

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **1**
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1月 第17卷 第1期(总第189期)

目 次

综述

压缩感知基本理论:回顾与展望 邵文泽, 韦志辉(1)

图像处理和编码

完全质量保持的 AVS 视频可逆信息隐藏算法 郭宝安, 陈彪, 张飏, 于志强, 张卫明(13)

多成分正则化约束的断层图像重建算法 王丽艳, 韦志辉, 李星秀(20)

基于单幅图像景深和大气散射模型的去雾方法 郭珈, 王孝通, 胡程鹏, 徐晓刚(27)

结合 NSS 和小波变换的无参考图像质量评价 金波, 李朝锋, 吴小俊(33)

结合区域分割和双边滤波的图像去噪新算法 杨学志, 徐勇, 方静, 卢洁, 左美霞(40)

种子像素滤波法去除随机脉冲噪声 单建华(49)

基于纹理和亮度感知特性的率失真优化策略 俞力克, 代锋, 张勇东, 林守勋(54)

单通道散焦模糊置换图像的盲分离 王伟, 方勇(62)

侧扫声呐图像的 3 维块匹配降斑方法 范习健, 李庆武, 黄河, 王敏(68)

新适应模型的提出及分类扩散 李彦宝, 姜广峰, 王治强, 刘薇(75)

图像分析和识别

从神经切片图像中识别功能束类型的研究 钟映春, 罗鹏(82)

融合 SPA 遮挡分割的多目标跟踪方法 丁欢, 张文生(90)

目标识别中的稳定图像特征组合发掘 姜永兵, 彭启民(99)

基于结构特征的高分辨率 TerraSAR-X 图像船舶识别方法研究 殷雄, 王超, 张红, 吴樊(106)

图像理解和计算机视觉

机器人的混合特征视觉环境感知方法 杨俊友, 马乐, 白殿春, 东俊光(114)

纹理分布分析的快速图像修复算法 张晴, 林家骏(123)

计算机图形学

圆的整数反走样生成算法 贾银亮, 张焕春, 经亚枝(130)

遥感图像处理

SAR 图像的快速核主成分分析识别方法 于红芸, 姜涛, 关键 (137)

基于图像内容层次表征的遥感图像分割方法 张学良, 肖鹏峰, 冯学智 (142)

地理信息技术

保持几何模式的城市道路路网简化方法 杨必胜, 张云菲, 栾学晨 (150)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健 月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 1 期

2012 年 1 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: 010-68407995 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

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 1 January 2012

Contents

Review

Advances and perspectives on compressed sensing theory *Shao Wenze, Wei Zhihui*(1)

Image Processing and Coding

Complete video quality-preserving reversible data-hiding based on AVS *Guo Bao'an, Chen Biao, Zhang Biao, Yu Zhiqiang, Zhang Weiming*(13)

Morphological component analysis for tomography reconstruction *Wang Liyan, Wei Zhihui, Li Xingxiu*(20)

Single image dehazing based on scene depth and physical model *Guo Jia, Wang Xiaotong, Hu Chengpeng, Xu Xiaogang*(27)

No-reference image quality assessment based on natural scene statistics and wavelet *Jin Bo, Li Chaofeng, Wu Xiaojun*(33)

New filter based on region segmentation and bilateral filtering *Yang Xuezhi, Xu Yong, Fang Jing, Lu Jie, Zuo Meixia*(40)

Removal of random-valued impulse noise based on seed pixels filter *Shan Jianhua*(49)

Novel rate distortion optimization strategy based on perceptual properties of texture and luminance *Yu Like, Dai Feng, Zhang Yongdong, Lin Shouxun*(54)

Blind separation of single-channel permuted defocus blurred image *Wang Wei, Fang Yong*(62)

Side-scan sonar image despeckling based on block-matching and 3D filtering *Fan Xijian, Li Qingwu, Huang He, Wang Min*(68)

New well-posed model and classified diffusion *Li Yanbao, Jiang Guangfeng, Wang Zhiqiang, Liu Wei*(75)

Image Analysis and Recognition

Type recognition of fascicular groups from nerve slice image *Zhong Yingchun, Luo Peng*(82)

Multi-target tracking approach combined with SPA occlusion segmentation *Ding Huan, Zhang Wensheng*(90)

The mining of stable image feature-compositions in object recognition *Jiang Yongbing, Peng Qimin*(99)

Vessel recognition with high resolution terraSAR-X image based on structure feature *Yin Xiong, Wang Chao, Zhang Hong, Wu Fan*(106)

Image Understanding and Computer Vision

Robot vision environmental perception method based on hybrid features *Yang Junyou, Ma Le, Bai Dianchun, Toshimitsu Higashi*(114)

Fast image inpainting algorithm using color texture distribution analysis *Zhang Qing, Lin Jiajun*(123)

Computer Graphics

Integral algorithm for circle anti-aliasing *Jia Yinliang, Zhang Huanchun, Jing Yazhi*(130)

Remote Sensing Image Processing

SAR images recognition based on kernel principal component analysis *Yu Hongyun, Jiang Tao, Guan Jian*(137)

Remotely sensed imagery segmentation based on the hierarchical representation of image content *Zhang Xueliang, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi*(142)

Geoinformatics

Pattern preserving method for grid simplification in road networks *Yang Bisheng, Zhang Yunfei, Luan Xuechen*(150)

中图法分类号: TP301.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)01-0040-09

论文引用格式: 杨学志, 徐勇, 方静, 卢洁, 左美霞. 结合区域分割和双边滤波的图像去噪新算法 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(1): 40-48

结合区域分割和双边滤波的图像去噪新算法

杨学志, 徐勇, 方静, 卢洁, 左美霞

合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009

摘要: 提出一种结合区域分割和双边滤波的图像高斯噪声抑制新算法。基于像素的双边滤波器在滤波时, 由于平滑系数的选择受到噪声的干扰, 在图像边缘区域的滤波存在一定的盲目性, 导致滤波结果中结构信息不能有效保持。本文在图像分割的基础上利用区域图来指导双边滤波过程, 根据区域内的噪声属性和区域间的相似程度来分别计算相应像素间的滤波平滑系数。通过对区域内与区域间进行不同模式的滤波, 增强了滤波算法对图像结构的自适应性。实验结果表明, 该算法在获得良好去噪效果的同时, 能有效保持图像的结构信息。

