

基于分块与噪声散点统计的单图噪声估计

华玮平¹ 赵巨峰¹ 李 梦¹ 崔光茫²

¹杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州 310018

²浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 单幅图像的噪声估计对于评价图像以及光学成像系统质量非常重要。提出了一种基于RGB三通道噪声散点统计累计的无参考型图像噪声水平估计方法。图像经过对比敏感函数滤波(CSF),以获取符合人眼观察的图像。图像被分水岭法分割成不同内容区域子块,并对各子块区域进行仿射重建以实现无噪图像的估计。通过含噪图像与无噪估计图像的比较,求取子块的强度与噪声对,获得RGB三通道的强度噪声对散点图。通过对噪声统计累计值的分析,实现噪声水平的估计。实验采用了通用数据库对所提方法进行了测试,并与其他方法进行了对比分析,实验数据表明,本文方法在噪声估计上实现了主客观评价的一致。

关键词 图像处理; 噪声统计累计; 图像分割; 仿射重建; 对比敏感函数

中图分类号 TP391; TN911

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.041006

Single Image Noise Estimation Based on Image Segmentation and Scatter Statistics of Noise

Hua Weiping¹ Zhao Jufeng¹ Li Meng¹ Cui Guangmang²

¹Electronics and Information College, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

²State Key Lab of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract Single image noise estimation is important for evaluating image and optical imaging system. A no-reference image noise estimation approach based on noise scatter statistics and accumulation of RGB three channels is proposed. An image is filtered by contrast sensitivity function (CSF) to match the human visual system, and the image is segmented by watershed method into sub-image patches with different contents, different patches are achieved free noise estimation using affine reconstruction. Then the pairs of intensity and noise are calculated for patches, and a scatter diagram for RGB three channels of intensity and noise is obtained. Through noise statistics and accumulation, the noise level estimation is achieved. The general database is applied to test the proposed method and other methods in the experiment. Experimental results indicate that the proposed method achieves the same evaluation both objective and subjective.

Key words image processing; noise statistics and accumulation; image segmentation; affine reconstruction; contrast sensitivity function

OCIS codes 100.2960; 100.3008; 110.3000

1 引言

成像过程中存在各种原因导致图像退化,而噪声是造成图像退化的最常见因素之一。在图像的处理、分析与目标探测、识别中,需要基于噪声估计辅助实现噪声抑制^[1-2],并且为减小其对后续的影响,先估计噪声后处理^[3-5]是主要思路之一。此外,图像作为光学成像系统的最终产物,图像噪声估计对于评价光学成像系统质量非常重要。近年来,如何合理评定图像噪声水平已经成为热门研究。

图像变换常被应用于噪声估计,比如小波变换^[6-7]。噪声图像被分解为子带系数,表征噪声的方差可根

收稿日期: 2015-10-09; 收到修改稿日期: 2015-12-04; 网络出版日期: 2016-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(61405052)、浙江省“电子科学与技术”重中之重学科开放基金(DZKF009)

作者简介: 华玮平(1992—),男,本科生,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: 564810049@qq.com

导师简介: 赵巨峰(1985—),男,博士,讲师,主要从事光学成像、图像处理等方面的研究。

E-mail: dabaozjf@hdu.edu.cn(通信联系人)

据这些系数来估计获得^[8]。这些方法对于高频噪声有效,但对低频噪声估计能力不足。采用滤波手段可以克服这个缺点,即先使用低通滤波器对含噪图像进行预处理,再使用原图与去噪抑制图像的差的方差来衡量噪声水平^[9-11],但是这类方法的缺陷在于容易忽略图像的边缘与细节对图像噪声估计的影响。

近年来研究者提出一些新型的噪声估计算法表现较为稳健。Tian等^[12]提出使用图解表示法与蚁群优化算法来选择合适的分块,以实现分块基础上的噪声估计。从图像特征出发,在基于统计假设检验基础上可实现快速与可信的高斯噪声估计^[13]。Liu等^[14]提出了噪声水平估计函数来描述真实的噪声分布,认为噪声是图像亮度的函数,并将其很好地应用于图像去噪中。

