

结合视觉显著性的图像去噪优化算法

赵 杰 马玉娇 刘帅奇

(河北大学电子信息工程学院 河北 保定 071000) (河北省数字医疗工程重点实验室 河北 保定 071000)

摘 要 图像在采样、处理、传输及存储过程中受到噪声干扰,导致图像的视觉信息衰退,而人眼对图像中不同区域噪声的敏感程度不同,因此提出了结合视觉显著性的图像去噪优化算法。首先利用视觉显著性对噪声图像进行预处理,得到噪声图像中人眼感兴趣的区域;然后运用对图像纹理保护较好的 BM3D 算法对该区域进行去噪处理,对非感兴趣的区域采用运算速度较快的算术均值滤波算法实现去噪处理。结果表明,该方法不仅可以获得较高的主观图像质量评价,而且在客观上相比于单纯地使用 BM3D 算法去噪,运算时间明显缩短。

关键词 图像去噪,视觉显著性,均值滤波,BM3D 算法

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.02.054

Image Denoising Optimization Algorithm Combined with Visual Saliency

ZHAO Jie MA Yu-jiao LIU Shuai-qi

(College of Electronic and Information Engineering, Hebei University, Baoding, Hebei 071000, China)

(Key Laboratory of Digital Medical Engineering of Hebei Province, Hebei University, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract The image is disturbed by noise in the process of sampling, processing, transmission and storage, which leads to the decline of the visual information of image. Based on the difference of sensitivity of the human eyes to the noise in different regions, this paper put forward an improved image denoising algorithm combined with visual significance. Firstly, the algorithm preprocesses the image by visual significance, and gets the interesting region in the image. Then this paper used the BM3D algorithm, which can better protect the image texture, to denoise this region, and used the arithmetic mean filter algorithm with faster computing speed to denoise the non-interest region. The results show that the proposed method can not only obtain higher subjective image quality evaluation, but also reduce the computational time by using BM3D algorithm.

Keywords Image denoising, Visual saliency, Mean filtering, BM3D algorithm

1 引言

当对图像进行获取和传输时,图像通常会受到噪声的污染,为提高图像的品质并突出图像本身的特征,学者们进行了大量的研究。近年来,在图像去噪方面具有良好表现的算法有:完备的多尺度变换域内高斯比例混合模型(Gaussian Scale Mixtures, GSM)^[1]、过完备字典学习算法^[2]、邻域自适应离散余弦变换算法(Shape-adaptive DCT)^[3]、基于互相似块的非局部滤波算法^[4]。目前, Buadesetal 所研究的非局部滤波算法的去噪结果尤为突出,而在非局部滤波算法中,三维块匹配算法(Block Matching 3D, BM3D)^[5-6]是当前比较好的图

像去噪算法之一。

使用 BM3D 去噪后的结果不仅信噪比较高,主观上的视觉感受也很好,但该算法计算复杂,处理图片的耗时较长,因此无法满足实际应用的要求。如何在确保图像品质的前提下提升运算效率一直是研究热点。人眼作为最终图像去噪结果的接收端,在接收图像信息时,对整幅图像不同区域的敏感程度不同。在复杂场景中,人眼的注意力通常只聚焦在某几个视觉显著的目标上,场景中显著的目标最能引起视觉关注^[7]。因此,对图片中的某些区域设定优先级以区分不同区域的重要程度,具有很强的现实意义。

根据视觉显著性计算选择出的图像块大大减少了 BM3D

到稿日期:2017-05-12 返修日期:2017-08-07 本文受国家自然科学基金(61572063,61401308),河北大学自然科学研究计划项目(2014-303),河北大学研究生创新资助项目(X2015085),河北省自然科学基金(F2016201187, F2016201142),河北省高等学校科学技术研究项目(QN2016085, ZC2016040)资助。