关键词: 双边滤波; 结构保持能力; 区域连接图; 区域相似度

New filter based on region segmentation and bilateral filtering

Yang Xuezhi, Xu Yong, Fang Jing, Lu Jie, Zuo Meixia

School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract: In this paper, we present a new algorithm to remove Gaussian noise in images by combining region segmentation and bilateral filtering. The pixel-based bilateral filter suffers difficulties in an appropriate selection of the smoothing parameter due to the disturbance of noise, which poses obstacles to the filtering process in dealing with edges and hence degrades the preservation of image structures. Based on the segmentation of images, this work takes advantage of the region map to facilitate the filtering process. Specifically, noise characteristics within regions and similarities between regions are utilized to derive smoothing parameters corresponding to the involved pixels. By applying filtering to pixels within regions and between regions in different means, the algorithm gains enhanced adaptability to image structures. Relative to some existing bilateral filter algorithms, testing results have demonstrated that the proposed algorithm improved the de-noising performance especially on the preservation of structure information.

Key words: bilateral filtering; structure preserve capability; region adjacency graph; region similarity

0 引言

图像中的噪声阻碍了图像处理的进行, 因此图像滤波是图像分析过程中的首要任务。局部加权平均思想常被应用于图像的去噪, 但只利用当前像素的空

间距离来决定邻域像素的滤波权重, 容易使得图像中的边缘结构被平滑。Perona 和 Malik 提出的各向异性扩散滤波器^[1] (AD) 能在一定程度上保持图像的边缘, 但该滤波器需要求解偏微分方程, 同时 P-M 方程 (Perona 和 Malik 提出) 在某些给出初值的问题上可能是病态的^[2], 不具有稳态解, 对初始条件的依赖性

收稿日期: 2011-02-28; 修回日期: 2011-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60672120, 41076120); 安徽省优秀青年科技基金项目 (10040606Y09); 合肥工业大学计算机与信息学院人才培养计划基金项目 (2010HGJXJ0017); 安徽省人才开发基金项目 (2008Z054); 教育部留学回国人员科研启动基金项目

第一作者简介: 杨学志 (1970—), 男, 教授, 2003 年于香港大学获电机与电子工程系信号与信息处理专业博士学位, 主要研究方向为数字图像处理、模式识别、计算机视觉、合成孔径雷达遥感图像处理。E-mail: hfut.cv@gmail.com

较弱,给边缘函数的选取带来困难。此外,AD滤波器对具有高梯度值的脉冲噪声效果并不好。非局部均值滤波器^[3-5],是一种基于结构相似性的滤波算法,对于纹理信息或结构信息呈现很强规律性的图像,该方法可以取得很好的效果,但该滤波算法计算量大,很难满足实时的要求。相比以上两种边缘保持滤波算法,双边滤波^[6](BF)简单且容易实现,作为一种具有边缘保持效果的去噪算法,广泛应用于图像处理与分析中,并在彩色图像处理领域得到了广泛应用^[6-7]。该算法在空间欧氏距离的基础上结合了当前点与其邻域点的亮度相似度,相对于传统的高斯滤波和均值滤波,双边滤波可以在平坦区域和边缘区域进行不同程度的滤波,具有较强的自适应性,对边缘具有保护作用。但经典的双边滤波算法是基于像素的,结构保持效果并没有得到明显提高。同时,噪声的存在会影响亮度加权系数的准确估计,使得双边滤波结果在某些区域存在剩余噪声,抑噪能力不强。

近年来,出现了很多双边滤波器的改进算法^[8-11],如 Xu 等人^[10]提出在对噪声图像进行双边滤波前先进行高斯滤波,使用高斯滤波结果作为当前像素点的估计值,邻域值仍使用原始噪声图像,对双边滤波的灰度滤波器进行一定的修正(GBF);文献^[11]提出二次迭代滤波概念,即用第一次双边滤波的结果来指导第二次双边滤波(DBF)。此外,最近几年,在关于双边滤波的改进算法研究中,出现一种从仅处理高斯噪声,到混合噪声(如高斯噪声叠加脉冲噪声)的处理趋势。如文献^[8]中, Heng-Hua Chang 等人提出结合中值思想的双边滤波改进算法(MBF)。但以上各种算法都存在滤波图像结构丢失的情况,在部分区域伴有平滑现象。

在传统的双边滤波中,灰度滤波器标准差 σ_r 的设置一直是影响双边滤波效果的一个重要因素。Zhang 等人^[9]通过大量实验分析得出 σ_r 与噪声标准差存在线性关系,在噪声比较大时这种线性关系就不再明显,存在很大的波动。本文以区域分割来指导双边滤波平滑系数的设置,通过估计区域内的噪声方差和灰度均值,处理区域内像素之间的滤波;通过结合区域间的相似度处理区域边界上像素的滤波。同时,利用分割各区域之间的均值差异度,对区域内及区域间像素的滤波进行细节处理,解决经典算法在高斯噪声干扰下的盲目性滤波问题,进一步提高双边滤波的自适应性,增强滤波结果的结构保持效果。

1 基于区域分割的双边滤波算法

1.1 双边滤波及区域型滤波算法的提出

双边滤波的权值系数为

$$C(k, l) = \exp\left(-\frac{(I(i, j) - I(k, l))^2}{2\sigma_r^2}\right) \times \exp\left(-\frac{(i - k)^2 + (j - l)^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (1)$$

式中, (i, j) 表示当前像素点, (k, l) 表示邻域点, $I(\cdot)$ 是对应像素点的灰度值, σ_d 是空域滤波器标准差, σ_r 是灰度滤波器标准差。双边滤波的结果为

$$\begin{cases} I(i, j) = C^{-1} \sum_{(k, l) \in \Omega_s} C(k, l) I(k, l) \\ C = \sum_{(k, l) \in \Omega_s} C(k, l) \end{cases} \quad (2)$$

