

分类号 \_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

编号 \_\_\_\_\_

# 成都理工大学

## 硕士学位论文

题名和副题名 简牍数字图像增强算法研究与应用

作者姓名 覃庆炎

指导教师姓名及职称 王绪本 教授

申请学位级别 硕士 专业名称 信号与信息处理

论文提交日期 2008.4 论文答辩日期 2008.5

学位授予单位和日期 成都理工大学 (2008年 6月)

答辩委员会主席 李灿平

评阅人 李灿平 刘刚

2008年5月

分类号 \_\_\_\_\_

学校代码: 10616

UDC \_\_\_\_\_

学号: 200502260

## 成都理工大学硕士学位论文

# 简牍数字图像增强算法研究与应用

覃庆炎

指导教师姓名及职称 王绪本 教授

申请学位级别 硕士 专业名称 信号与信息处理

论文提交日期 2008.4 论文答辩日期 2008.5

学位授予单位和日期 成都理工大学 ( 年 月)

答辩委员会主席 \_\_\_\_\_

评阅人 \_\_\_\_\_

2008年5月

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得成都理工大学或其他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作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：覃庆炎

2008年 6月 13日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解成都理工大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权成都理工大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：覃庆炎

学位论文作者导师签名：王瑞林

2008年 6月 13日

# 简牍数字图像增强算法研究与应用

作者简介: 覃庆炎, 男, 1981 年 1 月生, 师从成都理工大学王绪本教授, 2008 年 06 月毕业于成都理工大学信号与信息处理专业, 获得工学硕士学位。

## 摘要

简牍作为中国古代重要的一种书写材料, 保存了丰富的历史文化信息, 是我国宝贵的文化财富。简牍图像增强是简牍文字修复和文字信息提取最为关键的一个步骤。由于大多数简牍实物长期埋存地下, 出土时重叠、粘连, 有的腐蚀、朽烂, 文字信息出现脱落, 墨迹扩散, 肉眼根本难以识别简牍上的文字符号, 同时在简牍数字图像获取过程中外界光照的非均匀分布, 导致了大多数的简牍图像都存在着对比度差、分辨率低的缺点。简牍图像中暗区中包含了很重要的文字信息, 由于这些信息的能见度较低, 因而对简牍暗区的增强, 提高暗区的可视度对简牍考古工作者来讲意义十分重大。传统的图像增强方法虽然能够使图像的对比度增强, 但通常会丢失图像暗区的细节信息, 并且会导致图像颜色的失真。所以需要一种有效的简牍图像增强算法, 在提高图像对比度的同时, 能有效地消除光照对简牍图像的退化影响从而增强图像暗区的细节信息并且使简牍图像具有较高的色彩保真度。

本文以长沙简牍博物馆所收藏的简牍文物为实物模型, 以该馆所提供的简牍数字图像为研究对象, 深入研究简牍图像特点, 在简牍图像增强处理的各阶段进行了大量实验, 引入了一套适用于简牍图像增强处理算法:

### (1) 多尺度 Retinex 算法

Retinex 是一种建立在科学实验和科学分析基础上的图像增强理论, 其实质就是从图像中抛开照射分量的影响来获得物体的反射分量, 即获得物体本来的面貌。与其它图像增强方法相比, Retinex 算法具有锐化、颜色恒常性、动态范围压缩大、色彩保真度高等特点。本文对该理论进行了重点研究, 并采用多尺度 Retinex 算法来消除光照对简牍图像的退化影响, 以达到增强图像暗区细节信息和使简牍图像具有较好的色彩保真度的目的。

### (2) gain/offset 修正

通常利用多尺度 Retinex 算法处理后的图像像素值会出现负值, 而且会超出显示器的显示范围的情况, 这就需要将其平移和压缩到显示器显示围内, 本文利用 gain/offset 方法对图像像素进行修正, 再把修正后的图像的灰度值映射到显示器显示的灰度范围(0-255)。

### (3) 对比度拉伸

根据我们对几百张原始简牍的研究发现,这些简牍图像的直方图的灰度值通常处于 20 至 220 的区间,没有充分的利用整个灰度级(0-255),表现在简牍图像上就是对比度差,整个图像看起来比较黑。因此本文采用对比度拉伸算法来实现简牍图像高对比度的目的。

试验结果表明:本文所采用的算法在提高简牍图像对比度的同时,能显著地增强图像暗区的细节信息并且使简牍图像具有较好较高的色彩保真度。该方法克服了目前常规的图像增强方法的不足,能够满足简牍考古人员的要求。

**关键词:** Retinex 理论 多尺度 Retinex 算法 对比度拉伸算法 简牍图像

# Research and Application of Bamboo Script Image Enhancement Algorithm

Introduction of the author: Qinqingyan, male, was born in January, 1981 whose tutor was Professor Wangxuben . He graduated from Chengdu University of Technology in Signal and Information Processing major and was granted the Master Degree in June, 2008.

## Abstract

Bamboo script preserves the rich historical and cultural information. As a writing material in ancient China, Bamboo script is the valuable cultural wealth. Enhancement of the Bamboo script Image is the most key procedure in character reconstruction and text extraction. As most of the Bamboo scripts were buried underground for a very long period, almost all of the Bamboo script the lap over together. They were conglutination and some of them even corrupted. The characters on the Bamboo scripts were fallen off and it is hard to identify. On the other hand, most of the Bamboo script were photoed under poor condition, therefore most of the Bamboo script were in the poor contrast condition. As the dark area in the image includes very importance detail about the character, so the enhancement of the dark area in the Bamboo script is the most useful for archaeologist.

In this paper we made the Bamboo scripts from Changsha Jiandu museum as a model and taken the Bamboo script images as our research objects. This paper designs one kind of bamboo scripts images enhancement algorithm according to bamboo scripts image's characteristics and achieves the following specific functional modules:

### (1) multi-scale Retinex(MSR) algorithm

The Retinex is one kind of image enhancement theory and it established at the scientific experiment and the scientific analysis. Its essence is to 'skinning' the illumination in the original image and to yield the reflectance image, that is, the original appearance of the object. Compares with conventional enhancement methods, the Retinex has shown itself to be a very versatile automatic method and can simultaneously provide sharpening, color constancy, dynamic range compression and color rendition. Based on the theory of Retinex, the multi-scale Retinex algorithm is employed to remove the luminance degradation of the Bamboo script image and enhance the dark area and make the Bamboo script more color rendition.

(2)gain/offset algorithm

Usually after the multi-scale Retinex process,some of the image's Pixels are negative and also will beyond the display's ability,so we need to shift and compress to the display's scope(0-255) .In this paper,the gain/offset algorithm is employed to achieve this aim.

(3) contrast stretching algorithm

Based on the research of hundred of Bamboo scripts,we made the conclusion that the histogram of the Bamboo scripts usually between 20 to 220.And not take full advantage of all of the gray level(0-255), the image looks very dark and not clear.So in this paper the simple contrast stretching algorithm is deployed to improve the output brightness.

The results of experiment show that our algorithm can improve effectively not only the contrast but also can observably enhanced the information of hidden area in the Bamboo script image and provided better tonal rendition. The algorithm can overcome the lack of enhancement of traditional enhancement methods and satisfy the archaeologist's demand.

**Keywords:** Retinex theory multi-scale Retinex Contrast Stretching Bamboo scripts

## 目 录

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 摘 要                             | I   |
| ABSTRACT                        | III |
| 第 1 章 引 言                       | 1   |
| 1.1 选题依据与研究意义                   | 1   |
| 1.2 国内外的发展现状                    | 2   |
| 1.3 论文的主要研究内容与思路                | 4   |
| 第 2 章 图像增强方法概述                  | 6   |
| 2.1 图像增强概述                      | 6   |
| 2.2 线性变换和分段线性变换                 | 8   |
| 2.2.1 线性变换                      | 8   |
| 2.2.2 分段线性变换                    | 8   |
| 2.3 直方图均衡化                      | 9   |
| 2.4 直方图规定化                      | 11  |
| 2.5 图像边缘增强                      | 11  |
| 2.6 同态滤波                        | 13  |
| 2.7 传统图像增强算法分析                  | 14  |
| 第 3 章 RETINEX 理论和多尺度 RETINEX 算法 | 16  |
| 3.1 颜色视觉理论                      | 16  |
| 3.1.1 三色理论                      | 16  |
| 3.1.2 颜色对立机制理论                  | 18  |
| 3.1.3 Retinex 理论                | 18  |
| 3.2 色彩恒常性与 RETINEX 理论           | 19  |
| 3.2.1 色彩恒常性                     | 19  |
| 3.2.2 Retinex 理论                | 20  |
| 3.3 RETINEX 图像增强算法              | 21  |
| 3.3.1 单尺度 Retinex 算法            | 22  |
| 3.3.2 多尺度 Retinex 算法            | 25  |
| 3.4 本章小结                        | 25  |
| 第 4 章 多尺度 RETINEX 算法在简牍图像增强中的应用 | 27  |
| 4.1 概述                          | 27  |

|                    |    |
|--------------------|----|
| 4.1.1 简牍图像的特点      | 27 |
| 4.1.2 简牍图像增强算法流程   | 28 |
| 4.2 RETINEX 处理     | 29 |
| 4.2.1 算法实现         | 29 |
| 4.2.2 实验结果及分析      | 33 |
| 4.3 GAIN/OFFSET 修正 | 35 |
| 4.3.1 作用           | 35 |
| 4.3.2 算法原理         | 35 |
| 4.3.3 实验结果及分析      | 36 |
| 4.4 对比度拉伸          | 37 |
| 4.4.1 作用           | 37 |
| 4.4.2 算法原理         | 37 |
| 4.4.3 实验结果及分析      | 37 |
| 4.5 简牍图像增强结果讨论     | 38 |
| 4.5.1 增强效果评价       | 38 |
| 4.5.2 试验结果分析       | 41 |
| 4.6 本章小结           | 41 |
| 结 论                | 42 |
| 致 谢                | 44 |
| 参考文献               | 45 |

# 第1章 引言

## 1.1 选题依据与研究意义

文物是人类在历史发展过程中遗留下来的遗物、遗迹。各类文物从不同的侧面反映了各个历史时期人类的社会活动、社会关系、意识形态以及利用自然、改造自然和当时生态环境的状况,是人类宝贵的历史文化遗产。文物的保护管理和科学研究,对于人们认识自己的历史和创造力量,揭示人类社会发展的客观规律,认识并促进当代和未来社会的发展,具有重要的意义。这些珍贵文化遗产对传承中华文化、建设社会主义精神文明和物质文明、实现中华民族伟大复兴具有不可替代的作用。文物不仅代表着祖先曾经所创造的灿烂文化,反映着各个历史时期人类的生产、生活和环境状况,具有历史、艺术和科学等多重价值;它又是民族文化的象征,使一个国家及其人民产生强大的凝聚力。保护文物,不仅是维护前代物质历史文化遗产,保持民族文化特性,而且也是新时代先进文化建设的重要内容,意义重大而深远。

简牍是对我国古代遗存下来的写有文字的竹简与木牍的概称,是我国继甲骨卜辞、居延汉简、敦煌文书之后在古文献领域的又一重大发现。由于文字材料令我们能更加直接的了解历史,其可靠程度大大超过文献的记载,所以文字材料的出土是考古发掘中最宝贵的部分,其意义远在其他文物之上。简牍考古研究的目的是为了揭露、记录、发现古代遗留下来的实物资料及古代文献的相关信息。科学准确的记录研究过程、对海量考古数据的科学分析与直观的展示,是对简牍文物科学利用,正确分析古代文献的必要条件。简牍发掘出土之后,风化速度急剧加快,如不及时释读整理,很多字迹就永远无法辨认。因此,既要采取一切必要手段对之进行科学的保护,又要发挥其应有的价值,对之进行整理,并早日公布,以确保让“新发现”促进“新学问”的形成和发展,进而服务于社会文化事业的发展,达到正确分析古代文献资料的目的。目前对简牍的保护通常是先人工地简牍进行剥离、清洗、拍照、脱水、入库,然后再进行编码、整理工作。为了防止在对简牍研究的过程中对简牍本身造成损害,目前普遍的做法是对简牍实物进行拍照,简牍考古工作者利用简牍图像来进行文字的修复、文字的提取等工作。

本文以长沙简牍博物馆所收藏的我国古代秦、汉、三国时期的简牍文物为实物模型,并以该馆所拍摄的简牍实物图像作为研究对象。由于大多数简牍实物长期埋存地下,出土时重叠、粘连,有的腐蚀、朽烂,有的根本难以识别简牍上的文字符号,同时在简牍数字图像获取过程中外界光照的非均匀分布,导致了大多数的简牍图像都存在着对比度低、分辨率低的缺点。简牍图像中暗区中包含了很重要的文字信息,由于这些信息的能见度较低,因而对简牍暗区的增强,提高暗区的可视度对

简牍考古工作者来讲意义十分重大。传统的图像增强方法虽然能够使图像的对比度增强,但通常会丢失图像暗区的细节信息,并且会导致图像颜色的失真。所以需要一种有效的简牍图像增强算法,在提高图像对比度的同时,能有效地消除光照对简牍图像的退化影响从而增强图像暗区的细节信息并且使简牍图像具有较高的色彩保真度。

本论文的选题是基于国家“十五”科技攻关项目--文物保护关键技术(2004BA810B)/高新技术在出土竹木类文物修复复原与保存技术的应用研究课题中对简牍文物保护关键技术研究。本文的主要工作是基于多尺度 Retinex 算法并综合运用多种数字图像处理技术对简牍数字图像进行增强处理,为后续简牍图像分割、简牍图像文字修复以及简牍文字信息的提取打下坚实的基础,同时减少简牍研究人员的工作量,提高工作效率,利于考古专家提取与研究简牍文字信息,对提高简牍考古工作者史料解读工作的准确性和可靠性具有重要的意义。

## 1.2 国内外的发展现状

1964年美国喷气推进实验室(JPL)处理卫星发射回来的月球表面的照片,用计算机进行图像复原,以改善图像的质量,是首次获得实际成功应用的数字图像处理技术。70年代处理地球卫星获取的遥感图片,进行地质资源探测,农作物估产,水文气象监测等推动了图像增强技术的研究和发展。早期的改变图像质量的方法主要的内容就是改善图像的明暗清晰程度,也就是改善图像的对比度。修整给定图像的灰度是一种简单而有效的算法,一个重要的特例就是直方图的修正<sup>[1,2]</sup>。直方图均衡是使用最多的一种灰度变换算法,因为它高效而且易于实现。但是直方图是对整幅图像统计得到的,没有考虑到图像的空间相关性,因此对细节增强效果欠佳。Sherrier等人首先提出了局部直方图均衡算法<sup>[1]</sup>,但此算法存在运算量大的缺点,而且有时会出现调整过度的情况。Kamel等人提出了基于空间相关性的直方图均衡算法,此算法统计的不是灰度的分布特性,而是灰度的相关性,但也出现了为计算灰度的相关性运算量过大的缺点<sup>[2]</sup>。

由于人的视觉系统是图像的最后终端,后来人们想到了可以从人的视觉特性来考虑图像增强算法。Mokrane将人眼感知亮度的非线性关系(对数或幂指数关系)和直方图算法结合起来用于增强图像的对比度<sup>[3]</sup>,Ji利用人眼的对比度敏感函数(CSF—刻画分辨细节能力的函数)来达到增强图像细节的目的<sup>[4]</sup>,Wolf还考虑了人眼的颜色感知特性,将色度空间用于彩色图像增强<sup>[5]</sup>。但是,这类算法受到全局性的限制,即处理前和处理后的像素间的关系必须是一一对应的,阻碍了这类算法的进一步发展。80年代末,多尺度技术,尤其是小波分析技术被应用到图像处理中。Lu首次考虑了人眼的局部适应能力,利用小波分析来增强图像细节<sup>[6]</sup>,Brown对尺度间的

