

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 7
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年7月 第17卷 第7期(总第195期)

目次

综述

中国多媒体技术研究: 2011 史元春, 徐光祐, 高原(741)

图像处理和编码

图像引导滤波的局部多尺度 Retinex 算法 方帅, 杨静荣, 曹洋, 武鹏飞, 饶瑞中(748)

基于第一主成分方向稳定性的图像零水印 付剑晶, 王珂(756)

小波变换估计非线性扩散最优停止时间 蒋平, 张建州(770)

图像分析和识别

改进的 Beamlet 与 Canny 相结合提取复杂图像线特征 曾接贤, 周沥沥, 符祥(775)

动静态信息融合及动态贝叶斯网络的步态识别 杨旗, 薛定宇(783)

融合音频单词与视觉特征的成人视频检测 刘毅志, 唐胜, 王向东, 林守勋, 张勇东(791)

基于平面区域跟踪的目标位姿参数自动测量 回丙伟, 文贡坚, 赵竹新, 钟金荣(798)

3 维图像中边界曲面的分类追踪及抽取 丁德福, 程柳航, 王利生(806)

局部时空域模型的核密度估计目标检测方法 王兴宝, 刘纯平, 费兰英, 王朝晖, 季怡(813)

基于相位谱和调谐幅度谱的显著性检测方法 李崇飞, 高颖慧, 卢凯, 曲智国(821)

图像理解和计算机视觉

“目标-场景”语境关联的生成图模型分析 谢昭, 李姍琦, 高隼(828)

融合上下文信息的场景结构恢复 武晖, 于昕, 隋尧, 张利(839)

带有局部控制因子的图割光流估计 路子赟, 唐土生, 高隼, 沈琳, 刘伟(846)

改进的 Harris 亚像素角点快速定位 何海清, 黄声享(853)

计算机图形学

应用最小生成树实现点云分割 孙金虎, 周来水, 安鲁陵(858)

医学图像处理

病毒进化的离散差分进化超声图像特征选择 张巧荣, 朱长明, 倪军, 刘海波(866)

分水岭优化的 Snake 模型肝脏图像分割 兰红, 张璐(873)

遥感图像处理

Normalized Cut 与分水岭变换在高光谱影像混合像元端元提取中的应用 许菡, 李小娟(880)