赵 杰(1969—),男,博士,教授,主要研究方向为智能数据处理、图像处理与分析、信号检测等,E-mail:zhaojie_hbu@126.com(通信作者);马玉娇(1992—),女,硕士生,主要研究方向为图像处理,E-mail:183876887@qq.com;刘帅奇(1986—),男,博士,副教授,主要研究方向为人机交互、信号处理、SAR 雷达成像、图像处理,E-mail:shdkj-1918@163.com。

算法的计算量,并且其针对人眼感兴趣的部分使用了对纹理保护较好的去噪算法,因此可得到运算时间短且主观评价高的图像去噪结果,在实际应用中具有较高的实用价值。

2 算法介绍

为了高效地得到高视觉保真度的图像去噪结果,本文将视觉显著性算法应用到图像去噪领域。其中基于对比的显著性算法——RC 算法^[8-9]不仅在确定图像块的显著性方面更加准确,而且同 BM3D 一致,是在单一尺度下对图像进行分块预处理,更适用于 BM3D 算法的优化。本文首先使用计算视觉显著性的 RC 算法对图像进行预处理,选择出人眼感兴趣的图像块,再使用去噪效果较好的 BM3D 算法对选择出的图像块进行匹配去噪,同时使用均值滤波算法对人眼不感兴趣的部分进行快速去噪,最终将其合成完整的去噪图像。

2.1 RC 算法

视觉显著性是指在某一场景中的元素吸引人眼注意力能力的强弱。

与现有的显著性算法相比,基于对比的显著性算法是目前效果最佳的方法。常见的基于对比的显著性算法包括 Ma 等提出的 MZ 算法^[10]、Zhai 等提出的 LC 算法^[11]、Cheng 等提出的 RC 算法以及 Goferman 等提出的 CA 算法^[12]。数字图像处理领域中的对比往往是指颜色对比度,然而它同样受空间位置关系的影响。RC 算法将上述几种计算模型的优点结合起来,对图片进行单一尺度的预分割,根据颜色差异和空间位置关系来判别分割后图像块的显著性。

本文将图像分为均匀的 $k \times k$ 大小的图像块,并在单一尺度下进行视觉显著性计算。

对于单一尺度下图像中的任意两个像素 a 和 b ,其空间距离为欧氏距离 $d_p(a,b)$,文献^[13]在 CIELAB 颜色空间中,引入颜色对立维度的概率 $p(a)$ 和 $p(b)$,得到其颜色空间距离为:

$$d_c(a,b) = \sum \sum p(a)p(b)d_p(a,b) \quad (1)$$

对分割后图像块的颜色空间距离也具有类似的定义。选取任意两个图像块 B_i 和 B_j ,假设图像块内像素数目分别为 n_i 和 n_j ,则其 CIELAB 颜色空间距离为:

$$D_c(i,j) = \sum \sum p(i)p(j)D_p(i,j) \quad (2)$$

其中, $p(i)$ 和 $p(j)$ 代表颜色对立维度的概率, $D_p(i,j)$ 为其欧氏距离。接着,计算分块 B_i 和 B_j 间的对比度为:

$$C(i,j) = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=2}^{n_j} D_c(i,j) \quad (3)$$

在单一尺度下分割得到的图像块 B_r 在整体图像中的对比度可以用它与图内其他所有图像块对比度的加权和来表示,记为:

$$C(r) = \sum_{r \neq i} \omega(r,i)C(r,i) \quad (4)$$

其中, $\omega(r,i)$ 为当前图像块与对比块的权值函数,表示关于两个图像块中心像素的欧氏距离的函数。本文中 $\omega(r,i)$ 定义为:

$$\omega(r,i) = \frac{1}{1+d_p(r,i)} \quad (5)$$

空间位置关系是除颜色对比度之外,判断区域显著性的另一个决定因素。两个图像块的距离越近,颜色对比度越高,越能引起人眼注意;如果其距离很远,即使颜色对比度很大,也很难使人眼感兴趣。在图像块的全局对比中,任一图像块的显著性可表示为:

$$S(r) = \sum_{r \neq i} e^{-\frac{C(r)}{\delta^2}} \rho(r)C(r,i) \quad (6)$$

其中, $\rho(r)$ 为区域权值参数; $C(r,i)$ 为当前块与其他块的对比度; $C(r)$ 为当前块的全局对比度; δ 为空间位置关系影响因素,在运算过程中取 $\delta^2 = 0.4$ 。至此,算法完成了在单一尺度下图像块显著性的计算。