映射函数做了自适应的调整,不过主要是从抑制噪声方面考虑<sup>[7]</sup>。随着神经解剖学和实验心理学对视觉系统研究的深入,考虑人眼的视觉特性正成为图像处理尤其图像增强算法的一个研究方向。一方面人眼是公认的完美的视觉系统,成像设备的不断发展始终无法与人眼的优异特性相媲美;另一方面成像设备与显示系统的发展不平衡,导致新型成像设备获取的高质量图像无法在常规显示设备上正常显示。这两方面都会导致成像系统获得的影像与人类置身于真实场景中的感知存在一定程度的差别。这一问题引起了国内外学者的广泛关注,特别是从20世纪60,70年代开始,考虑人眼视觉特性图像增强技术与视觉特性研究、计算机视觉等结合起来,取得了突出进展。目前,基于视觉特性的图像增强较为成熟的技术要算以颜色恒定性为初衷的Retinex系列算法<sup>[8]</sup>。

Retinex理论根据物理光学中的理论,在正常情况下,抵达视网膜细胞或者其他成像器件像元的颜色信号是场景中某点的表面反射率和环境入射光强度的乘积<sup>[9]</sup><sup>[10]</sup>。Retinex理论通常的做法是将图像 $I$ 分解成两个独立的部分:由场景内物体表面反射率决定的反射率图像 $R$ ,由环境光照决定的照度图像 $L$ 。分离照度图像 $L$ ,就有可能有效地剔除光照的影响,以保持图像的颜色恒定性,同时有利于增强图像细节,特别是恢复由于光照的空间变化(如室内、室外光照差异等)造成的丢失信息。按照“光照计算”步骤中应用的视觉基础不同或者侧重点不同,可以将Retinex系列算法的发展历程分为四个阶段。

第一阶段:以随机路径为基础的明度计算。

1971年,E. H. Land等<sup>[1]</sup>将颜色恒定性以及明度计算简化为工程可操作的计算模型。他们强调<sup>[10,11,12]</sup>,视觉神经系统对色彩的感知主要取决于物体反射率以及周围物体反射率的对比,即使空间照度在发生相当大程度改变的情况下,视觉系统也能做出正确判断。若干年后,A. Hurlbert<sup>[13]</sup>证明了Retinex算法与其他明度算法具有相同的数学假设,归纳为明度计算三假设,即:

(1) 外界景物图像是由不同的色块组成的,在每个颜色通道内每个色块的反射率具有单一值,即景物Mondrian化(荷兰画家Mondrian以抽象几何图案风格的绘画著称)。

(2) 照度在整个视场空间域内变化缓慢而且平滑,并且在视场内任何一点都独立于观察者的位置。

(3) 视场中图像在每个颜色通道内的平均反射率相等,即“灰度世界”假设。

第二阶段:中心-环绕模型的应用。

用随机路径计算明度,原理简单,但如何选取合理的路径成为一个困扰。随后,E. H. Land与其他研究者合作<sup>[10,11,12]</sup>,将神经生理学的中心-环绕受域的概念引入到明度计算,提出了中心-环绕Retinex(Center-Surround Retinex,简称CSR)<sup>[14]</sup>,以常规窗

口卷积代替随机路径的简化,符合人类视觉系统的受域特性。此后,以 Retinex 为基础的算法研究及其改进得到了普遍重视。

A. Moore<sup>[15]</sup>等利用超大规模集成电路,根据中心-环绕 Retinex 原理,采用硬件实现了一个颜色恒定性系统,利用阻尼网络在超大规模集成电路中实现了 Retinex 算法,并且针对违反“灰度世界”假设的图像,设计了一种“Edginess”算子来克服 Retinex 的缺陷,以恢复由此导致的颜色失真。

Brian Fund<sup>[16]</sup>等对 Retinex 早期算法进行了系统研究,并加以拓展,如基于泊松方程的改进算法、基于多分辨金字塔的非线性滤波方法等。文献[16]较全面地分析了 Retinex 有关参数(尤其是迭代次数、空间距离等)的影响。

第三阶段:多尺度中心-环绕模型的提出。

D. J. Jobson<sup>[17]</sup>等在 1997 年将中心-环绕 Retinex 应用于图像增强中,通过对比仿真,发现高斯函数适合模拟人眼的低通滤波特性,提出了单尺度中心-环绕 Retinex 又称 SSR(Single-Scale Retinex),在较小的尺度下,单尺度 Retinex 能够实现高动态范围压缩,而在较大的尺度下能实现色调再现,但两者无法兼得。于是 Zia-ur Rahman 等进一步将 Retinex 做多尺度扩展(Muti-scale Retinex,即 MSR)。

与其它增强方法相比, Retinex 算法具有非常明显的图像增强效果。它具有锐化、颜色恒常、颜色高保真等特性,而很多其它的图像增强算法通常只具有其中的一种或几种特性,不是全部。但是,这种方法的运算量比较大,需要在实际应用中进一步优化和完善。目前很多国外的从事图像研究的科学家正致力于这一块的研究,在国内,对这一领域的研究还是非常少的。

### 1.3 论文的主要研究内容与思路

本文以长沙简牍博物馆所收藏的我国古代秦、汉、三国时期的简牍文物为实物模型,并以该馆所拍摄的简牍实物图像作为研究对象。根据简牍数字图像的特点,研究出一套对简牍数字图像增强切实有效的图像增强算法。本文的简牍图像增强算法主要以多尺度 Retinex 算法为主,综合运用多种图像处理技术来实现:采用多尺度 Retinex 算法来消除光照对简牍图像的退化影响,以达到增强图像暗区细节信息的目的;由于多尺度 Retinex 算法的输出图像的像素值会出现负值,超出显示器的显示范围,因此需要采用 gain/offset 方法进行修正;同时针对 MSR 输出图像偏暗,提出了直方图拉伸算法。本文的研究内容主要包括:

#### 1、传统图像增强算法研究

本文首先对传统的图像增强算法进行了深入讨论,如空间域中的直方图均衡化,线性变换,图像锐化等,然后介绍了频率域中的同态滤波方法,最后还介绍了传统图像增强算法的一些优缺点。提出这些传统的图像增强算法大多算法简单,运

算速度快,但是它们往往只能针对某一类特定的图像或者针对图像的某一种特征进行增强,例如,直方图均衡方法在原始图像的直方图是单峰的情况下,能够取得较好的增强效果,但是当图像的直方图是双峰时,增强的结果就无法令人满意。当图像中的亮度有较大差异时,同态滤波方法往往会产生较多的假象。而且传统的方法往往需要通过人机交互的方式调整参数才能获得较好的增强效果,因而在实际应用中,传统图像增强算法具有一定的局限性。现实中所获取的简牍图像的对比度很低,并且大部分的简牍图像都存在暗区,使用常规的图像增强方法往往无法分辨图像中的较暗区域内的图像细节信息。

## 2、颜色视觉理论以及 Retinex 理论研究

在介绍分析了传统图像增强算法的局限性之后,本文深入介绍了颜色视觉理论。而颜色视觉理论的研究成果直接为我们后面介绍彩色图像处理提供了理论依据。在此基础上,本文引入了用于彩色图像增强 Retinex 理论以及相应的算法。作为简牍图像增强的核心算法,本文重点介绍了单尺度 Retinex 算法以及多尺度 Retinex 算法。

## 3、gain/offset 修正算法研究

通常利用多尺度 Retinex 算法处理后的图像像素值会出现负值,而且会超出显示器的显示范围的情况,这就需要将其平移和压缩到显示器显示的范围,可利用 gain/offset 方法对图像像素进行修正,从而使图像的灰度值映射到显示器显示的灰度范围 0-255。

## 4、对比度拉伸算法研究

简牍图像直方图的特点是具有双峰、灰度级一般处于 20-220 范围内,并没有充分的利用 0-250 的灰度级,因此图像整体上比较暗,对比度不高,因此可以考虑采用对比度拉伸算法对简牍图像作进一步的处理,以改善图像的对比度,从而可以获得更佳视觉效果的简牍图像。

综上所述,本文简牍图像增强处理所采用的技术思路可以用图 1-1 来表示:

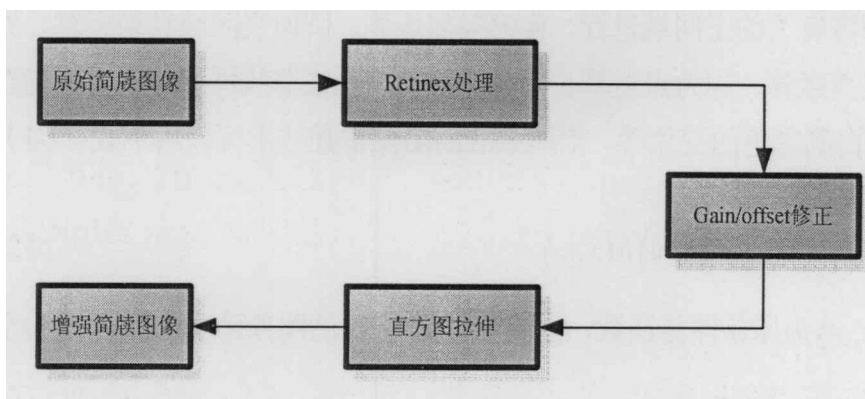


图 1-1 简牍图像增强处理思路

## 第2章 图像增强方法概述

图像增强技术的目的是提高图像质量。本章详细介绍了传统图像增强技术的分类以及特点,重点分析了线性变换和分段线性变换、图像边缘增强、直方图均衡化、直方图规定化和同态滤波等方法,分析各种方法的优缺点,最后引出基于人类视觉特性的 Retinex 理论。

### 2.1 图像增强概述

图像增强技术是指按特定的需要突出一幅图像中的某些信息,同时削弱或去除其他无关信息的处理方法,其主要目的是为了某种应用目的而去改善图像的质量<sup>[18]</sup>。图像增强不会增加数据信息量,而是增加所选择特征的动态范围,从而使这些特征检测或识别、或是其他分析处理更加容易进行,所以改善后的图像不一定要去逼近原始图像。也就是说,图像增强有可能对图像特征的动态范围进行压缩或拉伸、对边缘信息进行锐化以及提高图像对比度等处理,从而改善图像视觉等效果。从图像质量评价观点看,图像增强技术的主要目的是使处理后的图像对某种特定的应用来说,比原始图像更加适用,因此这种处理方法是为了某种应用目的去改善图像视觉效果、提高图像的清晰度等,从而使处理后的结果更适合人的视觉特性或计算机的识别系统。

图像增强目前还缺乏统一的理论,这与没有衡量图像增强质量通用的、客观的标准有关<sup>[19]</sup>。增强的方法往往具有针对性,增强的结果只是靠人的主观感觉加以评价。因此,图像增强方法只能有选择地使用。

图像增强方法从增强的作用域出发,可分为空间域处理和频域处理两种<sup>[19]</sup>。空间域(spatial domain)处理是在原图像上直接进行数据运算。它又分为两类,一类是在与像素点邻域有关的空间域进行,称为局部运算,例如空间域卷积运算。另一类是对图像做逐点运算,称为点运算。处理可以是线性或非线性的,例如用指数、对数、比值、黑白到彩色的变化等。空间域法的图像增强技术可以用下式(2-1)和图2-1来描述:

$$g(x,y) = f(x,y)h(x,y) \quad (2-1)$$

其中  $f(x,y)$  为原始图像函数,  $g(x,y)$  为增强后的图像函数,  $h(x,y)$  为空间增强函数。

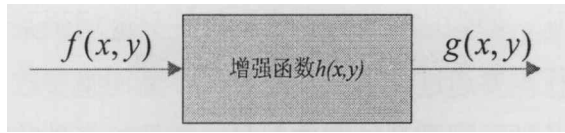


图 2-1 图像增强空域处理模型

频域(frequency domain)处理主要是通过某种变换(如傅立叶变换、余弦变换、小波变换等), 将图像变换到频域, 对图像的变化系数值进行运算, 即作某种修正, 然后通过逆变换得到增强后的图像。它主要包括低通和高通滤波, 低通滤波用来消除噪声, 高通滤波用来提升边缘、轮廓。频域法的图像增强技术可以用下式(2-2)和图 2-2 来描述:

$$\left. \begin{aligned} F(u, v) &= \phi[f(x, y)] \\ G(u, v) &= F(u, v)H(u, v) \\ g(x, y) &= \phi^{-1}[G(u, v)] \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

其中  $F(u, v)$ 、 $G(u, v)$  分别是增强处理前后图像  $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$  的频域正变换,

$H(u, v)$  为频域增强函数。

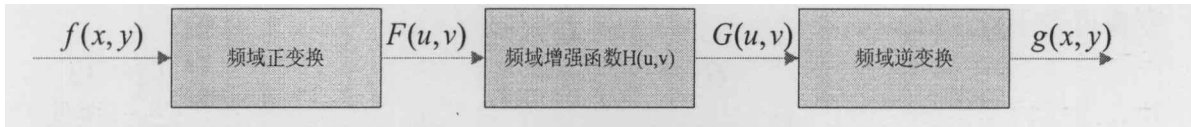


图 2-2 图像增强频域处理模型

传统图像增强所包含的主要内容如图 2-3 所示:

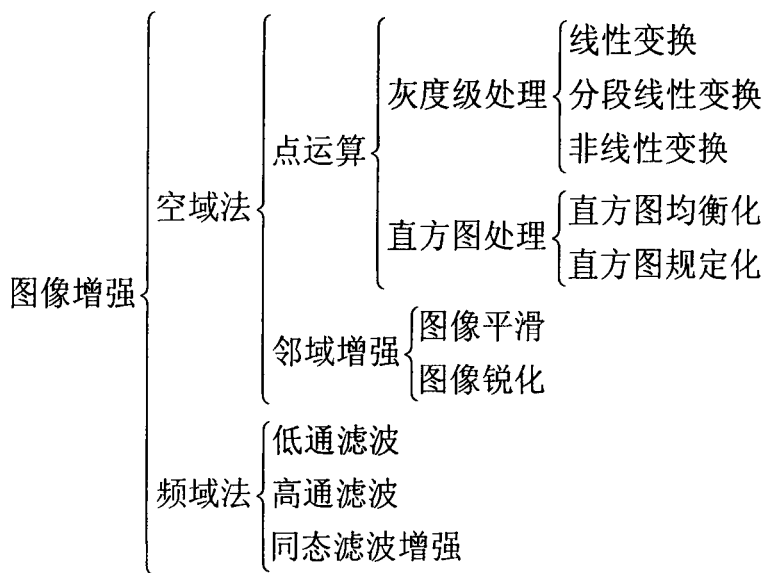


图 2-3 图像增强的主要内容

本章所谓传统增强算法是指那些在增强处理中一般需要人机交互, 并且往往需要将多种增强技术综合应用才能获得较好增强效果的算法。如线性、非线性变换,

图像平滑去噪, 图像锐化, 增强边缘等等。它们往往只能增强某一类图像或者图像的某一些特征, 并且往往需要通过人机交互的方式不断调整参数才能获得较好的增强效果。相对于可以对各种不同类型的图像并且对图像的多种特征进行综合增强的自适应增强算法, 这里将图像研究早期发展起来的针对特定图像进行增强的算法称为传统图像增强算法。传统图像增强算法虽然功能相对单一, 但由于算法简单, 在实际中仍得到了较多的应用。其许多技术原理仍是现代图像增强技术的技术基础, 所以本章中, 我们依次分析几种图像增强的基本方法, 最后是传统图像增强算法的比较分析。