改进非局部均值滤波的 SAR 图像降噪方法 郑永恒, 程建, 曹宗杰(886)

~~~~~  
第四届国际遥感考古会议 ..... (892)

**中国图象图形学报**

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 7 期

2012 年 7 月 16 日出版

**主管单位** 中国科学院

**主 办** 中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所

**主 编** 李小文

**编辑出版** 《中国图象图形学报》编辑出版委员会  
北京 9718 信箱 邮编 100101  
电子信箱:jig@irsa.ac.cn  
电话:010-64807995 010-82614429  
网 址:www.cjig.cn

**印刷装订** 北京北林印刷厂

**广告经营许可证** 京朝工商广字第 0346 号

**总 发 行** 北京报刊发行局

**订 购** 全国各地邮局

**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
(中国国际书店)  
(北京 399 信箱 邮编 100044)

**Superintended by** Chinese Academy of Sciences

**Sponsored by** Institute of Remote Sensing Application,  
CAS China Society of Image and Graphics  
Institute of Applied Physics and Computational  
Mathematics

**Chief editor** LI Xiaowen

**Editor, Publisher** Editorial and Publishing Board  
of Journal of Image and Graphics  
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)  
E-mail:jig@irsa.ac.cn

**Distributed by** Beijing Bureau for Distribution of Newspapers  
and Journals

**Domestic** All Local Post Offices in China

**Foreign** China International Book Trading Corporation  
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

**Printed by** Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

# Journal of Image and Graphics

( Monthly , Started in 1996 )

Vol. 17 No. 7 July 2012

## Contents

### Review

Researches on multimedia technology in China, 2011 ..... Shi Yuanchun, Xu Guangyou, Gao Yuan (741)

### Image Processing and Coding

Local multi-scale Retinex algorithm based on guided image filtering  
..... Fang Shuai, Yang Jingrong, Cao Yang, Wu Pengfei, Rao Ruizhong (748)

Image zero-watermark based on direction stability of first principal component vector ..... Fu Jianjing, Wang Ke (756)

Stopping-time estimation for anisotropic diffusion using discrete wavelet transform ..... Jiang Ping, Zhang Jianzhou (770)

### Image Analysis and Recognition

Complex image line feature extraction based on improved Beamlet transform and the Canny operator  
..... Zeng Jiexian, Zhou Lili, Fu Xiang (775)

Gait recognition based on dynamic & static information fusion and dynamic bayesian network ..... Yang Qi, Xue Dingyu (783)

Fusing audio-words with visual features for adult video detection  
..... Liu Yizhi, Tang Sheng, Wang Xiangdong, Lin Shouxun, Zhang Yongdong (791)

Automatic measurement for an object's position and attitude via tracking planar regions  
..... Hui Bingwei, Wen Gongjian, Zhao Zhuxin, Zhong Jinrong (798)

Detection and extraction of boundary surface patches within 3D images ..... Ding Defu, Cheng Liuhang, Wang Lisheng (806)

Foreground object detection method using kernel density estimation of a local spatio-temporal model  
..... Wang Xingbao, Liu Chunping, Fei Lanying, Wang Zhaohui, Ji Yi (813)

Saliency detection method based on phase spectrum and amplitude spectrum tuning  
..... Li Chongfei, Gao Yinghui, Lu Kai, Qu Zhiguo (821)

