

· 生物电子学 ·

基于视觉感受野特性的自适应图像去噪算法

刘玉红^{1,2}, 张艳山¹, 李永杰¹, 杨开富¹, 颜红梅¹

(1. 电子科技大学生命科学与技术学院 成都 610054; 2. 成都医学院物理教研室 成都 610500)

【摘要】针对图像去噪中边缘细节信息丢失的问题,提出一种基于视觉感受野特性的图像去噪算法。该方法基于视觉神经电生理研究结果,模拟视觉初级视皮层自适应机制和感受野的响应特性来实现对图像的去噪。使用小尺度模板对噪声进行检测;根据噪声的大小采用ON/OFF感受野模板去噪处理,对图像进行亮度调整。实验结果表明,与现有的流行算法比较,该算法去噪效果较为有效,并能更好地保留图像纹理和边缘细节信息,在峰值信噪比和均方误差等客观定量评价指标上优于其他算法。

关键词 自适应; 图像去噪; 感受野; 视觉机制

中图分类号 TP394.1

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.06.024

Adaptive Image Denoising Algorithm Based on Visual Receptive Fields Properties

LIU Yu-hong^{1,2}, ZHANG Yan-shan¹, LI Yong-jie¹, YANG Kai-fu¹, and YAN Hong-mei¹

(1. School of Life Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Department of Physics, Chengdu Medical College Chengdu 610500)

Abstract In order to eliminate noise and preserve details in image, an algorithm of image denoising based on visual receptive fields properties is proposed. Based on neuron electrophysiology research result, an image denoising processing has been realized by simulating adaptive mechanism in primary visual cortex and response characteristics of visual receptive fields. First, noise is detected by a small scale template. Then, according to the size and the location of the noise, an ON/OFF receptive field model is applied to adaptively deal with the noise. Finally, the brightness of the image is adjusted. Compared with some current denoising methods, experimental results show that textures and edges information in images processed by this proposed algorithm are better preserved. It is superior to other methods in objective image quality indexes, such as peak signal to noise ratio (PSNR) and mean squared error (MSE). It can not only remove noise in image process, but has ability to strengthen image edge details as well.

Key words adaptive; image denoising; receptive fields; visual mechanism

人类获取信息最直观的来源是图像,但图像在获取、采集、传输、处理过程中难免会受到噪声污染,从而导致图像质量下降,并会对图像后续的处理比如特征提取、模式识别、图像分割等带来不便^[1]。因此,图像去噪算法是一种重要的预处理方法,对提高图像的质量和性能具有重要意义。

图像去噪方法要解决的主要矛盾是如何在降低图像噪声的同时,尽可能地保留图像的细节信息,因此,设计合适的、匹配的滤波器去除噪声是图像处理领域的研究课题。目前常用的方法有均值滤波、

中值滤波^[2]、高斯滤波等,这些方法能够有效去除噪声,但同时也会导致图像结构信息的模糊,尤其是图像的边缘和细节信息。图像的细节和边缘信息属于高频信息,而噪声一般也是高频信息^[3],如果用上述的去噪方法,虽然能去除某些附加的随机噪声,但图像的边缘和细节部分容易产生较为严重的模糊,造成图像质量的下降^[4]。为了更好地抑制图像中的噪声,恢复因噪声污染引起的图像质量的退化,有必要寻找更好的去噪方法。研究人员也提出对应的去噪算法,通过建立一种高斯混合模型进行

收稿日期: 2017-04-28; 修回日期: 2017-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(61573080, 61375115); 国家973计划(2013CB329401)

作者简介: 刘玉红(1982-),女,博士生,副教授,主要从事图像处理方面的研究。

图像去噪^[5]; 利用隐马尔科夫模型进行图像去噪^[6]。但由于这些算法很大程度上依赖于图像的抽象数学特性, 不是一种自适应的方法, 限制了其使用的范围。小波域滤波^[7-8]、偏微分方程^[9-10]、双边滤波器(bilateral filter)算法^[11-13], 虽然这些方法能在一定程度上保存高频信息, 但由于过多保存了高频信息, 对于彩色图像来说, 会导致高频噪声滤除得不够干净。非局部均值滤波方法^[14-15]是近年来一种新型的去噪技术, 此方法主要是基于图像结构信息, 在去噪的同时可以最大程度地保持图像的细节特征, 但平滑区的单向扩散会造成图像结构信息一定程度的模糊, 并且运算量大。