式中, Ω_s 表示局部窗口, 大小为 $(2N + 1) \times (2N + 1)$ (N 取整数), C 是归一化系数。

图像滤波本质上,是借用噪声图像内已有的信息,对真实图像像素值进行预测的过程,即滤波需要指导信息。为了进一步减少图像滤波导致的结构丢失,提出基于区域型的双边滤波算法(RBF),借用图像分割信息指导图像的滤波。该算法是在图像分割的基础上,利用分割区域图对参数 σ_r 进行自适应选取,使用局部噪声方差指导双边滤波,引入区域相似度系数用以处理区域边界像素点间的滤波,同时根据区域的均值差异度抑制分水岭过分割^[12]的影响。

分水岭分割对弱边缘具有良好的响应,可以形成比较完备的封闭连续边缘,为获得区域的形状及统计特征量提供了条件。因此,本文在对噪声图像进行初始滤波后,利用分水岭分割后的区域建立区域连接图,统计相关区域内的噪声属性和区域灰度均值,以节点区域特征构造区域连接图的一元属性;对区域边界像素提出区域相似度的概念,以区域之间的相似关系建立区域连接图的二元属性。通过区域一元属性和二元属性,设置当前像素与其邻域像素之间的平滑系数,实现本文的算法。

1.2 区域连接图与区域相似度

在构造区域连接图的过程中建立区域内的一元属性,即区域均值向量、协方差矩阵,维数由图像信息的特征数决定。在本文算法中,目前只利用了图像的灰度信息,事实上后续改进算法还可以考虑区域形状及高阶统计量等特征。在RBF算法中,特征维数取1,协方差矩阵即是区域的噪声方差,均值向

量为区域灰度均值。

分割的结果可能会形成各种连接形式,与当前区域相邻的区域可能不止一处,并且产生的区域也呈现无规则性,因此需要将当前区域与其周围区域之间的联系——建立起来(图1)。图1中 (i,j) 、 (m,n) 、 (k,l) 点所在区域在迭代滤波后为区域 $S_1(\sigma_1^2, \mu_1)$ 的内部区域。 σ_1^2 与 μ_1 是在迭代滤波后的分割区域图指导下,在噪声图像的相应区域中计算获得。

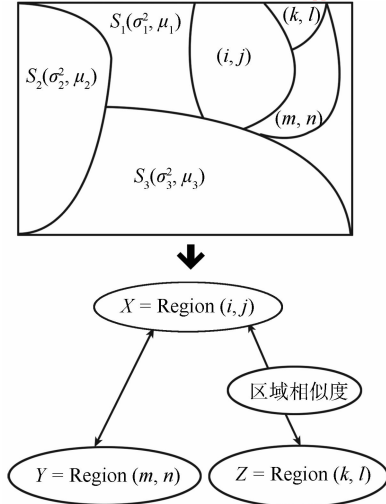


图1 基于分水岭分割的区域连接图

Fig. 1 Region adjacency graph based on the marker-based watershed

对于分割后无规则区域之间的二元属性关系,在编程实现上,采用“无向图”结构,每一节点表示一分割区域,图节点之间的“弧”反映区域之间的二元属性关系。在“图”中,将各区域所对应的边界以链表结构组织,并引出一头指针,方便对各区域边界像素点进行遍历;同时建立区域链表,将“图”中各区域链接起来,各区域均可以访问与自身对应的边界链表。需要说明的是,“图”建立在非迭代滤波分水岭分割图上,即可能存在大量过分割情况,这样可以建立一个更完备的区域连接图。但对各区域噪声及灰度均值的计算是建立在迭代滤波后的分割图上,适度增大分割区域有利于提高噪声图像相应区域统计量的准确性,图2即是本文算法的流程图。

区域之间的二元属性关系是指相邻区域之间的联系程度。本文在考虑区域边界点梯度差值及边界长度的基础上,提出区域间的相似度。区域之间的相似度、区域之间的梯度差值及边界长度之间都存在一定的关系:区域之间的边界点梯度越大,联系程度就越小,边界长度大小也相应地影响到区域相似

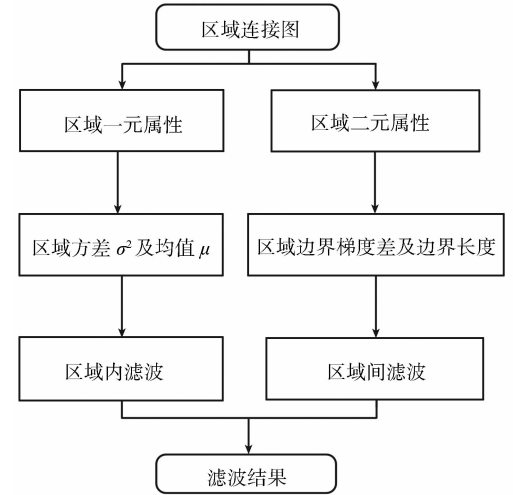
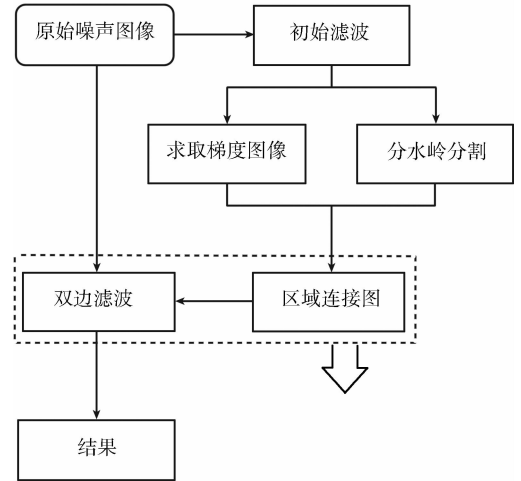