2.2 BM3D

BM3D 算法^[5-6]是当前数字图像处理中降噪效果最好的算法之一。在图片去噪处理过程中,首先对块匹配后的三维矩阵进行变换来获得图像块的基础估计,然后根据基础估计图像中的权值对噪声进行滤波处理,最后采用聚集算法将有重叠的块进行重新估值,通过加权平均得到最终图像。

2.2.1 块匹配

块匹配的基本思想是:将图像按照指定尺寸分割成互不重叠的图像块,并假定块内所有像素都具有同等大小的位移量。接着确定搜寻范围和匹配准则,在搜寻范围内搜寻与当前块相似的块,即匹配块(Matching Block)。

本文规定符号 I 表示噪声图像,当前操作的图像块为 B_r ,图像块的尺寸为 $k \times k$ 。用 Q 表示图像 I 搜寻过程中的滑动窗块。通常使用左上角的像素点代表该图像块。因此 $B_r \in I, Q \in I$ 。在块匹配时,以由左到右、由上到下的顺序进行图像块分割及搜寻操作。

首先对由视觉显著性计算筛选出的显著性高的图像块集合中的每个块按顺序进行块匹配操作。选定当前块 B_r 为参考块,并将 B_r 选作中心在以 R 为直径的范围内进行搜寻。

$$\gamma(x) = \begin{cases} 0, & |x| \leq \lambda_{3D}\sigma \\ x, & |x| > \lambda_{3D}\sigma \end{cases} \quad (7)$$

其中, λ_{3D} 是硬阈值滤波的阈值参数; σ 是噪声方差(加性高斯白噪声); $\gamma(x)$ 中的 x 表示图像块的矩阵值,用该图像块左上顶点处的坐标代表 x 。搜索中的两个图像块的距离 d 可由式(8)计算:

$$d(P,Q) = \frac{\|\gamma(P) - \gamma(Q)\|_2^2}{k \times k} \quad (8)$$

其中, $d(P,Q)$ 是指 P, Q 两个图像块的距离,式中分子表示两个块矩阵差的模值,分母表示块的大小。根据式(8)可以计算得到块距离,进而可利用块距离得到矩阵集合 T_p :

$$T_p = \{Q \in I, d(P,Q) \leq \tau_d\} \quad (9)$$

其中, τ_d 为距离阈值。若搜寻块与参考块的距离在阈值范围之内,则将该块归入集合 T_p ,然后对 T_p 中的矩阵集合根据 $d(P,Q)$ 距离排列,形成大小为 $k \times k \times |T_p|$ 的三维矩阵 U_{T_p} 。

2.2.2 三维变换域去噪

三维变换域去噪公式如下:

$$\rho(p) = \tau_{3D}^{-1}(\gamma(\tau_{3D}(U_{T_p}))) \quad (10)$$

其中, τ_{3D} 表示对矩阵 U_{T_p} 的三维酉变换。三维变换域去噪能够使图像的噪声和真实信息在保证能量无损耗的前提下实现分离。图像中的真实信息多数集中在三维矩阵能量顶端, 噪声信息通常集中在三维矩阵能量的底端。变换域的硬阈值滤波利用这一特性可以保证在过滤掉噪声的同时保留绝大部分真实信息。