设计图像噪声估计方法需要考虑两点:1) 无参考型为佳,即单幅图像估计更加切合实际应用;2) 客观噪声估计应与主观评价一致,一种优秀的噪声估计方法对图像的评价评估应该是主客观一致的。本文基于这两点,结合对比敏感函数滤波,采用图像分块思路,分析获取强度-噪声标准差参数对的噪声散点图,提出一种基于噪声散点统计的单图噪声评估度量指标。对于灰度图像或彩色图像都能计算该指标。在整个方法中,先后采用了对比敏感度函数(CSF)主观滤波,分水岭法分割图像,仿射重建实现无噪图像估计,强度-噪声散点图的估计,最终用噪声统计累计值实现三通道下的噪声水平衡量。实验结果表明,本文方法主客观评价一致性好,在噪声评估上有优势。

2 CSF滤波与仿射法信号重建

2.1 图像CSF滤波

人眼主观评价是噪声评价的最佳方式。利用人眼对不同空间频率的响应不同的这一视觉特性与生理规律,引入对比敏感度函数并处理图像以符合主观感受。

以空间频率为横坐标,对比敏感度为纵坐标,所测得的人眼响应曲线即对比敏感度函数。人眼的空间频率响应近似为^[15]

$$S(w) = 1.5 \exp(-\sigma^2 w^2 / 2) - \exp(-2\sigma^2 w^2), \quad (1)$$

式中 $\sigma = 2$, $w = 2\pi f / 60$, 空间频率为 $f = \sqrt{u^2 + v^2}$, u, v 分别代表水平、垂直方向的空间频率分量。由于在高频部分,人眼的响应为各向异性,改进的模型为

$$S_a(u, v) = S(w) \Gamma(w, \theta), \quad (2)$$

$$\Gamma(w, \theta) = \frac{1 + \exp[\beta(w - w_0)] \cos^4 2\theta}{1 + \exp[\beta(w - w_0)]}, \quad (3)$$

式中 $\theta = \arctan^{-1}(v/u)$, 经验数据 $\beta = 8$, $f_0 = 11.13 \text{ cycle}/(\circ)$ 。

对原图像 O , 使用该函数进行预处理, 滤波结果为

$$I(u, v) = O(u, v) S_a(u, v). \quad (4)$$

2.2 仿射法信号重建

从含噪图像中提取无噪信号, 需要进行信号重建。引入仿射优化方法进行图像信号重建, 旨在获取与原始图像接近并直接从图像空间坐标仿射到估计的信号。

为了通过仿射重建 $f_v = A \times L$ 而获得无噪图像信号 f_v 的估计, 需要在含噪图像 I 与坐标矩阵 L 的基础上先获取仿射矩阵 A 。 $v \in \mathbb{R}^2$ 为坐标变量, 例如 v 为 (x_i, y_j) 即第 x_i 行第 y_j 列。对于图像区域 Ω , 满足:

$$A = \arg \min_A \sum_{v \in \Omega} \|I_v - A[v^T \ 1]^T\|^2, \quad (5)$$

式中 $A \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为待求的仿射矩阵。根据(5)式, 设计优化方程:

$$A = \arg \min_A \|I_v - AL\|^2, \quad (6)$$

式中 $I_v \in \mathbb{R}^{3 \times m}$, 3行 m 列, 第一行为 R 值, 第二行为 G 值, 第三行为 B 值, 每一列对应一个像素; m 即像素数; $A \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为仿射矩阵; $L \in \mathbb{R}^{3 \times m}$ 为坐标矩阵, 第一行为纵向坐标(第几行), 第二行为横向坐标(第几列), 第三行全为 1, 每一列对应一个像素的空间位置(与 I 相对应)。利用偏微分优化方法, 推导得最优的 A 满足:

$$L^T AL = L^T I_v, \quad (7)$$

式中 L^T 为 L 的转置。该问题归结为求解极小范数最小二乘解^[16], 因此 A 的解为

$$A = (L^T)^{\dagger} (L^T I_v) L^{\dagger}, \quad (8)$$

式中 L^{\dagger} 为 L 的广义逆。由此, 获得无噪估计即仿射重建解 $f_v = A \times L$ 。

3 噪声水平估计

在噪声水平与像素灰度或亮度相关的前提下, 结合对比敏感函数滤波, 采用图像分块的思路, 分析获取强度—噪声标准差参数对的噪声散点图, 提出一种基于噪声散点统计的单图噪声评估度量指标。整个方法的流程图如图 1 所示。