### Image Understanding and Computer Vision

"Object-Scene" contextual associated generative graph model analysis ..... Xie Zhao, Li Shanqi, Gao Jun (828)

Structure recovery algorithm using contextual information ..... Wu Hui, Yu Xin, Sui Yao, Zhang Li (839)

Graph cut optical flow estimation with a local control factor ..... Lu Ziyun, Tang Tusheng, Gao Jun, Shen Lin, Liu Wei (846)

Improved algorithm for Harris rapid sub-pixel corners detection ..... He Haiqing, Huang Shengxiang (853)

### Computer Graphics

Research on point cloud segmentation using a minimum spanning tree ..... Sun Jinhu, Zhou Laishui, An Luling (858)

### Medical Image Processing

Virus-evolutionary discrete differential evolution algorithm for feature selection of cervical lymph nodes in ultrasound images  
..... Zhang Qiaorong, Zhu Changming, Ni Jun, Liu Haibo (866)

Liver image segmentation algorithm based on the Snake model And optimized by watershed transformation  
..... Lan Hong, Zhang Lu (873)

### Remote Sensing Image Processing

Endmember extraction for hyperspectral image based on normalized cut and watershed transformation  
..... Xu Han, Li Xiaojuan (880)

SAR image denoising via improved non-local means filter ..... Zheng Yongheng, Cheng Jian, Cao Zongjie (886)

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)07-0748-08

论文引用格式: 方帅, 杨静荣, 曹洋, 武鹏飞, 饶瑞中. 图像引导滤波的局部多尺度 Retinex 算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(7): 748-755.

## 图像引导滤波的局部多尺度 Retinex 算法

方帅<sup>1,2</sup>, 杨静荣<sup>1</sup>, 曹洋<sup>3</sup>, 武鹏飞<sup>2</sup>, 饶瑞中<sup>2</sup>

1. 合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009; 2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031;
3. 中国科学技术大学自动化系, 合肥 230027

**摘要:** Retinex 算法是一种用于消除由光照变化给图像所带来的负面影响的图像增强算法。该算法的求解通常需要基于入射分量分段光滑的假设, 利用正则化的方法迭代求解, 计算效率低。文中基于一项最近提出的研究——“图像引导滤波”, 提出一种非迭代的 Retinex 算法框架。基于反射分量也满足分段光滑的假设, 采用两次图像引导滤波克服了图像噪声所带来的影响。然后在基于小波变换域图像融合策略的基础上, 提出基于图像引导滤波的多尺度 Retinex 算法, 实现图像细节增强与颜色保真之间的平衡。实验结果表明, 与各种算法相比, 该算法在克服噪声、细节增强和颜色保真方面能够取得更好的效果。

**关键词:** Retinex 理论; 图像增强; 引导滤波; 双边滤波

### Local multi-scale Retinex algorithm based on guided image filtering

Fang Shuai<sup>1,2</sup>, Yang Jingrong<sup>1</sup>, Cao Yang<sup>3</sup>, Wu Pengfei<sup>2</sup>, Rao Ruizhong<sup>2</sup>

1. College of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
3. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

**Abstract:** Retinex algorithm deals with the removal of unfavorable illumination effects from a given image. Solving it is typically done by introducing a regularization that forces a spatial smoothness on the illumination, which is computational expensive. In this paper we propose a non-iterative retinex algorithm based on a recent “guided image filter”. Assuming a spatial smoothness on the reflectance, a method using two guided image filters is applied to eliminate artifacts caused by noise. Then, a multi-resolution framework combining guided image filtering and wavelet thresholding, is presented. Our framework is very effective in achieving a trade-off between detail enhancement and color constancy. Compared to other enhancement algorithms, our results verify the new approach’s efficiency in eliminating artifacts caused by noise, detail enhancement, and color constancy.

**Key words:** Retinex theory; image enhancement; guided filter; bilateral filter

## 0 引言

对于同一物体, 人可以在不同强度的光照条件