## 2.2 线性变换和分段线性变换

### 2.2.1 线性变换

通俗地讲, 线性变换即比例变换, 即因变量和自变量之间存在固定的比例系数, 该系数为常数。如果原图像用  $g$  表示, 经过变换后的图像为  $G$ , 则对图像进行线性变换可表示为:

$$G = T(g) = a \cdot g + b \quad (2-3)$$

当  $a > 1$  时输出图像的对比度增大; 当  $a < 1$  时输出图像对比度降低; 当  $a = 1, b \neq 0$  时, 仅使输出图像的灰度值上移或下移, 其效果是使整个图像更亮或更暗。如果  $a$  为负值, 暗区域将变亮, 亮区域将变暗, 这时的点运算相当于图像求补。一般情况下, 线性变换都是将某个较小的灰度范围拉伸到较大的灰度范围, 因此常称为灰度拉伸。

在曝光不足或过度的情况下, 图像灰度可能会局限在一个很小的范围内。这时在显示器上看到的将是一个模糊不清、似乎没有灰度层次的图像。采用线性变换对图像的每一个像素灰度作线性拉伸, 将有效地改善图像视觉效果。

### 2.2.2 分段线性变换

分段线性变换是将图像灰度区间分成两段乃至多段作线性变换, 在感兴趣的区间, 斜率大于 1, 突出有价值信息; 在不感兴趣区间, 斜率小于 1, 抑制无用信息, 如图 2-4 所示。常用的三段线性变换, 对应的数学表达式为:

$$s = \begin{cases} s_1 r / r_1 & 0 \leq r < r_1 \\ (s_2 - s_1)(r - r_1) / (r_2 - r_1) + s_1 & r_1 \leq r < r_2 \\ (255 - s_2)(r - r_2) / (r_3 - r_2) + s_2 & r_2 < r \leq r_3 \end{cases} \quad (2-4)$$

图 2-4 中对灰度区间 $[r_1, r_2]$ 进行了线性拉伸,而灰度区间 $[0, r_1]$ 和 $[r_2, r_3]$ 被压缩。通过细心调整折线拐点的位置及控制分段直线的斜率,可根据实际的需要对任一灰度区间进行拉伸或压缩。

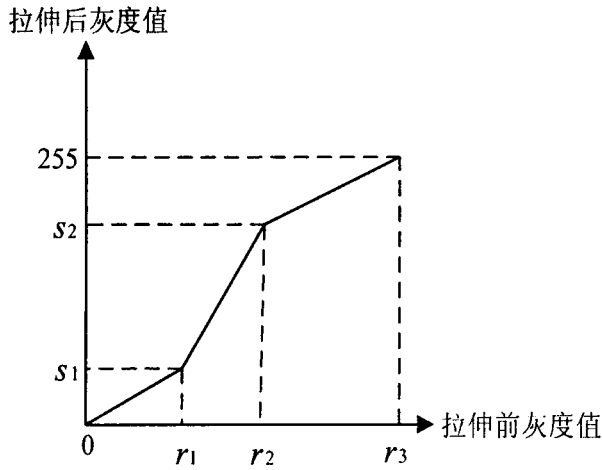


图 2-4 三段式线性变换示意图

由于简牍图像的有用信息(文字信息)通常都处于直方图区间 30-100 之间,因此我们采用压缩 $[0, 30]$ 和 $[100, 255]$ 的信息,而对 $[30, 100]$ 进行线性拉伸,即选取 $r_1 = 30$ ,  $r_2 = 100$ , 至于 $s_1$ 和 $s_2$ , 在这里我们选取 $s_1 = 6$ ,  $s_2 = 239$ 。变换结果如图所示:

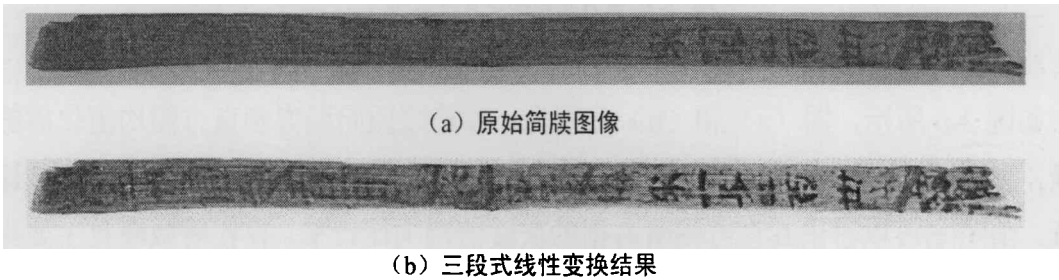


图 2-5 三段式线性变换算法示例

### 2.3 直方图均衡化

直方图均衡化(Histogram Equalization)被广泛应用于图像增强处理中,它是以累积分布函数变换为基础的直方图修正法,可以产生一幅灰度级分布具有均匀概率密度的图像。直方图是高低不齐的,因为像素灰度是随机变化的。直方图均衡化处理的“中心思想”是把原始图像的灰度直方图从比较集中的某个灰度区间变成在全部灰度范围内的均匀分布。该方法对图像进行非线性拉伸,重新分配图像像素值,使

在一定灰度范围内的像素数量大致相同。直方图均衡化就是把给定图像的直方图分布改变成“均匀”分布直方图分布。

直方图均衡化方法用于图像增强的原理在于：占有较多像素的灰度在变换后和前一个灰度级的级差增大。一般来讲，背景和目标占有较多的像素，这种技术实际上加大了目标与背景的对比度。与此同时，占有较少像素的灰度在变换后和前一个灰度的级差较小，需要归并。一般来讲，边界与背景的过渡处像素较少，由于归并，其或者变为背景点或者变为目标点，从而使边界变的陡峭。

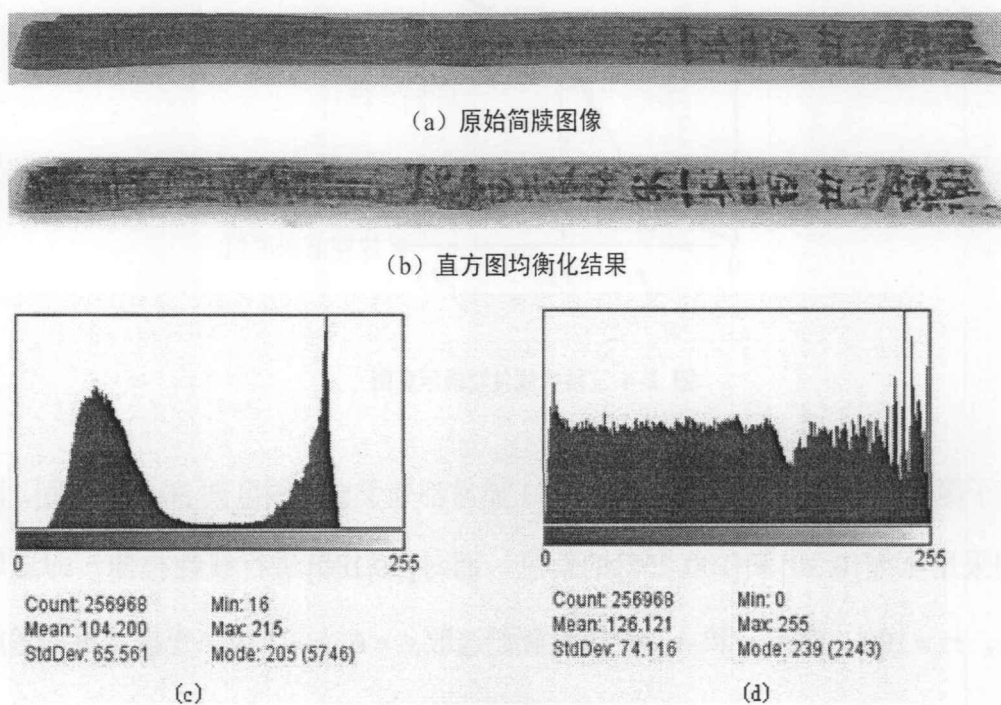


图 2-6 直方图均衡化算法示例

如图 2-6 所示，图 (a) 和 (b) 分别为一幅简牍原始图像和直方图均衡化后的图像，图(c)和 (d)分别为(a)和 (d)对应的直方图。原始简牍图像比较暗，对比度比较低，由图(c)可以看出其直方图所占据的灰度值范围比较窄，存在着双峰且主要集中在灰度值 40-200 附近。由图(d)可以看出其均衡化后的直方图占据了整个图像灰度值所允许的范围，且呈现参差不齐的外形。由于直方图均衡化增加了图像的灰度动态范围，也就增加了图像的对比度，这些反应在图像上就是图像有较大的反差，很多细节部分都比原始图像更清晰了。

但是，直方图均衡化增强技术也存在一些缺点，最大的一个缺点是会丢失图像的细节信息。由于将频数较少的灰度进行归并，可能损失一些较重要的图像细节，另外，处理后的图像显得较为粗犷，视觉效果得不到良好的保证，特别是对那些直方图有高峰的图像，经处理后，图像会出现不自然的过分增强。

## 2.4 直方图规定化

直方图规定化是使原图像灰度直方图变成规定形状的直方图而对图像作修正的增强方法，也称为直方图匹配（Histogram Matching）。

在实际应用中，希望能够有目的地增强某个灰度区间的图像，即能够人为地修正直方图的形状，使之与期望的形状相匹配，这就是直方图规定化的基本思想。换句话说，希望可以人为地改变直方图形状，使之成为某个特定的形状，直方图规定化就是针对上述要求提出来的一种增强技术，它可以按照预先设定的某个形状来调整图像的直方图。直方图规定化是在运用均衡化原理的基础上，通过建立原始图像和期望图像之间的关系，选择地控制直方图，使原始图像的直方图变成规定的形状，从而弥补了直方图均衡不具备交互作用的特性。

直方图规定化算法实现的步骤如下：

- (1) 对原始图像的直方图进行均衡化处理

$$S = T(r) \quad (2-5)$$

- (2) 对规定的直方图进行均衡化处理

$$V = G(z) \quad (2-1)$$

- (3) 由于都是均衡化处理，因此，令  $S = V$ ，则  $z = G^{-1}(V) = G^{-1}[T(r)]$ 。

## 2.5 图像边缘增强

图像在传输和变换过程中会受到各种干扰而退化，典型的表现就是图像模糊。在图像的判读或识别中常需要突出边缘和轮廓信息。图像锐化的目的就是增强图像的边缘或轮廓。图像平滑通过积分过程使得图像边缘模糊，那么图像锐化则是通过微分而使图像边缘突出、清晰，其基本方法是对图像进行微商处理，并且将运算结果与原图像叠加图像。锐化一般有两种方法，一种是微分法，另外一种是高通滤波法。下面，简单介绍一下常用的微分锐化方法：拉普拉斯（Laplacian）增强算子。

拉普拉斯算子是一个刻画图像灰度变化的二阶微商算子，它定义为：

$$\Delta^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \quad (2-2)$$

对离散的数字图像而言，二阶偏导数用二阶差分近似，由此可推导 Laplacian 算子表达式为：

$$\Delta^2 f(x, y) = f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4f(x, y) \quad (2-3)$$

Laplacian 增强算子为:

$$\begin{aligned}
 g(x, y) &= f(x, y) - \Delta^2 f(x, y) \\
 &= 5f(x, y) - [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)]
 \end{aligned}
 \tag{2-4}$$

Laplacian 增强算子具有如下的特点:

- 1、由于灰度均匀的区域或斜坡中间  $\Delta^2 f(x, y)$  为 0，Laplacian 增强算子不起作用;
- 2、在斜坡底或低灰度侧形成“下冲”;而在斜坡顶或高灰度侧形成“上冲”，说明 Laplacian 增强算子具有突出边缘的特点，其对应得模板如图 2-7 所示:

|    |    |    |
|----|----|----|
| -1 | -1 | -1 |
| -1 | 10 | -1 |
| -1 | -1 | -1 |

图 2-7 Laplacian 算法 3\*3 模板

容易看出拉普拉斯模板的作法：先将自身与周围的 8 个像素相减，表示自身与周围像素的差别；再将这个差别加上自身作为新像素的灰度。可见，如果一片暗区出现了一个亮点，那么锐化处理的结果是这个亮点变得更亮，增加了图像的噪声。因为图像中的边缘就是那些灰度发生跳变的区域，所以锐化模板在边缘检测中很有用，利用 Laplacian 增强算子对原始简牍图像进行增强处理结果如图 2-8 所示:

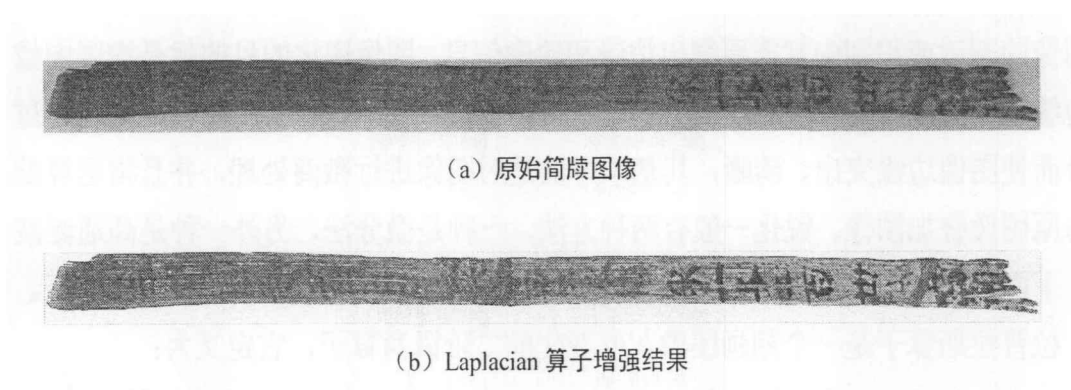


图 2-8 图像边缘增强示例

## 2.6 同态滤波

在现实生活中会得到这样的图像，它的动态范围很宽，而我们感兴趣的部分的灰度又很暗，图像细节几乎没有办法辨认，采用一般的灰度线性变换法是不行的。这时我们需要采用同态滤波。同态滤波增强是把频率过虑和灰度变换结合起来的一种处理方法。它是把图像的照明反射模型作为频域处理的基础，利用压缩灰度范围和增强对比度来改善图像的一种处理技术。它在密度域中运用相当成功。

一幅图像  $f(x, y)$  可以看成由两个分量组合而成，即

$$f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (2-5)$$

$i(x, y)$  为照明分量（入射分量），是入射到景物上的光强度； $r(x, y)$  为反射分量，是受到景物反射的光强度。

算法实现的具体步骤如下：

(1) 先对上式的两边同时取对数，即

$$\ln f(x, y) = \ln i(x, y) + \ln r(x, y) \quad (2-6)$$

(2) 将上式两边取傅立叶变换，得

$$F(u, v) = I(u, v) + R(u, v) \quad (2-7)$$

(3) 用一个频域函数  $H(u, v)$  处理  $F(u, v)$ ，可得到

$$H(u, v)F(u, v) = H(u, v)I(u, v) + H(u, v)R(u, v) \quad (2-8)$$

(4) 逆傅立叶变换到空间域得

$$hff(x, y) = h_i(x, y) + h_r(x, y) \quad (2-9)$$

可见增强后得图像是由对应照度分量与反射分量得两部分叠加而成。

(5) 再将上式两边取指数，得

$$g(x, y) = \exp | hff(x, y) | = \exp | h_i(x, y) | + \exp | h_r(x, y) | \quad (2-10)$$