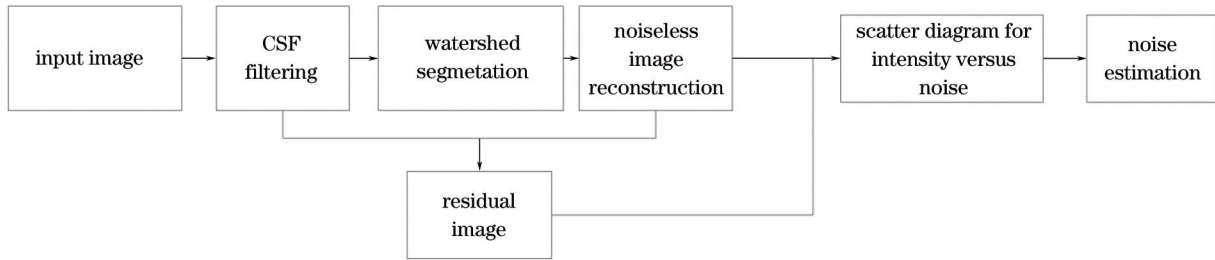


图 1 噪声估计流程图

Fig.1 Flowchart for noise estimation

3.1 分水岭法分割图像

对于不同的内容区域, 同样的噪声级别, 在视觉感受上是有区别的。因此采用分割图像对不同区域进行噪声估计。

在分水岭分割图像之前, 使用了 CSF 滤波对含噪图像进行预处理。利用 CSF 对图像处理前后, 图像在观察特性上有所区别, 如图 2 所示。图 2(a) 是尺寸为 628 pixel×564 pixel 的原图, 图 2(b) 为 CSF 滤波后的图像。从图 2(a)、(b) 对比观察发现, 图像噪声得到抑制, 观察感受更好, 也能减少过分割的产生。

利用分水岭法分割图像, 图像 I 被分割成 i 个区域, 分割块为 $\{\Omega_i\}$, 即 $I = \bigcup_i \Omega_i$, 同时各个区域无交叉 $\Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset$ (当 $i \neq j$)。图 2(a) 原图经 CSF 滤波并分割后, 获得了如图 2(c) 所示的结果。

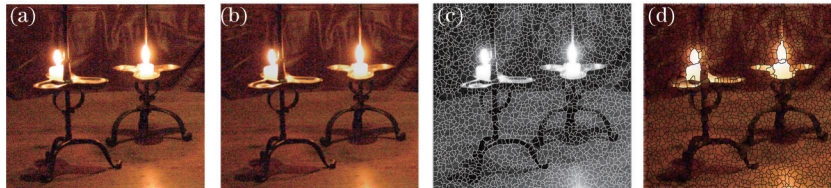


图 2 (a) 原图; (b) CSF 滤波图; (c) 分割图; (d) 重建图

Fig.2 (a) Original image; (b) filtering result with CSF; (c) segmented image; (d) reconstructed image

3.2 重建估计的无噪图

为实现噪声估计, 需要重建估计无噪图像, 采用仿射优化方法实现重建。由于同一个分块, 图像坐标值相对接近, 因此这种方法获取的各个图像分块重建信号, 块内信号比较均匀, 易于计算信号强度并易于后期的信号—噪声对散点图的形成。

对于任意图像区域(分割块) Ω_i , 采用 2.2 节的重建方法实现重建的无噪估计块 f_i 。对于所有的图像块都可以重建, 最终获取重建图像 f 。如图 2(d) 所示, 即为重建的无噪图像, 但图中保留了分割线条。

3.3 噪声散点估计

CSF 滤波后的图像 I 与重建图像 f 的差, 定义为残差图, 残差图 R 反映了噪声的强弱:

$$R = I - f. \quad (9)$$

对于图像的任意分块, 其对应的 f 图中的分块的均值作为强度值, 其对应的 R 图中分块的标准差值作为强度对应的噪声参数即 σ , 得到强度—噪声标准差对。对于所有的分块, 分别对 R 、 G 、 B 三通道进行强度与噪声标准差参数分析, 获得强度—噪声标准差对的散点图, 称之为强度噪声对散点图, 图 3 为图 2(a) 的散点图。图像强度已归一化到 [0 1] 区间。