图2 基于区域分割的双边滤波流程

Fig. 2 Flow chart of bilateral filtering based on region segmentation

度的大小。

区域相似度 C 定义为

$$C = \sum_{s \in (R_1 \cap R_2)} f(\nabla s) \quad (3)$$

式中, s 是区域 R_1 与 R_2 之间的边界点, $f(\cdot)$ 是与 s 点梯度值有关的单调非递增函数,采用

$$f(x) = \beta \exp\left(\frac{-x^2}{K}\right) \quad (4)$$

即随着梯度差值的增大, f 值下降的速度越来越快。式中, K 是平滑因子,与图像的局部噪声方差有关; β 是惩罚系数,用于调节具有较长共享边界但灰度突变区域间的相似度。由式(3)可知,区域之间的边界越长,区域相似度 C 就越大。

1.3 基于区域属性的双边滤波

区域内像素间的滤波主要依据区域的一元属性,

区域间像素滤波的权重由区域相似度大小决定。图3是算法的细节部分,其中 $Label(i,j)$ 表示当前点所在区域的标记, $Label(m,n)$ 表示邻域点所在区域标记, $\mu(i,j)$ 、 $\mu(m,n)$ 分别表示当前区域与其邻域区域的均值量, K_1 、 K_2 是均值差度阈值。由于分割结果中可能会有标记相同但特征差异较大的区域块, RBF 算法通过比较区域均值差来降低影响。此外,均值差异度可以帮助判断是否产生过分割,决定采取区域内滤波还是区域间滤波。区域内滤波的表达式为

$$F(i,j) = \left[\sum_{\substack{(m,n) \in \Omega \\ R(i,j) = R(m,n)}} \left(I(m,n) \exp\left(-\frac{(i-m)^2 + (j-n)^2}{2\sigma_d^2}\right) \right) \times \exp\left(-\frac{(I(i,j) - I(m,n))^2}{2\sigma_{ij}^2}\right) \right] / Z_1 \quad (5)$$

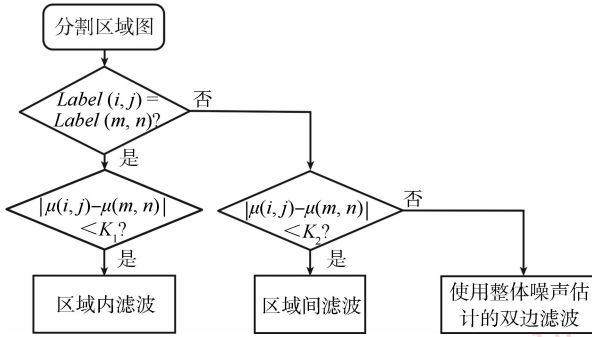


图3 RBF 算法的细化流程图

Fig. 3 Refined flow chart based on RBF algorithm

式(5)中 σ_{ij} 是 (i,j) 所在区域的噪声标准差, Z_1 是归一化系数。一般相同区域内各像素值差别不大,差异主要来自噪声的随机影响,选用局部噪声标准差作为 σ_r 值。因此,可以对图像不同区域构造不同的灰度滤波器,提高滤波器的自适应度。式(6)是区域间滤波表达式。

$$F(i,j) = \left[\sum_{\substack{(m,n) \in \Omega \\ R(i,j) \neq R(m,n)}} \left(I(m,n) \exp\left(-\frac{(i-m)^2 + (j-n)^2}{2\sigma_d^2}\right) \right) \times \frac{C_{R(m,n) \cap R(i,j)}}{C_{ij}} \right] / Z_2 \quad (6)$$

式中, $C_{R(m,n) \cap R(i,j)}$ 是当前区域与点 (m,n) 所在区域的相似度系数, C_{ij} 是当前区域间的共享边界长度, Z_2 是归一化系数。由式(3)(4)(6)知,当像素 (i,j) 与 (m,n) 位于不同区域时,加权系数如式(7)所示。

$$C(m,n) = \exp\left(-\frac{(i-m)^2 + (j-n)^2}{2\sigma_d^2}\right) \times \frac{\beta}{C_{i,j}} \sum_{s \in (R_{i,j} \cap R_{m,n})} \exp\left(-\frac{(\nabla s)^2}{K}\right) \quad (7)$$

式中, K 可以选取区域间较小的噪声方差, ∇s 是边界像素的梯度值。由式(7)知,区域间的滤波,除了一般性的欧氏距离加权外,还包括区域边界属性的影响,即区域相似度变大,相应的高斯加权重会增大,鼓励相似区域间的加权平均。惩罚系数 β 用来修正区域间的相似度系数,取值在 $0 \sim 1$ 之间,在本文实验中, β 为

$$\beta = \exp(-|u(i,j) - u(m,n)|) \quad (8)$$

2 实验结果及分析

2.1 峰值信噪比 (PSNR)

实验结果采用 PSNR 进行性能评价,其表达式为

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{I_{\max}^2}{\left(\sum_{k \in \Omega} (F_k - I_k)^2 \right) / N^2} \quad (9)$$

式中, I_{\max} 是真实图像的峰值, I_k 是真实图像的像素值, F_k 是滤波图像或噪声图像的像素值, N^2 是像素点个数, Ω 是图像空间,峰值信噪比可以从整体上反映滤波算法的去噪性能。

2.2 初始滤波次数对分割的影响

基于区域分割滤波的前提在于获得一个比较精确的初始分割图,但噪声干扰往往会给图像分割带来不确定性,这也是分割指导滤波作用机制的一个困难所在,本文算法的实验是在预滤波后的图像上进行分水岭分割。由于迭代滤波是对滤波结果的再滤波,在一定程度上可以消除噪声的随机性影响,降低滤波的盲目性,同时减少分水岭过分割现象,提高区域属性统计值的准确性,减少因区域像素过少而产生的区域均值和噪声方差估计波动大的问题。

图4是实验原图,表1(s 是迭代次数, σ_n 表示噪声方差)是对 Barbara 图像(图4(a))进行不同次数迭代滤波后分割块数的统计。从中看出多次迭代后,区域数量明显减少,即增大区域面积,这对区域的噪声统计量计算是有利的。图5是对表1中“ $\sigma_n = 30$ ”样本数据的标准差统计示意图。图5说明了区域面积的增大,降低了区域噪声标准差估计的波动,统计值的鲁棒性得到增强。但迭代次数过多时会造成滤波图像过平滑,引起峰值信噪比下降。图6是对不同噪声方差 Barbara 图像的 PSNR 与迭代次数的测试结果,横轴是滤波迭代次数,纵轴是 PSNR 相对滤波前的增长百分比。图6在一定程度上说明迭代次数过多时,对于加入不同方差的噪声,图像的滤波效果都会变差。