这里， $H(u, v)$  称作同态滤波函数，它可以分别作用于照度分量和反射分量上。

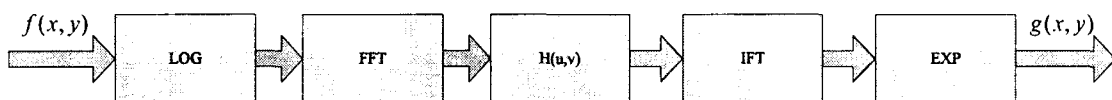


图 2-9 同态滤波算法流程图

一幅图像得照明分量通常用慢变化来表征,而反射分量则倾向于急剧变换。所以图像取数后得傅立叶变换的低频部分主要对应照度分量,而高频部分主要对应反射分量。适当选择滤波器函数将会对傅立叶变换中的低频部分和高频部分产生不同的响应。处理结果使像元灰度的动态范围或图像对比度得到增强。

由于同态滤波在加强图像的高频分量的同时对低频增强效果一般,表现在图像上就是对比度不高,因此我们采用直方图均衡化来提高同态滤波后的图像的对比度,以利于人眼的辨别。

## 2.7 传统图像增强算法分析

正如上文所述,传统的图像增强算法,虽然算法比较简单,但却阐明了图像增强最基本的原理,在整个数字图像技术和图像增强理论发展中,它们也可以称之为最经典的算法。但是由于图像本身的复杂性和不确定性,特别是随着现代图像应用的增多,传统的图像增强算法也显示出很多局限性,如需要人机交互来经验地调节参数以获得良好的增强效果。

具体来说,对空域法中的灰度变换(如分段线性变换),变换函数需要根据增强图像的不同而不同,变换函数一经确定,就只能处理某一类或者某一些图像,而对有些类型的图像,如何找到合适的变换函数也是一个极大的难点;另一方面,由于各种图像的直方图的特点不完全相同,因此如果想得到比较好的增强效果,必须采用人机交互的方式多次地对分段参数进行调节,因此图像处理的效率较低,且不利于批量处理。直方图均衡虽然不需要通过人机交互的方式不断修正调节参数,但是由于直方图变换是建立在对灰度级信息全局的统计分析基础之上,因此,直方图在增强图像全局对比度的同时,也往往引起细节和局部信息的丢失;传统的图像锐化算法虽然可以增强边缘细节,往往会引起噪声。这些局限性都严重限制了传统图像增强算法在实际中的应用效果和应用价值。

频域法中的同态滤波虽在思想和方法上比较新颖,传统的同态滤波用傅立叶变换的低频部分和亮度图像相联系,用傅立叶变换的高频部分和反射部分相联系,但实际中又很难找到一种对各种图像都适宜的低通和高通滤波器,因此,建立在傅立叶变换基础上的同态滤波也往往不能够获得良好的增强效果。另外经典的同态滤波算法是在频率域上进行的,需要先利用傅立叶变换将图像变换到频率域,然后再用适当的滤波函数对低频部分和高频部分施加不同的影响,最后再做傅立叶反变换回来。但是频率域算法有几个缺点:①要对整幅图像处理完后才能见到结果;②计算傅立叶变换要扩展到复数域,占用存储空间较大;③进行傅立叶变换和傅立叶反变换花费的时间比较多,对主机的性能要求较高。

综上所述,我们可以得出如下的结论:传统的图像增强方法虽然能够使图像的对比度增强,在一定程度上能够满足一些需求,但由于传统图像增强算法本身的缺陷,如会丢失图像暗区的细节信息、需要人机交互经验地调节图像增强的参数、运算量大等,而且通常会导致图像颜色的失真。因此,本文根据人眼的视觉特性,在空间域提出了简牍图像的基于 Retinex 模型的多尺度 Retinex(MSR)算法对简牍图像进行增强处理,目的在于克服上述的种种缺陷,从而达到既能有效地实现简牍图像对比度的增强,同时又使简牍图像具有较高的色彩保真度,并能有效地提高图像暗区内细节的可视度的目的。

## 第3章 Retinex 理论和多尺度 Retinex 算法

本章首先介绍了颜色视觉的三个主要理论体系，接着分析用于解释色彩恒常知觉的 Retinex 理论，详细讨论了 Retinex 计算理论及其算法，最后重点介绍了用于彩色图像增强的单尺度 Retinex 算法以及多尺度 Retinex 算法。

### 3.1 颜色视觉理论

颜色视觉理论 (Theory of Color Vision) 是基于人眼视觉系统对色彩辨识机制所发展出来的，其目的在于希望借此理论来解释或协助研究人员了解并掌握人眼视觉与色彩产生的现象及关系。一般来说，人类视觉系统分辨颜色的能力远高于动物。例如，猫难以区分绿色和红色，虽然这两者之间波长相差高达 150 纳米。而相比之下人可轻易地区分波长为 590 纳米和 595 纳米的两种颜色，这可能是由于人具有高度的智能。也正是由于这样高度的智能才使人类能以艺术的眼光欣赏丰富多彩的色彩。动物之中只有从生物进化角度来说最接近于人类的短尾猴具有与人类相近的颜色视觉。因此对短尾猴颜色视觉的研究有特殊的重要性。但令人感兴趣的是短尾猴眼睛中锥体细胞的视色素与人眼锥体细胞不同。众所周知在人类视觉系统中存在着两种感光细胞：杆体细胞和锥体细胞。前者是暗视器官，后者是明视器官，锥体细胞在照度足够高时起作用，并能分辨颜色。

已知人眼中存在着三种锥体细胞。颜色视觉的三色理论认为在视网膜中存在着三个独立的颜色处理通道，并且这些通道是由于不同锥体细胞中不同类型的视色素所造成的。三色理论能说明为什么三种颜色可以起原色的作用，它还说明某种颜色不只是由某几个固定波长的光组合而成，而且它也可以由其他波长的光组合而成。三色理论最初是由 Young 在 1802 年提出的，后由 Helmholtz 在 1862 年作了进一步发展，并且得到实验结果的支持。1872 年 Hering 又提出了颜色的对立机制理论。这个理论似乎与三色理论相矛盾。他认为在视网膜的层次中存在着以颜色差异为基础的处理机制。这种模型也得到了许多证据的支持。近年来的研究证明上述这两种颜色视觉处理模型都是可行的，但它们各自在不同的颜色信息处理层次上起作用。

#### 3.1.1 三色理论

1802 年 Young 提出了红 (R)、绿 (G)、蓝 (B) 三种原色以不同比例混合可以产生白色和其他各种颜色的假设。这个假设为以后的颜色混合实验所证实。在此基础上，1862 年 Helmholtz 提出了一个颜色视觉的生理学理论。他假设在人眼中存在着三种接收器，分别对不同波长的色光敏感或吸收不同波长的色光。后来发现这些

假设的接收器和视网膜的锥体细胞的作用相类似。所以近代的三色理论认为，三种接收器实际上是视网膜的三种锥体细胞。每一种锥体细胞包含一种色素，三种锥体细胞色素的光吸收特性不同，所以在光照射下它们吸收和反射不同的光波。Helmholtz 还假设了每种锥体细胞色素的敏感特性曲线，由此算出具有任何一种能量分布的色光所引起的三种锥体细胞色素输出信号大小。Helmholtz 发展和量化了 Young 的三原色理论。

假设一种物体反射的色光能量分布是  $S(\lambda)$ ，三种锥体细胞色素敏感曲线是  $R(\lambda)$ ， $G(\lambda)$ ， $B(\lambda)$ ，如图 3-1 所示：

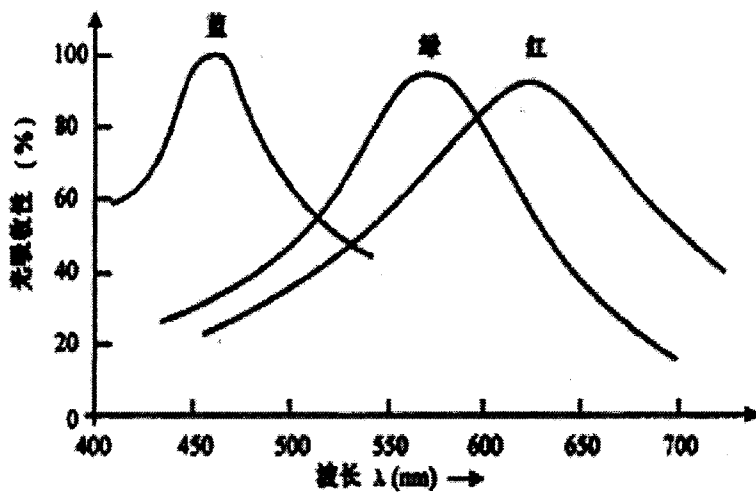


图 3-1 人类感光细胞敏感曲线

那么三种锥体细胞色素输出信号大小就是：

$$\begin{cases} Y_R = \int_0^{+\infty} S(\lambda)R(\lambda)d\lambda \\ Y_G = \int_0^{+\infty} S(\lambda)G(\lambda)d\lambda \\ Y_B = \int_0^{+\infty} S(\lambda)B(\lambda)d\lambda \end{cases} \quad (3-1)$$

对于图 3-1 中，第一种锥体细胞而言，色光  $S(\lambda)$  和  $R(\lambda)$  越重合，且  $S(\lambda)$  越大，则输出  $Y_R$  越大，即产生红色感觉。其它两种锥体细胞机理类似。这种模型可以解释不少颜色现象，但还有许多颜色现象仅用三色理论模型难以解释。如蓝色锥体细胞对波长大于 600 纳米的光波不是很敏感的。所以，可认为在此波长以上的刺激将产生带绿的红色感觉。但实际上，我们看到的是黄红色或橙色。还有，在 580 纳米波长处，红、绿两种锥体细胞的光谱吸收曲线相交，这意味着这两者的反应相同，而实际上人在这时看到的是黄色。此外，上述三色模型不考虑白和黑。这些现象意味

着在锥体细胞以后还有一层信号处理，把经过三通道变换后的信号再变换成新的空间。这个新空间的特征似乎应该用 Hering 提出的颜色对立机制理论来说明。

### 3.1.2 颜色对立机制理论

早在 1864 年, Hering 就根据心理物理学的实验结果提出了颜色的对立机制理论, 又称为四色理论。他的理论是根据以下的观察: 有些颜色看起来是单纯的, 不是其它颜色的混合体, 而另外一些颜色则看起来是由其它颜色混合得来的。一般人都会认为橙色是红和黄的混合色, 紫色是红和蓝的混合色。而红、绿、蓝、黄则看起来是纯色, 它们彼此不相似, 也不象是其它颜色的混合色。因此, Hering 认为存在红、绿、蓝、黄四种原色。Hering 理论的另一个根据是我们找不到一种看起来是偏绿的红或偏黄的蓝, 而只有偏黄的红, 即橙色以及绿蓝色。红和绿, 以及黄和蓝色的混合得不出其它颜色, 只能得到灰色或白色。这就是说, 绿刺激可以抵消红刺激的作用; 黄刺激可以抵消蓝刺激的作用。于是, Hering 假设在视网膜中有三对视素, 白-黑视素、红-绿视素和黄-蓝视素, 这三对视素的代谢作用给出四种颜色感觉和黑白感觉。每对视素的代谢作用包括分解和合成两种对立过程, 光的刺激使白-黑视素分解, 产生神经冲动, 引起白色感觉; 无光刺激时, 白-黑视素便重新合成引起黑色感觉。白灰色的物体对所有波长的光都产生分解反应。对红-绿视素来说, 红光作用时, 使红-绿视素分解引起红色感觉; 绿光作用时, 使红-绿视素合成产生绿色感觉。对黄-蓝视素来说, 黄光刺激使它分解而产生黄色感觉; 蓝光刺激使它合成于是引起蓝色感觉。因为各种颜色都有一定的明度, 即含有白色的成份, 所以每一种颜色不仅影响其本身视素的活动, 而且也影响白、黑视素的活动。

根据 Hering 学说, 三种视素的对立过程的组合产生各种颜色混合现象。当补色混合时, 某一对视素的两种对立过程形成平衡, 因而不产生与该视素有关的颜色感觉。但所有颜色都有白色成份, 所以引起白-黑视素的分解, 从而产生白色或灰色感觉。同样情况, 当所有颜色同时都作用到各种视素, 红-绿、黄-蓝视素的对立过程都达到平衡, 而只有白-黑视素活动, 这就引起白色或灰色感觉。Hering 的学说很好的解释了色盲、颜色负后象等现象。色盲是缺乏一对视素(红-绿、或黄-蓝)或两对视素的结果。Hering 学说的最大困难是对三原色能产生光谱上一切颜色这一现象没有给予说明。

### 3.1.3 Retinex 理论

到目前为止, 我们所讨论的颜色视觉理论都是将颜色当作一种点状特性来研究, 也就是不考虑周围区域颜色特性的影响。这种点理论并不能解释颜色的时间和空间的适应性。对这些性质的本质目前还理解很少。例如, 区域周围的颜色如何影

响我们对该区颜色的感知?虽然已经提出了不少见解,但至今还没有普遍接受的理论。在已提出的理论中,最著名的是 Land 的视网膜皮层理论(Retinex 理论)。Land 理论的依据是他所进行的一些实验。这些实验的结果表明,颜色的感觉在某种程度上与刺激光谱的波长无关。十九世纪时, Helmholtz 已经发现颜色的感知与光照无关。为了解释这点, Land 提出,经过视网膜三种锥体细胞处理后的信息进一步在三个独立通道中进行处理,这些通道的作用就是消除光照影响,以使得所感知的颜色纯粹是依据物体表面的性质。他把这些独立通道称为视网膜皮层系统。每一个视网膜系统都对视野中的各种颜色独立起反应。一种主要对光谱长波光起反应,第二种主要对光谱中波光起反应,第三种主要对短波光起反应。这样在中枢神经系统就建立了三种独立的景物图像。这三种视网膜皮层记录的不是颜色图像,而是明度各不相同的黑白图像。Land 认为,这三种视网膜皮层图像的不同明度的相互比较决定了颜色知觉,通过实验 Land 还进一步发现视觉系统仅需要两个通道就可以感知图像中的颜色。关于视网膜皮层理论的进一步讨论以及其相应的图像增强算法在以下部分讨论。

## 3.2 色彩恒常性与 Retinex 理论

### 3.2.1 色彩恒常性

色彩恒常性是人类的视觉认知功能之一,它使人们能够忽略环境光照的光谱成分变化而获得对物体颜色的稳定知觉。计算机视觉的色彩恒常性可以定义为在未知环境光照和单视野的条件下,计算机视觉系统自动的得到图像中物体颜色的稳定描述。

色彩恒常性的研究包括心理学、神经生理学等各个领域。早期对色彩恒常性的研究主要集中于探讨在不同的光照条件下,色彩恒常性的保持程度。研究者经常采用颜色匹配方法,通过计算具有特定意义的数学系数来表示颜色恒常程度。随着色彩恒常性研究的进展,逐步形成了色彩恒常性的理论。该理论认为,色彩恒常性是由于颜色场的存在形成相对颜色梯度的结果。Helmholtz 指出,色彩恒常性是人排除照明光线的变化,作出颜色判断的结果。赫氏的理论最早对照明条件和物理颜色作出区分,对随后的颜色理论(如视觉计算理论)产生了重要影响。Hering 试图以人的记忆过程来解释色彩恒常性现象。他在强调颜色知觉过程中周边变量(如视网膜的适应性等)的影响的同时,也强调了经验在颜色知觉中的作用,提出了“颜色记忆”的概念。Von Kries 通过对颜色适应现象的研究提出了系数理论,该理论认为视网膜上的三种视锥细胞的光感受性随光刺激强度不同发生线性变化。三类视锥细胞因具有不同的光谱选择性,感受性变化系数也各不相同。系数理论强调了视觉感