近年来, 许多学者模拟视觉神经机制并应用于图像处理领域, 使图像处理的发展进入一个全新的阶段。模拟视觉信息处理机制一方面帮助人们理解视觉机制, 另一方面帮助建立新的计算方法用于图像处理。如基于视网膜和LGN神经元的感受野机理的模型可用于颜色校正^[16]等视觉任务, 基于初级视皮层感受野特性的计算模型被应用于图像轮廓检测^[17]、纹理分析^[18]等。这些方法的出现激发研究人员考虑如何利用视觉感受野的拮抗作用, 对图像中的噪声信息进行处理。因此, 本文主要根据视觉感受野的响应特性, 提出一种基于视觉感受野的自适应图像去噪模型, 并应用于灰度/彩色图像中。实验结果表明该方法的去噪效果明显, 计算量小, 并且能动态改变模型的参数, 更有效地达到去除噪声的目的, 解决了图像去噪中的一些实际问题, 所获得的结果可进一步为高级图像处理提供应用基础。

1 图像去噪的生物视觉基础

视觉信号的初级处理发生在视网膜上, 而视网膜复杂网络的处理结果和反应特性主要体现在视网膜神经节细胞的感受野上。所以, 感受野是视觉系统信息处理的基本结构和功能单元。神经节细胞的作用主要是汇聚比它低层的信息, 并进一步为比它高层的信息加工环节提供基础。因此对神经节细胞感受野的加工机制进行模拟对视觉算法具有显著性的启示意义。

在视觉系统中, 每个神经元对落在视网膜上图像的特定范围内的刺激会产生相应的反应, 而这个特定的范围就被称为该神经元的感受野^[19]。感受野模型主要有ON-中心型和OFF-中心型两类, 模型如图1所示。在图1a中, “+”代表兴奋区, “-”代表抑制区; 在图1b中, 实线为感受野相应曲线, 虚线和

点线分别为兴奋区和抑制区的响应曲线。给光型“ON”中心感受野, 它主要由中心兴奋区及外周抑制区构成, 功能上为中心-外周拮抗作用, 空间分布为同心圆结构^[20]。这一类细胞的特点表现为当光刺激照射到视网膜神经节细胞感受野中心时, 细胞放电是最为强烈的, 而照射到感受野一定范围的外周时, 细胞放电却逐步减弱。而撤光型“OFF”中心感受野, 它主要由中心抑制区及外周兴奋区构成, 空间分布与“ON”型感受野细胞类似。主要特点表现为当照射到感受野中心外周时, 细胞放电反而增强。在均匀光照下, 这种兴奋性作用和抑制性作用总是趋向于抵消。通过感受野对信息的分级提取, 视觉系统可实现提取关键信息的视觉任务。对生物而言, 这种对光学信息的处理能力能对外界介质所引起的光线退化起着补偿作用, 提高物体的清晰度, 因此, 视觉感受野的“中心-外周”拮抗作用对图像中的噪声抑制具有借鉴作用。

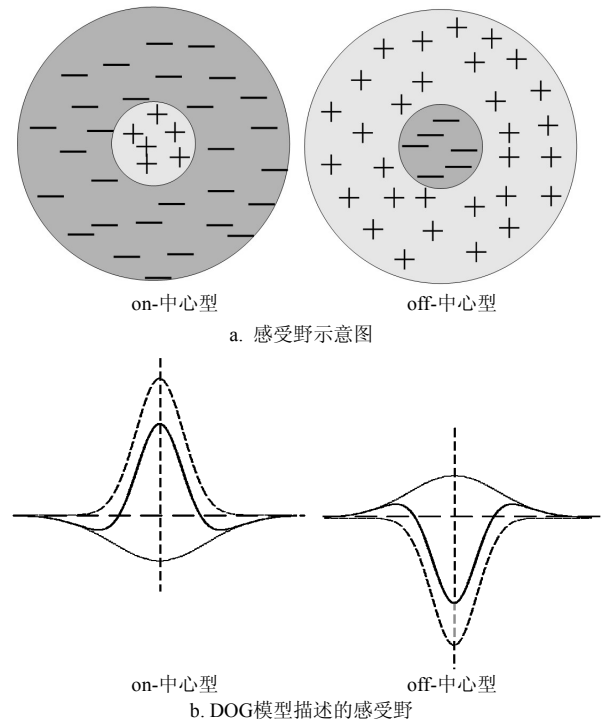


图1 视网膜神经节细胞感受野及DOG模型描述

文献[21]提出了高斯差模型(difference of Gaussian, DOG), 对视网膜神经节细胞感受野的输入和输出特性进行客观定量的描述。高斯差模型很好地模拟了视网膜神经节细胞感受野的同心圆结构以及其空间特性。其表达式为:

$$DOG(x, y) = G_1(x, y) - G_2(x, y) = A_1 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma_1^2}\right) - A_2 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma_2^2}\right) \quad (1)$$

