应该设法控制量化过程，令量化误差逐渐最小化。换句话说，它应该具有与标量量化一样的特征。

3.3.3 输入越界对系统稳定性的影响

为了保证第Ⅲ类系统的稳定性，一般要求输入范围受限于输出范围。然而，这并不是要求所有的输入象素值都不能超出输出范围。实际中，如果一些越界的象素被另外一些未越界的象素包围着，并且这一区域的平均灰度值并没有超出输出范围，仍然不会出现异样的处理结果。即使这一区域的平均灰度值稍稍超出范围，

不理想的纹理也只会出现在小范围区域内出现，并且影响很小。

不过，倘若输入持续超出输出范围，当然会出现不理想的纹理。如果输出已知，算法中可以加入对输入边界值的判定。因为程序需要时刻关注量化误差的大小，一旦它变得太大，就设法对它进行修正。

第四章 主要研究成果

在对数字半色调技术及误差扩散算法进行了深入研究后,本人利用 VC++ 6.0 建立了一个数字半色调算法实验平台,对各种经典的半色调算法进行了实现,通过对比不同方法的处理效果,加深了对各种不同方法的理解。此外,在深入分析和理解的基础上,针对传统误差的不足之处,提出了两种新的误差扩散算法。实验证明,这两种算法的确能够有效地改善传统算法,表现出更好的视觉效果。本章将对上述研究成果作以介绍。

4.1 实验平台的介绍和传统算法的实现比较

4.1.1 实验平台的介绍

在对数字半色调技术及误差扩散算法进行了深入研究后,本人基于 VC++6.0 语言建立了一个数字半色调算法实验平台,其界面如图 4.1。下面对平台主要功能简要作以介绍:

1) 抖动算法

这里主要研究了 Bayer 有序抖动。因为它在抖动法中效果最为出色,因此常用来与误差扩散算法进行比较。

2) 传统误差扩散算法

如图 4.1 的(a)所示,这里分别对 Floyd-Steinberg、Stucki 和 Jarris-Judice-Ninke 三种滤波器进行了实现,其中每种滤波器包括顺序扫描和 S 形扫描两种方式,共计六种算法。

3) 阈值调节

阈值调节功能部分主要包括基于输入的误差扩散和基于输出的误差扩散两种基本算法。

4) 基于 HVS 的误差扩散

包括本文所提出的两种新算法:一种基于视觉差的误差扩散算法和自适应反馈视觉感知差的误差扩散算法。

5) 图像产生

主要用来提供算法研究所需的基本灰度图像,便于分析算法对不同区域的半色调效果。如常值图像,灰度值渐变图像(由 0 增加至 255),灰度条渐变图像(灰度值以一定的间隔灰度值递增或递减),各种灰度条纹图像(包括不同宽度及不同

灰度值)等。

6) 低通滤波器

这部分主要用于比较不同低通滤波器的实验差异,更好地研究基 HVS 的误差扩散算法。其中包括理想低通滤波器、巴特沃斯低通滤波器以及高斯滤波器。



(a) 打开图象, 选择需要进行的处理



(b) 得出相应算法的处理结果

图 4.1 数字半色调算法实验平台的界面

4.1.2 算法的实验和比较

1) 抖动算法与误差扩散算法的实验比较

目前,学术界公认且广为流传的分类方法是,按照它们的处理方式将其分为抖动法、误差扩散法和迭代法三大类。由于迭代法的计算复杂度太高,几乎不应用于实际处理,因此,本文只对抖动法和误差扩散法进行了算法实现。图 4.2 是抖动法与误差扩散法的处理效果对比,这里抖动法以最著名的 Bayer 有序抖动为代表,误差扩散法选择整体处理效果最好的 Floyd-Steinberg 滤波器;为了与 Bayer 有序抖动的扫描方式保持一致,这里采用从左至右的顺序扫描。



图 4.2 抖动算法与误差扩散算法的处理效果对比

如图可以看出, (b)图已经可以基本再现原灰度图像的阶调,表达较为完整的信息,但它的不足之处非常明显:由于整幅图象反复采用 Bayer 抖动矩阵,图像纹理呈现明显的规律性,使主观视觉效果大打折扣。而(c)图是误差扩散处理后的半色调图像,其中象素点的分布是各向异性和无规律的,因而色调丰富、纹理细腻,视觉效果明显优于前者。因此,误差扩散法比抖动算法能够更准确地再现灰度图像的色调和层次,呈现更好的主观视觉效果。

2) 传统误差扩散算法的实验和分析

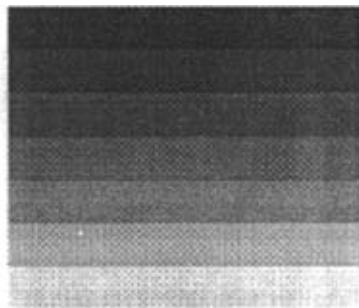


图 4.3 渐变灰度条图像

如 3.1 节所述,误差扩散滤波器、量化函数和扫描顺序是影响误差扩散算法的三大主要因素。随着研究的不断深入,阈值量化已经渐渐成为误差扩散研究的一个分支方向,而滤波器和扫描顺序的研究已相对比较成熟。因此,本文在量化

函数不变的情况下（取规一化后的 0.5），考察了不同滤波器、不同扫描顺序时算法的特点。为了更好地分析半色调算法对于图像不同色调区域的处理效果，特选取渐变的灰度条图像为原始图像，其灰度级从 31 到 255 以等间隔（32 个灰度级）逐渐增加，如图 4.3。