受性的变化对色彩恒常知觉的作用，在色彩恒常性理论中占有重要的地位。但它仍然不能对某些颜色知觉现象作出圆满的解释。

二十世纪七十年代，随着计算机技术的发展，研究者提出了用于解释色彩恒常知觉的计算理论。该类理论认为，色彩恒常知觉是人们在知觉物体颜色的过程中，抽取物体表面反射光线中不变因数的过程。Land 提出的视网膜皮层理论是最具影响力的计算理论。该理论认为，色彩恒常知觉不受照明环境变化的影响，只与视觉系统对物体的反射性质的知觉有关。

### 3.2.2 Retinex 理论

美国物理学家 Edwin Land 在 20 世纪 50 年代发现有些现象是传统的色彩理论无法解释的，经过近 20 多年的科学实验和分析，Land 发现在视觉信息的传导过程中人类的视觉系统对这些信息进行了某种处理，只保留了反映物体本质特征的信息，如反射系数等，而去除了光源强度和照射不均匀等一系列不确定因素。当这些描述物体本质特征的相关信息传递到大脑皮层后，经过更加复杂的信息处理，才最终形成了人的视觉。基于上述认识，1977 年 Edwin Land 首次提出了一种被称为 Retinex 的色彩理论。Retinex 本身是一个合成词，它是由视网膜 Retina 和大脑皮层 Cortex 这两个词组合构成的，故 Retinex 理论又被称为视网膜大脑皮层理论。

从物理光学中可以知道，在正常情况下，抵达视网膜细胞或者其他成像器件像元的颜色信号是场景中某点的表面反射率和环境入射光强度的乘积，如图 3-2 所示，分别是入射光和反射物体，可以由式(3-1)表示：

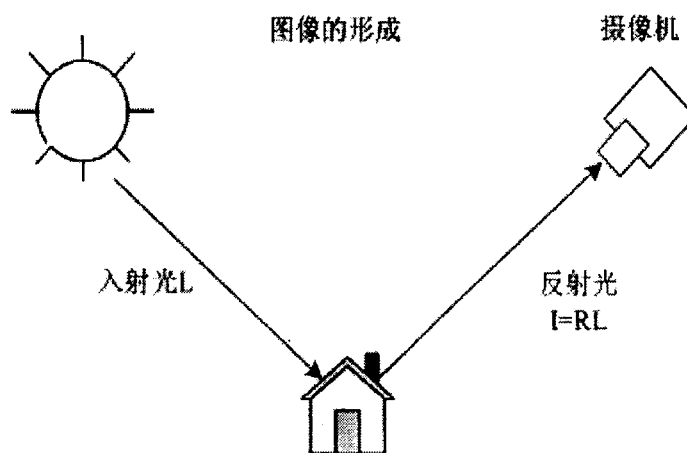


图 3-2 图像的形成示意图

$$I(x, y) = R(x, y)L(x, y) \quad (3-2)$$

式中  $R(x, y)$  为某颜色通道的像素  $(x, y)$  处的表面反射率,  $L(x, y)$  为相应像素位置的入射光强度,  $I(x, y)$  为图像像素值。事实上, 入射光  $L$  直接决定了一副图像中像素能达到的动态范围, 反射物体  $R$  决定了图像的内在性质。Retinex 理论的目的就是为了从图像  $I$  中获得物体的反射性质  $R$ , 即抛开入射光的性质来获得物体的本来面貌。

Retinex 理论通常的做法是将图像  $I$  分解成两个独立的部分: 由场景内物体表面反射率决定的反射率图像  $R$ , 由环境光照决定的照度图像  $L$ 。分离照度图像  $L$ , 就有可能有效地剔除光照的影响, 以保持图像的颜色恒定性, 同时有利于增强图像细节, 特别是恢复由于光照的空间变化(如室内、室外光照差异等)造成的丢失信息。大多数 Retinex 算法的首要步骤, 都是将图像像素转化到对数域。

将式 3-2 变换到对数域中进行处理, 即  $i = \log I$ ,  $r = \log R$ ,  $l = \log L$ 。对式 (3-2) 两边取对数可以得到:

$$i = \log I = \log(R.L) = \log R + \log L = r + l \quad (3-3)$$

从数学角度来说, 这种取对数处理的好处在于可以将复杂的乘法运算转化为简单的加法计算, 同时, 从生理学角度来看, 对数形式更接近人类视觉系统和摄像机对光线的感知能力。

直接获得物体的反射部分是不太现实的, 因此可以先估计出入射光部分  $l$ ,  $i$  是已知的, 然后通过加减关系获得反射部分  $r$ 。Retinex 的算法流程如图 3-3 所示, 首先对输入图像中的像素值取对数, 接着通过相应算法得到入射光估计, 然后减去这个估计值得到反射图像, 最后通过相对应的指数函数得到输出。

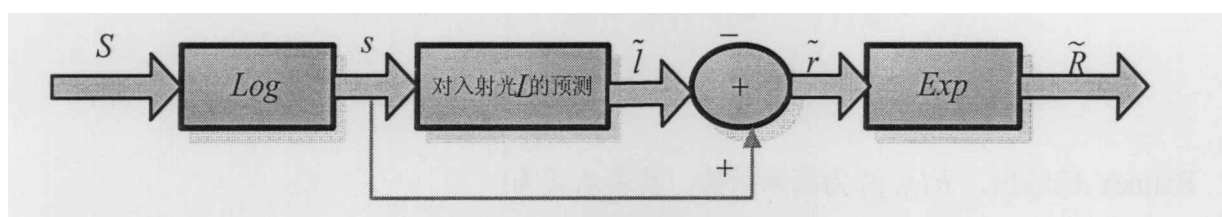


图 3-3 Retinex 算法示意图

### 3.3 Retinex 图像增强算法

通过图像采集器等设备获得的所有彩色图像(数字或模拟图像)与直接观察真实的场景之间存在着严重的差异。人类的感知能力可以对场景进行动态压缩以及保持色彩一致性, 它可以在很大的频谱范围和光照的变化来估计场景的细节信息。相比

之下图像采集器在将场景记录到动态范围有限的媒体之前并没有这个估计的过程。即使是对于具有很宽的动态范围的图像设备，被记录下来的图像和观察到的场景仍然存在着差异。这是因为人类的感知能力对图像的动态压缩能力要比对真实场景的动态压缩能力要弱得多。

用 Retinex 理论进行图像增强的关键是从原图像中有效的计算出亮度图像，但是从原图像计算亮度图像在数学上是一个奇异问题，因此，只能通过数学上近似估计的方式估算亮度图像。在 Retinex 理论发展的过程中，根据估计亮度图像方法的不同，先后出现了许多种基于 Retinex 理论的图像增强方法，McCann、Marini 等都从不同角度提出了对应的 Retinex 算法，而且 Retinex 理论的创始人 Land 本人就提出过几个版本，其最近的一个版本就是从神经生理学出发提出的中心/环绕 Retinex 算法，本文将以此为基础分别介绍单尺度 Retinex 以及多尺度 Retinex 算法，在下一章中本文将将其应用于彩色简牍图像增强。

### 3.3.1 单尺度 Retinex 算法

Land 首次提出了 Retinex 是为了解释人类视觉感知光照和颜色的一种模型。显然，它比仅仅是一种模型，而是可以发展成为一种图像增强算法。Land 本身对 Retinex 算法的发展就做了巨大的贡献，从最终的随机步行算法到最新的中心/环绕 Retinex 方法。中心/环绕 Retinex 方法，较以前的算法运算速度显著提高，而且物理意义更加清楚。这种算法与人类视网膜和大脑皮层神经元的神经生理学函数相关，其形式类似于自然科学中常用来模拟单个神经元感受野的高斯差分函数。近年来，Jobson 等人提出了一种称为单尺度 Retinex 算法 (single-scale Retinex, SSR)，这是中心/环绕 Retinex 的一种的实现方式。该算法可用式 (3-4) 描述:

$$R_i(x, y) = \log I_i(x, y) - \log [F(x, y) * I_i(x, y)] \quad (3-4)$$

其中  $I_i(x, y)$  表示输入图像中的第  $i$  个颜色通道， $*$  表示卷积运算， $R_i(x, y)$  表示 Retinex 的输出， $F(x, y)$  为高斯函数，其表达式为:

$$F(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right) \quad (r = x^2 + y^2) \quad (3-5)$$

式 (3-5) 中  $\sigma$  是关联的概率分布的标准差，是高斯滤波器的唯一参数。不同的  $\sigma$  是由不同大小的高斯滤波器掩模形成的，下面我们详细讨论高斯分布的标准差  $\sigma$  与高斯滤波器邻域  $r$  之间的关系。

#### (1) $\sigma$ 与 $r$ 的关系

设连续型随机变量  $X$  的概率密度为:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < X < +\infty \quad (3-6)$$

则称  $x$  服从正态分布, 记号  $x \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。其中  $\mu$ 、 $\sigma$  是两个不确定常数, 是正态分布的参数, 不同的  $\mu$ 、不同的  $\sigma$  对应不同的正态分布。  $f(x)$  的图形如下所示, 它具有如下的性质:

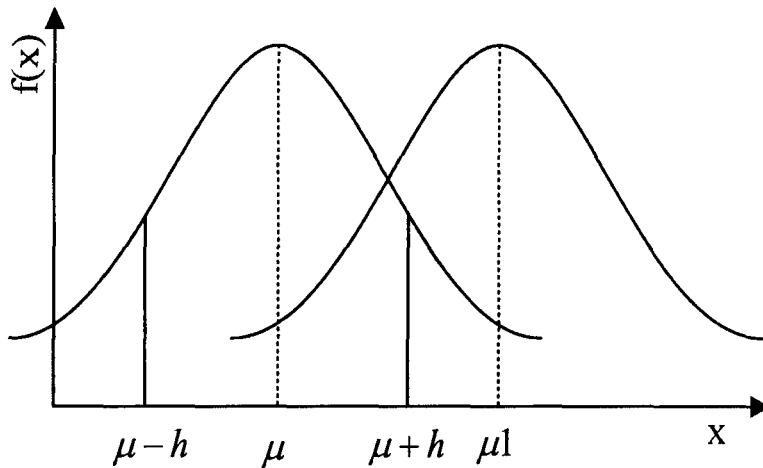
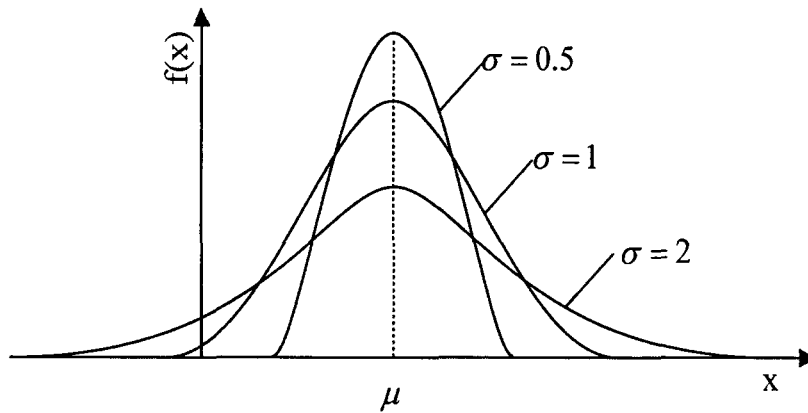


图 3-4 高斯分布

1、 $\mu$  是正态分布的位置参数, 描述正态分布的集中趋势位置。正态分布以  $x = \mu$  为对称轴, 左右完全对称, 此时取到最大值:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (3-7)$$

2、 $\sigma$  描述正态分布资料数据分布的离散程度, 如果固定  $\mu$ , 改变  $\sigma$  的值,  $\sigma$  越大, 数据分布越分散,  $\sigma$  越小, 数据分布越集中。 $\sigma$  也称为是正态分布的形状参数,  $\sigma$  越大, 曲线越扁平, 反之,  $\sigma$  越小, 曲线越瘦高。

图 3-5  $\sigma$  取不同值时的高斯分布

正态曲线下，横轴区间  $\mu \pm \sigma$  内的面积为 68.27%，横轴区间  $\mu \pm 1.64\sigma$  内的面积为 90.00%，横轴区间  $\mu \pm 1.96\sigma$  内的面积为 95.00%，横轴区间  $\mu \pm 2.58\sigma$  内的面积为 99.00%，因此，对于正态随机变量来说，它的值落在区间  $[\mu \pm 3\sigma]$  内几乎是肯定的事，这就是所谓的“3 $\sigma$  规则”。

由高斯函数的性质我们可以发现，在高斯滤波器中，离高斯模板中心点越近的像素点其权重越大，离模板中心点越远的像素点其权重越小。遵循“3 $\sigma$  规则”，我们认为在高斯模板中，与邻域中心点的距离超过 3 $\sigma$  的像素点，由于其权重非常小 (0.0013) 可以忽略不计。

### (2) 参数 $\sigma$ 的取值对 SRS 的影响

由于  $\sigma$  是高斯滤波器的唯一参数，因而它也是 SRS 的一个关键参数，称为尺度参数，它直接决定着 SRS 的性能。当高斯模板半径  $r$  越小，即  $\sigma$  越小时，SRS 的动态压缩能力越强，图像中阴暗部分的细节就越能得到较好的增强，但是输出图像的颜色失真比较严重；反之，当高斯模板半径  $r$  越大，即  $\sigma$  越大时，输出图像的颜色保真度越好，但是动态压缩能力也同时减弱。所以，对于单尺度 Retinex 算法，需要选一个折衷的参数  $\sigma$ ，以期得到一个比较理想的结果。

### (3) SSR 算法的特点

单尺度 Retinex 以高斯函数作为环绕函数，并且将高斯平滑后的点放在对数域中进行处理。标准偏差  $\sigma$  的选择会直接影响图像增强的效果，它控制着图像中有多少细节信息被保留，当选取较小的标准偏差，能够完成动态范围的压缩，图像的细节部分增强效果比较好，但图像的颜色失真非常明显。当选取较大的标准偏差时，增强后图像的色感一致性较好，但是局部细节部分增强效果较差。通常都是在动态范围压缩和色感一致性之间寻找平衡点实验表明取值在 50 到 100 个之间通常被看作

是一种折衷的方案.但是由于该方法只是单尺度的,因此如果想在图像的动态范围压缩及图像的色感一致性要好这两方面都取得良好的效果,必须对单尺度进行改进,而采用多尺度 Retinex 算法,它具备了 SSR 高、中、低三个尺度的特点。

### 3.3.2 多尺度 Retinex 算法

多尺度 Retinex(Mutiscale Retinex,即 MSR)是对 SSR 的概括,它之所以优于 SSR 在于它能够同时提供动态范围压缩又可保证图像的色感一致性好的图像增强方法。该算法用下式来表示:

$$R_i(x,y) = \sum_{n=1}^N \omega_n \{ \log I_i(x,y) - \log [F_n(x,y) * I_i(x,y)] \} \quad i=1, \dots, K \quad (3-8)$$

其中,  $(x,y)$  表示像素点在图像中的坐标,  $*$  表示卷积运算。下标  $i$  表示第  $i$  个颜色通道,  $K$  表示颜色通道的个数,  $K=1$  时代表灰度图像,  $K=3$  代表彩色图像,  $i \in R, G, B$ ;  $I_i(x,y)$  表示输入图像中的第  $i$  个颜色通道,  $R_i(x,y)$  表示多尺度 Retinex 输出,  $F_n(x,y)$  为高斯函数(环境函数),  $\omega_n$  表示和  $F_n(x,y)$  相关的权重系数,  $N$  表示高斯环绕函数的个数或环绕尺度的个数, 其中环境函数  $F_n(x,y)$  选取不同的标准偏差  $\sigma_n$ , 用来控制环境函数范围的尺度。当  $n=1$  时, 多尺度 Retinex(MSR)特例化为单尺度 Retinex(SSR), 此时权重  $\omega_1=1$ 。