2.2.3 聚类

在三维变换域滤波之后, 各个图像块及像素会得到一个估计值。 N_p 是当前块在硬阈值滤波之后矩阵系数的非零个数, 则当前块的基础权值估计值 ω_p 可以记为:

$$\omega_p^{basic} = \begin{cases} \frac{1}{N_p}, & N_p \geq 1 \\ 1, & N_p < 1 \end{cases} \quad (11)$$

最终估计权值根据基础估计的三维变换域滤波求得, 表示为:

$$\omega_p^{final} = \frac{|\tau_{3D}(U_{T_p})|^2}{|\tau_{3D}(U_{T_p})|^2 + \sigma^2} \quad (12)$$

所得到的权值越大, 表明图片中混合的噪声成分越少。

$$V(x) = V(x) + \omega_p f_p^Q(x), \forall x \in Q \quad (13)$$

其中, $f_p^Q(x)$ 是指通过三维变换域滤波对图像块的估计值。 $V(x)$ 表示该块估计值的分子。

$$t(x) = t(x) + \omega_p, \forall x \in Q \quad (14)$$

其中, $t(x)$ 表示该块估计值的分母。最后还需要对重叠的块计算其加权平均估计值, 以实现图像去噪。

2.3 均值滤波

通常均值滤波算法^[14]对高斯噪声的滤除效果比较理想。均值滤波算法的去噪原理为: 计算某一个像素及其邻域像素的灰度值的平均值, 用所得平均值来代表该像素的灰度值。

令 W_{xy} 表示位于中心 (x, y) 点处大小为 $m \times n$ 的矩形子窗口的坐标组。算术均值滤波的基本思想就是计算在 W_{xy} 框定区域内被污染图像 $I(x, y)$ 的均值。在图中任一点 (x, y) 处滤波得到的原图像 $f'(x, y)$ 的值即是 W_{xy} 框定区域像素的算术均值。即:

$$f'(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{(s,t) \in W_{xy}} I(s, t) \quad (15)$$

3 算法实现

本文算法主要分为两步: 1) 对噪声图像进行预处理, 其中包括视觉显著性计算及图像块分类; 2) 对显著性不同的图像块分别进行 BM3D 和算术均值滤波两种算法的去噪处理。由于 BM3D 是对单一尺度下分割的图像块进行处理, 经过 RC 算法后对图像进行单一尺度分割, 计算图像块的显著性, 最后通过硬阈值分类的图像块可以直接进行去噪处理, 进一步减少了运算时间。算法流程如下:

Step1 预处理

1) 显著性计算

选定尺寸为 3×3 的基本块对图像进行分割, 为使分块数正好填满整个图像, 对输入图像边界进行 0 填充, 并逐块计算显著性。

① 根据空间距离, 通过式(3)计算图像块之间的对比度。

② 通过式(4)由对比度计算对比度的加权和。

③ 通过式(6), 根据所求的对比度与对比度加权和得到图像块的显著性。

2) 图像块分类

通过硬阈值筛选, 根据显著值将图像块分为显著图像块集合和非显著图像块集合, 并在分类过程中保留图像块原有的位置信息。

① 显著性阈值。阈值过小会导致显著性图像块提取不完全, 得到的显著性区域过小; 而阈值过大则会扩大显著性图像块的提取范围, 导致显著性区域过大, 降低算法去噪的运算效率。经实验, 选取显著性硬阈值 $g = 0.5$, 在此阈值下显著性图像块提取效果最佳。

② 对显著性值 s 进行分类, 若 $S_r \geq g$, 则 $S_r \in Z_s, Z_s$ 即为显著图像块集合; 若 $S_r < g$, 则 $S_r \in Z_n, Z_n$ 即为非显著图像块集合。

Step2 图像去噪

原图像在计算显著性时已按单一尺度进行分割, 在去噪阶段无须再次分割, 直接对分类后的显著图像块与非显著图像块集合进行去噪运算即可。

由于均值滤波对本文图像加入了高斯白噪声, 去噪效果更好, 且在均值滤波中, 算术均值滤波器的计算复杂度最低, 去噪速度最快, 因此本文为了提高总体运算速率, 使用算术均值滤波器对筛选出的人眼不感兴趣的图像块进行去噪处理。