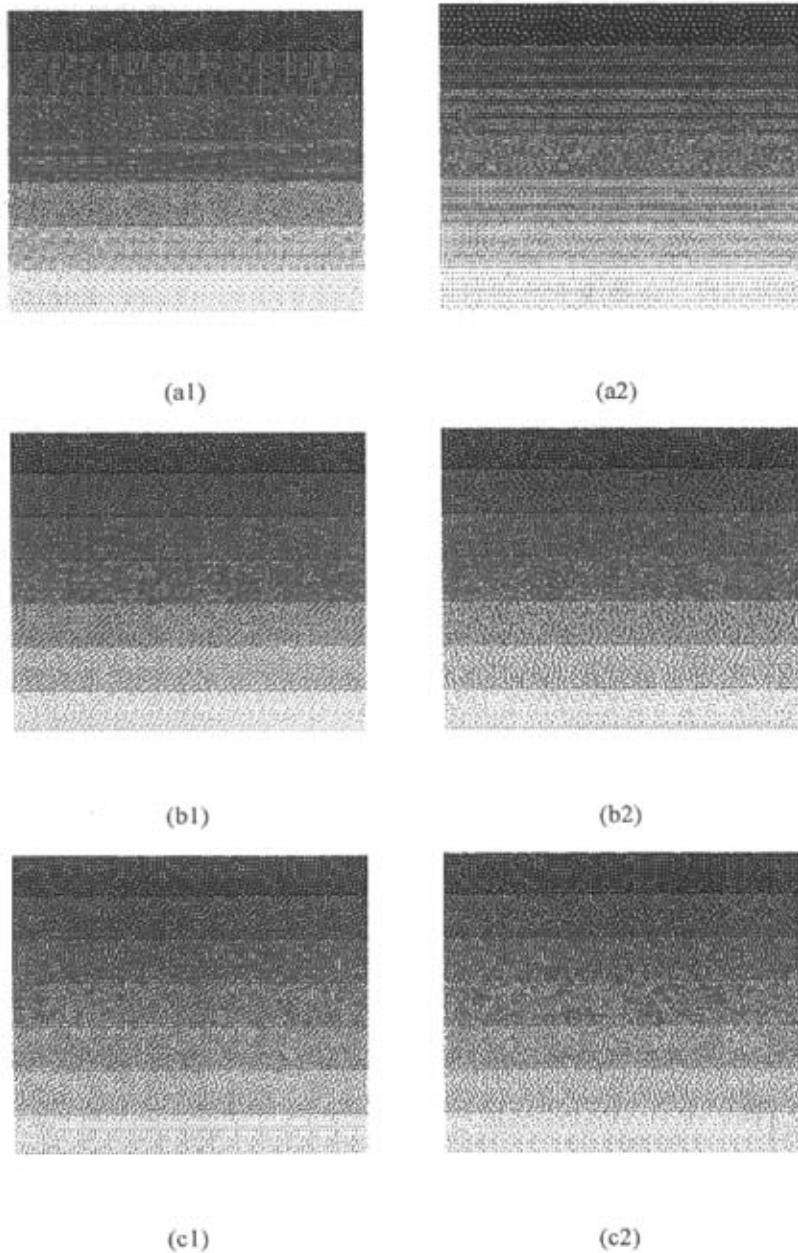


图 4.4 不同滤波器不同扫描方式的处理效果对比

(a) Floyd-Steinberg (b) Stucki (c) Jarris-Judice-Ninke

(a1)(b1)(c1)为顺序扫描方式, (a2)(b2)(c2)为 S 形扫描方式

实验分别考察了 Floyd-Steinberg、Stucki、Jarris-Judice-Ninke 三种最常用的滤波器，分别按照顺序扫描和 S 形扫描的处理效果。半色调结果见图 4.4。

先整体观察三种滤波器处理效果的差异。如图，Floyd-Steinberg 滤波器的整体处理效果比较好，处理的图像更容易被人眼以接受，如在人眼比较敏感的亮调区，(a1)比(b1)(c1)表现出更均匀的网点分布。因此，在大部分算法研究中，Floyd-Steinberg 误差扩散法常常被作为误差扩散法的代表，与其它算法进行比较分析。

接着分析两种不同扫描方式下不同半色调结果的处理效果。由于 Stucki 和 Jarris-Judice-Ninke 滤波器结构都较为复杂，覆盖 3 行 5 列，因此不同扫描方式下的效果差异就不如 Floyd-Steinberg 滤波器更为明显，因为它只有 2 行 3 列，在扫描方向不断变换时更容易表现出对网点分布的影响。因此，这里以 Floyd-Steinberg 为例进行分析。在(a1)的中高频和中低频区域，尽管并不严重，但依然可以看见一些斜向的结构纹理，这是由于滤波器处理始终保持同一方向，量化误差始终向右下方叠加而引起的迟滞现象；但在(a2)中，由于滤波器方向隔行变换，量化误差每隔一行就改变扩散方向，因而斜向结构纹理几乎不再存在，大部分区域呈现出均匀的网点分布，明显增强了视觉效果。所以，S 形扫描方式能够有效改善由滤波器所引起的滞后现象，但这只是提出一种思路，并非适用于所有的算法。

4.2 一种基于视觉差的误差扩散算法

从 4.1 节的半色调结果可以看出，尽管误差扩散可以提供较为理想的视觉效果，但它依然存在着一一些不足。仔细观察图 4.4 的(a1)(b1)(c1)不难发现，几乎所有的处理结果都存在人眼可以识别的结构性纹理，且主要分布在中频区域。于是，针对此问题提出了一种基于视觉差的误差扩散算法 (Perceived Error-Based Error Diffusion)，简称 PEB Error Diffusion 算法。

4.2.1 理论依据

1) 如2.3.1所述，半色调技术属于图像复制的一种，而图像复制的主要目的，就是使复制图像的视觉感受同原图像尽可能地相同。既然半色调技术是一种以主观视觉效果为判定标准的算法，因此在半色调算法中引入HVS模型具有重要意义 [24][27]。

当观察者对一幅连续调图像 $g(m, n)$ 及其处理结果 $b(m, n)$ 进行评判时，比较的对象并不是客观存在的 $g(m, n)$ 和 $b(m, n)$ ，而是已经通过了视觉系统、反映在大脑中的两幅图像，设它们为 $\tilde{g}(m, n)$ 和 $\tilde{b}(m, n)$ 。大脑正是根据 $\tilde{g}(m, n)$ 和 $\tilde{b}(m, n)$ 之间

的相似程度来进行判断的。因此,考察 $\tilde{b}(m,n)$ 和 $\tilde{g}(m,n)$ 之间的相似性具有重要的价值。

2) 在传统算法中由于阈值常取 0.5,由阈值量化和误差扩散的算法特点可知,亮调区域的象素点由于灰度值大于阈值较多,被判定为“白点”的概率较大,即被误判成为“黑点”的概率就较小;同样的道理也适用于暗调区域。当然,即使误差扩散的输入是带有扩散误差的修正值,但此误差值往往数值较小,在多数情况下上述判断依然合理。那么自然想到,中频区域由于灰度值在靠近阈值的范围内波动,因而被“误判”的概率自然更大。因此,可以以此为出发点来改善中频区域的结构纹理。

4.2.2 算法的基本原理

本算法是一种基于视觉差的改进的误差扩散法。由于误差扩散法是目前综合考虑处理效果与计算效率最好的方法,因此这里以误差扩散法为基础,借鉴了 DBS 中考察人类视觉误差的思想对误差扩散后的处理结果进行矫正。这里的“矫正”主要是指,根据 $\tilde{g}(m,n)$ 和 $\tilde{b}(m,n)$ 的差异和原图象当前的灰度特征,对中频区域误判概率较大的象素进行考察和矫正。由于没有采用 DBS 中的迭代过程,因而从处理方式上,它还是属于一种邻域处理过程,具有较高的计算效率。图 4.5 是 PEB Error Diffusion 的原理框图。

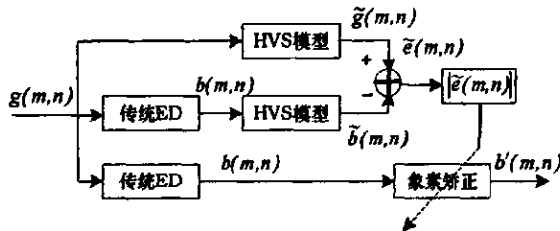


图 4.5 PEB Error Diffusion 算法的原理框图

1) 通过传统误差扩散得到初始图像

首先用一种传统的误差扩散法（这里采用 Floyd-Steinberg 算法）对连续调图像 $g(m,n)$ 进行处理,得到一幅半色调图像,称为初始图像 $b(m,n)$,并将其暂时保存。这里的处理过程与传统的误差扩散法基本相同,只是阈值处理部分进行了改进,令相邻象素的阈值有一个 $\pm\Delta$ 的上下浮动,即(3-2)式变为

$$Q[g^*(m,n)] = \begin{cases} 0.5 - \Delta, & (m+n)\%2 = 1 \\ 0.5 + \Delta, & (m+n)\%2 = 0 \end{cases} \quad (4-1)$$

$$b(m,n) = \begin{cases} 1, & g(m,n) \gg Q \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (4-2)$$

由于误差扩散后的输入已经不是原始输入,因此,令阈值有个 $\pm\Delta$ 的波动,可

令每次阈值处理后的量化误差产生波动，减小误差不断向后叠加产生方向滞后的可能性。本文中取 $\Delta = 10$ 。

2) 计算视觉误差图像

令连续调图像 $g(m, n)$ 和初始图像 $b(m, n)$ 分别在频域通过 HVS 模型滤波器，得到通过人眼的连续调图像 $\tilde{g}(m, n)$ 和二值图像 $\tilde{b}(m, n)$

$$\tilde{g}(m, n) = IFFT\{G(s, t) \cdot H_{HVS}(s, t)\} = IFFT\{FFT[g(m, n)] \cdot H_{GAUS}(s, t)\} \quad (4-3)$$

$$\tilde{b}(m, n) = IFFT\{B(s, t) \cdot H_{HVS}(s, t)\} = IFFT\{FFT[b(m, n)] \cdot H_{GAUS}(s, t)\} \quad (4-4)$$

事实上，观察者评判一幅半色调图像的过程是，先在大脑中比较经过了视觉系统的半色调图像 $\tilde{b}(m, n)$ 和经过视觉系统的连续调图像 $\tilde{g}(m, n)$ ，然后根据其差异给大脑反馈一个信号，作为评判的依据。因此，进一步考察 $\tilde{b}(m, n)$ 和 $\tilde{g}(m, n)$ 之间的误差具有重要的意义。

