

基于改进双域滤波的视频降噪算法

权 利¹ 胡越黎¹ 诸安骥¹ 燕 明²

(上海大学微电子中心 上海 200072)¹ (上海大学机电工程与自动化学院 上海 200072)²

摘 要 传统的视频降噪滤波在空域或者时域中进行,若视频中的噪声过大,其滤波效果较差。最新的有着较高性能的 BM3D 算法必须进行块匹配处理,且对于部分有着平滑过渡色彩的图像并不适合。基于双域滤波算法提出了一种改进的算法,其更加适合视频降噪。通过空域和频域分别对分层图像进行降噪,有效地滤除大噪点和小噪点,在时域上的双边滤波不仅提高了滤除噪声的能力,而且更好地保留了图像边缘特征。仿真实验表明,改进的双域滤波视频降噪算法在 PSNR 值上较 DCT 算法提高了约 1dB,与原双边滤波算法相比,无论是在主观视觉还是客观评价上,所提算法均有较好效果及优势。

关键词 双域降噪,双边滤波,小波收缩,快速傅里叶变换

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.7.054

Video Denoising Method Based on Improved Dual-domain Image Denoising

QUAN Li¹ HU Yue-li¹ ZHU An-ji¹ YAN Ming²

(Microelectronic Research and Development Center, Shanghai University, Shanghai 200072, China)¹

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)²

Abstract Image denoising continues to be an active research topic. Recently the proposed BM3D is based on block matching, which introduces visible artifacts in homogeneous regions, manifesting as low-frequency noise. This paper offered a hybrid method that is easy to implement and yet rivals BM3D in quality. The noise differentials were estimated using robust kernels in two spatial domains, one spatial range domain and one frequency range domain. The approach using robust estimators unifies spatial and wavelet domain methods. Video denoising based on temporal is highly effective, and the method is further demonstrated particularly to be suitable for video denoising. Comparing to the DCT, the value of PSNR of the proposed method is improved by about 1dB.

Keywords Dual-domain image denoising, Bilateral filtering, Wavelet shrinkage, Short-time fourier transform

1 引言

提升图像质量的一个重要方面是滤波降噪——将原图像从噪声图像中重构出来。通常假设图像中的噪声是加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise)。随着像素传感器的增加,摄像设备对噪声会更加敏感,因此降噪算法至关重要。

在众多算法中,文献[1]提出的非局部均值法(NonLocal Means Algorithm, NLM)是一种加权块平均滤波,即在图像中找到与处理块相似的相似块,并用相似块中相应位置的像素作为权重值来为处理块中的像素进行降噪^[18],由于图像很大,相似块的寻找需要大量计算,因此在实际中,只在处理块邻域一定范围内作相似块的匹配。文献[2]是在非局部均值算法上通过增加一个自适应窗调节权重参数来提高滤波效果。三维块匹配算法(Block-Matching with 3D filtering, BM3D 滤波)^[3]是近年来提出的降噪效果较好的一种算法,它也是基于 NLM 的思想,将寻找到的相似块组成一个组,并在

频率域中对其集中处理。BM3D 并不局限于空域,而是将空域与变换域相结合,达到了更好的降噪效果。也有一些算法针对 BM3D 算法的不足进行了改进,如 SA-BM3D^[4]、BM3D-SAPCA^[5],也有一些降噪效果很好的算法,如文献[6]所提的算法,但是该算法复杂度太高,不利于实现,而另一些则牺牲了降噪效果来降低算法复杂度^[7-9]。以上的方法都是基于块匹配的思想,都会在对比度较大的边缘和平滑区域产生明显的分界痕迹,所以这类算法对于一些需要纹理细节的图像来说是不适合的。DCT^[14]降噪是另一个降噪研究方向,它是一种非分块的算法,在去色斑、去模糊、降噪方面都有较好的效果,近年来也有一些改进的算法被提出,如 B-DCT^[15]、SA-DCT^[16]。

在文献[10]中, Claude Knaus 和 Matthias Zwicker 提出了一种双域图像降噪(Dual-Domain Image Denoising, DDID)算法。这是一种高效而简单的降噪方法,在空域中用双边滤波,在变换域中用短时傅里叶变换对其滤波;之后他们在此基

到稿日期:2015-06-28 返修日期:2015-08-28 本文受国家自然科学基金:硅基有机发光微显示器的高性能顶发射界面及数字驱动研究(61376028),上海市科委基金资助项目:高清硅基 OLED 微显示器器件设计制造技术(13111104600)资助。

权 利(1989—),女,硕士生,主要研究领域为图像降噪算法, E-mail: quanli0927@163.com; 胡越黎(1959—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为图像处理、机器视觉、片上系统、芯片设计; 诸安骥(1993—),男,硕士生,主要研究领域为神经网络与机器学习; 燕 明(1992—),男,硕士生,主要研究领域为图像降噪算法。