对两个集合分别使用 BM3D 和算术均值滤波同时进行去噪处理, 即对 Z_s 进行 BM3D 运算, 同时将 Z_n 集合中的图像块进行均值滤波去噪处理, 具体流程如下:

1) 首先利用式(8)将 Z_s 集合中的图像块进行块匹配。为获得更高的运算效率, 本文采用快速搜索块匹配算法进行块匹配。将按照相似规则选择出的块集中起来, 然后根据式(9)得到相似块构成的三维矩阵 U_{T_p} 。

2) 对三维矩阵 U_{T_p} 进行三维变换, 由式(10)确定变换域系数, 从而实现硬阈值处理, 减少噪声含量。然后经过三维逆变换求得每个图像块的估计值, 进而由式(13)和式(14)求出各个像素的估计值, 并把这些估值恢复到像素原本的位置。对有重叠的块重新计算估计值, 并对其加权平均, 获得基础估计后的结果 μ^{basic} 。

3) 经过基础估计后得到新三维矩阵 U'_{T_p} 。至此共获得两个三维数组: 第一个是由含噪图像的相似块组成的三维矩阵 U_{T_p} ; 第二个则是在基础估计后得到的图像内相似图像块组成的三维数组 U'_{T_p} 。同时将这两个三维矩阵进行三维变换, 接着使用基础估计得出的权值根据式(10)再次滤波, 随后进行逆变换得到全部图片中图像块的估值, 最后对得到的图像

再次分割,并逐一对新图像块进行估计。将重新分割后的图像块再次使用式(8)进行块匹配,根据式(13)和式(14)求取各像素估值,同时将这些估值恢复到初始位置。对有重叠部分的块重新估值,对其加权平均合成最终结果图 μ_2^{final} 。

4) 将 Z_n 集合中的图像块代入式(15),求得算术均值滤波后所得的去噪图像结果 μ_1^{final} 。

5) 最终去噪结果为 $\mu^{final} = \mu_1^{final} + \mu_2^{final}$ 。

4 实验结果

实验环境为 Intel i5(1.7GHz)处理器,实验平台为 MATLAB R2016b。本文对图片添加不同程度的噪声时对提取显著区域图的影响进行实验分析^[15]。对比实验使用了几种常用的优秀去噪算法及本文算法来对加入 $\sigma=30$ 的噪声图像进行去噪。对去噪算法的评价指标主要包括去噪后图片的信噪比(PSNR)、标准误差(RMSE)、运算时间(Time(s))以及去噪结果的主观评价。经多次实验发现,当取 $\lambda_{3D}=3.0, \tau_d=4000$ 时,所得实验结果最佳,因此本文在该参数下进行了对比实验。

考虑到图像中显著性区域不同可能会对实验结果造成影响,本文选取显著区域比重较大、显著性区域比重较小、多显著性区域、显著性区域不明显 4 种图片进行对比实验,图 1—图 4 为代表图片,图 5—图 8 为其显著性区域图。



图 1 lena
Fig. 1 Lena



图 2 cup
Fig. 2 Cup



图 3 bird
Fig. 3 Bird



图 4 grass
Fig. 4 Grass



图 5 lena 显著性区域图
Fig. 5 Lena salient area



图 6 cup 显著性区域图
Fig. 6 Cup salient area



图 7 bird 显著性区域图
Fig. 7 Bird salient area



图 8 grass 显著性区域图
Fig. 8 Grass salient area

由显著性区域图可以看出,无论是单一显著性区域还是多显著性区域,本文算法都能较准确地提取出显著性区域。而对于显著性区域不明显的图像,提取的结果有一定偏差,但不影响本文算法的使用。