设 $\tilde{b}(m, n)$ 和 $\tilde{g}(m, n)$ 之间的视觉误差图像为 $\tilde{e}(m, n)$ ，它的每个像素值都表示 $\tilde{b}(m, n)$ 和 $\tilde{g}(m, n)$ 在 (m, n) 处像素灰度的误差绝对值（简称视觉差），即

$$\tilde{e}(m, n) = |\tilde{g}(m, n) - \tilde{b}(m, n)| \quad (4-5)$$

之所以选择 $\tilde{e}(m, n)$ 为视觉差的绝对值而非均方误差 (MSE)，是因为绝对值运算不但可以更为准确地反映灰度差值，而且可以减小算法的计算复杂度。

3) 利用代价函数对初始图像进行矫正

设 $g_{ave}(m, n)$ 表示 $g(m, n)$ 在 (m, n) 处 9 邻域内的像素均值，即

$$g_{ave}(m, n) = \sum_{i,j} g(i, j) \quad i = m-1, m, m+1; j = n-1, n, n+1 \quad (4-6)$$

$|\tilde{e}(m, n)|$ 为 (m, n) 处的视觉差，代价函数为 $C(m, n)$ ，即

$$C(m, n) = a_1 \cdot C_{ave}(m, n) + a_2 \cdot C_{err}(m, n) \quad a_1, a_2 \in \mathbb{V}Z^+ \quad (4-7)$$

这里，代价函数包含两项， $C_{ave}(m, n)$ 和 $C_{err}(m, n)$ 分别表示对 $g_{ave}(m, n)$ 和视觉差 $|\tilde{e}(m, n)|$ 的考察。

考察 $C_{ave}(m, n)$ 的理论依据是视觉模型的熵掩盖特征，即失真信号容易在平滑取域被察觉，而在纹理区域易被掩盖。如果 (m, n) 周围的像素灰度值均很大，而当前像素灰度值却很小，那么考察其 9 邻域的像素均值，就能根据当前像素所处的灰度区域，使此点的二值输出不易成为局部噪声，得到更好的视觉效果。

因此，设

$$C_{ave}(m, n) = \begin{cases} 1, & \{b(m, n) = 0 \& g_{ave}(m, n) > T_{low}\} \cap \{b(m, n) = 1 \& g_{ave}(m, n) < T_{high}\} \\ 0 & \end{cases} \quad (4-8)$$

上式表示，如果初始图像当前像素值为“0（黑）”，且 $g_{ave}(m, n)$ 大于一定灰度级，

就把它作为进一步考察视觉误差的对象；同理，如果初始图像当前象素值为“1（白）”，且 $g_{err}(m,n)$ 小于一定灰度级，也成为进一步考察的对象。这可以令原本局部灰度值很小或很大的象素保持不便，减少被误判的可能，而令中色调区域的点成为被矫正的主要对象。这里将中色调区域界定为 256 个灰度级的中间部分，即 64~190，因此 T_{low} 和 T_{high} 取 64 和 190 较为合理。

设可以接受的最小视觉差为 \tilde{E} ，那么有

$$C_{err}(m,n) = \begin{cases} 1, & \tilde{e}(m,n) \geq \tilde{E} \\ 0 & \end{cases} \quad (4-9)$$

根据代价函数的定义，只有当两方面条件均满足时，将初始图像 $b(m,n)$ 在 (m,n) 处的象素取反，即原来为“0”，取反为“1”，原来为“1”，则取反为“0”。即

$$\tilde{b}(m,n) = \begin{cases} \text{取反}, & C(m,n) = a_1 + a_2 \\ b(m,n), & \text{else} \end{cases} \quad (4-10)$$

从原理框图看，本算法看起来与 DBS 方法极为相似，但实际只是借助了 DBS 最核心的思想对误差扩散进行了改进，其创新之处在于：1) DBS 以随即加网后的半色调图像作为初始图像进行搜索，而本算法以误差扩散后的半色调图像作为初始图像；2) DBS 以每次迭代后误差图像的局部均方误差作为判断依据，而本算法以一次低通滤波后视觉差图像的绝对值作为判断依据；3) DBS 每处理完一个象素都要计算一次局部均方误差之和，是典型的迭代过程，因而计算量很大，而本算法仅计算一次所有象素点的视觉误差，从实质上讲，并非迭代算法，依然保持了误差扩散的计算效率。

4.2.3 实验结果与分析

为验证 PEB Error Diffusion 算法的有效性，对 256×256 的 8bit Lena 图像进行实验。实验设备为 HP LaserJet 1020 激光打印机，输出分辨率为 600dpi。误差扩散步骤采用顺序扫描的 Floyd-Steinberg 滤波器，HVS 模型采用 Gaussian 低通滤波器。由于本算法在传统误差扩散上作了重要的改进，因此将 PEB Error Diffusion 的处理结果与传统 Floyd-Steinberg 误差扩散法进行比较，结果见图 4.6 和 4.7。

PEB Error Diffusion 算法的性能分析：

1) 保持了高光区和暗调区的处理效果。从图 4.6 的(b)(c)可以看出，与传统 Floyd-Steinberg 算法相比，PEB Error Diffusion 在高光区和暗调区依然保持了很好的处理效果，如 Lena 的头发、帽顶以及背景中的高光区和暗调区，这些区域象素点分布均匀且基本不存在方向纹理。

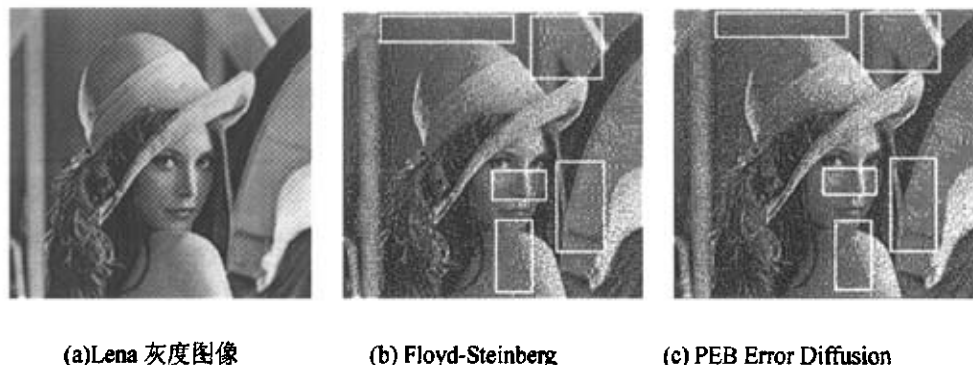


图 4.6 连续调图像和实验后的半色调图像

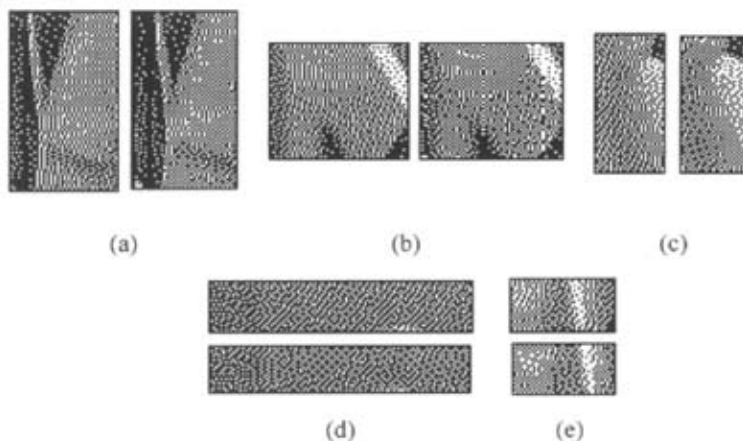


图 4.7 两种算法半色调图像的局部对比图

2) 有效改善了中色调区域的结构性纹理。如图 4.6 的(b)图,在中色调区域主要存在两种形式的结构纹理,一种是约 45 度角的方向纹理,如 Lena 帽顶向上的背景区域、Lena 的背部,另一种是长度不一的纵向纹理,如背景的右上部分、Lena 右侧的背景区域。而(c)图中,纵向纹理明显减少,较亮部分表现为黑白点均匀分步的特征,如图 4.7 的(a)(b)(c)(e),较暗部分表现为规则的“十字形”聚集簇点,如图 4.7 的(c)(d)(e),因而有效改善了中色调区域的结构性纹理。