下分辨出它的颜色。基于此现象, 美国物理学家 Land 于 1971 年提出色彩恒常性理论即 Retinex (retina + cortex), 认为人眼对物体色彩的感知取决于物体表面的反射特性, 而与入射光强度无关。与此同

收稿日期: 2011-09-05; 修回日期: 2012-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(61175033); 国家自然科学基金项目(60805019); 国家自然科学基金项目(61075032); 中央高校基本科研业务费专项资金(WK2100100009)

第一作者简介: 方帅(1978—), 女, 副研究员, 硕士生导师, 2005年东北大学获控制理论与控制工程工学博士学位, 2007年至今, 于中国科学院安徽光学精密机械研究所做博士后, 主要研究方向为计算机视觉、图像复原。E-mail: fangshuai@hfut.edu.cn

通讯作者: 曹洋, E-mail: forrest@ustc.edu.cn

时, Land 提出相应的算法用于对受不匀光照影响的图像进行增强,恢复其色彩。Retinex 算法<sup>[1-2]</sup>是一种常见的图像增强算法,用于消除由于光照变化给图像所带来的负面影响,达到压缩图像动态范围(HDR compression)的目的。Retinex 图像增强算法基本思路是:对于一幅待增强的图像  $S$  来说,可以看做是由反射光分量  $R$  和入射光分量  $L$  两部分的逐像素乘积,即  $S = L \times R$ 。其中反射分量  $R$  对应于消除光照影响后的图像,入射分量  $L$  对应于光照给图像带来的干扰。为便于计算,通常会通过对数变换将乘法运算转化为加法运算,满足  $s = \log(S) = \log(L) + \log(R) = l + r$ 。然后通过某种策略估算出入射分量  $L$ ,再从待增强图像中减去入射分量  $l$ ,得到反射分量部分  $r$ ,再经过对数反变换实现图像增强。

从待增强图像  $s$  中求取入射分量  $l$  的过程是一个病态问题,文献[3]基于入射分量  $l$  分段光滑的假设利用正则化的方法进行求解。文献[4]提出了单尺度 Retinex 算法,通过对原始图像  $s$  进行各向同性的低通滤波(通常为高斯滤波器)得到入射分量  $l$  的粗略估计。在此基础上,文献[5]提出了多尺度 Retinex 算法,利用多个具有不同尺度参数的低通滤波器分别对原始图像进行滤波,并对滤波结果进行线性加权平均后作为入射分量  $l$  的估计值。由于针对 Retinex 算法的研究由来已久,对于其他各类方法的总结和介绍本文中将不再复述,本文的重点将主要针对一项最近提出的研究——“图像引导滤波器在图像增强领域中的应用”来进行。

图像引导滤波器<sup>[6]</sup>是微软亚洲研究院的 He 等人于 2010 年提出的一种局部线性图像滤波器,由于其在实现平滑滤波的同时还能具有良好的边缘保持性能,因此在图像去噪、超分辨率图像复原、图像增强等领域均有着广泛的应用前景。在文献[6]给出了基于图像引导滤波的图像增强结果。与传统方法相比,该方法在实时性和去除伪影等方面表现出了明显优势。但是,由于该方法仅仅是图像引导滤波器在图像增强领域的一个简单应用,还存在着以下不足:1)当原始图像比较复杂同时又存在有较大噪声时,在增强图像中会出现噪声增加的现象;2)由于仅采用了单一尺度参数,增强图像中某些区域存在有过度锐化或者颜色失真的现象。

针对上述不足,首先在对 Retinex 算法进行详细分析的基础上,采用两次图像引导滤波克服图像噪声所带来的影响;然后在基于小波变换域的融合策

略基础上,提出基于图像引导滤波的多尺度 Retinex 算法,实现细节增强与颜色保真之间的平衡。

## 1 相关工作及分析

### 1.1 图像引导滤波算法

图像引导滤波是一个线性移可变的滤波过程,包括引导图像  $I$ ,输入图像  $p$  和输出图像  $q$ 。其中引导图像  $I$  是需要根据具体应用事先设定的,也可以直接取为输入图像  $p$ 。对于输出图像中第  $i$  个像素而言,其计算方法可表达为

$$q_i = \sum_j W_{ij}(I) p_j \quad (1)$$

式中, $i$  和  $j$  为像素标签, $W_{ij}$  为滤波核函数,在文献[6]中其定义为

$$W_{ij}(I) = \frac{1}{|\omega|^2} \sum_{k:(i,j) \in \omega_k} \left( 1 + \frac{(I_i - \mu_k)(I_j - \mu_k)}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \right) \quad (2)$$

式中, $\omega_k$  为第  $k$  个核函数窗口, $|\omega|$  为窗口内的像素个数, $\mu_k$  和  $\sigma_k^2$  是引导图像  $I$  在窗口内的均值和方差, $\varepsilon$  为平滑因子。

与传统的滤波核函数相比,引导滤波核函数具有良好的边缘保持和细节增强性能。对于其性能的理论分析,在文献[6]及其补充材料中有着详细的描述。本文将主要通过两个对比实验来说明引导滤波核函数的性能优势。

首先,为了说明引导滤波核函数在边缘保持方面的性能优势,本文将其与高斯滤波核函数进行了对比实验。高斯滤波核函数的表达式为

$$W_G(i,j) = e^{-\|I_i - I_j\|^2 / \sigma^2} \quad (3)$$

式中, $\sigma$  为全局参数,通常为手动选取。 $I$  为输入图像, $i$  和  $j$  为像素标签。高斯滤波核函数的意义是对于邻域窗口范围内的像素,当颜色相近时权重加大,反之则减少;当颜色差别远大于  $\sigma$  时,则趋近于零。