对比实验以图 1 为例,首先对图片分别加入 σ 为 15, 30 和 60 的高斯白噪声(见图 9),对原图及 3 个加入噪声的图片进行显著性计算,提取显著性区域并对显著性区域图进行比较分析,实验结果如图 10 所示。

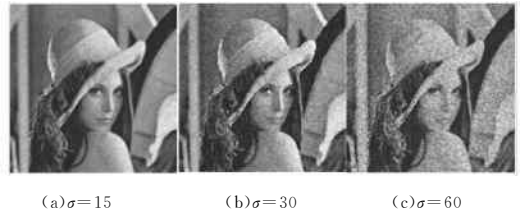


图 9 加噪图像

Fig. 9 Noisy images



(a)原图 (b)噪声 $\sigma=15$



(c)噪声 $\sigma=30$ (d)噪声 $\sigma=60$

图 10 显著性区域图

Fig. 10 Salient area

由图 10 可以看出,噪声越大所得到的显著区域图的显著部分缺失越严重,显著部分提取的准确性越低。虽然显著区域有缺失,但不影响图片大体显著性区域的提取,因此本文提出的算法仍然具有实用价值。

实验将本文算法与 BM3D、均值滤波、DCT、小波^[16] 4 种

算法进行对比。以图 1 为例,5 种算法的去噪处理结果如图 11 所示。

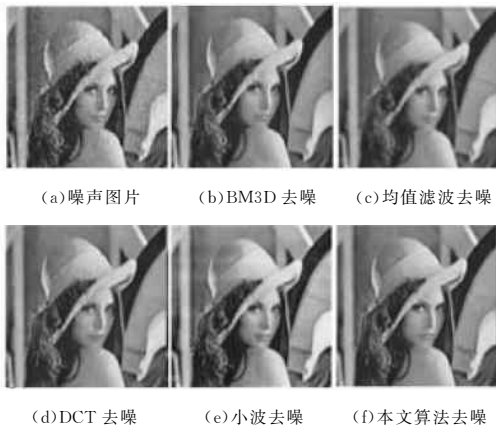


图 11 去噪结果对比

Fig. 11 Comparison of denoising results

利用不同去噪方法对 4 幅图片进行去噪处理,所得的峰值信噪比 (PSNR) 及标准误差 (RMSE) 如表 1 所列。表 2 列出了不同去噪算法处理 4 幅图片所花费的运算时间。

表 1 客观评价比较

Table 1 Objective evaluation comparison

算法	BM3D	均值	DCT	小波	本文方法
图 1	32.91	24.52	26.67	23.32	29.03
	5.76	10.81	8.62	9.28	8.84
图 2	27.80	23.01	24.90	25.68	25.86
	10.38	13.48	14.45	8.76	12.15
图 3	28.51	22.44	27.42	26.10	32.09
	5.63	13.18	20.16	8.94	6.12
图 4	26.36	21.97	22.85	24.55	24.66
	9.32	15.87	10.40	13.93	11.08

注:上方数值代表 PSNR,下方数值代表 RMSE

表 2 运算时间/s

Table 2 Operation Time/s

算法	BM3D	均值	DCT	小波	本文方法
图 1	307	133	250	278	227
图 2	280	109	235	254	182
图 3	273	139	248	225	179
图 4	291	116	252	265	131

由表 1 中的数据可知,本文算法的峰值信噪比 (PSNR) 与 BM3D 算法的结果相近,与均值滤波、DCT 和小波算法相比具有一定优势;本文算法的标准误差 (RMSE) 与其他算法相比也取得了较好的结果。对显著性区域整体比重不同的图片进行比较发现,比重较高的图片获得了更好的客观评价结果。由表 2 中的数据可知,本文算法的运算时间相比 BM3D 算法明显缩短,与其他算法相比在运算时间上也具有很大优势。而且通过对比显著性区域比重不同的图片可以发现,显著性区域比重越小,运算时间优势越明显。