3) 中色调区域具有一定的减弱“点增益现象”的能力。如 2) 所述,在经过 PEB Error Diffusion 处理的半色调图像中,较暗部分表现为规则的“十字形”簇点,根据 2.3 节的介绍,这种点聚集的特性可以有效减弱实际打印中“点增益现象”的影响。

4.2.4 结论

本文针对传统误差扩散法在中色调区域存在严重结构纹理的缺点,提出了一

种基于视觉差的数字半色调算法。由于以人眼的视觉误差为依据,对误差扩散结果中的最容易发生误处理的中间调区域象素进行矫正,因而明显减少了结构性纹理,提高了图像的整体视觉效果,并具有一定减弱“点增益现象”的能力。

4.3 自适应反馈视觉感知差的误差扩散算法

尽管误差扩散法可以使象素点的分布是各向异性和无规律的,具有丰富的色调,但它在视觉效果上依然存在着自身的不足^{[25][36]}。从全局来看,它基于整体解决的算法特征,会使各个色调的对比度有所下降;从局部来看,这种通过滤波器扩散误差来改进图像光滑度的方法,往往会因为滤波器设计不能满足图像各种变化的需求等原因,造成图像局部细节的损失,由于“点增益现象”的存在,暗调区域的细节损失更为严重。

本文基于人眼对亮度的视觉感受特性,提出了一种自适应反馈视觉感知差的误差扩散算法(Adaptive Error Diffusion with Perceived Error Feedback),简称PEF Error Diffusion算法。它避开了滤波器权值的调节和迭代计算,因而不存在稳定性的问题,计算量较小。实验结果表明,由于视觉感知差的引入及反馈系数的自适应变化,本算法能够明显增强图像的整体对比度,准确再现更多的图像细节,在没有引入迭代过程的情况下有效改善了“点增益现象”,比传统算法具有更好的主观视觉效果。

4.3.1 理论依据

如2.3节所述,人眼视觉系统对亮度反应的灵敏度是非线性的。例如,人眼对于黑暗背景的微小亮度变化比较敏感,而对于明亮背景下的微小变化则较难察觉,这就从一个侧面反映出HVS有其特定的亮度反映曲线,并且这条曲线是非线性的。根据实验得出的结论,在人眼适应了某一平均亮度后,“黑”和“白”感觉对应的亮度范围将有所缩小。因此以人眼观察为目的重现数字图像时,重现图像的亮度不必等于实际景物的亮度,只要保持二者的对比度及亮度差的级别尽可能相同,就能给人以真实的感觉。故我们在考虑图像的亮度再现时,最重要的是保证图像不同灰度级的对比度,而不需过多考虑其它方面的影响。

由于半色调技术的目的就是利用二值图像再现连续调图像,因此处理后必然丢失一部分灰度信息。尤其是在灰度缓慢变化的区域,由于阈值量化与误差扩散的算法特征,背景和目标的对比度降低,其中的一部分纹理或细节变得模糊,视觉效果变差。由于 $\tilde{b}(m,n)$ 和 $\tilde{g}(m,n)$ 之间的差值恰好包含着人眼能感知到的丢失了

的信息，于是可以将它定义为 (m, n) 处的视觉感知差，用 $\tilde{e}(m, n)$ 表示。因此，PEF Error Diffusion 算法的基本原理就是根据当前区域的灰度特征，补偿因误差扩散所引起的灰度损失，从而增强图像的主观视觉效果。

4.3.2 基本原理

图 4.8 为 PEF Error Diffusion 算法的原理框图。首先将连续调图像 $g(m, n)$ 及经过传统误差扩散得到的半色调结果 $b(m, n)$ 分别通过 HVS 模型，得到 $\tilde{g}(m, n)$ 和 $\tilde{b}(m, n)$ ，进而得到整幅视觉感知差图像 $\tilde{e}(m, n)$ 。接着根据当前区域的灰度特征计算自适应反馈系数 H ，通过自适应地反馈视觉感知差对 $g(m, n)$ 的每个象素进行补偿。最后，对补偿后的连续调图像进行传统的误差扩散就可以得到对比度增强的半色调图像。

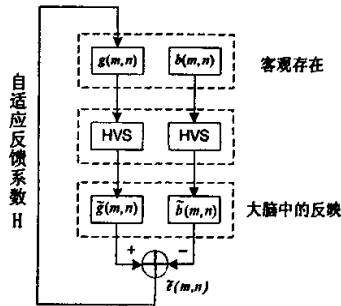


图 4.8 PEF Error Diffusion 算法的原理框图

4.3.3 PEF Error Diffusion 算法中的关键技术

1) 反馈方式的确定

图4.9给出了Lena, Girl和Jet图象及其误差图像的直方图统计。这里，选取传统的Floyd-Steinberg误差扩散滤波器，HVS模型为高斯低通滤波器。从各灰度图象的直方图可以看出，这三幅图象具有不同的灰度特征，因而各自都具有一定的代表性。这里，

$$e(m, n) = |g(m, n) - b(m, n)|, \quad \tilde{e}(m, n) = |\tilde{g}(m, n) - \tilde{b}(m, n)| \quad (4-11)$$

从 $|e(m, n)|$ 的直方图可以看出， $g(m, n)$ 和 $b(m, n)$ 的灰度差还是很大的；但 $|\tilde{e}(m, n)|$ 的直方图要表明，经过人类视觉系统后，处理前后的灰度差大大减小，基本上都维持在较小的数值。这也再次验证了半色调技术存在的道理性，即用二值图像表示灰度图像是可行的，这是由人眼相当于一个低通滤波器的视觉特性决定的。

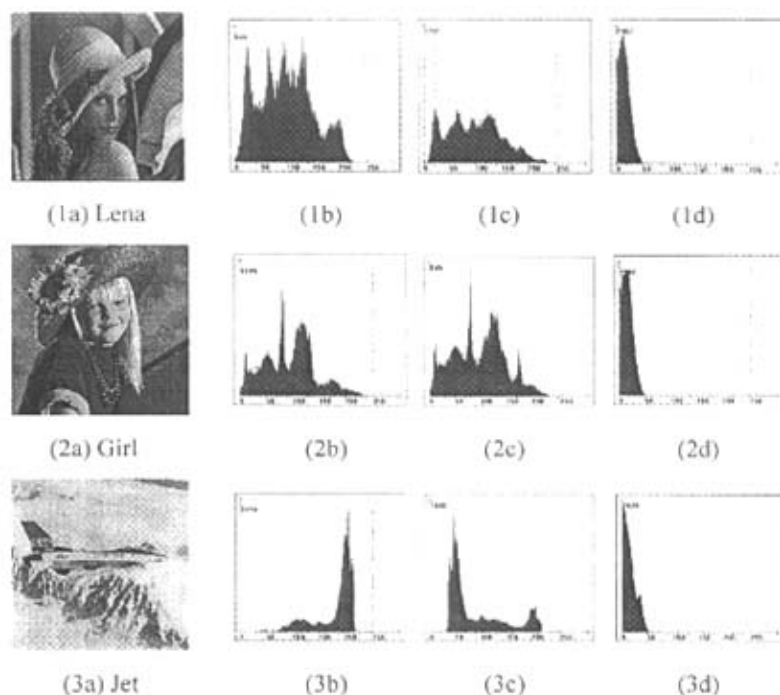


图4.9 误差图像的直方图统计

(a) 256色灰度图像 (b) 原灰度图像的直方图 (c) $|e(m,n)|$ 的直方图 (d) $|\tilde{e}(m,n)|$ 的直方图

表4.1 $|\tilde{e}(m,n)|$ 图像的平均灰度值

	256×256	512×512
Lena	16.044510	17.257618
Girl	16.362198	16.506779
Barbara	17.020493	16.685146
Peppers	17.319275	17.001503
Jet	16.230225	15.697533
Goldhill	17.270126	17.040417
Baroon	18.203598	17.795238