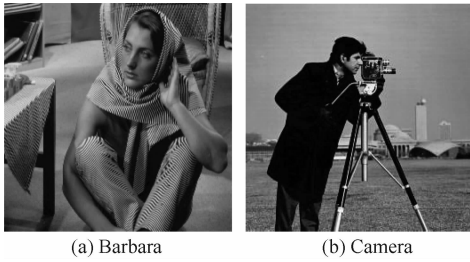


图 4 实验原图

Fig. 4 Original image

表 1 迭代滤波次数对分割区域数量的影响

Table 1 The relations between regions and iterations

s	σ_n				
	10	20	30	40	50
1	4 872	5 559	5 922	6 255	6 271
2	3 764	4 084	4 452	4 462	4 524
3	2 781	2 283	1 969	1 548	1 300

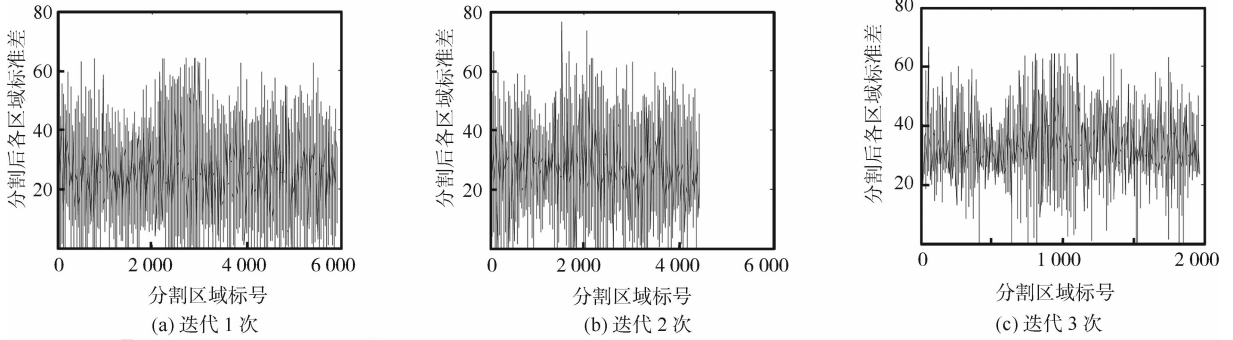


图 5 滤波迭代次数对区域标准差估计的影响

Fig. 5 Estimated impact of regional standard deviation with filtering iteration times

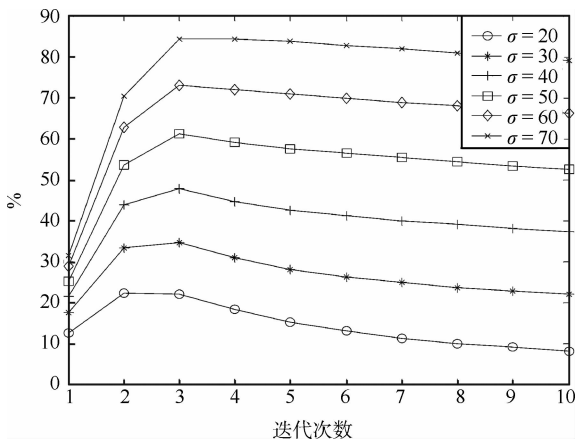


图 6 Barbara 图像 PSNR 与滤波迭代次数的关系

Fig. 6 Relations between PSNR and filtering iteration times on the image of Barbara

2.3 标准图像测试及实验结果分析

文献[9]依据大量的实验结果指出, σ_d 对最优 σ_r 的选取影响不明显(推荐 σ_d 设为 1.5~2.1), 本文采用文献[9]中推荐值。考虑到 σ_d 过大会增加算法的时间复杂度, 同时也会造成边缘区域的过平滑, 在本节实验中 σ_d 取 1.5。初始滤波 σ_r 的取值通过对图像(图 4(a))整体进行噪声估计获得^[13-14]。本

节选取细节信息较丰富的 Barbara 图像(图 4(a))及结构较简单的 Camera 图像(图 4(b))作为实验测试对象, 阈值 K_1 取 5, K_2 取 20。图 7、图 8、图 9 是不同算法对不同噪声方差 Barbara 和 Camera 图像的滤波结果: 其中 (a) 是添加噪声后的图像, σ_n 表示添加的高斯白噪声方差; (b) 为高斯滤波 (GF) 结果; (c) 是双边滤波 (BF) 结果, (d) 为 GBF 滤波结果; (e) 为 RBF 滤波结果; (f) — (i) 分别为 (b) — (e) 与噪声图像之间的差值图像。从差值图像中可看出图像在滤波后的结构丢失情况, 若差值图像中没有明显的有用结构信息出现, 则滤波方法的结构保持性能更好。图 7、图 8 两组实验对比说明, 在噪声较小时, 本文算法具有更好的滤波效果, 尤其在结构保持性能上相对其他算法更好。

对 Camera 图像的测试表明, 当图像的区域结构较为明显时, RBF 方法的结构保持效果更好, 有较明显区域结构的图像对提高初始分割的准确性是有利的, 同时在噪声较低的情况下也可以提高分割的准确性, 如图 7 所示。表 2 是对算法 GF、BF、GBF、RBF 滤波后的峰值信噪比提高的统计, 其中的数据是噪声图像滤波前后的峰值信噪比, 括号中的黑体字表示峰值信噪比在滤波后, 相对滤波前的增长百

分比 R 。由表 2 可以看到 RBF 算法在峰值信噪比上高于其他 3 种方法,同时 RBF 在结构保持能力上,相对 BF 与 GBF 均突出很多。表 2 及图 7—图 9 的差值图像表明,新方法可以在提高峰值信噪比的同时,提高滤波图像的边缘保持能力。事实上若区