对于引导滤波核函数而言,它与高斯滤波核函数等传统核函数的最大区别在于其使用了邻域内的像素均值和方差作为局部估计,能够根据图像内容自适应调整输出权重值。为比较两种滤波核函数的性能,本文分别检验了由这两种核函数生成的拉普拉斯矩阵的第 2 特征向量(次小特征值所对应的特征向量),该特征向量在基于谱分析的图像分割算法中有着重要作用(如 Normalized-Cuts 算法<sup>[7]</sup>等)。对比实验结果如图 1 所示,图 1(a)为测试图像,图 1(b)(c)分别

是基于高斯核函数和引导滤波核函数拉普拉斯矩阵的第 2 特征向量。从测试结果中可以看出,高斯核函数的特征向量无法很好捕捉图像中复杂的细节(如羽毛、头发等),而引导滤波核函数的特征向量能够很好地将复杂的前景与背景分开。在测试实验中使用的参数分别是  $\sigma = 0.02, \varepsilon = 0.0001$ 。

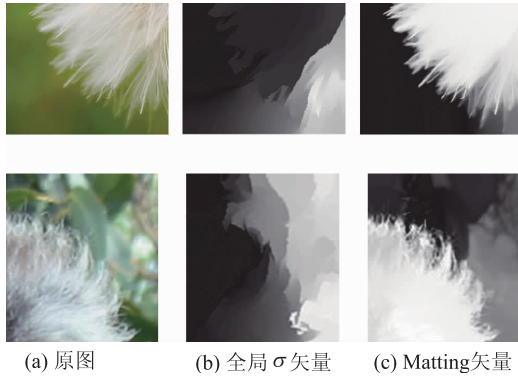


图 1 基于不同滤波核函数的拉普拉斯矩阵的第 2 特征向量  
Fig. 1 The second eigenvectors of the different filtering kernel Laplacians

为了说明引导滤波核函数在细节增强方面的性能优势,将其与高斯双边滤波核函数进行对比实验。高斯双边滤波核函数在图像去噪、图像增强等很多领域中都有着广泛的应用<sup>[8]</sup>,其表达式为

$$W_{ij}^{bf}(I) = \frac{1}{K_i} \exp\left(-\frac{|x_i - x_j|^2}{\sigma_s^2}\right) \times \exp\left(-\frac{|I_i - I_j|^2}{\sigma_r^2}\right) \quad (4)$$

对比实验结果如图 2 所示,为便于描述,以 1 维信号为例。输入信号为黑色曲线,经过平滑滤波后的结果如红色曲线所示,输入信号和滤波后信号的差值为蓝色曲线。由局部放大结果可以看出,使用双边滤波的平滑结果在信号强度突变的位置(如图中黑框所示位置,在图像中通常就是边缘区域)不能很好的跟随原始信号。这主要是由于在边缘位

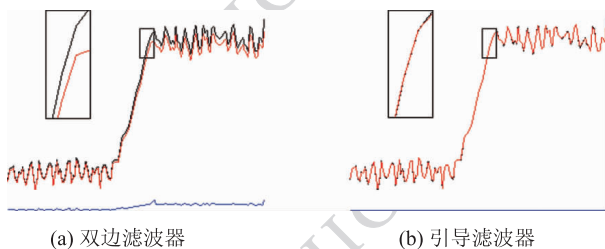


图 2 1 维信号的细节对比实验

Fig. 2 Comparison of details for one-dimensional signal

置上只会有很少信号的强度值比较接近,这样高斯双边滤波核函数输出的权重值就会多数接近于零,从而变得不可靠。这样反映在平滑结果上就存在有比较大的跟随误差,表现在 Retinex 问题中,就会出现比较明显的伪影。而引导滤波由于其基本原理是梯度保持,所以即使在强度突变的位置附近信号个数较少,但只要能够提供足够的梯度信息,就能够实现较好的跟随效果。因此,将图像引导滤波应用于 Retinex 问题中能够有效减少伪影这一现象的出现。在实验中,高斯双边滤波器和引导滤波器的参数分别为  $\sigma_s = 40, \sigma_r = 0.8$  和  $\varepsilon = 0.01$ 。

### 1.2 多尺度 Retinex 算法

在本文 Retinex 算法中,图像引导滤波器的平滑参数  $\varepsilon$  也被称为尺度参数。由于平滑参数为全局参数,因此其大小直接影响各个分量的估计结果,尤其对于细节比较丰富的图像。这里以添加方差为 0.01 高斯噪声的 1 维信号为例,输入信号为实线,经过平滑滤波后的结果为虚线。当  $\varepsilon \ll \sigma_k^2$  时,引导滤波核函数表现为相对收敛于中心信号(如图 3(a) 所示,  $\varepsilon = 0.00001^2$ ),卷积后产生的信号与输入信号一致(如图 3(c) 所示),结果保留了图像的细节,但是颜色保真效果较差;反之,当  $\varepsilon \gg \sigma_k^2$  时,引导滤波核函数表现为相对发散(如图 3(b) 所示,  $\varepsilon = 20^2$ ),卷积后的信号为中心信号周围信号的均值,即相对平缓(如图 3(d) 所示),表现为颜色保真能力好,但是细节增强效果较差。因此,当图像细节比较丰富时,基于单一平滑参数的单尺度 Retinex 算法无法同时保证细节增强与颜色保真。

多尺度 Retinex 算法<sup>[9]</sup>(MSR)能够改善这一问

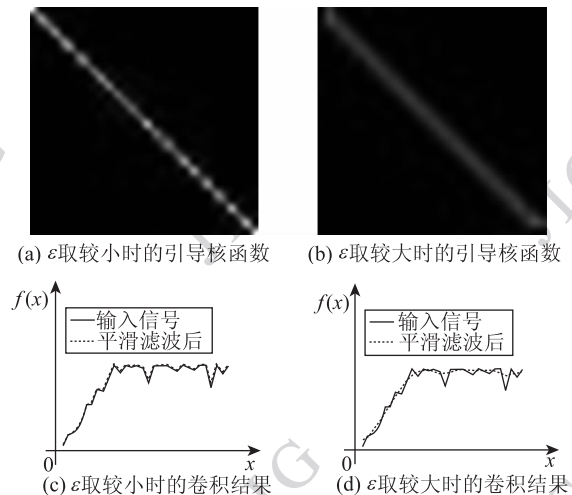


图 3 引导核函数及卷积结果

Fig. 3 The guided kernel functions and the result of convolution

题。传统的多尺度 Retinex 算法取不同的尺度参数进行线性加权平均,实现细节增强与颜色保真之间的平衡,公式为

$$R(x,y) = \sum_{i=1}^k W_i \{ \log I(x,y) - \log [I(x,y) * F_i(x,y)] \} \quad (5)$$

式中, $k$  为尺度参数的总个数, $W_i$  为归一化的加权系数,表示采用第  $i$  个尺度参数的滤波核函数, $F_i(x,y)$  为参数是  $\sigma_i$  的高斯函数。一般情况下,MSR 取高、中、低 3 个尺度,即  $k=3$ 。

由于线性加权平均只是一种折中的融合策略,不能很好反映多尺度融合的优点,为此将在第 3 节中将基于小波变换域的融合策略应用于 MSR 算法,取代线性加权的部分,以突出不同尺度融合的优点。

## 2 基于图像引导滤波的 Retinex 图像增强

将图像引导滤波作为一种平滑约束条件,添加到求解 Retinex 问题的目标函数中。基于这一目标函数,设计基于两次引导滤波的 Retinex 算法。

### 2.1 基于引导滤波平滑约束的 Retinex 算法

在 Retinex 问题中,为避免在增强图像中出现伪影现象,通常会在目标函数中添加一个使得入射分量  $I$  分段光滑的约束项,如式(6)中的第 2 项所示。经典 Retinex 算法的目标函数表现为

$$\min_{I \geq s} \lambda \|I - s\|_2^2 + \left\{ \|D_x I\|_2^2 + \|D_y I\|_2^2 \right\} \quad (6)$$

式中, $\lambda$  为加权系数, $D_x$  和  $D_y$  分别代表水平和垂直方向上的梯度算子,作用是使得入射分量  $I$  分段光滑。