从图4.9的(d)还可以看出,几乎所有的 $|\tilde{e}(m,n)|$ 都介于0~50之间,又由表1可知 $|\tilde{e}(m,n)|$ 的均值几乎都小于20。因此,得出结论,大部分 $|\tilde{e}(m,n)|$ 数值都非常小。由于 $\tilde{e}(m,n)$ 本身有正负而且绝对值很小,为了便于正负反馈的讨论,可以用 $|\tilde{e}(m,n)|$ 近似代表 $\tilde{e}(m,n)$ 。

图4.10给出了对 $\tilde{e}(m,n)$ 及 $|\tilde{e}(m,n)|$ 分别进行正负反馈时的处理结果。如图,(a)(c)表示 $\tilde{e}(m,n)$ 的反馈处理结果,由于 $\tilde{e}(m,n)$ 本身有正负,因此它们都不是严格意义上的正负反馈,而是兼而有之,因此几乎看不出任何差别;(a)和(c)、(b)和(d)之间非常近似,只是使用 $|\tilde{e}(m,n)|$ 后,(c)比(a)色调亮一点,(d)比(b)色调显得暗一些。因此可以得出:1)用 $|\tilde{e}(m,n)|$ 近似代表 $\tilde{e}(m,n)$ 是合理的;2)正反馈可以使色调变亮,

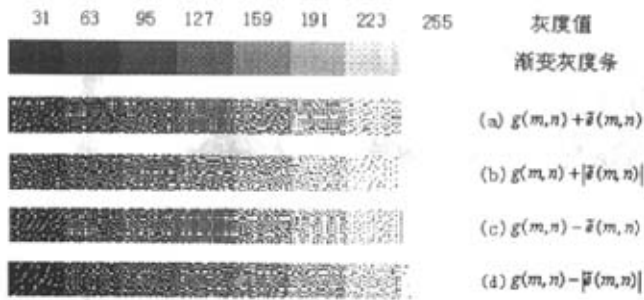


图4.10 视觉感知差的正负反馈效果对比

负反馈可以使色调变暗。由于印刷或打印过程中不可避免地存在“点增益现象”，即由于设备、纸张的物理特性、墨水的扩散特性等客观因素使得印刷结果在视觉上偏黑，因此，采用负反馈应该非常慎重。

由图像增强的理论可知，同一幅图像中目标与背景的对比度越大，越有利于人眼识别。如果在整幅图像使用单独一种反馈方式，不但会使整体灰度值发生较大变化，而且对比度的增强效果可能并不明显。所以，应该考虑在较亮区域采用正反馈使亮度增强，在较暗区域使用负反馈使色调变暗。同时，如何兼顾负反馈存在的必要性和可能带来的不良影响尤为关键。

2) 反馈方程的建立

设 H 为反馈系数，它表示视觉感知差 $\tilde{e}(m,n)$ 对连续调图像 $g(m,n)$ 当前象素的影响程度，设 $g'(m,n)$ 为补偿后的当前象素，建立反馈方程如下

$$g'(m,n) = g(m,n) + H \cdot |\tilde{e}(m,n)| \quad (4-12)$$

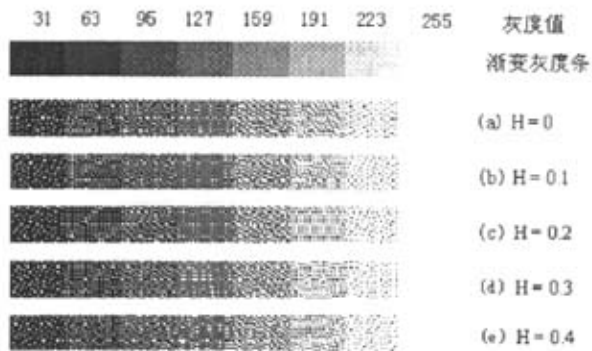


图 4.11 改进前方程的处理结果

图 4.11 是不同 H 时式(4-12)的处理效果。如图，随着 H 的增加，各个区域的差异非常小，人眼几乎不能识别。这是因为 $|\tilde{e}(m,n)|$ 本身数值很小，乘以反馈系数 H 后更小，因此 $H \cdot |\tilde{e}(m,n)|$ 对于数值相对较大的 $g(m,n)$ 影响非常有限。于是，作如下改进：

$$g'(m,n) = \begin{cases} g(m,n) - H \cdot |\bar{e}(m,n)|, & g(m,n) < 50 \\ g(m,n) + H \cdot (g(m,n) - |\bar{e}(m,n)|), & g(m,n) \geq 50 \end{cases} \quad (4-13)$$

这样改进的原因如下：1) 由 $|\bar{e}(m,n)|$ 的范围可知，对 $g(m,n) > |\bar{e}(m,n)|$ 的多数像素点，将反馈项变为 $g(m,n) - |\bar{e}(m,n)|$ 后，反馈项数值变大，便于进行亮度的控制；2) 尽管前面提到使用负反馈应十分慎重，但是由于 $|\bar{e}(m,n)| \in [0, 50]$ ， $H \cdot |\bar{e}(m,n)|$ 数值相对很小，对于 $g(m,n) < 50$ 这些点来说，负反馈的存在不但可以适当减小正反馈带来的平均灰度值的增加，而且有利于更好地表现图像细节，这将在之后作以解释。

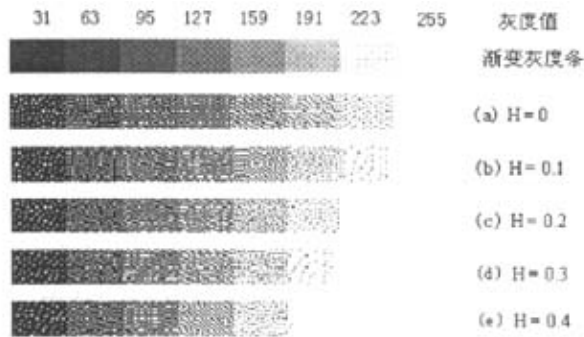


图 4.12 改进后方程的处理结果

图 4.12 为改进后的处理效果。从图中可以看出，随着 H 值的增大，中间调和亮调区域的亮度逐渐增强，而暗调处也稍稍变暗；但在同一 H 下，增强效果又随着灰度级的增加而逐渐明显，暗调区域略微变暗，中间调和亮调区域都变亮，但亮调区的增强程度明显大于中间色调。从对比度增强的角度来看，这种处理方式主要通过提高中间调和亮调的灰度值来增加对比度，而不是依赖于减小暗调区域的灰度值，在增强图像视觉效果的同时，能够有效减弱点增益现象的影响。

3) 反馈系数 H 的计算

为了便于分析不同 H 时的处理效果，近似做出 $g' \sim g$ 的函数图像。为简化分析，假定 $|\bar{e}(m,n)|$ 为常值 20，由于反馈方程为分段的一次线性方程，因此，假设 $|\bar{e}(m,n)|$ 为常值是合理的，实际处理中， $|\bar{e}(m,n)|$ 的变化只会稍稍影响直线的截距，这对 H 的分析影响甚微。

于是，式 (4-13) 可以表示为

$$g'(m,n) = \begin{cases} g(m,n) - 20H, & g(m,n) < 50 \\ (1+H)g(m,n) + 20H, & g(m,n) \geq 50 \end{cases} \quad (4-14)$$

图 4.13 是 $g' \sim g$ 的近似函数图像。实验证明，H=0 时相当于传统算法，H=0.4 时图像的亮调区域失真严重，因此 H 介于 [0, 0.4] 内时，有不同程度的增强效果。