在主观评价方面,本文借助 MOS 标准的综合失真图像库,利用相关系数进行图像质量分析。文献[17-18]对现有 MOS 标准图像数据库做了详细说明,在图像主观评价方面提供了基础数据。

MOS 标准图像库度量的运算原理即利用最小二乘法,获得实际评价标准和标准参考图像的 MOS 相关系数,从而得到与主观评价标准相关的估值,最大值为 5,最小值为 0。所得的 MOS 值越高,主观感受越好。

表 3 列出了 4 幅图像经过本文算法、BM3D、均值滤波、DCT、小波去噪后的主观评价结果(用 MOS 估值表示)。

表 3 主观评价 (MOS) 结果

Table 3 Subjective evaluation results (MOS)

算法	BM3D	均值	DCT	小波	本文方法
图 1	4.22	3.25	3.96	4.03	4.19
图 2	4.14	3.06	3.58	3.72	4.07
图 3	4.58	3.01	4.11	4.23	4.55
图 4	4.30	3.49	3.93	4.01	4.10

通过比较可以发现,本文算法相对于其他几种算法获得了较好的主观评价结果,显著性区域比重对主观评价结果的影响不大,与单一使用 BM3D 进行处理的结果相近。

通过对比客观评价指标和主观评价指标的结果可以发现,本文算法取得了较好的去噪结果,尤其是在主观评价中表现得更加出色。而且对于显著性区域比重较小的图像,本文算法的去噪效率明显提高,较 BM3D 算法的运算时间大大缩短,具有较强的实用价值。

结束语 本文结合了视觉显著性理论对图像去噪算法进行优化,在保证较高主观评价水平的基础上提高运算效率,解决高斯噪声问题。本文算法首先利用 RC 显著性算法计算单一尺度下噪声图像块的显著性大小,经过硬阈值处理对图像块进行分类,将图像块分为显著图像块与非显著图像块。对显著图像块使用保护纹理效果更好的 BM3D 算法进行去噪处理,而非显著图像块则使用运算速度更快的算数均值滤波算法进行去噪处理。由于 BM3D 是对单一尺度图像块进行计算处理,可直接对经过分类的显著图像块进行下一步计算,进一步缩短运算时间。最后将经过不同去噪方法处理的图像块合成得到去噪结果。实验表明,结合视觉显著性的去噪优化算法有较好的主观评价结果,运算效率明显提升,具有较高的实用价值。然而单一尺度下的图像分块在图像处理过程中仍存在边缘模糊等不足,这为今后进一步研究推广该算法提供了切入点。

参考文献

- [1] RAKVONGTHAI Y, AN P N V, ORAINTARA S. Complex Gaussian Scale Mixtures of Complex Wavelet Coefficients [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(7): 3545-3556.
- [2] ELAD M, AHARON M. Image Denoising via Sparse and Redundant Representations over Learned Dictionaries [J]. IEEE Transactions on Image Process, 2006, 15(12): 3736-3745.
- [3] FOI A, KATKOVNIK V, EGIAZARIAN K. Pointwise Shape-Adaptive DCT for High-quality Denoising and Deblocking of Grayscale and Color Images [J]. IEEE Transactions on Image