文献[10]指出对于入射分量  $I$  的求解可以转化为二次规划问题进行求解。近年来,全变分法<sup>[11]</sup>和基于稀疏表示方法<sup>[12]</sup>的提出,通过使用 1 范数的平滑约束取代式(6)中 2 范数的平滑约束,使得对于此类问题有了近似最优解法。但是,这些方法在数值求解的过程中往往需要通过多次的迭代才能实现。为此,将使用一个基于引导滤波的平滑约束项取代式(6)中的第 2 项以提高实时性。为便于表述,先将平滑项定义为

$$B_{W,P}(I) = \sum_{m=-P}^P \sum_{n=-P}^P (C_{m,n} I - I)^T W_{[m,n]}(s) (C_{m,n} I - I) \quad (7)$$

式中, $s$  为原始图像, $C_{m,n}$  是转移矩阵,表示将图像  $s$  向水平方向移动  $m$  个像素以及向垂直方向移动  $n$

个像素。 $W_{[m,n]}$  是滤波核函数矩阵,其作用是降低对边缘上像素的平滑作用。

使用该平滑约束项取代式(6)的对应项,可得

$$F(I) = \min_{I: I \geq s} \lambda \|I - s\|_2^2 + B_{W,P}(I) \quad (8)$$

对于如式(8)所示最小化问题的求解可以通过一次雅可比迭代<sup>[13]</sup>来实现。求解过程可描述如下:

1) 计算目标函数  $F$  的梯度

$$\frac{\partial F(\bar{s})}{\partial \bar{s}} = 2\lambda(\bar{s} - s) +$$

$$2 \sum_{m=-P}^P \sum_{n=-P}^P (C_{m,n} - I)^T W_{[m,n]}(s) (C_{m,n} - I) \bar{s} \quad (9)$$

2) 计算目标函数  $F$  的黑塞矩阵

$$\frac{\partial^2 F(\bar{s})}{\partial \bar{s}^2} = 2\lambda I +$$

$$2 \sum_{m=-P}^P \sum_{n=-P}^P (C_{m,n} - I)^T W_{[m,n]}(s) (C_{m,n} - I) \quad (10)$$

3) 假设  $\bar{s}$  的初值  $\bar{s}_0 = s$ ,  $\frac{1}{2}M(s)$  为黑塞矩阵的

主对角化阵,经过一次雅可比迭代后,可实现对最小化目标函数  $F$  的初步求解,

$$\bar{s}_1 = \bar{s}_0 - \text{diag} \left\{ \left. \frac{\partial^2 F(\bar{s})}{\partial \bar{s}^2} \right|_{\bar{s}_0=s} \right\}^{-1} \cdot \left. \frac{\partial F(\bar{s})}{\partial \bar{s}} \right|_{\bar{s}=s} = \left[ I - M(s)^{-1} \cdot \sum_{m=-P}^P \sum_{n=-P}^P (C_{m,n} - I)^T W_{[m,n]}(s) (C_{m,n} - I) \right] s \quad (11)$$

由式(11)可以看出,权重系数矩阵  $W_{[m,n]}$  对于 Retinex 问题的求解是起到关键作用的。根据第 1 节的分析,将其设计为如式(2)所示引导滤波核函数的形式,引导图像就取为原始图像。这样就实现了基于引导滤波平滑约束的 Retinex 算法,基于该算法的图像增强结果如图 4(b) 所示。

### 2.2 基于两次引导滤波的 Retinex 算法

如 2.1 节所述,本文设计了基于引导滤波平滑约束的 Retinex 算法。但当原始图像  $s$  比较复杂且含有较大噪声时,在增强图像中会出现噪声增加的现象。这是由于强制添加的光滑约束项有可能使得入射分量的估计值过于平滑,从而导致最终的增强图像中除了保留原始图像  $s$  中的噪声以外,还增加了入射分量的估计误差。

针对这一问题,对式(8)所示的目标函数进行修正,调整为

$$F(I) = \min_{I, r: I \geq s} \{ \lambda_l \|I - s\|_2^2 + B_{W_l, P_l}(I) \} + \alpha \{ \lambda_r \|r - (s - I)\|_2^2 + B_{W_r, P_r}(s - I) \} \quad (12)$$

式中,第 1 项的作用与式(8)相同,第 2 项则对增强图像也添加了一个平滑约束。目标函数中这两项的作用是相互抑制的,因为不可能同时平滑。惩罚因子的作用是调整这两项在目标函数中的权重。通过这种调整,可以抑制入射分量过度平滑所带来的影响,降低反射分量中的噪声。

对于式(12)所示目标函数最小化问题的求解,可以通过两步法来实现。先基于目标函数的第 1 项求出入射分量,然后根据目标函数的第 2 项在给定入射分量的情况下,求出反射分量。两个步骤的具体求解与 2.1 小节所示方法相同,即均通过引导滤波来实现,但两个步骤所采用的滤波器参数不尽相同。根据上述描述,这样就实现了通过两次图像引导滤波的 Retinex 图像增强。

### 3 基于小波域信息融合的多尺度 Retinex 算法

根据第 1.2 小节的分析,当图像细节比较丰富

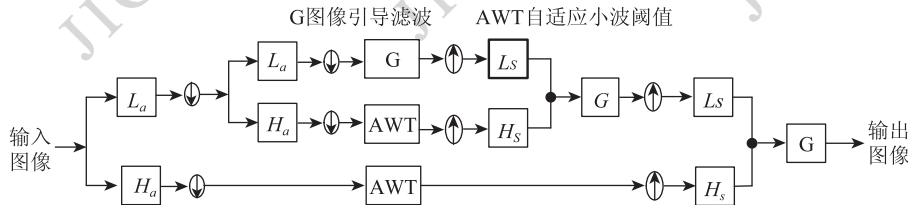


图 4 基于小波域信息融合的图像增强算法框架

Fig. 4 The framework for image enhancement based on wavelet domain information fusion

## 4 实验结果与分析

实验平台:CPU 双核 2.0 GHz,内存 1 G;软件为 Matlab 7.0,Windows XP 操作系统。在小波分解时选取小波基为 Db8 小波,对图像进行 4 层分解。

### 4.1 一次引导滤波与两次引导滤波

图像进行一次引导滤波,由于只考虑到对入射分量的平滑约束,导致最终的增强图像中除了保留原始图像  $s$  中的噪声以外,还增加了入射分量的估计误差。而图像进行两次引导滤波,则同时考虑了对入射分量和反射图像的平滑约束,使得最终得到的增强图像不仅满足了平滑约束的条件,且降低了噪声。如图 5 所示:(a) 为原图含有噪声;(b) 是一次引导滤波结果,使用的参数为  $P_l = 11, \varepsilon = 0.1^2$ ;(c) 则是两次引导滤波结果,使用的参数为  $P_l = 11,$

时,基于单尺度参数的 Retinex 算法无法同时保证细节增强与颜色保真,需要结合多尺度分析的思想来解决这一问题。基于小波域的信息融合算法在图像处理领域有着广泛的应用,它能够有效地利用多个尺度的信息,实现诸如图像去噪、图像复原等目的。