设 $g(m,n) < 50$ 的直线斜率为 h_1 ， $g(m,n) \geq 50$ 的直线斜率为 h_2 ，那么 H=0 时， $h_1 = h_2 = 1$ ， $g'(m,n) \equiv g(m,n)$ ，图像没有增强效果。显而易见，H=0 的函数曲线是

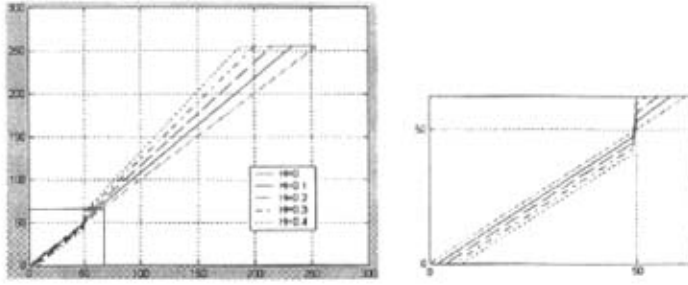


图 4.13 方程(4-14)的函数曲线及局部放大图

灰度值增大或减小的边界, 当 $g(m,n) \geq 50$ 时, H 越大, 直线斜率越大, 像素灰度值增加越多, 因而增强效果明显, 而在同一条直线上, 灰度值的增加又随灰度级递增; 当 $g(m,n) < 50$ 时, 直线斜率为 1, 但由于截距为负, 所以直线位于 $H=0$ 函数之下, 处理后色调变暗。这和之前的处理结果分析是一致的。

如果没有 $g(m,n) < 50$ 时负反馈的存在, $h_2/h_1 \equiv 1$, 那么这种情况下暗调背景下的目标识别难度较大, 但是有了负反馈, $h_1/h_2 = 1 + H$, 可以通过在暗调区域增大 h_2/h_1 更好地再现细节。另一方面, 如果在同一幅图像中使用一个常值反馈系数, 将存在这样的问题: 如果 H 较小, 对比度增强不明显, H 较大又容易引起亮调区域的失真。通过上述分析, 想要同时满足增强图像、亮调不出现失真以及不丢失暗调的细节, 可以令 H 随着灰度值的增加而递减。

此外, 由于人眼在观察图像时是基于区域而不是基于像素, 那么图像的增强更应该基于不同色调的区域进行, 更符合人类的视觉特征。

4.3.4 算法实现

PEF Error Diffusion 算法主要有以下步骤:

1) 计算视觉感知差

此过程与 4.2 节计算视觉误差图像的过程完全相同, 通过(4-3)至(4-5)式计算得到 $|\tilde{e}(m,n)|$ 图像。

2) 计算自适应反馈系数 H

计算 (m,n) 处 9 邻域内的像素均值 $g_{ave}(m,n)$, 即

$$g_{ave}(m,n) = \sum_{i,j} g(i,j) \quad i = m-1, m, m+1; j = n-1, n, n+1 \quad (4-15)$$

构造递减的一次线性方程, 求出当前点的反馈系数。

$$H = -0.4 * g_{ave}(m,n) + 0.4 \quad (4-16)$$

3) 对原始连续调图像的像素逐点进行补偿

$$g'(m,n) = \begin{cases} g(m,n) - H \cdot |\tilde{e}(m,n)|, & g(m,n) < 50 \\ g(m,n) + H \cdot (g(m,n) - |\tilde{e}(m,n)|), & g(m,n) \geq 50 \end{cases} \quad (4-17)$$

重复进行步骤 2) 和 3), 直到图像中的所有象素处理完毕。

4) 利用传统误差扩散算法进行处理

按照 (3-1)、(3-2) 和 (3-3) 式, 利用传统算法对补偿后的连续调图像 $g'(m,n)$ 进行处理, 得到最终的半色调图像。

4.3.5 实验结果与分析

为验证 PEF Error Diffusion 算法的有效性, 以 8bit 的 Lena 和 Girl 图像进行实验。实验设备为 HP LaserJet 1020 激光打印机, 输出分辨率为 600dpi。其中, Lena 图像大小为 512×512 , 便于观察整体视觉效果, Girl 图像为 256×256 , 更利于局部细节的分析。误差扩散过程采用顺序扫描的 Floyd-Steinberg 滤波器, HVS 模型采用 Gaussian 低通滤波器。为了证明它比传统算法具有更好的主观视觉效果, 图 4.14 将二种算法的处理结果进行了比较。

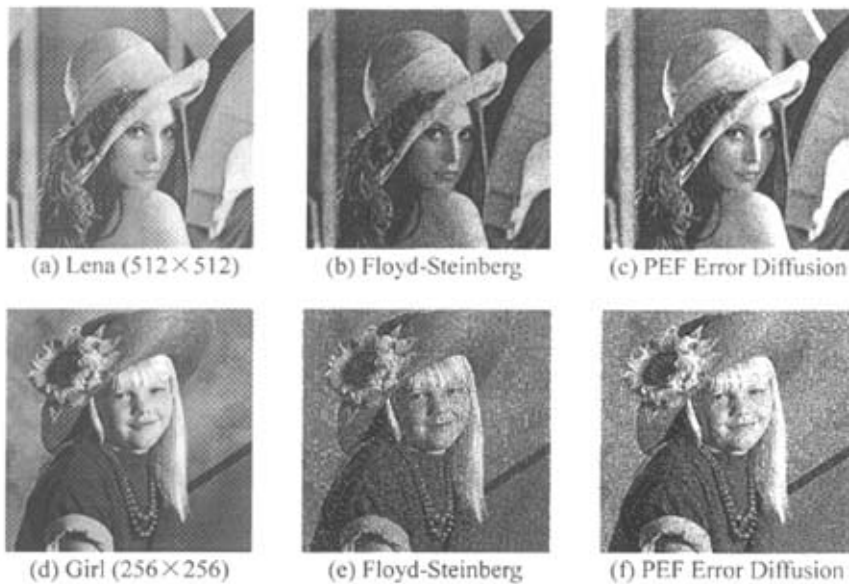


图 4.14 PEF Error Diffusion 算法与传统算法的实验结果对比

PEF Error Diffusion 算法的性能分析:

(1) 图像的整体视觉效果更接近于原始图像。传统算法的处理结果中不同色调区域的色调趋于平滑, 色调间的对比度不明显, 而且由于点增益现象整幅图像在视觉上明显偏黑; 而 PEF Error Diffusion 算法的处理结果(c)(f)与(b)(e)相比, 有效

抑制了点增益现象, 图像的整体色调更接近于原连续调图像, 而且不同色调区域的对比度增强, 表现出比传统算法更好的主观视觉效果。

(2) 能够更准确地再现图像细节。由于局部对比度增强, PEF Error Diffusion 算法能够比传统算法表现出更多的图像细节。如(c)中 Lena 的头发、帽子上的羽毛都表现出更细腻的纹理, 两侧下垂的头发呈现出更明显的纵向纹理, 除此之外, 在原始图像右侧的暗调斜向宽条纹中可以隐约看到纵向纹理, 比较(b)和(c)可以看出, PEF Error Diffusion 算法将这个传统算法完全无法表现的细节较为准确地反映出来; 在 Girl 图像中, 由于衣服本身色调较暗, 上面各种细节的灰度值非常接近, 所以衣服的缝线及褶皱都是很难表现的细节, 如(e)中几乎看不出领口的缝线及肩线, 衣服上的褶皱也被平滑掉了许多, 背后还出现了一些原图没有的横向纹理, 而在(f)中, Girl 领口的缝线、肩线及衣服上的褶皱都明显得到了增强, 更易于人眼识别, 她背后的纹理更符合原图的特征, 因而(f)比(e)呈现出更好的视觉效果。