式中, x 和 y 分别表示空间变量; G_1 和 G_2 分别表示兴奋性高斯分布的函数和抑制性分布的高斯函数; A_1 和 A_2 分别表示两种分布的敏感度; σ_1 和 σ_2 分别表示感受野兴奋性和抑制性成分的空间散布程度。该函数可简写为 $\text{DOG}(\sigma_1, \sigma_2, A_1, A_2)$ 。当参数 $A_1 > A_2$ 且 $\sigma_1 < \sigma_2$ 时, DOG模型表示的是ON型感受野; 当参数 $A_1 < A_2$ 且 $\sigma_1 > \sigma_2$ 时, 表示的是OFF型感受野。DOG模型简单有效地模拟了神经节细胞的同心圆结构感受野空间特性, 并具有模型参数少、物理意义明确的优点。感受野模型的尺度不同, 其对图像的处理效果也不同。图像如果经较大尺度感受野模型滤波后, 得到的是图像的轮廓和边缘细节信息, 这对图像的边缘保护和轮廓检测等方面具有重要的作用; 图像经小尺度感受野模型滤波后, 得到一系列的高频散点图, 这对图像去噪的研究具有重要的作用。因此, 可利用不同尺寸的感受野模板对图像进行去噪, 有效地滤除图像中的噪声并保留图像的细节信息。

2 基于视觉感受野的计算模型

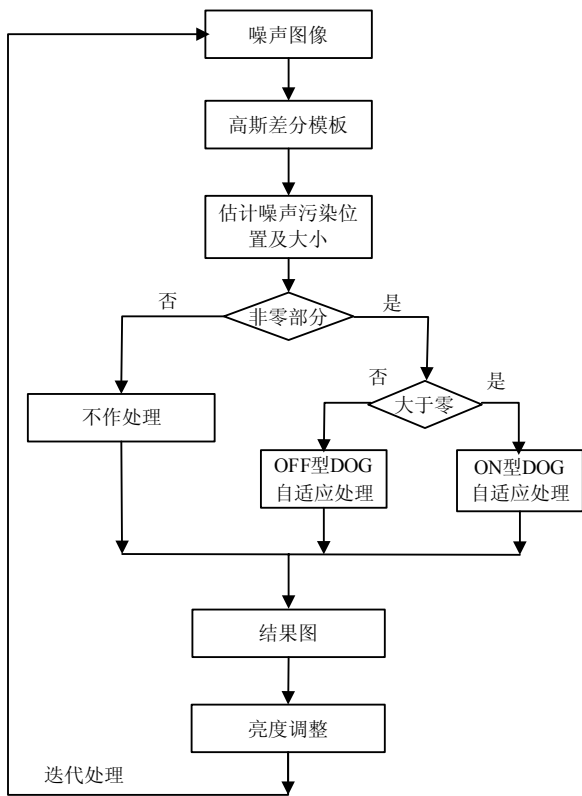


图2 算法处理流程

本文的关键技术在于首先采用视觉感受野的DOG模型判断出噪声信息, 再根据判断出的噪声信息利用相应的感受野神经机制进行处理, 最终达到图像去噪的目的。该算法分为两个步骤: 1) 利用小

尺度的感受野模板判断出噪声的大小和位置; 2) 根据判断出来的噪声大小利用不同的ON/OFF感受野模板进行自适应噪声处理, 同时为了保证图像的亮度, 需要对结果图进行亮度修正。算法流程如图2所示。

2.1 噪声判断计算模型

如果一幅图像混入噪声, 其主要表现为灰度值大于或小于原来无噪声混入时的灰度值。这些噪声主要为高频信息, 并满足灰度分布的平稳性, 从而会引起目标图像模糊和失真。本文采用视觉感受野的DOG模型作为检测噪声的滤波器。DOG模型主要通过高斯函数来描述视觉感受野对光刺激的响应特性量。对于二维图像信号, 利用卷积运算的分离性质, 将式子(1)分解为:

$$C(x, y) = I(x, y) * \text{DOG}(x, y) = I(x, y) * G_1(x, y) - I(x, y) * G_2(x, y) = I(x, y) * \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{x^2+y^2}{\sigma_1^2}} - I(x, y) * \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{x^2+y^2}{\sigma_2^2}} \quad (2)$$

式中, $I(x, y)$ 表示该点的像素值; $C(x, y)$ 表示经过小尺度滤波后得到的像素值。根据 σ_1, σ_2 可以调整模板的大小, 因此判断噪声的函数可简写为 $\text{DOG}(\sigma_1, \sigma_2)$ 。式(2)表示了噪声判断的模型, 可理解为单独的两个二维高斯函数分别与图像做卷积处理后所得到的两个高斯差值。对于高斯函数而言, σ 越大, 高斯函数就越平坦, 能量就会相对分散; 如果 σ 越小, 高斯函数就越陡峭, 能量会相对集中。因此, 如果所设置的 σ_1 大于噪声值并小于目标值, 就能对图像进行去除噪声的同时保持目标信息; 如果 σ_2 大于目标尺寸, 则会平滑高频噪声, 获得变化相对缓慢的低频信息。为了尽可能检测出更多的噪声, 并基于各参数一定的约束条件下, 通过具体实验进行性能比较和测试, σ_1, σ_2 分别取0.1和0.08, 可获得最小尺度半径为 3×3 像素形式的检测噪声模板。