图 4 所示为本文基于小波域信息融合的图像增强算法框架。首先,利用小波变换对输入图像进行多尺度分解,分别得到各个尺度上的低频系数  $L_a$  和高频系数  $H_a$  (包括水平、垂直和对角系数)。然后,对于高频系数  $H_a$  采用基于 SURE 的自适应最优阈值方法<sup>[14]</sup>,这样可以去除其中的一些噪声成分;对于低频系数  $L_a$  则采用第 2.2 节中所述的方法,通过两次引导滤波获得进行细节增强。最后再根据各个尺度上的小波系数进行小波重建,得到最终的增强图像。

这一框架的最大特点是融合了基于引导滤波的图像增强和基于小波阈值的图像去噪的算法思想。

$\varepsilon = 0.1^2, P_r = 5, \varepsilon = 0.1^2$ ;(d)(e) 分别为(b)(c) 黑框区域放大的结果。从图 5(d) 可以清楚地看到,在半圆弧周围有许多白色的小点,同时还出现了伪影现象,而图 5(e) 在半圆弧周围几乎看不到白点和伪影。这说明用两次引导滤波得到的 Retinex 图像可以有效地降低噪声,在一定程度上克服了一次引导滤波的缺陷。

### 4.2 算法分析与对比

将双边滤波、引导滤波与本文算法进行对比。图 6—图 8 以经典的 Retinex 图像为例进行实验说明,双边滤波器的参数为  $\sigma_s = 100, \sigma_r = 0.3$ ,引导滤波器参数为  $r = 10, \varepsilon = 0.1^2$ ,本文提出的结合小波域信息融合多尺度算法,取 3 个不同的引导模板,图 6、图 7 的  $\varepsilon$  分别取  $10^{-6}, 0.1^2, 1$ ,图 8 的  $\varepsilon$  分别取  $10^{-4}, 0.1^2, 2^2$ ,窗口大小设定为  $20 \times 20$ ,并以直方图客观的说明图像质量,直方图以 R 通道为例。

图6(b)(c)(d)是上述3种算法得到的结果。从主观感觉上可以看出,3种方法都增强了暗区域。但仔细观察局部放大图像图6(f)(g)(h)发现:图6(f)相对于图6(g)比较平滑,边缘模糊,细节不突出;图6(g)虽然更加突出细节,但存在颜色失真的现象;而图6(h)相对于图6(f)(g)则在颜色保真度和细节方面得到了很好的平衡。再从客观数据上分析,原图直方图图6(i)的亮度值大部分集中在灰度值较小的区域,对比度低。而双边滤波、引导滤波和本文算法得到的增强图像图6(j)(k)(l)的灰度值分布的较均匀,反映在图像上,暗区域亮度得到了增强,

细节清楚,对比度得到提高,同时可以看出本文算法处理的结果在直方图上分布的更加均匀,因此具有较高的对比度,细节看的更清楚,颜色保真效果好。

图7(b)(c)(d)也是原图图7(a)应用上述3种 Retinex 算法的处理结果。从它们对应的直方图分布来看,算法结果仅使原图变亮而灰度值的分布范围相对变化不大。这是因为原图本身的质量较好,使得尺度参数  $\epsilon$  对图像影响不是很大。但本文结果在颜色保真度和细节方面均好于双边滤波和引导滤波的处理结果。

从图8的实验结果也很容易看出,双边滤波处



图5 一次引导滤波与两次引导滤波处理结果对比  
Fig. 5 Comparison between single and double guided filtering

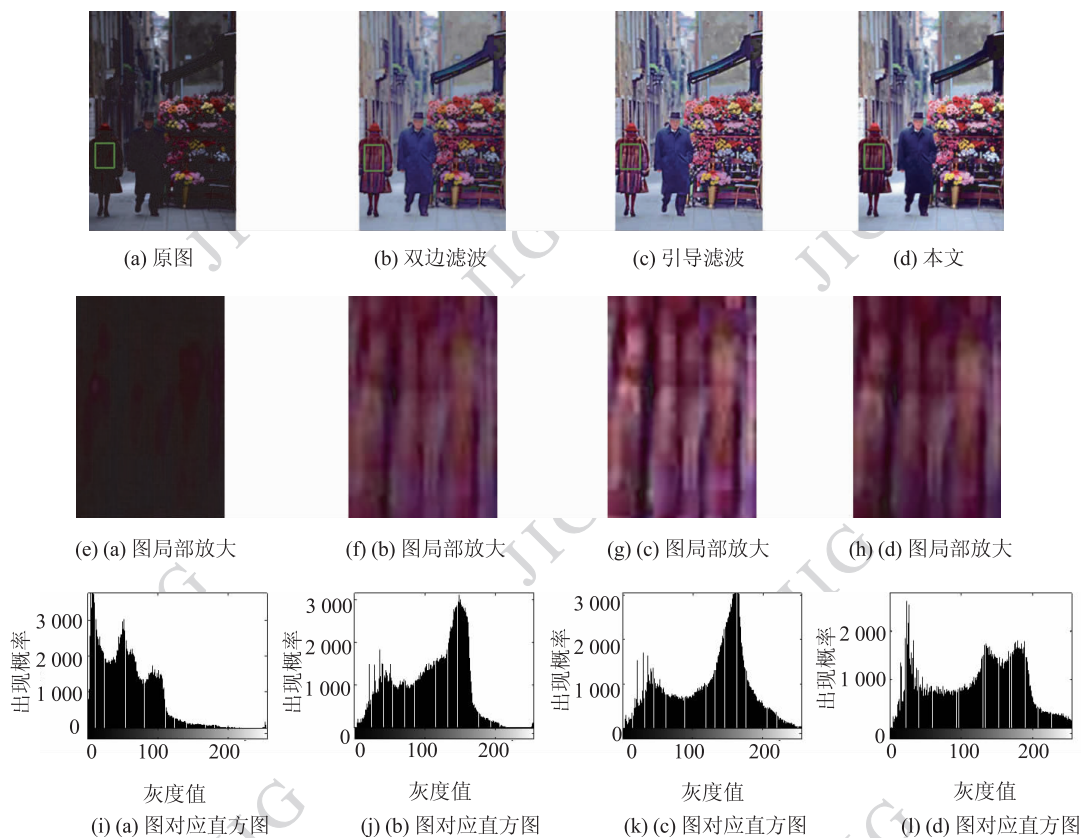


图6 不同算法的处理效果对比1  
Fig. 6 Comparison between different algorithms

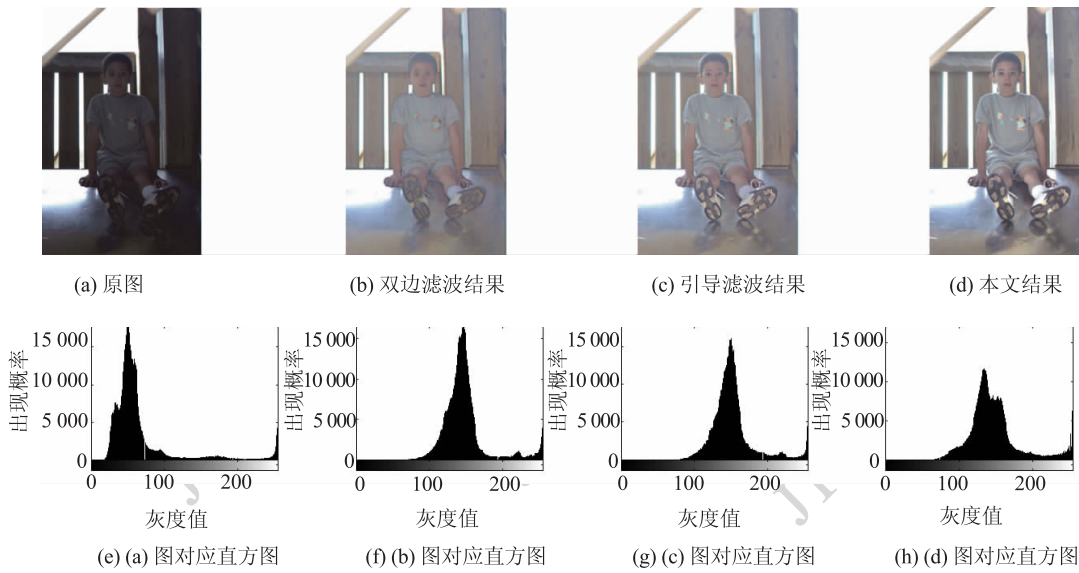


图 7 不同算法的处理效果对比 2

Fig. 7 Comparison between different algorithms

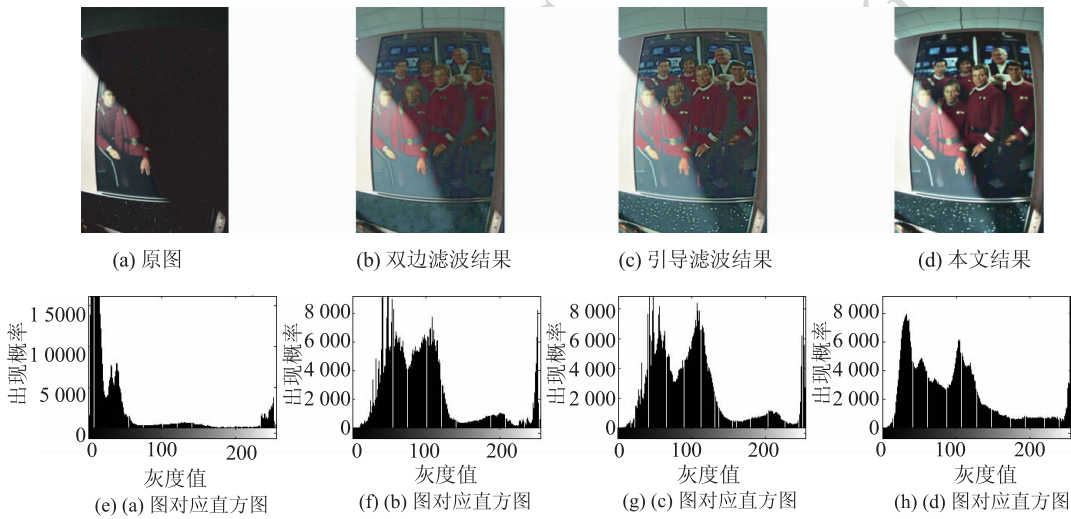


图 8 不同算法的处理效果对比 3

Fig. 8 Comparison between different algorithms

理的结果在边界比较平滑,细节模糊,引导滤波得到的 Retinex 图像在边界比较锐化,细节突出。本文算法得到的 Retinex 图像不仅很好地去除了噪声,而且突出细节,颜色保真效果好,实现细节增强与颜色保真的统一。

### 4.3 统计评价

采用文献[15]提出的基于统计的图像质量评价方法。当灰度均值为 100 到 200,标准方差为 35 到 80 时,图像质量最好,并且  $\bar{I} * \bar{\sigma}$  的值越大图像质量也越好。一般把图像分成不重叠的  $50 \times 50$  的子

块来处理。根据文献[15]提出的方法,分别计算图 6—图 8 的  $\bar{I} * \bar{\sigma}$  值(如表 1)。

从表 1 可以看出:1)原图的  $\bar{I} * \bar{\sigma}$  值比较小,而经过处理后其值有明显的提高,因此,双边滤波器、引导滤波器和本文的算法都改善了图像质量。2)3 种算法的效果分别是:本文算法效果最好,引导滤波器次之,最后是双边滤波器,这与前面的算法分析是一致的。

因此,从主观感觉和客观数据分析角度都能说明,应用本文增强方法得到的 Retinex 图像在质量上有很大的提高。

表 1  $I * \bar{\sigma}$  的统计  
Table 1 Statistics of  $I * \bar{\sigma}$

| 图像  | 统计结果           |                |                |                |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|
|     | 原图             | 双边滤波处理结果       | 引导滤波处理结果       | 本文处理结果         |
| 图 6 | 1.487 5E + 003 | 3.478 0E + 003 | 5.010 3E + 003 | 5.822 5E + 003 |
| 图 7 | 2.150 4E + 003 | 2.596 6E + 003 | 3.087 3E + 003 | 4.006 1E + 003 |
| 图 8 | 742.336 9      | 1.729 8E + 003 | 2.359 8E + 003 | 3.371 3E + 003 |