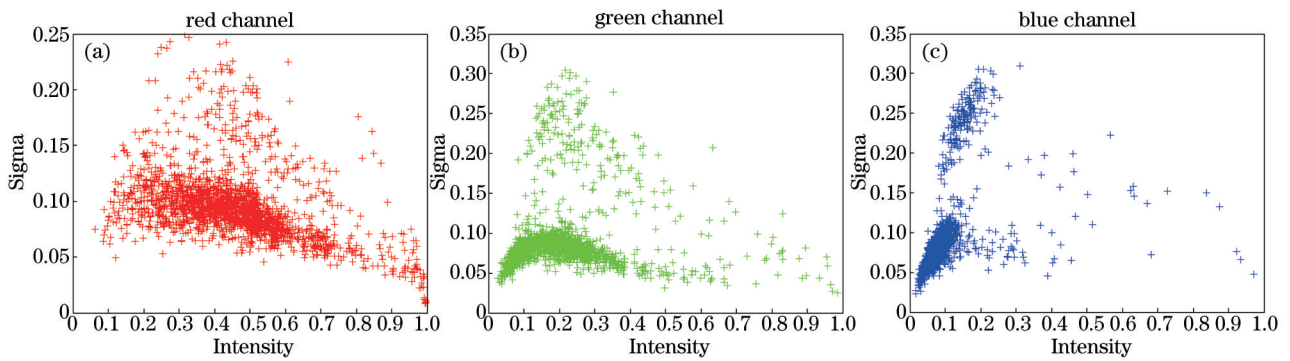


图3 三通道强度-噪声对的散点分布图

Fig.3 Scatter distribution of intensity versus noise for three channels

3.4 噪声水平估计

R 、 G 、 B 三通道的强度-噪声对散点图反应了原图像 O 的噪声水平。为获得单一指标作为噪声水平值利用统计累计值。

对于任意一个通道,图像强度均已归一化到 $[0, 1]$ 区间,并将其等分为 256 个区间 $\{nh, (n+1)h\}_{n=0}^{\frac{1}{h}-1}$, 其中 h 为强度区间的间隔长度 $h = \frac{1}{256}$ 。结合噪声散点的分布,对不同的区间予以不同的权重,区间内散点数多的权重高,散点分布数少的权重小,以区间散点数与散点总数的比作为该区间的权重值。将噪声统计累计值定义为噪声水平:

$$f_{Nl} = \frac{1}{3} \sum_{R,G,B} \left[\sum_{i=1}^{256} \min(\sigma_i) \times \frac{n_i}{n_{total}} \right], \quad (10)$$

式中 $\min(\sigma_i)$ 表示第 i 个区间内噪声方差散点的最小值,并作为区间内的噪声水平估计值。 n_i 为第 i 个区间内的噪声散点数, n_{total} 为散点总数。噪声水平 f_{Nl} 为 R 、 G 、 B 各自通道噪声统计累计值的平均值。但对于灰度图,则只有一个通道。

4 实验与分析

4.1 实验分析与说明

实验台式机为双核 CPU(1.7 GHz),内存 2 GB,运行平台为 Matlab R2010b。

如图 2 所示,CSF 处理前后,分割块数从 1917 下降到 1785,也从侧面说明了 CSF 处理对预防图像过分割的重要性。在时间处理方面,CSF 处理时间为 0.05 s,图像分割耗时 0.22 s,仿射重建用时 8.05 s,噪声散点计算与噪声估计共用 2.1 s,总计时间为 10.42 s。

作为对比,在数据库的实验测试对比中,引入两种参考型的评价方法结构相似性评价(SSIM)^[17]与峰值信噪比(PSNR),以及两种无参考型的评价方法:盲图像质量指数(BIQI)^[18]与基于统计的盲图像指数(BLIINDS)^[19]。

图 4 为经 CSF 滤波前后的的残差图对比(绿色通道),图 4(a)为未经 CSF 的残差图,图 4(b)为经过 CSF 滤波的残差图。该残差图表征了噪声的强弱。对比分析发现,经 CSF 滤波后会避免一些细节被误认为噪声,