2.2 噪声处理算法描述

被噪声污染的图像经过小尺度的DOG模板滤波后, 可得到图像的噪声信息。通过所计算的噪声图可得, 如果图像信息被噪声所污染, 那么原像素值可能会存在变小或变大的情况。因此, 本文采用“中心-外周”生理机制的视网膜神经节感受野模型, 把被噪声污染后变大的像素值变小, 使之接近甚至恢复到原值。同理, 把被噪声污染后变小的像素值变大, 使之接近甚至恢复到原值。同时电生理实验的结果表明, 感受野对外界刺激的响应随时间是动态变化的。因此, 把感受野静态模型设计为动态模型,

可对不同噪声来进行处理, 更加符合视网膜生理特性。

根据前面的讨论, 本文基于视网膜神经节细胞感受野模型来建立噪声处理模型。

1) 用“内正-外负”的“ON”型感受野模型来处理使原始像素变大的噪声点。

2) 用“内负-外正”的“OFF”型感受野模型来处理使原始像素变小的噪声点。

3) 根据噪声点的绝对值大小, 自适应调节视觉感受野模板的尺度参数。如果该点的值为正, 且值较大, 本文采用ON型感受野模板自适应调节外周抑制半径, 使外周的半径增大, 这样对噪声点的抑制强度就会更大, 使该点的像素值接近原值。如果该点的值比较小, 同样可自适应调节外周的抑制半径, 使外周抑制半径减小, 这样对噪声点抑制的强度相对减弱, 使该点像素值接近原值。如果噪声点的值为负, 采用OFF型的感受野来处理, 自适应调节外周半径的尺寸, 对该点进行处理, 使该点的像素值恢复或接近原值。另外, 如果噪声值为零, 则不需要做任何处理。

4) 迭代处理。具体的迭代次数可根据每次处理后对结果图的主观图像质量评价和客观图像质量评价相结合的方式判定, 是可选择的参数, 从测试中发现, 并不是迭代次数越多越好, 一般迭代2~3次能够获得较好的结果。

2.3 模型参数的确定

噪声处理表达式为:

$$\begin{cases} C(x,y) > 0 & H(x,y) = I(x,y) * DOG(x,y)_{ON} \\ C(x,y) < 0 & H(x,y) = I(x,y) * DOG(x,y)_{OFF} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $DOG(x,y)_{ON}$ 为ON型感受野; $DOG(x,y)_{OFF}$ 为OFF型感受野。噪声处理算法中, 无论是ON、OFF型DOG函数, 感受野尺寸的大小主要根据噪声绝对值的大小自适应调节。在模型中, DOG函数共有四个可变参数, 经测试后, 发现改变其中两个参数的处理结果与改变四个参数的处理结果基本相同, 因此, $DOG(x,y)_{ON}$ 选择改变参数“ A_2 ”, $DOG(x,y)_{OFF}$ 选择改变“ σ_1 ”来自适应调整DOG模板参数, 使之达到更好的去噪效果。

1) 对于 $DOG(x,y)_{ON}$, 选择微调参数 A_2 , 微调函数为:

$$A_2 = k_1 \left(1 + \frac{1}{1 + e^{-c(x,y)}} \right) \quad (4)$$

经过测试, 最优的 k_1 取0.2。 $C(x,y)$ 是噪声点的值。微调函数的作用是根据噪声点值的大小用不同尺度的模板进行处理, 使被噪声污染的像素点接近

甚至恢复到原值。

2) 对于 $DOG(x,y)_{OFF}$, 选择微调参数 σ_1 , 微调函数为:

$$\sigma_1 = k_2 \left(1 + \frac{1}{1 + e^{-c(x,y)}} \right) \quad (5)$$

根据噪声值的大小, 使 σ_1 在 k_2 上下浮动, 自适应改变模板尺寸。微调函数的作用就是使不同的噪声值可用不同尺度大小的模板函数来处理, 这样更符合视网膜感受野自适应的特性。经过测试, 最优的 k_2 取1.2。