实验表明对于大多数图像而言, 选取大、中、小三个尺度(选用 15、80 和 250), 并且每个尺度的权重可以相同(通常), 也可以根据需求是侧重动态范围压缩, 还是侧重色感一致性来选取。

## 3.4 本章小结

色彩恒常性是一种重要的人眼感知特性。Retinex 理论能很好地解释色彩恒常性的颜色视觉理论, 长期受到关注。本章首先讨论颜色视觉理论和作为彩色图像增强的 Retinex 理论, 讨论了 Retinex 理论的通用实现方式。然后引入了单尺度 Retinex 算法, 根据高斯邻域的大小依次介绍了高、中、低三种尺度的优劣性, 在较小尺度下单尺度 Retinex 相当于高通滤波, 但丢失了大量色彩信息; 大尺度下单尺度 Retinex 在损失动态范围的基础上, 能有效地保持色彩信息。由于单尺度 Retinex 无法在动态范围压缩和颜色高保真之间获得平衡, 因而又引入了多尺度 Retinex 算法。多尺度 Retinex 能够同时提供动态范围压缩和颜色高保真, 并且它也解决了中、

低尺度 Retinex 增强后光晕化的缺点。与其它图像增强方法相比, Retinex 算法具有锐化、颜色恒常性、动态范围压缩大、色彩保真度高等特点。Retinex 算法是将视觉特性运用到彩色图像增强领域的突出代表,它成功地揭示了人类颜色视觉系统的许多基本属性,理论简单明了,在工程实际中得到了成功的应用,成为当前彩色图像增强和影像再现技术中影响力最大的理论。

## 第4章 多尺度 Retinex 算法在简牍图像增强中的应用

本章综合运用多尺度 Retinex 算法、gain/offset 方法以及对比度拉伸算法对简牍图像进行了增强处理,目的在于提高简牍图像对比度的同时,能显著地增强图像暗区的细节信息并且使简牍图像具有较好较高的色彩保真度,使简牍图像上的文字信息更加清晰,以利于简牍考古工作者分析提取简牍上的文字信息。

### 4.1 概述

正如前文所述,由于大多数简牍实物长期埋存地下,出土时重叠、粘连,有的腐蚀、朽烂,有的根本难以识别简牍上的文字符号,同时在简牍数字图像获取过程中外界光照的非均匀分布,导致了大多数的简牍图像都存在着对比度差、分辨率低的缺点。根据对长沙简牍博物馆提供的简牍数字图像的统计分析,我们发现大多数的简牍图像都存在着暗区,这些暗区中通常都包含着很重要的文字信息,因此对简牍考古工作者来说,如何有效的增强暗区细节信息就先得特别的有意义。

传统的图像增强方法虽然能够使图像的对比度增强,但通常会丢失图像暗区的细节信息,并且会导致图像颜色的失真。综上所述,迫切需要一种有效的简牍图像增强算法,在能够提高图像对比度的同时,能有效地增强图像暗区的细节信息并且使简牍图像具有较高的色彩保真度。

#### 4.1.1 简牍图像的特点

图 4-1 是一张典型的简牍图像(图 a)以及相应的直方图(图 b),从图中视觉观察我们可以得出以下的几点结论:

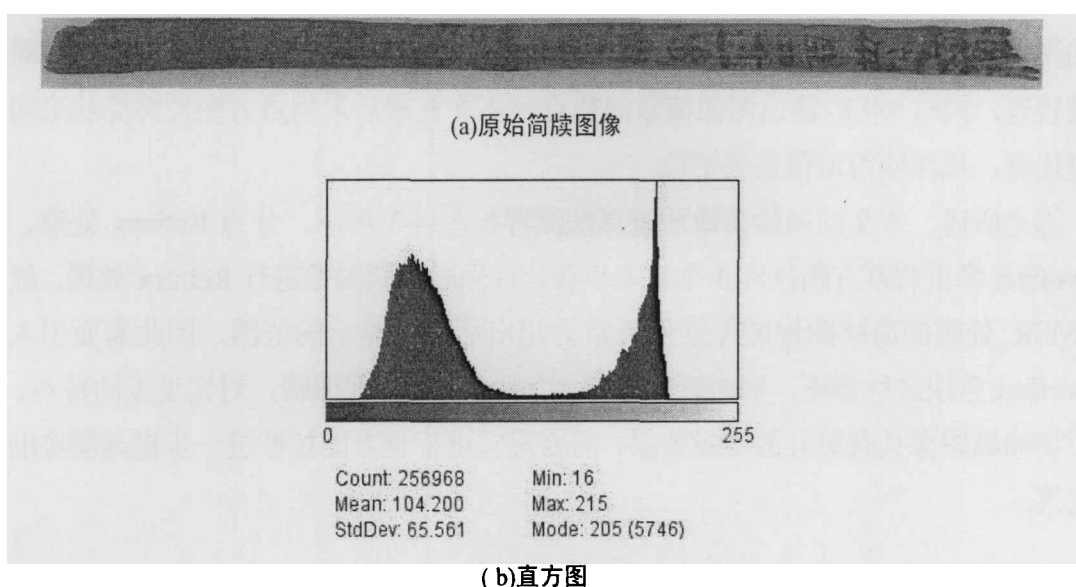


图 4-1 典型原始简牍图像及相应的直方图分布

(1) 原始简牍图像对比度差、分辨率低,表现在图像上面就是整个简牍图像比较模糊,不清晰,难以辨认简牍图像上面的文字信息。

(2) 原始简牍图像中(左边区域)存在着暗区,从图中我们根本无法辨认该区域中的文字信息。

(3) 从原始简牍的直方图中我们可以看出,该直方图具有双峰,并且包含了文字信息的一峰(左峰)占据了较大的区间,因此无法用传统的空域滤波法来实现背景和文字信息的分离。

(4) 从原始简牍的直方图中我们可以看出,通常简牍图像的直方图的灰度值处于 20 至 220 的区间,没有完全利用 0 至 255,这也正是图像对比度差的原因所在。因此可以考虑采用对比度拉伸算法来达到简牍图像高对比度的目的。

综上所述,为了获得视觉效果较佳的简牍图像,需要对简牍图像进行增强处理。一方面需要提高简牍图像的对比度,使图像在视觉上显得更清晰,另一方面更为重要且意义重大的是需要增强图像暗区的细节信息,并且使简牍图像具有较高的色彩保真度。

#### 4.1.2 简牍图像增强算法流程

根据简牍图像自身的特点,单一的方法无法得到较好的增强效果,因此本文综合运用多种图像处理技术来实现简牍图像增强处理。如前文所述,与传统图像增强方法相比,Retinex 算法具有锐化、颜色恒常性、动态范围压缩大、色彩保真度高特点,多尺度 Retinex 算法更可以同时提供动态范围压缩,对图像的暗区细节部分增强效果比较好又可保证图像具有较高的色彩保真度的优点。因此本文的简牍图像增强算法主要是基于多尺度 Retinex 算法。通常利用多尺度(MSR)方法处理后的图像像素值会出现负值,而且会超出示器的显示范围的情况,这就需要将其平移和压缩到显示器显示的范围,可利用 gain/offset 方法对图像像素进行修正再把修正后的图像的灰度值映射到显示器显示的灰度范围(0-255)。另外考虑到简牍图像的对比度较差,同时 MSR 输出图像偏暗的特点,本文在最后采用直方图拉伸算法来增强对比度,从而使得增强效果更佳。

综上所述,本文的简牍图像增强算法流程如图 4-3 所示,分为 Retinex 处理、gain/offset 修正和直方图拉伸 3 个基本步骤,首先对简牍图像进行 Retinex 处理,经过 MSR 处理的简牍图像的像素值通常会超出显示器显示的范围,因此需要引入 gain/offset 方法进行修正,同时针对 MSR 处理的简牍图像偏暗,对比度差的特点,为了使简牍图像具有更好的视觉效果,需要对它进行直方图拉伸进一步提高图像的对比度。

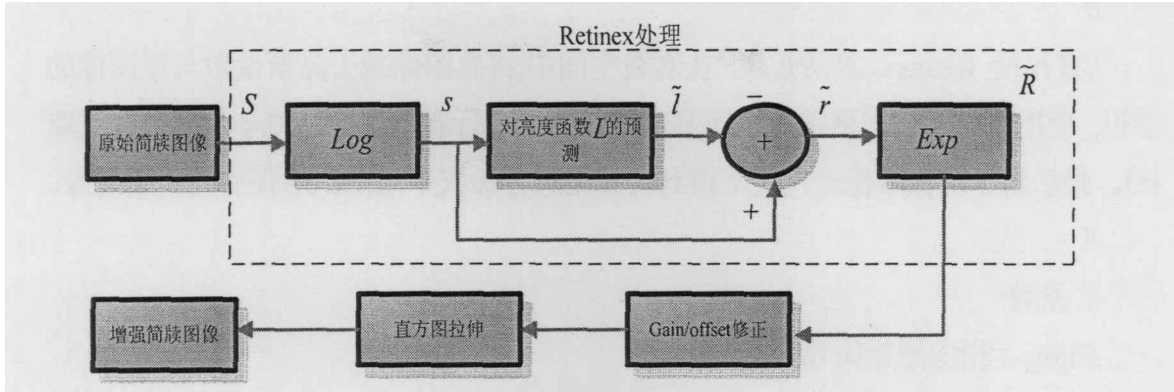


图 4-2 简牍图像增强算法流程

## 4.2 Retinex 处理

在简牍图像处理平台中，我们利用多尺度 Retinex 算法模型来处理简牍图像，环境函数  $L(x, y)$  相当于照射到简牍上的入射光；反射函数  $R(x, y)$  表征简牍表面对入射光吸收系数的变化。亮度函数  $L(x, y)$  主要决定简牍图像的动态范围，其变化极其缓慢。而反射函数  $R(x, y)$  代表了简牍各个部分的细节，主要决定了图像的局部对比度，其变化非常的迅速。因此可以利用多尺度 Retinex 模型对简牍图像进行增强处理。

### 4.2.1 算法实现

本文利用多尺度 Retinex 算法模型来处理简牍图像，在对数空间中,将原图像减去高斯函数与原图像的卷积,其物理本质是除去了原图像中的平滑的部分,突出了原图像中的快速变化的部分,而且高斯函数越尖锐,越是突出图像中的细节,高斯函数越平坦,图像色调保持得越好。为了达到既增强简牍图像暗区细节信息的同时又使其具有较好的色感一致性的目的，使用 3 种不同尺度的高斯函数对简牍图像进行卷积操作，每个尺度的权重取 1/3，最后将 3 种标准偏差尺度下得到的结果进行加权平均得到增强后的简牍图像。

根据上述的算法思想，本文的多尺度 Retinex(MSR)算法核心代码由函数 `MultiScaleRetinex()` 来实现：

```
//
// 函数名称 MultiScaleRetinex
//
// 函数描述:
```

```

//
//多尺度 Retinex 算法实现. 在对数空间中,将原图像减去高斯函数与原图像的
卷积, 使用 3 种不同尺度的高斯函数对简牍图像进行卷积操作, 每个尺度的权重取
1/3, 最后将 3 种标准偏差尺度下得到的结果进行加权平均得到增强后的简牍图像。
//
// 参数:
// img – 指向原始简牍图像的指针
// scales– 尺度数目
// weights– 指向表示尺度权重 double 数组的指针
// sigmas– 指向表示尺度标准偏差 double 数组的指针
//
void MultiScaleRetinex(IplImage *img, int scales, double *weights, double
*sigmas)
{
    int i;
    double weight;
    IplImage *A, *fA, *fB, *fC;
    // 初始化简牍图像, 用于保存中间结果
    fA = cvCreateImage(cvSize(img->width, img->height), IPL_DEPTH_32F,
img->nChannels);
    fB = cvCreateImage(cvSize(img->width, img->height), IPL_DEPTH_32F,
img->nChannels);
    fC = cvCreateImage(cvSize(img->width, img->height), IPL_DEPTH_32F,
img->nChannels);
    // 将原始简牍图像转换到对数空间, 结果存放在指针 fB 中
    cvConvert( img, fA );
    cvLog( fA, fB );
    // 根据给出的权重数组来实现归一化, weights[1]+ weights[2]+
weights[3]+...=1
    for (i = 0, weight = 0; i < scales; i++)
        weight += weights[i];
    if (weight != 1.0) cvScale( fB, fB, weight );
    // 为每一个尺度实现高斯滤波, 并将结果变换到对数空间, 最终结果保存
    在指针 fC 中
    for (i = 0; i < scales; i++) {

```

```

A = cvCloneImage( img );
FastFilter( A, sigmas[i] );
cvConvert( A, fA );
cvLog( fA, fC );
cvReleaseImage( &A );
//将原图像减去高斯函数与原图像的卷积
cvScale( fC, fC, weights[i] );
cvSub( fB, fC, fB );
}
// 释放临时变量的内存
cvReleaseImage( &fA );
cvReleaseImage( &fB );
cvReleaseImage( &fC );
}

```

从以上的代码中我们可以看出,利用多尺度 Retinex(MSR)算法对简牍图像进行增强处理可分为以下四个步骤:

(1) 将原始简牍图像  $S(x, y)$  通过对数变换到对数空间,得到  $LogS(x, y)$ 。

(2) 在三种标准偏差  $\sigma$  尺度下,使用三种不同的高斯函数对图像进行卷积操作。这个步骤可以分解为2个子步骤,首先是在不同的  $\sigma$  下计算相应的高斯核,相应的实现代码如下所示,函数参数  $\sigma$  代表标准偏差  $\sigma$  :

```

double*
CreateKernel(double sigma)
{
    int i, x, filter_size;
    double* filter;
    double sum;
    if ( sigma > 200 ) sigma = 200;
    filter_size = (int)floor(sigma*6) / 2;
    filter_size = filter_size * 2 + 1;
    filter = new double[filter_size];
    sum = 0;
    for ( i = 0; i < filter_size; i++ ) {
        x = i - (filter_size / 2);
        filter[i] = exp( -(x*x) / (2*sigma*sigma) );
        sum += filter[i];
    }
}

```

```

    }
    for (i = 0, x; i < filter_size; i++)
        filter[i] /= sum;
    return filter;
}

```

通过以上函数得到相应高斯核以后，接下来要做的是对简牍图像进行卷积操作，相应的代码如下所示，函数参数 `img` 是指向原始简牍图像的指针，`sigma` 代表标准偏差  $\sigma$ ：

```

FilterGaussian(IplImage* img, double sigma)
{
    int i, j, k, source, filter_size;
    int* kernel;
    IplImage* temp;
    int v1, v2, v3;
    if ( sigma > 200 ) sigma = 200;
    filter_size = (int)floor(sigma*6) / 2;
    filter_size = filter_size * 2 + 1;
    kernel = CreateFastKernel(sigma);
    temp = cvCreateImage(cvSize(img->width, img->height), img->depth,
img->nChannels);
    //x 方向卷积
    for (j = 0; j < temp->height; j++)
        for (i = 0; i < temp->width; i++) {
            v1 = v2 = v3 = 0;
            for (k = 0; k < filter_size; k++) {
                source = i + filter_size / 2 - k;
                if (source < 0) source *= -1;
                if (source > img->width - 1) source = 2*(img->width - 1) - source;
                v1 += kernel[k] * (unsigned char)pc(img, source, j, 0);
                if (img->nChannels == 1) continue;
                v2 += kernel[k] * (unsigned char)pc(img, source, j, 1);
                v3 += kernel[k] * (unsigned char)pc(img, source, j, 2);
            }
            pc(temp, i, j, 0) = (char)int2smallint(v1);
            if (img->nChannels == 1) continue;