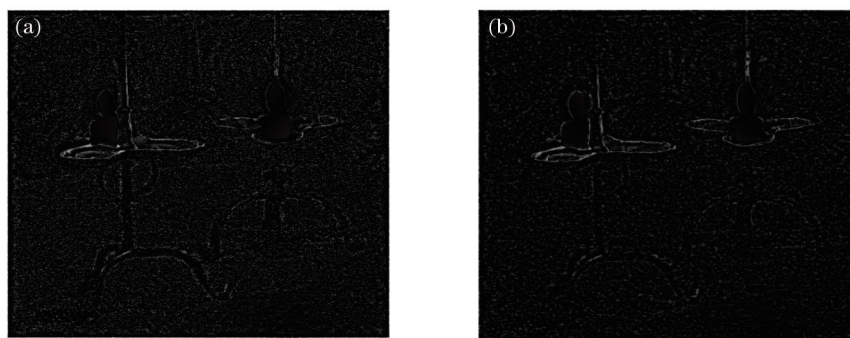


图4 残差图对比(绿色通道)。(a) 未用 CSF 滤波; (b) 利用 CSF 滤波

Fig.4 Comparison of residual images (green channel). (a) Without CSF filtering; (b) with CSF filtering

降低了由于细节干扰导致噪声估计过大的可能性。另外,真实的噪声被相对抑制了,同时从实验结果发现CSF滤波未对最终的估计结果造成较大影响。

4.2 灰度图的仿真实验

本文方法虽然是描写单幅彩色图像的,但对灰度图同样有效。为测试方法的噪声估计能力,选择了两幅清晰图像作为原始输入,分别加入不同程度的高斯噪声,并采用本文方法进行噪声估计。通过与真实值的对比,分析本文方法的优劣。测试的两幅图像如图5所示。

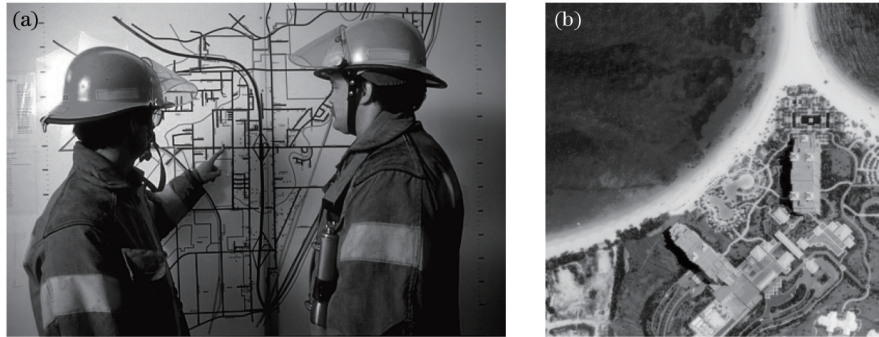


图5 测试的两幅图像

Fig.5 Two images for testing

表1为仿真实验结果。分别对图5(a)、(b)加入标准差为0.01~0.1的高斯噪声,利用本文方法获得估计结果。从表1中可知,估计的结果非常接近真实值。噪声越小时,估计值相对不准;但随着噪声逐渐变大,估计值也更加准确。

表1 噪声估计能力的测试

Table 1 Test for ability of noise estimation

	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
Fig.5 (a)	0.015	0.027	0.033	0.041	0.057	0.064	0.071	0.080	0.087	0.098
Fig.5 (b)	0.012	0.022	0.032	0.040	0.051	0.059	0.069	0.081	0.092	0.098

4.3 彩色图数据库的论证实验

为论证该方法的有效性,使用图像处理领域经常使用的LIVE数据库^[17,20]进行测试,该数据库已经形成了对每张图像的相对差异程度值(DMOS)。选用该LIVE数据库中174幅加入高斯白噪声的图像,其中29幅为无噪参考图像,测试图像均有DMOS值(表示被测图与无噪清晰图的差异程度的主观评价),数值范围0~100。DMOS值越小,则该噪声图主观感受质量越好。