根据噪声值的大小自适应调节感受野模板尺寸的特性, 使原为静态的去噪模型变为动态模型, 更加符合调制强度随外界刺激变化的生理特性, 并提高了图像的信噪比。

2.4 修正

与原图相比, 经处理后的图像亮度值可能会发生改变^[19]。因此, 需要对上述处理后的结果图进行亮度校正, 使其亮度值保持在原亮度的范围内。亮度校正函数为:

$$I_{result} = L + II \quad (6)$$

式中, I_{result} 表示输出的最终结果; L 表示的是噪声与结果图的平均亮度值之差; II 代表为自适应处理后的结果图。经亮度校正后, 处理的效果有可能还没达到最优情况, 且受噪声污染的值增大或变小的点还未恢复到原值或接近原值的情况, 就需要继续依照上述步骤进行下一次迭代处理, 使被噪声污染的值更进一步接近原值, 直到图像处理效果有较明显的改善。经以上步骤的处理, 图像中的噪声可以得到抑制, 边缘及细节信息得以保留, 具体的结果详见实验结果和分析部分。

3 实验结果和分析

在本文的实验中, 首先表明了ON/OFF通道在去噪中的贡献, 然后展示了本文模型的去噪效果, 并与经典的去噪算法进行性能对比。

3.1 ON/OFF去噪效果的贡献

本文以Star图像为例, ON型感受野和OFF型感受野通过对正负噪声点的响应, 使该点的像素点接近原值。图3展示了ON/OFF通路对噪声图像的影响。图3a是输入的噪声图像, 图3b是ON型感受野单独处理后的结果, 主要根据“估计噪声”找出使原图像素值变大的噪声点, 利用ON型感受野去抑制噪声图, 使变大像素值抑制到接近原值。图3c是OFF型感受野单独处理后的结果, 使变小的像素值提升,

接近于原像素值，噪声也得到了部分抑制。图3d是ON/OFF感受野联合处理结果。通过对比可看出，

ON/OFF联合处理噪声得到了很大的抑制，图像的内容保留得很好，画质更为细腻。

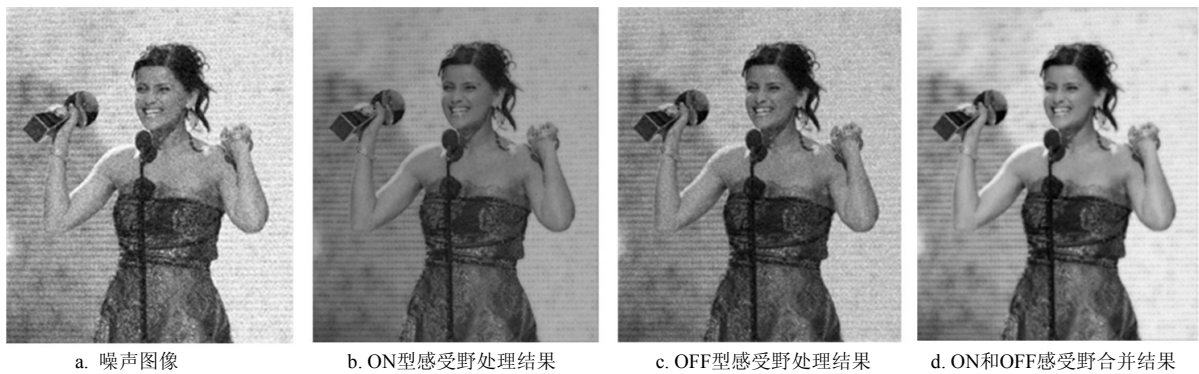


图3 噪声处理图

3.2 本文模型去噪效果

本文以Carrier图像为例对图像去噪前后的结果进行对比，如图4所示。从处理结果可看出，结果图中噪声基本被抑制，并且图像的边缘和细节特征也得到保留。图像结果图对比可进一步说明，本文的算法有效地将噪声图像基本恢复到接近于原图。具