域分割更为精确,基于区域分割滤波的效果相应也会提高,不仅可以实现去噪,同时能更好地保护图像的局部区域结构。图 10(a)是从图 8(a)的噪声图像中截取的细节图,图 10(b)—(f)分别是 GF、BF、GBF、DBF、RBF 算法结果^[11]。

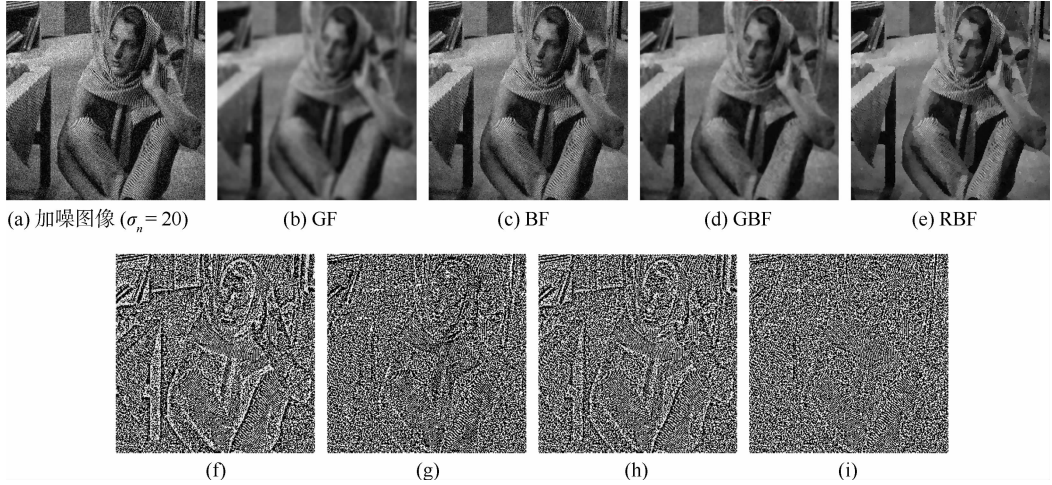


图 7 $\sigma_n = 20$ 时的滤波结果比较

Fig. 7 Comparison of filtering result ($\sigma_n = 20$)

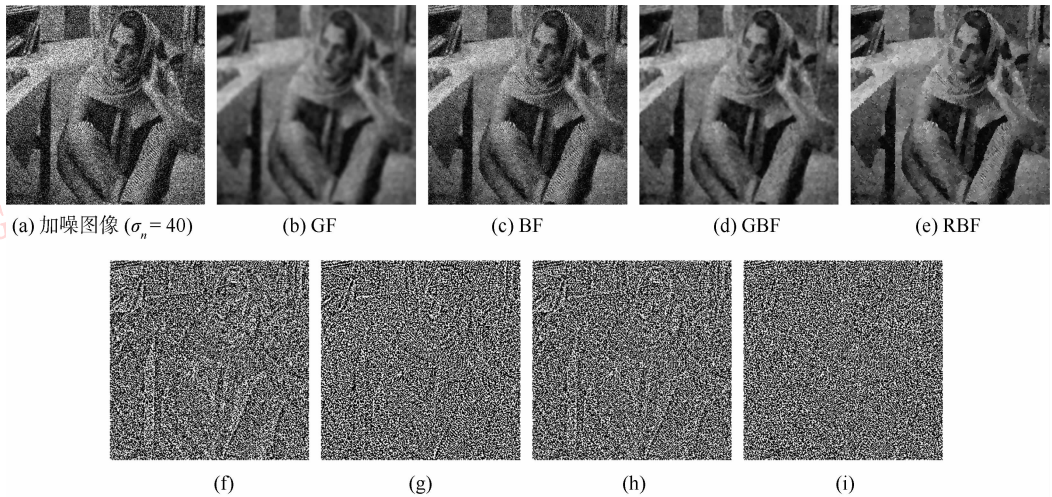


图 8 $\sigma_n = 40$ 时的滤波结果比较

Fig. 8 Comparison of filtering result ($\sigma_n = 40$)

表 2 峰值信噪比统计
Table 2 Stastics on PSNR

		Barbara ($\sigma_n = 20$)	Barbara ($\sigma_n = 40$)	Camera ($\sigma_n = 35$)
滤波前 PSNR/dB		22.40	16.49	17.86
	GF	22.62 (00.98)	22.29 (35.17)	22.34 (25.08)
	BF	25.29 (12.90)	20.26 (22.86)	21.91 (22.67)
滤波后 PSNR/dB ($R/\%$)	GBF	23.82 (06.30)	22.82 (38.38)	24.69 (38.24)
	RBF	25.79 (15.13)	23.12 (40.20)	25.29 (41.60)

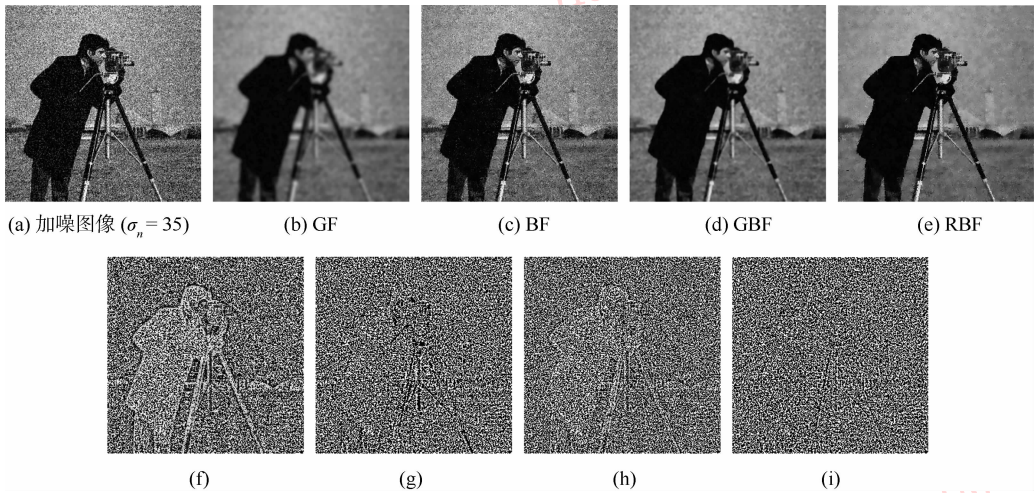


图 9 $\sigma_n = 35$ 时的 Camera 图像滤波结果比较

Fig. 9 Comparison of Camera image's filtering result($\sigma_n = 35$)