将所选取的174幅图像利用本文方法得出评价指标(NI),并对NI和DMOS进行拟合,得到预测的主观评价(DMOS_p)的拟合曲线。拟合方程^[21]为

$$X_{DMOSp} = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{1 + \exp\left(-\frac{f_{NI} - \alpha_3}{|\alpha_4|}\right)} + \alpha_2, \quad (11)$$

式中 α_i ($i=1,2,3,4$)为拟合参数,结果 $\alpha_i = \{1.1532, 430.2103, -2.8212, 2.1624\}$ ($i=1,2,3,4$)。拟合结果如图6(a)所示。利用拟合方程对LIVE数据库中的噪声图像进行预测,得到预测的主观评价与主观评价的关系如图6(b)所示。由图6可知,真实值与估计值误差较小,反映了主客观评价的一致性。

评价方法的性能一般有以下指标:1)模型预测的准确性:Pearson线性相关系数(CC)、均方根误差(RMSE);2)模型预测的单调性:Spearman等级相关系数(ROCC)。一种优秀的方法需要有高Pearson系数、高Spearman系数以及低RMSE参数。实验所获得性能评价指标的结果如表2所示。

表2 性能评价指标的比较

Table 2 Comparison of performance evaluation metrics

	PSNR	SSIM	BIQI	BLIINDS	NI
RMSE	2.683	3.915	6.930	11.27	5.032
Pearson	0.986	0.970	0.968	0.914	0.956
Spearman	0.986	0.963	0.958	0.890	0.948

从表2可以发现,参考型的两种方法表现最佳,这主要是因为其具有参考图像的最佳信息。但在实际应用中,几乎不存在有参考图像的因素,因此多采用无参考方法。由于具有更小的RMSE,较大的Pearson系数与Spearman系数,所以本文方法的结果比BLIINDS更好。与BIQI相比,该方法具有较小的RMSE,但Spearman系数与Pearson系数相对稍小,综合考察,该方法更适合噪声的估计,而不是作为评价图像质量的直接指标。

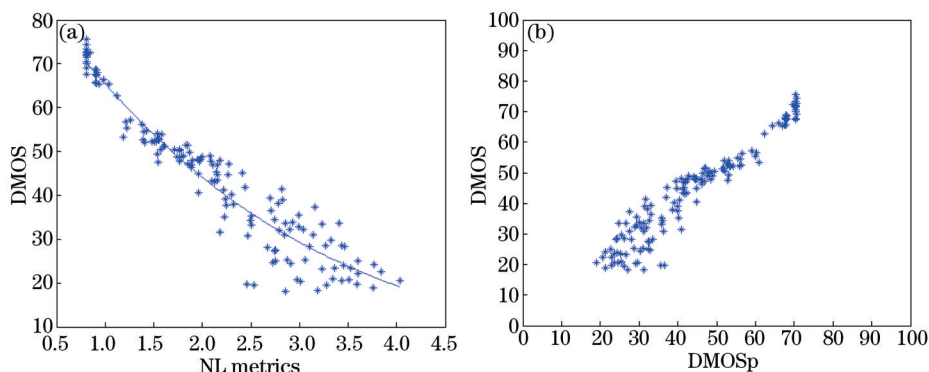


图6 拟合结果比较。(a) 主观评价值与评价指标的关系;(b) 主观评价值与预测值的关系

Fig.6 Comparison of fitting results. (a) Relationship of DMOS and NI metric; (b) relationship of DMOS and DMOSp

5 结 论

针对单幅图像的噪声水平估计,提出了在分割法基础上改进的噪声估计算法。该方法采用了CSF滤波、分水岭法分割图像、仿射重建实现无噪图像估计、强度-噪声散点图的估计,最终采用噪声统计累计值实现三通道下的噪声水平衡量。该方法是一种无参考型的评估方法,相比于参考型的方法更易应用于实际运用中。从实验结果分析,主观值与估计值之间的线性相关度较好,主客观评价一致性好,在噪声评估上有优势。

在未来的工作中,需要继续努力解决几个问题:1) 计算效率的问题,方法总体略显繁杂,计算时间不够快,这需要继续改进。2) 如何使得方法能尽快应用于实际的噪声评估中,如遥感图像的噪声评估等。3) 如何与其他指标结合,形成能与参考型方法相比的无参考图像质量评价指标,比如结合MTF、图像锐度等。4) 该方法的稳健性训练与论证,结合不同景物内容作大量的实验讨论,包括主观实验的对比设计等,以有效提升该方法的稳健性。