体细节保留情况如图5所示。噪声图像中的Carrier细节部分基本上被噪声所淹没，经去噪后，细节部分可以很好地呈现出来。

根据以上的实验分析可知，本文提出的基于感受野特性所构建的图像去噪算法，去噪效果明显，并能很好地保留图像纹理和细节信息。

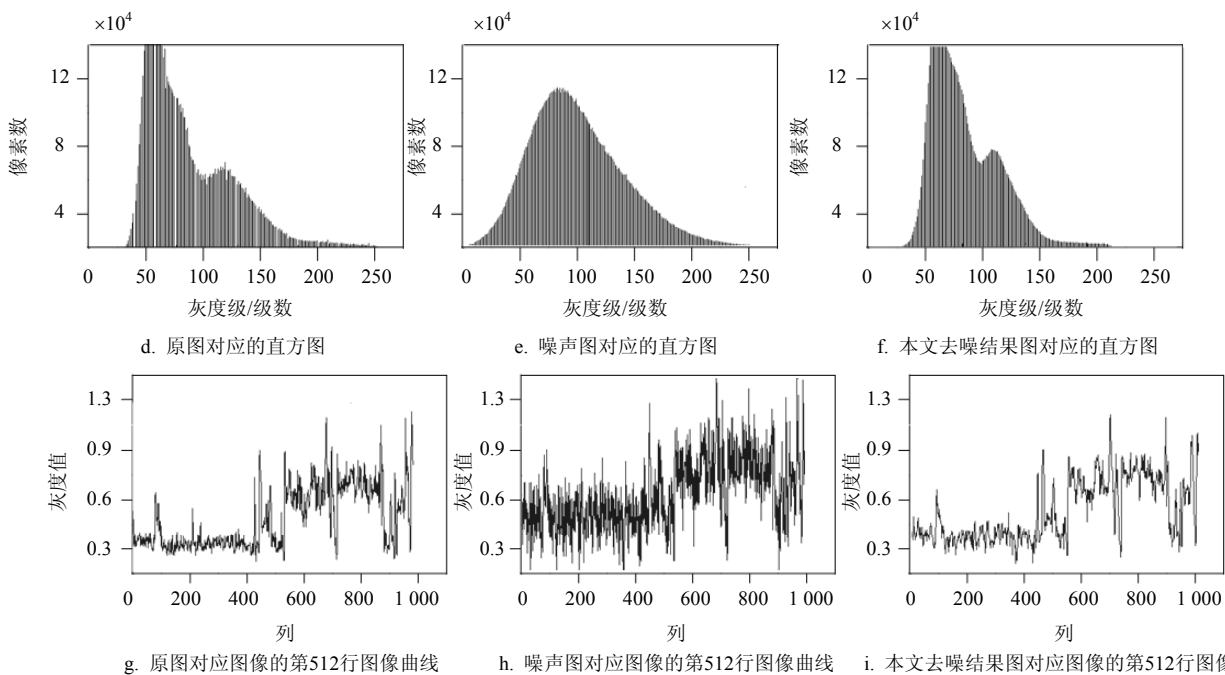
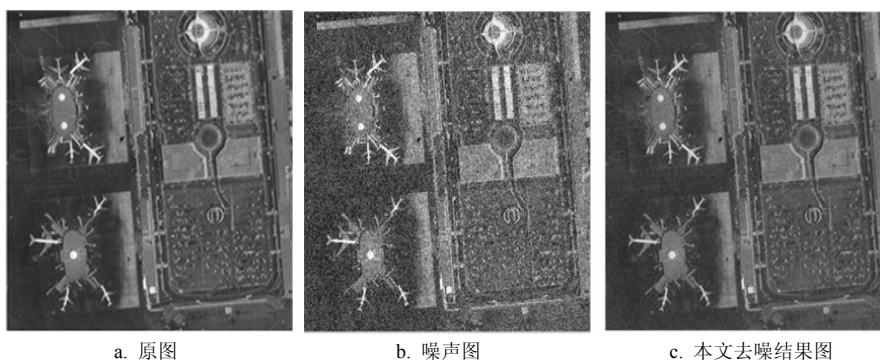