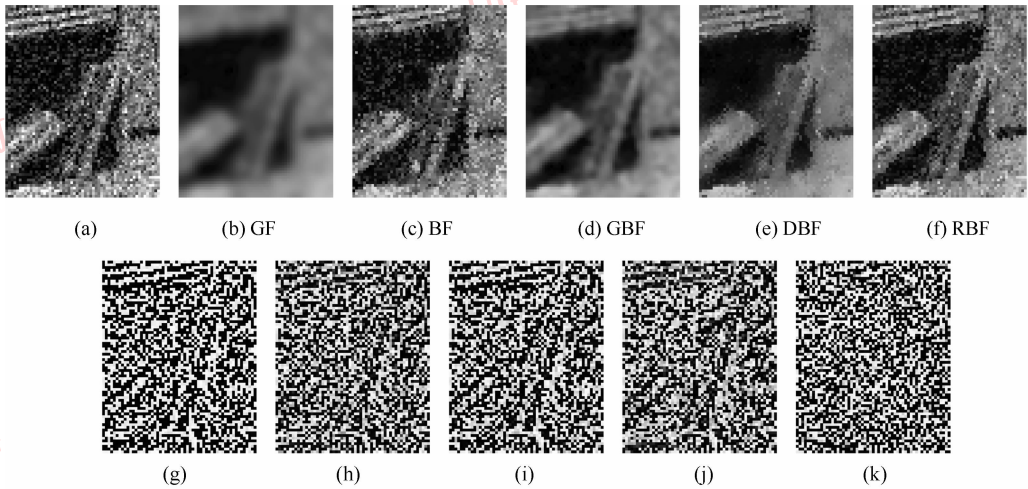


图 10 图像去噪结果的细节比较

Fig. 10 Comparison of details in the image of denoising result

本文算法时间消耗包括两部分：一部分是生成区域分割图的时间，另一部分即是区域指导双边滤波消耗的时间。第 1 部分时间消耗包括 2 次双边滤波，2 次分水岭分割，其中一次分水岭分割用于建立区域连接图，另一次用于求解区域属性。算法实现语言为 C++，系统运行环境：奔腾 CPU，主频是 2.19 GHz，内存是 2 GB。在上述系统运行环境下，针对 512×512 的 Barbara 图像 ($\sigma_n = 30$)，双边滤波一次需要的时间是 2 797 ms，分水岭分割算法时间消耗为 265 ms，构建区域连接图需要的时间为 693 ms；区域指导双边滤波消耗的时间为 3 536 ms，因此 RBF 算法消耗的时间是 10 353 ms。本文算法相对经典的双边滤波，在时间上不占优势，主要消耗在前期处理上，即滤波指导信息的获取上。

2.4 进一步的实验对比及结果分析

鉴于最近几年来，出现了较多的关于双边滤波的改进算法，本小节将 RBF 算法与较新的 DBF 算法，及 MBF 算法进行对比分析，通过实验数据分析出三者之间的相对优劣势。文献 [8] 中提出的算法，是基于中值滤波器对于去脉冲噪声的有效性，而将其引入双边滤波中，使改进的双边滤波器能够有效地处理高斯噪声和脉冲噪声叠加成的混合噪声。由于本文研究的是基于高斯噪声的图像滤波算法，同时，Chang 等人 [8] 指出，MBF 算法对单一的高斯噪声抑制效果也优于传统的 BF 算法，因此本小节通过实验结果间的对比，分析 RBF、DBF、MBF 3 种算法对图像高斯噪声的去除效果。

图 11 (a) 是 256×256 Lena 实验原图，

图 11(b)是对图 11(a)添加方差为 30 的高斯白噪声后的图像(PSNR = 18.93 dB)。图 12 是 3 种算法的滤波结果,其中(a)是 DBF 算法滤波图像,(b)是 MBF 算法的滤波图像,(c)是初始滤波 2 次的 RBF 算法结果,(d)是初始滤波 3 次后的 RBF 算法结果。(e)一(h)分别是滤波结果(a)一(d)与噪声图像(图 11(b))间的差值图像。根据文献[8]中的建议,对于噪声较大时($\sigma_n \geq 30$),MBF 算法中的平衡系数 β 设为较大数,本节实验中 $\beta = 0.5$ 。中值滤波器与空域滤波器的窗口选为 3×3 ,中值高斯函数参数 σ_M ,灰度滤波器参数 σ_r ,满足 $\sigma_M = \sigma_r = \sigma_n$,空域滤波器参数 σ_d 仍取 1.5。表 3 是图 12 实验结果的相关数据统计,包括滤波图像的峰值信噪比和滤波算法运行时间。算法时间

消耗以一次标准双边滤波所需的时间为基本单位,与上小节的实验运行环境一致,一次 BF 算法需要的时间为 565 ms(针对 256×256 的 Lena 图像,即图 11(b))。