- Processing, 2007, 16(5):1395-1411.
- [4] XU J, SUN Y B, WEI Z H. Research on Non-Local Means Denoising Algorithm Based on Structural Tension [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(28):178-180. (in Chinese)
许娟, 孙玉宝, 韦志辉. 基于结构张量的 Non-Local Means 去噪算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(28):178-180.
- [5] DABOV K, FOI A, KATKOVNIK V, et al. Image Denoising by Sparse 3D Transform-domain Collaborative Filtering [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(8):2080-2095.
- [6] HUANG M, HUANG W Q, LI J B, et al. Study on parameters based on BM3D image denoising algorithm [J]. Industrial Control Computer, 2014(10):99-101. (in Chinese)
黄牧, 黄文清, 李俊柏, 等. 基于 BM3D 图像去噪算法的参数研究[J]. 工业控制计算机, 2014(10):99-101.
- [7] TANG Y, TONG R, TANG M, et al. Depth incorporating with color improves salient object detection[J]. Visual Computer International Journal of Computer Graphics, 2016, 32(1):111-121.
- [8] CHENG M M, ZHANG G X, MITRA N J, et al. Global contrast based salient region detection[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2011:409-416.
- [9] XU D, TANG Z M, XU W. Numerical object detection of fusion color attribute and spatial information [J]. Journal of Image and Graphics, 2014(4):541-548. (in Chinese)
徐丹, 唐振民, 徐威. 融合颜色属性和空间信息的显著性物体检测[J]. 中国图象图形学报, 2014(4):541-548.
- [10] MA Y F, ZHANG H J. Contrast-based image attention analysis by using fuzzy growing[C]//Proceedings of the Eleventh ACM International Conference on Multimedia. ACM, 2003:374-381.
- [11] ZHAI Y, SHAH M. Visual attention detection in video sequences using spatiotemporal cues [C] // ACM International Conference on Multimedia. Santa Barbara, CA, USA, DBLP, 2006:815-824.
- [12] GOFERMAN S, ZELNIK-MANOR L, TAL A. Context-aware saliency detection [C] // 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2010:2376-2383.
- [13] CHENG M M, ZHANG G X, MITRA N J, et al. Global contrast based salient region detection [C] // 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2011:409-416.
- [14] HAN Z, WANG H B, YU Z T, et al. Image Denoising Algorithm for Bilateral Nonlocal Mean Filter [J]. Journal of Sensors and Microsystems, 2016(6):124-127, 131. (in Chinese)
韩震, 王红斌, 余正涛, 等. 双边非局部均值滤波图像去噪算法[J]. 传感器与微系统, 2016(6):124-127, 131.
- [15] SHAO H, YU T, XU M, et al. Image region duplication detection based on circular window expansion and phase correlation [J]. Forensic Science International, 2012, 222(1-3):71.
- [16] JAIN P, TYAGI V. An Adaptive Edge-Preserving Image Denoising Using Block-Based Singular Value Decomposition in Wavelet Domain [C] // Proceedings of the International Congress on Information and Communication Technology, 2016:19-27.
- [17] CHANDLER D M. Seven Challenges in Image Quality Assessment: Past, Present, and Future Research [C] // ISRN Signal Processing, 2013:53.
- [18] LI L. Empirical Study and Policy Suggestions on the Influence of Chinese Think Tanks [J]. Social Sciences, 2014(4):4-21. (in Chinese)
李凌. 中国智库影响力的实证研究与政策建议[J]. 社会科学, 2014(4):4-21.

(上接第 296 页)

- [7] MORI U, MENDIBURU A, KEOGH E, et al. Reliable early classification of time series based on discriminating the classes over time[J]. Data Mining & Knowledge Discovery, 2016, 31(1):1-31.
- [8] XING Z, PEI J, YU P S, et al. Extracting Interpretable Features for Early Classification on Time Series [C] // Eleventh Siam International Conference on Data Mining (SDM 2011). Mesa, Arizona, USA, 2011:744-757.
- [9] DING C, HE X. Cluster Aggregate Inequality and Multi-level Hierarchical Clustering [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3721:71-83.
- [10] CHEN Y P, KEOGH E, HU B, et al. Abdullah Mueen and Gustavo Batista [OL]. http://www.cs.ucr.edu/~eamonn/time_series_data.
- [11] YUAN J D, WANG Z H. Review of Time Series Representation and Classification Techniques [J]. Computer Science, 2015, 42(3):1-7. (in Chinese)
原继东, 王志海. 时间序列的表示与分类算法综述[J]. 计算机科学, 2015, 42(3):1-7.