图4 实验结果分析图

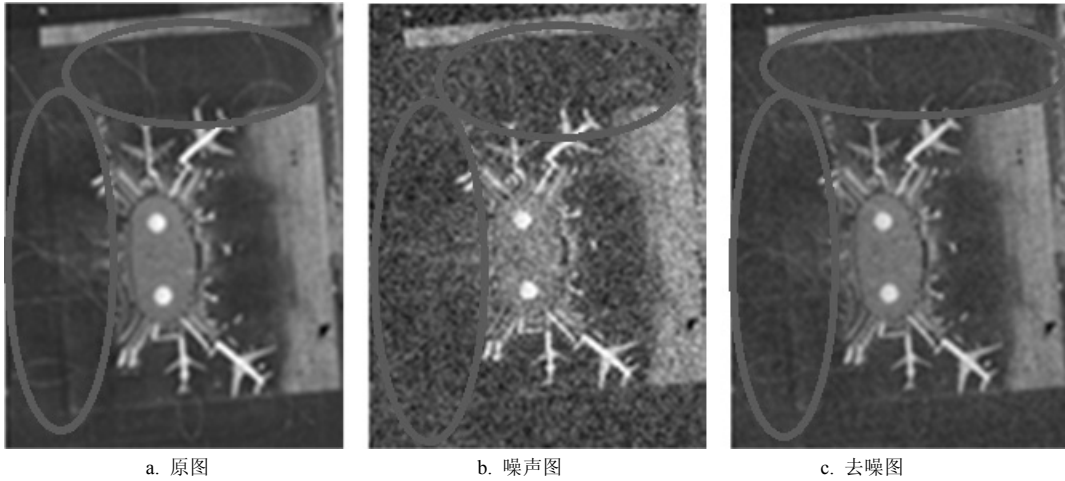


图5 结果对比图

3.3 本文模型与现有去噪算法比较

本文实现了灰度图像去噪处理, 进一步将该算法引入到彩色图像去噪中, 并选择Gorilla彩色图像作为示例图, 处理结果如图6所示。分别把彩色图像分解为R、G、B三个分量, 然后对R、G、B分量按照上述去噪流程进行处理, 最后将各分量图像组合得到去噪后的彩色图像。为了验证该算法的有效性, 从标准图像数据库中选取了灰度图像以及彩色图像共16幅。分别用高斯滤波器去噪算法和应用比较广泛的双边滤波器、非局部均值滤波器与本文方法进行比较。同样以Gorilla图像(图6)为示例图。图6a~图6e表示的是各算法整体图像的去噪效果比较, 图6f~图6j截取的是各算法结果图的局部块放大去噪

效果的对比。本文算法对图像的边缘保护较好, 而高斯算法和非均值去噪算法会使图像结构有一定程度的模糊。双边滤波器图像边缘保护较好, 但是平滑去残余的噪声使得图像PSNR降低。而本文算法能够在去噪的同时, 很好地保留低频成分以及高频成分。图6的去噪方法均在RGB颜色空间中进行处理的, 在RGB颜色空间下, 高斯去噪和非局部均值去噪的图像细节表示不够清晰, 出现平滑现象。双边滤波方法视觉效果已有所改善, 但是去噪后的图像仍然存在一些斑点。总体来看, 各算法处理后的图像对颜色影响不大。采用客观图像质量评价来衡量去噪的效果, 目前较为常用的方法有峰值信噪比(PSNR)、均方误差(MSE)、平均绝对值差(mean



图6 算法对比结果图

表1 不同去噪算法的质量评价

图像名称	高斯滤波		双边滤波		非局部均值		本文算法	
	PSNR	MSE	PSNR	MSE	PSNR	MSE	PSNR	MSE
Build	22.770 5	0.005 28	22.525 5	0.005 59	23.032 1	0.004 97	23.347 7	0.004 63
Gorilla	23.577 3	0.004 43	22.787 6	0.005 26	23.741 6	0.004 22	26.366 6	0.002 17
Carrier	21.784 7	0.006 63	21.630 2	0.006 87	22.205 4	0.006 02	24.865 5	0.003 26
Wall	23.278 6	0.004 70	22.931 7	0.005 09	23.345 1	0.004 62	26.946 8	0.002 02
Calculator	22.365 8	0.005 79	22.898 1	0.005 13	23.013 7	0.004 99	25.827 2	0.002 61
Woman	24.508 4	0.003 54	23.207 2	0.004 78	24.518 7	0.003 53	28.253 4	0.001 49
Pentagon	22.238 2	0.005 51	22.019 1	0.005 79	22.419 0	0.005 29	25.841 0	0.002 40
Hurrican	22.394 6	0.005 71	22.406 2	0.005 70	22.523 3	0.005 55	25.075 6	0.003 08
Chest	23.480 9	0.003 55	22.319 6	0.004 65	23.803 8	0.003 30	26.511 6	0.001 76
Star	22.936 9	0.005 08	22.620 0	0.005 47	23.081 7	0.004 91	25.592 1	0.002 75
Lena	23.834 6	0.004 13	23.417 6	0.004 55	24.438 2	0.003 50	25.632 4	0.002 73
Leaf	23.479 8	0.004 48	22.744 0	0.005 31	23.526 1	0.004 44	26.213 6	0.002 39
Gorilla	23.577 3	0.004 38	22.787 6	0.005 20	23.741 6	0.004 22	26.366 6	0.002 30
Peppers	22.208 5	0.005 19	22.101 9	0.005 32	22.596 2	0.004 75	25.471 5	0.002 45
WallRGB	23.901 9	0.003 91	22.549 2	0.005 34	23.998 5	0.003 82	28.166 9	0.001 46
Machine	22.184 0	0.006 04	22.619 5	0.005 47	22.347 9	0.005 82	24.068 6	0.003 91

absolute error, MAE)等。本文采用PSNR以及MSE图像客观评价质量指标对各种图像处理结果进行评价如表1所示。评价去噪效果时, PSNR的值越大, MSE的值越小, 去噪的效果越好。从PSNR的角度来看, 本文算法比高斯平滑去噪好, 比目前流行的非局部均值去噪方法质量略高。从MSE的结果来看, 本文算法比高斯算法、非局部均值滤波和双边滤波算法的效果都好。因此, 图像及表中数据表明, 本文算法与目前常用的去噪方法相比, 去噪效果更好, 保留的细节比较多, 对颜色空间的影响并不大。