```

```

    pc(temp, i, j, 1) = (char)int2smallint(v2);
    pc(temp, i, j, 2) = (char)int2smallint(v3);
}
//y 方向卷积
for (j = 0; j < img->height; j++)
for (i = 0; i < img->width; i++) {
    v1 = v2 = v3 = 0;
    for (k = 0; k < filter_size; k++) {
        source = j + filter_size / 2 - k;
        if (source < 0) source *= -1;
        if (source > temp->height - 1) source = 2*(temp->height - 1) - source;
        v1 += kernel[k] * (unsigned char)pc(temp, i, source, 0);
        if (img->nChannels == 1) continue;
        v2 += kernel[k] * (unsigned char)pc(temp, i, source, 1);
        v3 += kernel[k] * (unsigned char)pc(temp, i, source, 2);
    }
    pc(img, i, j, 0) = (char)int2smallint(v1);
    if (img->nChannels == 1) continue;
    pc(img, i, j, 1) = (char)int2smallint(v2);
    pc(img, i, j, 2) = (char)int2smallint(v3);
}
cvReleaseImage( &temp );
delete kernel;
}

```

(3) 在对数域中，用原图像减去低通滤波后的图像，便可得到高频增强的图像。

(4) 分别取高、中、低 3 个尺度，每个尺度的权重取 1/3 进行计算，求和。

$$R = R_1 + R_2 + R_3;$$

## 4.2.2 实验结果及分析

选取典型简牍图像分别用高、中、低 3 个尺度，每个尺度的权重取 1/3 进行计算。下面是一张原始简牍图像以及分别取 5,20,240 和 150,200,240 的 MSR 输出结果图像。

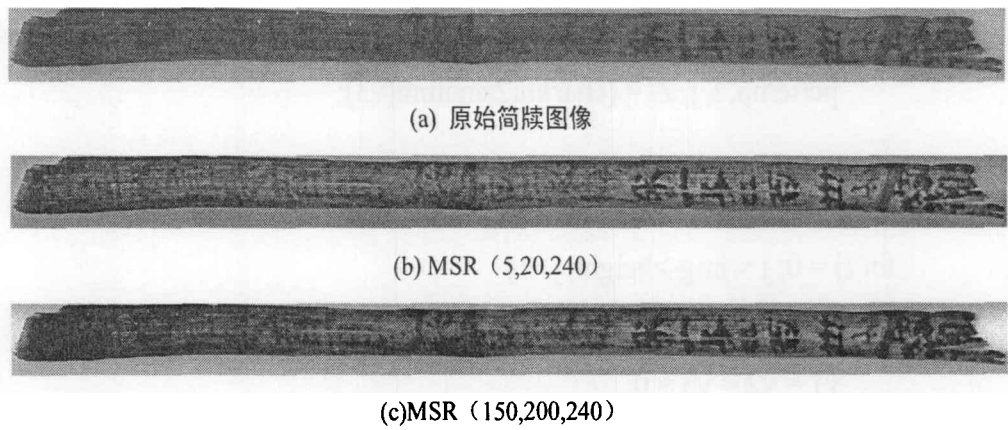


图 4-3 原始简牍图像以及取不同尺度的 MSR 结果

从图 4-3 中可以看出，图 (a) 是原始简牍图像，图像整体质量较低，图像对比度不高，左边暗区内信息不可分辨，整体上感觉比较模糊。图 (b) 和图 (c) 分别是采用高、中、低 (5,20,240) 和 (150,200,240) 三个尺度 MSR 结果。从这两张简牍图像可以看出，利用 MSR 图像增强算法能够得到满意的增强结果，图像对比度得到显著提高，并具有一定的锐化效果，由于该算法对原始图像的亮度要求不高，因此能够有效地增强图像中暗区的信息。

仔细观察图 (b) 和图 (c) 可以发现，前者较后者的细节信息的可视度更好一点；但反过来后者较前者的色感更佳，这主要是因为图 (b) 选用了较小的尺度，更侧重于细节信息的锐化性，而图 (c) 则选用了较大的尺度，因此色感性较好，但图像暗区中细节信息可视度较差。

我们再来观察图 4-3 (b) 中的简牍图像的直方图分布如图 4-4 所示：

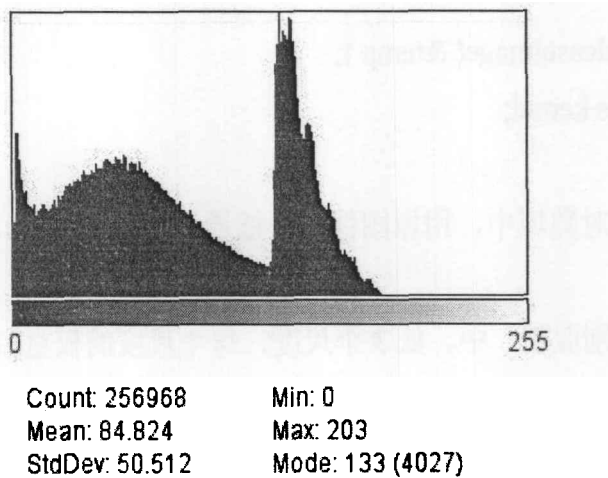


图 4-4 MSR 结果图像直方图

从图 4-3 中，我们可以发现经过 MSR 处理后的简牍图像整体偏暗，对比度不高（表现在直方图上就是灰度分布比较窄，如图 4-4 所示）；另外，从图 4-4 中的 MSR 结果图像直方图中我们也可以看出，通常利用多尺度(MSR)方法处理后的图像像素值会出现负值，而且会超出显示器的显示范围的情况，这就需要将其平移和压

缩到显示器显示的范围内。因此还需要对该算法进行改进,利用 gain/offset 方法对图像像素进行修正,再把修正后的图像的灰度映射到显示器显示的灰度范围(0-255),同时为了提高增强图像的对比度,需要对该图像进行直方图拉伸。

### 4.3 gain/offset 修正

#### 4.3.1 作用

正如前文所述,通常 MSR 的输出图像的像素值会超出显示器的显示范围,如图 4-5 所示。因此需要将其平移并压缩到显示器的显示范围之内,通常是 0-255。为了解决这个问题,人们通常采用 gain/offset 方法来实现,其中 gain 和 offset (gain 和 offset 分别代表了增益系数和偏移量)是基于对相应的图像进行统计来确定。但幸运的是,研究发现,同类型的不同的图像的直方图都具有典型的形状和位置,这就意味着,对这种类型的图像来说,可以采用统一的 gain 和 offset 参数。

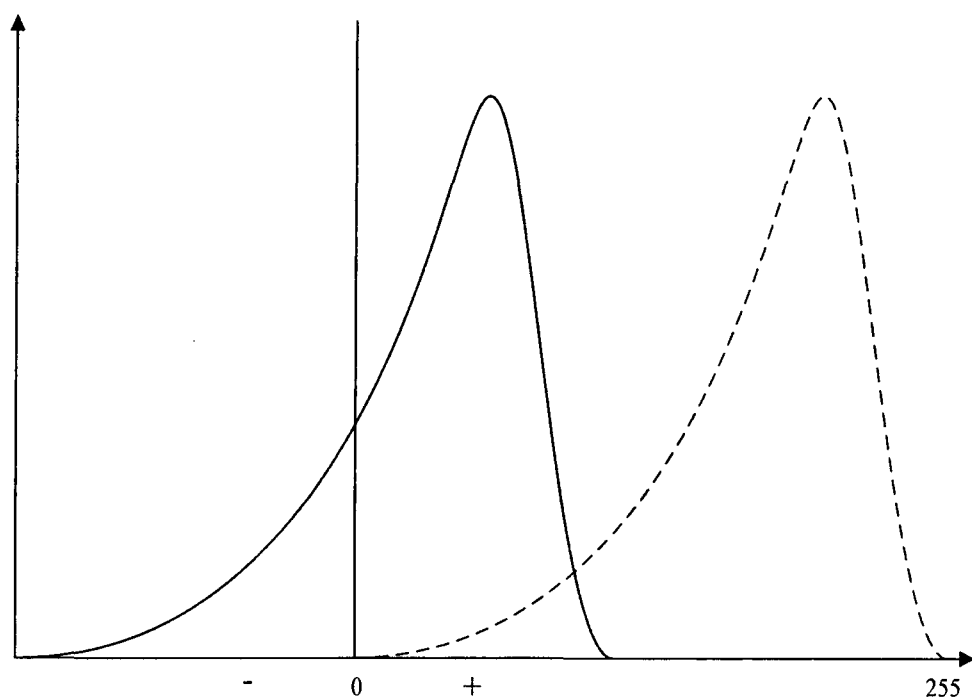


图 4-5 gain/offset 示意图

#### 4.3.2 算法原理

gain/offset 的算法原理可以用式 (4-1) 和 (4-2) 来描述:

$$R_o(x, y) = G \times R_i(x, y) + offset \quad (4-1)$$

$$R(x, y) = 255 \times \frac{R_o(x, y) - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}} \quad (4-2)$$

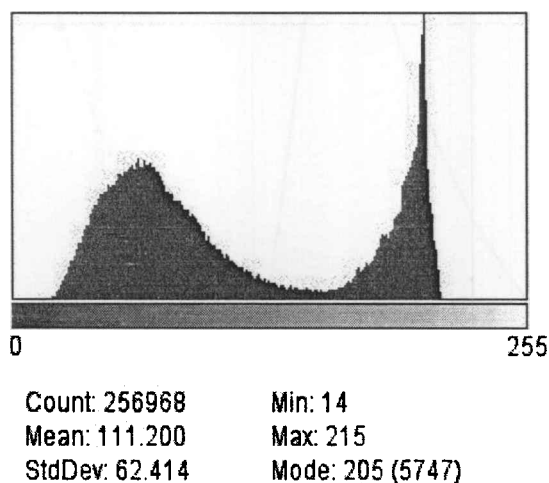
其中,  $R_i(x, y)$  和  $R_o(x, y)$  分别为图像的输入及输出灰度值, 对增益系数  $G$  和偏移量  $offset$  的选取做了大量的研究表明由于利用 MSR 处理后各种图像具有非常类似的直方图分布, 因此对大多数图像这两个量可以取固定的值, 而不会影响图像的增强效果, 这里分别选取  $G = 1$  和  $offset = 40$ 。  $r_{\min}$  和  $r_{\max}$  分别为修正后图像的最大灰度值和最小灰度值,  $R(x, y)$  为映射后的用来显示的图像灰度值。

### 4.3.3 实验结果及分析

根据以上 gain/offset 算法对图 4-3 (b) 进行修正处理, 分别取  $G = 1$  和  $offset = 40$ , 得到的结果如图所示:



(a) MSR+gain/offset



(b) 直方图

图 4-6 gain/offset 处理结果图像及其直方图

同时, 图 4-6 (b) 给出了经过 gain/offset 处理结果图像直方图, 从灰度直方图可以看出, 经过 gain/offset 修正处理后的筒牍图像得到了较好的灰度分布。但是, 从图 4-6 (b) 中我们可以发现, 该直方图分布区间还是比较窄, 一般处于 20-200 的灰度区间, 图像显得比较暗, 因此需要进一步的处理。

## 4.4 对比度拉伸

### 4.4.1 作用

若系统没有充分利用显示装置所允许的最大灰度范围,导致图像的对比度太低(如摄影时曝光不足),导致了图像的对比度低、分辨率低,可以对图像进行对比度的线性拉伸,将原图像  $I(i, j)$  的灰度范围由  $[\min, \max]$  扩展成  $[0, 255]$ 。正如上文所述,经过 MSR 处理的简牍图像偏暗,为了使简牍图像具有更好的视觉效果,本节我们讨论运用对比度拉伸算法来实现对简牍图像进行直方图修改,从而进一步提高图像的对比度。

### 4.4.2 算法原理

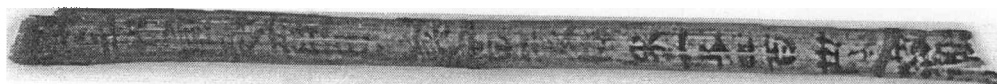
对比拉伸变换是图像增强技术中一种比较简单而又十分重要的方法。这种方法是按一定的规则修改输入图像每一个像素的灰度,从而改变图像灰度的动态范围。它可以使灰度动态范围扩展,也可以使其压缩,或者是对灰度进行分段处理,根据图像特点和要求在某段区间中进行压缩而在另外区间中进行扩展。本文通过采用对比度增强算法对简牍图像进行了预处理,从而达到增强对比度的目的。下式 4-3 给出了对比度拉伸算法的表达式:

$$P_{out} = (P_{in} - c) \left( \frac{b - a}{d - c} \right) + a \quad (4-3)$$

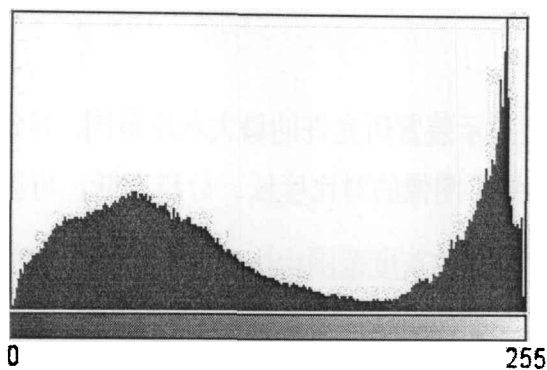
其中,表达式中  $a$ ,  $b$  分别表示所能表达的最小像素值和最大像素值,对 8-bit 灰度图像来说,最小和最大的像素值必须是 0 和 255。 $c$  和  $d$  表示当前图像的最小和最大的像素值。 $P_{in}$  和  $P_{out}$  分别表示输入的像素值和对比度拉伸算法的输出。值得注意的是,小于 0 的像素值应该被置 0,而大于 255 的像素值应该被置为 255。

### 4.4.3 实验结果及分析

对图 4-6 (a) 用对比度拉伸算法进一步的处理,结果如图所示:



(a) MSR+gain/offset+对比度拉伸



|                |                  |
|----------------|------------------|
| Count: 256968  | Min: 0           |
| Mean: 123.171  | Max: 255         |
| StdDev: 83.155 | Mode: 246 (4515) |

(b) 直方图

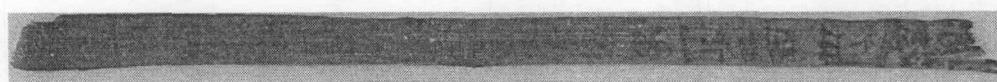
图 4-7 直方图拉伸算法处理结果图像及其直方图

由于原始简牍图像的灰度范围比较窄，其灰度直方图通常分布在 40-200 之间，并没有完全利用完整个灰度级 (0-255)，造成目标图像灰度值与背景灰度值相接近，整个图像看起来比较暗。利用对比度拉伸，可以使图像的直方图分布于整个灰度级上，如图 4-7 (b) 所示，图像有较大的动态变化范围，视觉上增加变换后图像分辨的亮度差的总级数，同时也加大目标图像与背景间亮度差异。

## 4.5 简牍图像增强结果讨论

### 4.5.1 增强效果评价

经过了多尺度 Retinex 算法处理、gain/offset 修正以及直方图拉伸三个处理步骤，我们得到了最终的增强结果，如图 4-8 (b) 所示：



(a) 原始简牍图像



(b) 本文算法增强结果

图 4-8 本文算法增强效果图

为了便于分析对比讨论,本文选取了2种对简牍图像增强效果较好的方法直方图均衡化以及采用三段式线性变换对简牍图像进行增强处理,如图4-9所示:

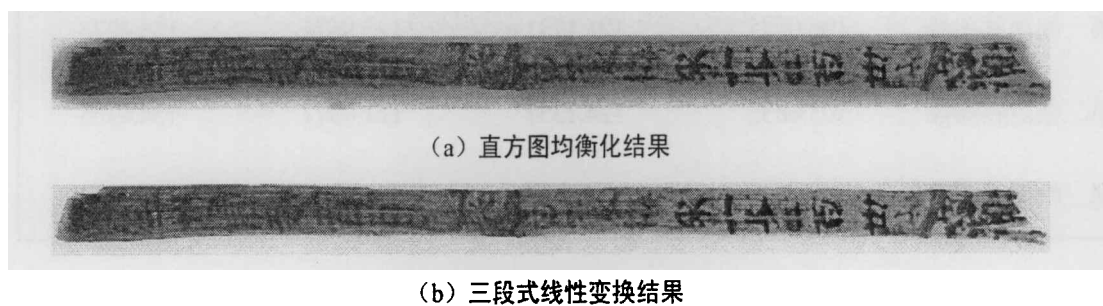


图 4-9 直方图均衡化结果以及三段式线性变换结果

对于如何评价彩色图增强算法效果方面,长期以来没有一个统一的看法。本章对增强图像的质量评估采用以客观评价为主,主观评价为辅的方式。首先,从主观评价上来看,从图4-6(a)中的原始简牍图像中可以看到,简牍左侧的阴影处细节不清晰,图像对比度偏小,图4-6(b)是经过了本文的算法处理的效果,图中的简牍不仅明亮清晰,左侧暗区细节突出,颜色也得到了更好的表现,更加符合人眼视觉感受。相比之下,如图4-9(a)所示,由于直方图均衡化增强技术所固有的缺陷,使得该方法在对简牍图像进行对比度增强的同时会丢失图像的细节信息,同时我们可以发现增强后的简牍图像有过增的现象,并且造成了简牍图像颜色的严重失真。而对于采用三段式线性变换的图4-9(b)来说,该方法根据了简牍图像直方图的特点,对简牍中背景、文字部分分别作了压缩和拉伸处理,因而得到了较好的增强效果,但是该方法的最大缺点是需要手动的调整分段参数,另外和直方图均衡化类似该方法也会导致暗区细节信息的丢失,色彩保真度也不好。

总的来说,使用灰度增强算法可以改变彩色图像的亮度与对比度,但并没有利用人眼对彩色图像的颜色感知能力,增强的图像显得较单调。考虑了基于 Retinex 理论的色彩恒常性的增强算法,处理后的图像色彩较柔和、自然,色彩的表现也越好。

下面,本文将采用客观评价方法对上述图像进行分析。尽管图像质量客观评价的指标有很多,但从实验图像的实际情况出发,考虑到图像的亮度反映了图像的明暗程度,对比度反映图像的黑白反差,熵则体现了对图像信息量的度量,因此,采用亮度、对比度、熵这三个指标对上述图像进行定量分析。

#### 1、亮度 (brightness)

图像亮度即图像矩阵的平均值,其值越小,表现在图像上就越暗。对三幅典型的原始简牍分别采用各种增强算法后得到的结果图像的亮度如表所示:

表 4-1 图像亮度表

| 增强算法    | 原始简牍图像   | 本文算法结果   | 直方图均衡化结果 | 三段式线性变换结果 |
|---------|----------|----------|----------|-----------|
| 第一幅简牍图像 | 106.0975 | 125.1731 | 123.9674 | 155.4275  |
| 第二幅简牍图像 | 103.0835 | 124.1351 | 121.9377 | 154.4365  |
| 第三幅简牍图像 | 108.0234 | 127.5632 | 125.1773 | 160.4318  |

## 2、对比度 (contrast)

图像的对比度即图像矩阵的均方差(标准差)。对比度越大, 图像中黑白反差越明显。对于三幅典型的简牍图像, 采用各种增强算法后得到的结果图像的对比度如表所示:

表 4-2 图像的对比度

| 增强算法<br>原始图像 | 原始简牍图像  | 本文算法结果  | 直方图均衡化结果 | 三段式线性变换结果 |
|--------------|---------|---------|----------|-----------|
| 第一幅简牍图像      | 64.5252 | 82.9696 | 73.6084  | 80.1326   |
| 第二幅简牍图像      | 60.3221 | 82.7231 | 72.9354  | 80.0212   |
| 第三幅简牍图像      | 64.1419 | 82.8151 | 73.5218  | 80.1219   |

## 3、熵(Entropy)

熵是信息量的度量。根据熵理论, 图像熵越大其信息量越多, 图像细节就越丰富。对二维图像来说, 熵的定义可以用式 4-4 来描述:

$$H = - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f(m,n) \ln f(m,n) \quad (4-4)$$

对于三幅典型的简牍图像, 采用各种增强算法后得到的结果图像的信息熵如表所示:

表 4-3 图像的信息熵

| 增强算法<br>原始图像 | 原始简牍图像 | 本文算法结果 | 直方图均衡化结果 | 三段式线性变换结果 |
|--------------|--------|--------|----------|-----------|
| 第一幅简牍图像      | 6.9544 | 8.1432 | 7.8634   | 8.1136    |
| 第二幅简牍图像      | 6.7132 | 8.1113 | 7.783    | 8.0134    |
| 第三幅简牍图像      | 6.8513 | 8.0321 | 7.8133   | 8.0179    |

### 4.5.2 试验结果分析

对比图像亮度对照表(表 4-1)可以看出,本文所用的算法在亮度方面较直方图均衡化算法来说有较大的提高,略低于三段式线性变换算法;从图像对比度对照表(表 4-2)中我们发现,本文所用的算法要优于直方图均衡化算法和三段式线性变换算法,简牍图像具有最高的对比度;而根据图像熵对照表(表 4-3)来看,本文所用的算法也要优于其它两种算法,对简牍图像暗区的细节信息具有最好的增强效果。

## 4.6 本章小结

多尺度 Retinex(MSR)算法是一种非常有效的、基于人眼视觉原理的图像增强算法,它既能有效地压缩图像的动态范围,实现图像中阴暗部分的细节信息的增强,同时又可以使图像具有较好的色感一致性,具有广泛的应用领域。本章主要基于多尺度 Retinex 算法并综合运用 gain/offset 算法和对比度拉伸算法对简牍图像进行增强处理,试验表明该算法克服了传统增强算法的不足,既能够实现简牍图像对比度的增强,同时又使简牍图像具有较高的色彩保真度,可显著地增强图像暗区内细节信息的可视度,大大地提高简牍考古工作者史料解读工作的准确性和可靠性。

## 结 论

人眼是公认的完美的视觉系统,尽管近年来,人类在数字图像处理领域取得了许多进展与成果,但是同人类视觉系统在图像的产生,传输和处理方面的能力相比,目前的图像系统无论是在功能上还是在系统构造上都仅仅处于一个十分初级的阶段,成像设备的不断发展始终无法与人眼的优异特性相媲美。因此,国内外很多专家学者近年对人类视觉系统进行了很多深入的研究。在这样的大的环境下,本文对传统的图像增强算法进行了深入的分析,指出其存在的局限性:传统的直方图均衡化处理通常产生非自然的图像和视觉效果,原因之一就是它不考虑原始图像的像素分布,而强令所有输出都是一个均匀的分布;线性变换和分段线性变换需要人机交互经验地调节斜率和分段参数;至于频域法的同态滤波法,需要先利用傅立叶变换将图像变换到频率域进行处理,因而运算的效率较低,无法达到实时处理的要求。

在详细讨论了传统图像增强算法以后,本文接着对目前的人类视觉系统的研究成果进行了深入的讨论,并在此基础上深入的研究了与人类视觉系统息息相关的颜色视觉理论。在这些研究的基础上,本文提出了 Retinex 理论,并重点讨论了其相应的计算理论单尺度 Retinex 算法和多尺度 Retinex 算法。根据高斯邻域的大小依次介绍了高、中、低三种尺度的优劣性,在较小尺度下单尺度 Retinex 相当于高通滤波,可以取得较高的动态范围压缩,图像暗区的细节信息得到较好的增强,但丢失了大量色彩信息,色感较差;大尺度下单尺度 Retinex 在损失动态范围的基础上,能有效地保持色彩信息。由于单尺度 Retinex 无法在动态范围压缩和颜色高保真之间获得平衡,因而又引入了多尺度 Retinex 算法。多尺度 Retinex 能够同时提供动态范围压缩和颜色高保真,并且它也解决了中、低尺度 Retinex 增强后光晕化的缺点。与其它图像增强方法相比,Retinex 算法具有锐化、颜色恒常性、动态范围压缩大、色彩保真度高等特点。

最后,本文主要基于多尺度 Retinex 算法,并综合运用多种数字图像处理技术对简牍图像进行增强处理,试验表明该算法既能够实现简牍图像对比度的增强,同时又使简牍图像具有较高的色彩保真度,可显著地增强图像暗区内细节信息的可视度,可大大地提高简牍考古工作者史料解读工作的准确性和可靠性。

在对 Retinex 理论和算法的研究过程中,尽管本文取得了一定的成果,但仍然存在一些不足之处,未来的发展可从以下几个方面着手:

(1) 进一步深入研究、分析人类视觉系统的特性。

对于人类视觉系统,所感兴趣的主要是参与视觉形成的各种视觉系统结构和视觉特性,包括视觉通道、受域和空间视觉对抗、光谱对抗、视觉适应等特性,以及更高级的视觉信息处理机制。如何选择适用于图像处理的视觉特性模型,是目前研究的

一个瓶颈。一则需要了解视觉系统的理论,为图像处理寻找可接纳、可应用的模型;二则即便找到可能的研究方向,由于生物视觉系统的复杂性、现有相关知识体系本身的不完善,在实际操作中还需要简化、反复实验等,可行性验证费时费力。

(2) 深入研究有效的图像增强效果评价方法。

由于视觉感知量化评估方法仍然缺乏,对于复杂图像的评判只能在主观心理评价框架内进行,因此依据生理、心理物理学进行量化评估,也需要建立在对视觉系统深入研究的基础上。目前较为常用的评价指标,如亮度、对比度、熵等由于缺乏理论的支撑而还没有成为公认的评价标准。

(3) 进一步研究彩色图像三个颜色分量的相互关系

在简牍图像的增强中,增强后的图像中 R、G、B 分量的到底应该满足怎样的比例关系才能使增强后的图像具有最好的色彩保真度。

## 致 谢

首先，最应该感谢的是我的导师王绪本教授。王老师的引导、关心和支持，是我得以顺利完成硕士阶段研究工作的最重要条件。王老师的待人以真、待人以诚、待人以宽、谦和平易的作风，对学生细致入微的关心，以及严谨的治学态度，对工作认真、负责、投入的精神，都使我受益匪浅。这所有的一切必将对我的一生产生长远的影响。

衷心地感谢汪刘艳博士，在我生活上最困难的时候帮助了我，使我能够顺利地完成学业。感谢工作室的其他几位师兄师姐：曹辉博士、简兴祥博士、阚瑗珂博士、曹礼刚博士、李秋香博士、银正彤博士、杨利容博士、李军博士！几位师兄师姐不仅在工作中给了我很大的帮助，生活里也是最好的朋友。

衷心地感谢我的学习伙伴张伟，在系统的开发过程中一起学习，相互监督，为系统的最终实现作了很大的贡献。

衷心地感谢三年来陪伴我走过风风雨雨的同级学友们：陈瑜、邓薇、胡蕾、路瑶、李文超、余年、林春、周军、胡青龙；师弟师妹李国庆、高树全、陈进超、杨朝晖、闵刚、李刚毅、于嘉等，他们都在学习中给了我很多的帮助。

深深地感谢我的家人，他(她)们的爱，是我永恒的幸福源泉！

感谢所有关心和帮助过我的人！

## 参考文献

- [1]Johnson G A, Sherrier R H.Regionally adaptive histogram equalization of the chest[J].IEEE Trans on Med Image, 1987, 6: 1-7.
- [2]Kamel M, Lian Guan.Histogram equalization:utilizing spatial correlation for image enhancement[J].Proc SPIE.1989, Vol.1199: 712-721.
- [3]Mokrane A.A new image contrast enhancement technique based on a contrast discrimination model[J].Graphical Models and Image Processing.1992,54(2):171-180.
- [4]Ji T L, Sundarehan M K, Roehrig H.Adaptive Image Contrast Enhancement Based on Human Visual Properties.IEEE Trans Medical Imaging, 1994, 13(4):573-586.
- [5]Zeevi Y, Wolf S and Ginosar R.Spatio-Chromatic Image Enhancement Based on a Model of Human Visual Information System[J].Journal of Visual Communication and Image Representation, 1998, 9(1):25-37.
- [6]Jian Lu, Weaver J B and Healy Jr D M.Contrast Enhancement of Medical Images Using Multiscale Edge Representation[J].Optical Engineering.1994, 33(7):2151-2161.
- [7]Brown T J.An adaptive strategy for wavelet based image enhancement[C].In:Proceedings of Conference on Machine Vision and Image Processing Conference.Irish,2000,67-81.
- [8] E. H. Land, J. J. McCann. Lightness and retinex theory[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1971, 61(1):1-11.
- [9]L. T. Maloney. Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1986, 3(10):1673~1683
- [10]E. H. Land. The retinex theory of color vision[J]. Sci. Am., 1977, 237(6):108-128.
- [11]E. H. Land. Recent advances in retinex theory and some implications for cortical computations: color vision and the natural image [C]. Proc. Natl. Acad. Sci. US A, 1983, 80:5163-5169.
- [12]J. J. McCann, S. P. McKee, T. H. Taylor. Quantitative studies in retinex theory [J]. Vision Research, 1976, 16:445-458
- [13]A. Hurlbert. Formal connection between lightness algorithms[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1986, 3(10):1684-1693
- [14]E. H. Land. An alternative technique for the computation of the designator in the retinex theory of color vision [C]. Proc. Natl. Acad. Sci. US A, 1986, 83:3078~3080.
- [15]A. Moore, J. Allman, R. M. Goodman. A real-time neural system for color constancy [J]. IEEE Trans. Neural Networks, 1991, 2(2):237~247.
- [16] Brian Funt, Florian Ciurea, John McCann. Retinex in Matlab[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1):48~57.
- [17]D. J. Jobson, Z. Rahman, G. A. Woodell. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. IEEE Trans. on Image Processing: Special Issue on Color Processing, 1997, 6(3):451~462.
- [18]李在铭等.数字图像处理压缩与识别技术[M].成都:电子科技大学出版社, 2000.
- [19]贾永红等.数字图像处理[M].武汉:汉大学出版社,2003.
- [20]盛骤, 谢式千, 概率论与数理统计(第二版), 高等教育出版社.
- [21]刘瑛, 王绪本. 简牍图像文字切分算法研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(21): 5586-5589.

- [22]覃庆炎,王绪本,蒋维.反锐化掩模法在简牍文字增强中的应用[J].微计算机信息,2008,3(24):241-242.
- [23]刘瑛.OCR技术在简牍图像数字化中的应用[D].硕士,成都理工大学,2007.
- [24]张娜.简牍图像增强与分割的研究[D].硕士,成都理工大学,2007.
- [25]李申申.基于轻量级架构的简牍图像信息系统[D].硕士,成都理工大学,2006.
- [26]杨斯涵.图像分割技术在简牍保护中的应用研究[D].硕士,成都理工大学,2006.
- [27]肖燕峰.基于Retinex理论的图像增强恢复算法研究[D].硕士,上海交通大学,2007.
- [28]陈雾.基于Retinex理论的图像增强算法研究[D].硕士,南京理工大学,2006.
- [29]夏思宇.彩色图像序列的人脸检测、跟踪与识别研究[D].博士,东南大学,2006.
- [30]倪国强,肖蔓君,胡宏清,陈思颖,黄光华;基于视觉特性的真实影像再现技术进展及展望[J];中国激光;2007年04期.