4.3.6 结论

本文基于人眼对亮度的视觉感受特性, 提出了一种能够自适应地反馈视觉感知差的误差扩散算法。首先提出视觉感知差的概念, 根据原图像中区域的灰度特征, 自适应地计算反馈系数, 将视觉感知差反馈给原连续调图像以增强半色调图像的视觉效果。实验结果表明, 由于视觉感知差的引入及反馈系数的自适应变化, PEF Error Diffusion 算法能够明显增强图像的整体对比度, 减弱点增益现象的不良影响, 并准确再现更多的图像细节, 比传统算法表现出更好的主观视觉效果。

第五章 结论与展望

5.1 论文完成的主要工作

本文从数字图像处理的角度,对数字半色调技术进行了全面系统的研究,建立了清晰的理论框架,并重点研究了近年来学术界最为关注的热点——误差扩散算法。总结本文的工作,主要包括以下几个方面:

1) 系统深入地研究了数字半色调技术,对其研究背景、基本原理、技术发展过程都进行了详细的介绍,对现存的主要方法进行了较为全面的总结。

2) 重点研究了半色调技术中的误差扩散算法,对算法的思想、原理、影响算法的主要因素都进行了深入研究,尤其对阈值调节过程进行了总结和分析,并讨论了误差扩散滤波器的稳定性问题。

3) 利用 VC++ 6.0 建立了数字半色调算法实验平台,对传统的误差扩散算法进行了实验和比较,并在此平台上进行了新算法的实验。

4) 在深入研究分析的基础上,结合误差扩散算法和 DBS 算法的特点,提出了两种新的基于人类视觉模型的误差扩散算法,并通过实验验证了它们的有效性。

5.2 未来研究展望

半色调技术应用于印刷工业已有一个多世纪,应用在数字输出设备上也有 40 多年。数字半色调技术和数字图像处理技术经过 40 多年的发展,已建立了较为完善的理论体系,并根据应用特性和不同领域,提出了许多方法。尽管该技术最早用于印刷行业,但随着电子技术和信息技术越来越多地应用于生产生活,随着人们对各种印刷制品的要求越来越高,各种印刷机、打印机、照排机、等离子体显示屏等二值设备已经为数字半色调技术的研究提出了更高的要求。因此,研究数字半色调技术具有重要的现实意义和应用价值。

在本论文的研究基础上,作者认为进一步的研究工作可以从以下几方面考虑:

1) 优化改进基于迭代的半色调算法

迭代算法的主要原理是通过多条路径来决定最终的输出。通常通过最小化连续调图像和二值图像之间的误差,来寻找可能存在的最优的二值输出。它输出的处理结果明显优于抖动和误差扩散法:产生的半色调图像的视觉效果最令人满意,基本上没有结构性的龟纹和人工痕迹;能够正确地再现图像的色调,特别是在灰暗处再现丰富的色调。但是由于它的计算复杂度非常高,故很难用于实际处理场

合。因此,如何在保证迭代算法处理效果不变或稍稍折中的前提下,提高算法的计算效率,使其满足实际处理要求,是一个非常值得深入研究的课题。

2) 将人眼视觉模型的最新研究成果用于实际半色调技术

自从数字半色调技术出现以来,几乎所有的算法都直接地或间接地考虑到了人眼视觉模型(HVS模型),并且由于半色调技术是一种基于主观评价的算法,因此在半色调算法中引入HVS模型具有重要意义。尽管在过去25年中,人眼视觉模型的研究方面取得了巨大成就,但目前它在半色调技术中的应用还非常有限,而且此技术应用背景下HVS模型的系统性研究也才刚刚起步。因此,进一步深入人类视觉系统的研究,并将研究成果有效地应用于数字半色调技术中将具有重要的意义。

3) 彩色数字半色调技术

本文一开始就提到,灰度图像的半色调研究是彩色图象半色调研究的重要基础,因为彩色半色调通常是将颜色的各个分量独立地进行半色调处理即可。然而,在实际彩色打印中,由于三种或者四种颜色分量的重叠以及加网角度等客观原因,彩色半色调处理中的确存在一系列灰度处理中没有的问题,如龟纹的出现、颜色移位、空间分辨率不足等等。尽管已经提出了基于模型的彩色半色调方法、基于图象特征信息的彩色半色调等方法,但主要还是利用彩色图象的特点将灰度处理的方法用于图象的再现,依然存在一定局限性。因此,彩色图像的半色调研究将是一个充满机遇和挑战的研究方向。

致 谢

在本论文完成之际，谨向我的导师郭宝龙教授致以崇高的敬意和衷心的感谢！郭老师创造的宽松民主的学术氛围、团结和谐的工作环境极大地激发了我的创新意识和进取精神，在他的指导和鼓励下，这篇论文才得以顺利完成。郭老师深邃渊博的学识、诲人不倦的师者风范、严谨缜密的治学作风和平易近人的态度，都使我受益终生。感谢学校和郭老师为我们提供了很好的学习和科研条件。

感谢实验室的倪伟、吴宪祥、闫允一、孙伟、朱娟娟等诸位博士师兄师姐，感谢潘玉、曹蓓、孟凡洁、侯舒维等已经毕业了了的师兄师姐，与他们的交流和讨论使我受益匪浅，我的整个研究都离不开他们的真诚的指导和帮助。感谢一路走来的各位同门，仵建宁、张鹏、刘汉洲、杨镠、何姗、李鹏、李葳、董绍锋，与他们共同学习生活的日子是我人生道路上最珍贵的记忆。感谢李雷达、白博、李楠、邓登峰等师弟师妹们，与他们一起学习欢乐的点点滴滴都是美好的记忆。

感谢朝夕相处的同室好友，我将珍藏我们一起度过的每一天。感谢研 0403 班的所有同学，感谢一起工作的所有班干部，与他们一起学习、工作、成长是我研究生阶段的宝贵财富。

最后特别感谢我的家人和挚友，是他们的无私关爱和真挚鼓励支持着我不断挑战自我、挑战生活！

参 考 文 献

- [1] 姚海根. 数字加网技术. 北京:印刷工业出版社, 2000.
- [2] 耿丽萍. 数字化印刷中的加网技术. 印刷杂志, 2003(2):21-22.
- [3] 夏自由. 数字印刷工艺综述. 今日印刷, 2004(2):74-78.
- [4] 任小玲, 张二虎. 数字半色调发展概述. 西安工业学院学报, 2003, 23(2): 108-113.
- [5] Murat Mese, P.P.Vaidyanathan. Recent advances in digital halftoning and inverse halftoning methods. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2002, Vol.49, No.6, pp.790-805.
- [6] Robert Ulichney. A Review of Halftoning. Techniques. SiteSee. 2000:
<http://Citeseer.nj.nec.com/>
- [7] J.Allebach, T.Pappas. Digital halftoning. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, Vol.20, No.4, pp.12-13.
- [8] R.W.Floyd and L. Steinberg. An adaptive algorithm for spatial grayscale. Proceeding of the society for Information Display, 1976, Vol.17, No.2, pp:75-77.
- [9] 余柳, 万晓霞. 浅谈几种混合数字加网方式. 印刷杂志, 2004(3):46-49.
- [10] 王克蒙. 计算机加网算法探讨. 北京印刷学院学报, 1999, 7(4):24-28 转 35.
- [11] 邝广敏, 陈新. 调频加网技术分析与研究. 包装工程, 2002(23):12-14.
- [12] 郑元林. 新型数字加网技术. 印刷世界, 2004(8):1-5.
- [13] David J. Lieberman, Jan P. Allebach. A dual interpretation for direct binary search and implications for tone reproduction and texture quality. IEEE Transactions on Image Processing, Vol.9, No.11, pp.1950-1963.
- [14] Sang Ho Kim, Allebach, J.P. Impact of HVS models on model-based halftoning. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, Vol.11, No.3, pp. 258- 269.
- [15] Zhen He, Charles A. Bouma. AM/FM halftoning: A method for digital halftoning through simultaneous modulation of dot size and dot density. Proc. SPIE Color Imaging: Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hardcopy and Applications VII4663, Dec.2001, pp.322-344.
- [16] Naranjan Damena-Venkata, Qian Lin. AM/FM screen design using donut filters. CiteSeer: <http://citeseer.nj.nec.com/cs>
- [17] M. Mege, P.P.Vaidyanathan. Look up table (LUT) method for image halftoning Image Processing. 2000 International Conference on Proceedings, Sept.2000,