## 5 结 论

图像引导滤波是 2010 年提出的一种局部线性图像滤波器,具有良好的平滑保边性能。本文首先对图像引导滤波的性能进行了充分分析,论证了其应用于图像增强领域的优势。然后提出了一种基于两次图像引导滤波的 Retinex 算法,在实现良好的增强效果的同时,克服了图像噪声所引起的伪影增强等现象。最后,为实现细节增强与颜色保真的统一,结合小波变换域图像融合策略,提出一种基于图像引导滤波的局部多尺度 Retinex 算法框架。主观观测和客观评价的结果表明,本文算法在克服噪声,细节增强和颜色保真方面能够取得更好的效果。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Land E H. Recent advances in the Retinex theory and some implications for cortical computations: Color vision and the natural image[J]. Proceedings of the National Academy Sciences of the United States of America, 1983, 80(16): 5163-5169.
- [ 2 ] Provenzi E, Fierro M, Rizzi A, et al. Random spray Retinex: a new Retinex implementation to investigate the local properties of the model[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(1): 162-171.
- [ 3 ] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Multi-scale retinex for color image enhancement[C] // Proceedings of International Conference on Lausanne, Image Processing. Vaud, Switzerland; International Conference on Image Processing, 1996: 1003-1006.
- [ 4 ] Jobson D, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround Retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.
- [ 5 ] Jobson D, Rahman Z, Woodell G A. A multiscale retinex for

bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965-976.

- [ 6 ] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering[C] // Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision. Heraklion, Crete, Greece: Lecture Notes in Computer Science, 2010: 1-14.
- [ 7 ] Shi J, Malik J. Normalized cuts and image segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(8): 888-905.
- [ 8 ] Petschnigg G, Agrawala M, Hoppe H, et al. Digital photography with flash and no-flash image pairs [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2004, 23(3): 664-672.
- [ 9 ] Wang R G, Zhang X T, Fang S, et al. A novel Retinex algorithm for image enhancement based on Zernike moment [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(3): 310-315. [汪荣贵, 张新彤, 方帅, 等. 基于 Zernike 矩阵的新型 Retinex 图像增强方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(3): 310-315.]
- [ 10 ] Kimmel R, Elad M, Shaked D, et al. A variational framework for retinex [J]. International Journal of Computer Vision, 2003, 52(1): 7-23.
- [ 11 ] Chan T F, Osher S, Shen J. The digital TV filter and nonlinear denoising [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2): 231-241.
- [ 12 ] Mairal J, Elad M, Sapiro G. Sparse representation for color image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(1): 53-69.
- [ 13 ] Elad M. Retinex by two bilateral filters [C] // Proceedings of the 5th International Conference, Scale-Space. Hofgeismar, Germany: Lecture Notes in Computer Science, 2005: 217-229.
- [ 14 ] Chang S G, Bin Y, Vetterli M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(9): 1532-1546.
- [ 15 ] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. The statistics of visual representation [C] // Proceedings of the International Society for Optical Engineering Visual Information Proceeding. Washington DC, USA: SPIE Press, 2002: 25-35.