参 考 文 献

- 1 Lu Huimin, Xu Ming, Li Xun. Image deblurring with adaptive signal-noise ratio estimation for computational imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0810002.
卢惠民, 徐明, 李迅. 用于计算成像系统的基于信噪比自适应估计的图像去模糊研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0810002.
- 2 Zhang Xin, Jing Xili. A method for image denoising based on normal inverse Gaussian model using Bayesian estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 70-74.
张鑫, 井西利. 一种基于正态反高斯模型的贝叶斯图像去噪方法[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 70-74.
- 3 Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C]. Computer Vision, 1998, Sixth International Conference on, IEEE, 1998: 839-846.
- 4 Dabov K, Foi A, Katkovnik V, et al.. Image denoising by sparse 3D transform-domain collaborative filtering[J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 2007, 16(8): 2080-2095.
- 5 Wang Bin, Hu Liaolin, Cao Jingjing, et al.. Impulse noise removal method based on Moreau envelope smoothing L1/TV norm model[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1211002.
王斌, 胡辽林, 曹京京, 等. 基于Moreau包络平滑L1/全变差范数模型的图像脉冲噪声去除方法[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1211002.
- 6 Zhang Baohua, Liu He. Infrared image denoising algorithm based on sub-band component threshold estimation[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0809002.
张宝华, 刘鹤. 采用子带分量阈值估计的红外图像去噪方法[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0809002.

- 7 Li Dongming, Gai Mengye, Li Chaoran, *et al.*. Research on adaptive optics image denoising algorithm based on the wavelet-based Contourlet transform[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 111001.
李东明, 盖梦野, 李超然, 等. 基于小波域的 Contourlet 变换法的自适应光学图像去噪算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(11): 111001.
- 8 Yang J, Wang Y, Xu W, *et al.*. Image and video denoising using adaptive dual-tree discrete wavelet packets[J]. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 2009, 19(5): 642-655.
- 9 Yang S M, Tai S C. Fast and reliable image-noise estimation using a hybrid approach[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, 19(3): 33007.
- 10 Russo F. Gaussian noise estimation in digital images using nonlinear sharpening and genetic optimization[C]. *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, IEEE*, 2007: 1-5.
- 11 Bilcu R C, Vehvilainen M. New method for noise estimation in images[C]. *Nonlinear Signal and Image Processing, IEEE*, 2005: 25.
- 12 Tian J, Chen L. Image noise estimation using a variation-adaptive evolutionary approach[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2012, 19(7): 395-398.
- 13 Jiang P, Zhang J Z. Fast and reliable noise estimation algorithm based on statistical hypothesis tests[C]. *Visual Communications and Image Processing (VCIP), IEEE*, 2012: 1-5.
- 14 Liu C, Szeliski R, Kang S B, *et al.*. Automatic estimation and removal of noise from a single image[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2008, 30(2): 299-314.
- 15 Miyahara M, Horita Y. Image coding and quality estimation in uniform perceptual space[J]. *ITEJ Technical Report*, 1988, 12(2): 25-32.
- 16 Dai Hua. *Matrix theory*[M]. Beijing: Science Press, 2001: 343-344.
戴 华. *矩阵论*[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 343-344.
- 17 Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, *et al.*. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 2004, 13(4): 600-612.
- 18 Moorthy A K, Bovik A C. A two-step framework for constructing blind image quality indices[J]. *Signal Processing Letters, IEEE*, 2010, 17(5): 513-516.
- 19 Saad M, Bovik A C, Charrier C. A DCT statistics-based blind image quality index[J]. *Signal Processing Letters, IEEE*, 2010, 17(6): 583-586.
- 20 Sheikh H R, Sabir M F, Bovik A C. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms[J]. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 2006, 15(11): 3440-3451.
- 21 Narvekar N D, Karam L J. A no-reference image blur metric based on the cumulative probability of blur detection (CPBD) [J]. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 2011, 20(9): 2678-2683.

栏目编辑: 苏 岑