- Vol.3, pp.Pages:993- 996
- [18] Li Pingshan, J.P.Allebach. Look-up-table based halftoning algorithm. IEEE Transactions on Image Processing, Sept. 2000,Vol.9, No. 9,pp 1593-1603.
 - [19] R.A.Ulichney. Dithering with blue noise. Proceedings of the IEEE, Jan. 1988, Vol. 76, No.1,pp 56-79.
 - [20] D.L.Lau, G.R.Arce, N.C.Gallagher Green-noise digital halftoning. Proceedings of the IEEE, Dec. 1998,Vol.86, No.12 ,pp.2424-2444.
 - [21] Daniel L.Lau,Ganzalo R.Arce. Digital color halftoning with generalized error diffusion and multichannel green-noise masks. IEEE Transactions on Image Processing, May 2000,Vol.9, No.5.
 - [22] D.L.Lau, R.Ulichney, G.R.Arce. Blue and green noise halftoning models. Signal Processing Magazine, IEEE , July 2003 ,Vo.20 , No. 4 , pp. 28-38.
 - [23] Hong-Kee Kim, Byoung-Ho Kang. A method of printer modeling with the spectral reflectance curves using error back propagation.Systems, Man, and Cybernetics, 1998. 1998 IEEE International Conference on, 11-14 Oct. 1998,Vol.2 , pp. 1796-1800
 - [24] T.N.Pappas, J.P.Allebach, D.L.Neuhoff. Model-based digital halftoning. Signal Processing Magazine, IEEE , July 2003, Vol.20 , No. 4 , pp.14-27.
 - [25] T.N.Pappas, D.L.Neuhoff. Printer models and error diffusion. IEEE Transactions on Image Processing, Jan. 1995, Vol., No1, pp.66-80.
 - [26] Yinyi Lin, Tsung-Chieh Ko. A modified model-based error diffusion. Signal Processing Letters, IEEE , Feb.1997, Vol.4 , No. 2, pp. 36-38.
 - [27] T.D. Kite, B.L. Evans, A.C.Bovik. Modeling and quality assessment of halftoning by error diffusion. IEEE Transactions on Image rocessing, May2000,Vol.9, No.5.
 - [28] T.N.Pappas, D.L.Neuhoff. Least-squares model-based halftoning. IEEE Transactions on Image Processing, Aug. 1999,Vol.8 , No. 8, pp.1102-1116.
 - [29] Li Pingshan,J.P.Allebach.Clustered minority pixel error diffusion. Image Processing. 2002. Proceedings(1): I-641-I-644.
 - [30] D.J.Lieberman, J.P.Allebach. Efficient model based halftoning using direct binary search. Image Processing,1997. Proceedings., International Conference on , Vol.1 , 26-29 Oct. 1997,pp. 775-778
 - [31] F.A.Baqai, J.P.Allebach. Printer models and the direct binary search algorithm Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1998. ICASSP '98. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on , May 1998, Vol.5, 12-15,pp.2949 – 2952.
 - [32] L.Velho, J.M.Gomes.Digitalhalftoning with spece filling curves. Computer Gra-

- phics,1991, Vol.25, No. 7,pp.81-90.
- [33] 任小玲.基于误差扩散数字半色调方法的研究.西安理工大硕士毕业论文,2004(3)
- [34] 戴勇.数字半色调技术中误差传递方法的研究.西安理工大硕士毕业论文,2001(3)
- [35] Naranjan Damena-Venkata, Brian L. Evans. Adaptive threshold modulation for error diffusion halftoning. *IEEE Transactions on Image Processing*, Jan.2001, Vol. 10, No. 1, pp.104-116.
- [36] R.Escbbach, Z.Fan, K.T. Knox, G. Marcu.Threshold modulation and stability in error diffusion. *Signal Processing Magazine, IEEE*, July 2003, Vol.20, No. 4, pp. 39-50.
- [37] Z.Fan. Stability analysis of error diffusion. *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1993. ICASSP-93., 1993 IEEE International Conference on*, Vol. 5, 27-30 April 1993,pp.321-324.
- [38] Li Pingshan, J.P.Allebach. Tone-dependent error diffusion. *IEEE Transactions on Image Processing*, Feb. 2004, Vol.13, No.2, pp.201-215.
- [39] Yuk-Hee Chan, Sin-Ming Cheung. Row-oriented multiscale error diffusion technique for digital halftoning. *Electronics Letters*, May 2001, Vol.37, No.10, pp. 626-627.
- [40] B.W. Kolpatzik, C.A. Bouman. Optimized error diffusion for image display. *J. Elect. Imag.*, July 1992, Vol.1, No. 3, pp. 277-292.
- [41] J. Sullivan, R. Miller, and G. Pios. Image halftoning using a visual model in error diffusion. *J. Opt. Soc. Amer. A*, Aug. 1993, Vol.10, No.8, pp.1714-1724.
- [42] Qing Yu, Kevin J. Parker. Stochastic Screen Halftoning for Electronic Imaging Devices. CiteSeer: <http://citeseer.nj.nec.com/cs>.
- [43] Ping Wah Wong. Error diffusion with dynamically adjusted kernel. *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1994. ICASSP-94, 1994 IEEE International Conference on*, Volume: v, 19-22 April 1994, Pages:V/113 - V/116 vol.5
- [44] Fan Zhigang, R.Eschbach. Limit cycle behavior of error diffusion. *Image Processing, 1994. Proceedings. ICIP-94, IEEE International Conference*, Nov. 1994, Vol.2, 13-16 Pages:1041-1045
- [45] Shiozaki. A. Digital half-toning by error diffusion with perturbation. *Electronics Letters*, 29 Aug. 1996, Vol.32, No.18, pp.1655.
- [46] Ti-chiun Chang, J.P.Allebach. Memory efficient error diffusion. *IEEE Transactions*

- on Image Processing, Nov. 2003, Vol.12, No.11, pp.1352-1366.
- [47] N. Damera-Venkata, B.L. Evans. FM halftoning via block error diffusion. Image Processing, 2001. Proceedings. 2001 International Conference on, 7-10 Oct. 2001, Vol. 2, pp.1081-1084.
- [48] Fan Zhigang, Li Fu. Edge behavior of error diffusion. Image Processing, 1995. Proceedings, International Conference on, 23-26 Oct. 1995, Vol.3, pp.113-116
- [49] Yu Qing, J. Parker. Kevin. Stochastic Screen Halftoning for Electronic Imaging Devices. CiteSeer: <http://citeseer.nj.nec.com/cs>.
- [50] L.Lau Daniel, R.Arce Ganzalo. Digital color halftoning with generalized error diffusion and multichannel green-noise masks. IEEE Transactions on Image Processing, May 2000, Vol.9, No.5, pp.923-935.
- [51] Naranjan Damena-Venkata. Design and analysis of vector color error diffusion halftoning systems. IEEE Transactions on Image Processing, Oct.2001, Vol.10, No.10, pp.1552-1565.
- [52] 段华伟, 基于可变信息印刷数字化加网的研究. 西安理工大学硕士毕业论文, 2004(3)
- [53] 曾平, 孟健. 打印机色调自补偿数字半调的模型与算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 11(4), 1999:352-355
- [54] 苏永宪. 调频加网计算模型的研究. 中国人民解放军信息工程大学测绘学院硕士毕业论文, 2000(4)
- [55] 栾红霞. 绿噪声半色调技术及其应用. 杭州电子工业学院硕士毕业论文, 2000(4)

硕士在读期间的研究成果

- [1] 叶玉芬, 郭宝龙, 马佳. 一种基于视觉差的误差扩散半色调算法. 计算机工程. 2006, 9 (已录用)
- [2] 叶玉芬, 郭宝龙, 马佳. 自适应反馈视觉感知差的误差扩散半色调算法. 微电子学与计算机. 2006, 8 (已录用)