4 结束语

图像去噪是图像处理领域中的重要组成部分, 对改善图像质量具有重要的作用。本文主要根据视网膜感受野的神经机制及其模型, 构建了一种新的图像去噪方法, 把神经信息的处理机制应用于图像去噪的研究领域中。由实验结果分析可知, 本文算法不仅能有效地抑制噪声, 并且能保留图像细节和边缘信息, 对进一步的高级图像处理有重要的作用。本文还将该算法与具有代表性的现有去噪算法进行对比, 实验结果也表明本文算法能更好去除图像噪声点, 并且图像的细节和边缘信息都得以很好的, 取得较好的视觉效果。为图像去噪领域提供新的思路和研究基础。为了更好地研究彩色图像的去噪效果, 下一步将会研究在不同颜色空间下, 该方法的

彩色图像去噪效果; 与不同颜色空间下的其他方法的去噪效果进行对比。

参 考 文 献

- [1] ALAMRI S S, KALYANKAR N V, KHAMITKAR S. A comparative study of removal noise from remote sensing image[J]. International Journal of Computer Science Issues, 2010, 7(1): 32-36.
- [2] HWANG H, HADDAD R A. Adaptive median filters: New algorithms and results[J]. IEEE Transactions on Image Processing, A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 1995, 4(4): 499-502.
- [3] GAO L, LI C. An adaptive TV model for image denoising[C]//International Conference on Natural Computation. [S.l.]: IEEE, 2013:766-770.
- [4] CHEN T, MA K K, CHEN L H. Tri-state median filter for image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 1999, 8(12): 1834-1838.
- [5] HU Xiao-dong, PENG Xin, YAO Lan, et al. Study of wavelet domain gaussian mixture model with median filtering mixed image denoising[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(12): 2381-2385.
- [6] 杨燕, 黄彦丽, 曹金莲. 基于小波域隐马尔可夫模型的SAR图像去噪[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 33(5): 64-69.
YANG Yan, HUANG Yan-li, CAO Jin-lian. SAR image denoising based on wavelet domain hidden markov tree model[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2012, 33(5): 64-69.
- [7] DAVIDSON G, GRIFFITHS H D. Wavelet detection scheme

- for small targets in sea clutter[J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(19): 1128-1130.
- [8] 曾敬枫. 基于matlab不同小波基的小波阈值图像去噪算法[J]. *智能计算机与应用*, 2016, 6(4): 75-77.
- ZENG Jing-feng. Wavelet threshold image denoising algorithm based on MATLAB different wavelet bases[J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2016, 6(4): 75-77.
- [9] ZHANG B. Fast new small-target detection algorithm based on a modified partial differential equation in infrared clutter [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(10): 106401.
- [10] MICHEL J, JEAN C P. A model for logarithmic image processing[J]. *Journal of Microscopy*, 2011, 149(1): 21-35.
- [11] FLEISHMAN S, DRORI I, COHEN D. Bilateral mesh denoising[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 950-953.
- [12] ZHANG M, GUNTURK B K. Multiresolution bilateral filtering for image denoising[J]. *IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2008, 17(12): 2324-2333.
- [13] SHI J L, LIU Z Y, JING T. Bilateral signal variance estimation for wavelet-domain image denoising[J]. *Science China Information Sciences*, 2013, 56(6): 1-6.
- [14] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A review of image denoising algorithms, with a new one[J]. *Siam Journal on Multiscale Modeling & Simulation*, 2005, 4(2): 490-530.
- [15] 罗学刚, 吕俊瑞, 王华军, 等. 选择性计算的快速非局部均值图像去噪[J]. *电子科技大学学报*, 2015, 44(1): 84-90.
- LUO Xue-gang, LÜ Jun-rui, WANG Hua-jun, et al. Fast nonlocal means image denoising algorithm using selective calculation[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2015, 44(1): 84-90.
- [16] ZHANG X S, GAO S B, LI R X, et al. A retinal mechanism inspired color constancy model[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(3): 1219-1232.
- [17] PETKOV N, WESTENBERG M A. Suppression of contour perception by band-limited noise and its relation to nonclassical receptive field inhibition[J]. *Biological Cybernetics*, 2003, 88(3): 236-246.
- [18] MALIK J, PERONA P. Preattentive texture discrimination with early vision mechanisms[J]. *Journal of the Optical Society of America, A Optics & Image Science*, 1990, 7(5): 923-932.
- [19] 杨开富. 前端视觉通路信息加工的计算模型及应用研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- YANG Kai-fu. Computational models and applications of the early stages of biological visual system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [20] RODIECK R W. Quantitative analysis of cat retinal ganglion cell response to visual stimuli[J]. *Vision Research*, 1965, 5(12): 583-601.
- [21] RODIECK R W, STONE J. Analysis of receptive fields of cat retinal ganglion cells[J]. *Journal of Neurophysiology*, 1965, 28(5): 832-849.

编辑 黄 莘