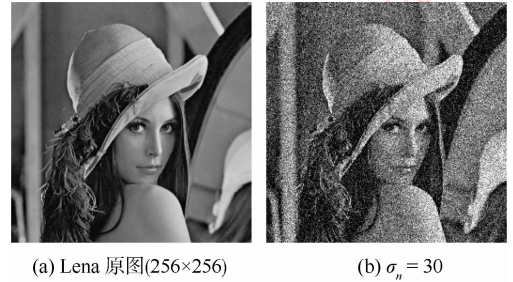


图 11 原图与噪声图像
Fig. 11 Original image and noise image

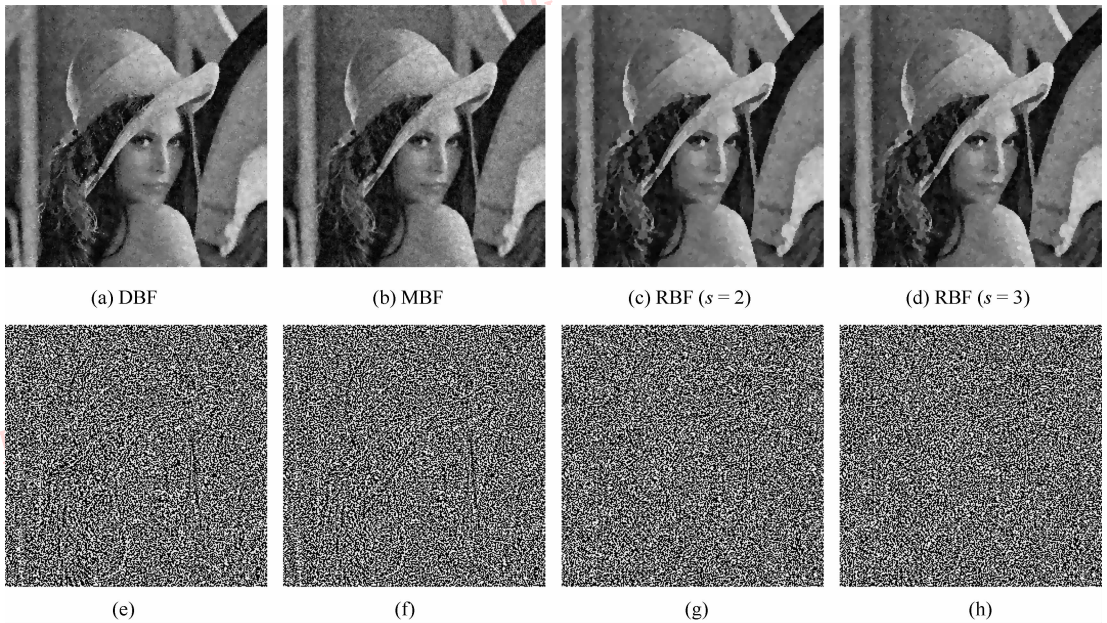


图 12 进一步的实验结果比较

Fig. 12 Further comparison of experimental results

表 3 基于图 12 的实验数据统计

Table 3 Statics for experimental data based on Fig. 12

方法	PSNR/dB(R/%)	算法相对于 BF 运行时间增加倍数
DBF	26.03(37.48)	约 2 倍
MBF	25.70(35.73)	6.9 倍
RBF(s=2)	25.96(37.09)	3.7 倍
RBF(s=3)	25.96(37.07)	4.7 倍

表 3 中的数据说明了两点:1) MBF 算法所需要的时间均超过 DBF 与 RBF 算法所需要的时间,且所选的窗口已是最小(3×3),显然,当窗口进一步增大时,再计算中值像素,所需要的时间会倍增。2) RBF 算法对于初始滤波次数并不敏感,只要适中(2~3 次)即可。注意到 DBF 算法具有最大的峰值信噪比值,同时算法时间消耗也比本文算法小,具有一定的优势,但滤波结果的结构丢失程度大于 RBF 算法,同时 RBF 的 PSNR 值非常逼近 DBF 的 PSNR 值,图像清晰度也更

高。图 12 的实验结果及表 3 中的数据进一步说明,RBF 算法在图像滤波时,进一步权衡了图像去噪与图像细节保持。

3 结 论

针对双边滤波器参数设置的准确性,对滤波算法去噪效果影响的重要性,提出结合区域分割的双边滤波算法。以区域分割指导双边滤波器平滑参数的设置,消除了传统双边滤波及改进双边滤波算法,在图像边缘区域盲目性滤波所导致的结构丢失现象,同时以局部的噪声方差指导双边滤波,提高图像的去噪效果。建立在区域分割图上的图像滤波算法,可以有效提升滤波器的自适应。大量的实验对比及结果分析,验证了 RBF 算法对图像高斯干扰噪声的有效去除。RBF 算法初步探讨了区域分割指导滤波的可行性,对进一步加强滤波与分割之间的有机联系提供了初步探索方向,同时对今后的研究具有一定的参考意义。

参考文献 (References)

- [1] Perona P, Malik J. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1990,12(7):629-639.
- [2] You Y L. Behavioral analysis of anisotropic diffusion in image processing[J]. IEEE IP,1996,5(11):1539-1553.
- [3] Buades A, Coll B, Morel J M. Neighborhood filters and PDE's [J]. Numerical Mathematics,2006,105(1):1-34.
- [4] Buades A, Coll B, Morel J M. Image denoising by non-local averaging [C]//Proceedings of International Conference on

Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway, New Jersey, USA:IEEE,2005:25-28.

- [5] Coil A B, Morel J M. Review of image buades denoising algorithm, with a new one [J]. Multiscale Modeling and Simulation,2005,4(2):490-530.
- [6] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images [C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision. Bombay, India:IEEE,1998:839-846.
- [7] Eisemann E, Durand F. Flash photography enhancement via intrinsic relighting[C]//Proceedings of the Siggraph Conference. Atlanta, USA: ACM Transactions on Graphics, 2004; 23 (3) : 673-678.
- [8] Chang H H, Chu W C. Double bilateral filtering for image noise removal [C]//World Congress on Computer Science and Information Engineering. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society,2009:414.
- [9] Zhang M, Bahadir K G. Multiresolution bilateral filtering for image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(12):2324-2333.
- [10] Xu R F, Sumanta N P. A novel Monte Carlo noise reduction operator[J]. IEEE Computer Graphics and Applications,2005, 25:31-35.
- [11] Zhou Z F, Cao J Z. Image denoising algorithm via doubly bilateral filtering[C]// Information Engineering and Computer Science, Chinese Academic Sciences. Wuhan, China:IEEE,2009:1-4.
- [12] Luc V, Pierre S. Watersheds in digital spaces:an efficient algorithm based on immersion simulations[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1991,13(6):583-598.
- [13] Liu C, William T F, Richard S, et al. Noise estimation from a single image [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Springs, Colorado, USA:IEEE Computer Society,2006,2:901-908.
- [14] Liu C, Richard S. Automatic estimation and removal of noise from a single image [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2008,30(2):299-314.