础之上又提出了改进的迭代新算法^[13],其对图像质量有着更好的提升。本文对 DDID 进行一些改进,在时域三维上加以处理,使之更好地应用在视频降噪处理中。

2 双域算法

降噪,就是将原图从噪声图中分离出来。通常降噪图像的模式为:

$$y_i = x_i + \eta_i \quad (1)$$

其中, x_i 是原图真实像素值, η_i 是在此像素上的噪声, y_i 是输入的图像像素值。

通过对算法的研究可以发现,空域算法对高对比度的图像降噪有着很好的效果,而频域算法则在低对比度图像的降噪处理上发挥出更好的性能。因此,在 DDID 算法中,将图像分为两个层次在不同域分别处理。双边滤波器可以实现这种分离,高对比图层是由双边滤波过的图像,而残差即是低对比图层,在频域中用小波收缩阈值对其进行降噪处理。这里可以提出一个由两个降噪图层组成的图像新模型:

$$\bar{x} = \bar{s} + \bar{S} \quad (2)$$

其中, \bar{s} 和 \bar{S} 分别是高、低对比图层。

2.1 空域:双边滤波

双边滤波是以处理像素与邻域内像素的空间相关性与灰度相关性为权重,加权而得到本像素值的一种方法。这里采用联合双边滤波^[11]的方法对噪声图像进行滤波,定义 N_p 是以像素 p 为中心、 r 为半径的窗,由于在进行小波收缩处理时需要用到双边滤波处理后的结果,因此同时对噪声图 x 和参考图 g 进行高对比图层的降噪,如式(3)和式(4)所示:

$$\bar{g}_p = \frac{\sum_{q \in N_p} k_{p,q} g_q}{\sum_{q \in N_p} k_{p,q}} \quad (3)$$

$$\bar{s}_p = \frac{\sum_{q \in N_p} k_{p,q} y_q}{\sum_{q \in N_p} k_{p,q}} \quad (4)$$

其中, y 是输入的带噪点图像, $k_{p,q}$ 是双边核系数, \bar{s}_p 是由双边滤波得到的高对比图层图像;在进行原图高对比图层提取时,同时进行参考图像的高对比图层滤波提取, \bar{g}_p 即为参考图像中对应点高对比像素值。

式(5)定义了双边滤波的系数 $k_{p,q}$ 。

$$k_{p,q} = e^{-\frac{|p-q|^2}{2\sigma_s^2}} e^{-\frac{(g_p - g_q)^2}{2\sigma_g^2}} \quad (5)$$

2.2 变换域

由双边滤波得到的高对比图层,可以从原图中分离出低对比图层并对其进行 STFT,这里采用的是在空域上加高斯窗,进行 Gabor 变换。设其窗 F_p 大小与 N_p 一样,则其变换之后的结果如下:

$$G_{p,f} = \sum_{q \in N_p} e^{-i2\pi(q-p) \cdot \frac{f}{2r+1}} k_{p,q} (g_p - \bar{g}_p) \quad (6)$$

$$S_{p,f} = \sum_{q \in N_p} e^{-i2\pi(q-p) \cdot \frac{f}{2r+1}} k_{p,q} (y_p - \bar{s}_p) \quad (7)$$

假设双边系数 $k_{p,q}$ 是无噪声的,那么 $\sigma_{p,f}^2$ 与 σ^2 的关系如下:

$$\sigma_{p,f}^2 = \sigma^2 \sum_{q \in N_p} k_{p,q}^2 \quad (8)$$

2.3 频域:小波收缩

在 2.2 节中已求出了傅里叶系数 $S_{p,f}$,可以构造一个与

双边滤波中空间相关因数相似的一个收缩因数,但双边滤波的空间相关因数的构造会保留近零均值噪声而忽略偏移信号,对于小波收缩因数 $K_{p,f}$ 的构造而言,要反其道而行之,即保留信号而忽略噪声,所以取欧氏距离的倒数来构造 $K_{p,f}$:

$$K_{p,f} = e^{-\frac{\gamma_f \sigma_{p,f}^2}{|G_{p,f}|^2}} \quad (9)$$

其中, $K_{p,f}$ 是用参考图 g 的傅里叶系数 $G_{p,f}$ 来构造的,小波收缩参数 γ_f 与双边空间因数中参数 γ_r 的作用是一样的。

从频域返回空域的过程很简单,由于只需中心像素值,因此在做反变换时,只需取频域窗内所有收缩因数的平均值即可:

$$\tilde{S}_p = \frac{1}{|F_p|} \sum_{f \in F_p} K_{p,f} S_{p,f} \quad (10)$$

2.4 DDID 总结

在第一次的迭代中,双边滤波采用大系数的,可以保证得到大对比的轮廓图,同时也平滑了细节,如图 1(a) 所示,而之后进行的 STFT 则恢复了一部分细节,从而不会影响双边的结果,由此得到的新信号代入下一步的迭代中作为参考信号输入。图 1 中高频线均为原噪声图,图 1(a) 低频线为第一次迭代双边滤波后的结果,图 1(b) 为第一次迭代 STFT 后的结果,图 1(c) 为第二次迭代双边滤波后的结果,图 1(d) 为第二次迭代 STFT 的结果。在第二次的迭代运算时,采用较小的双边系数,尽管在第一次的 STFT 中由于小波收缩而引入了振铃震荡,但是在第二次的双边滤波中可以将这些视为噪声并滤除,而再次进行的 STFT 会再次加强细节纹理而不引入振铃效应,即用迭代联合双边滤波的方法可以消除由小波变换产生的振铃现象^[12]。

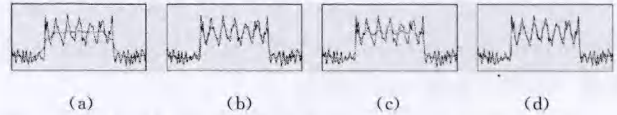


图 1 一维信号降噪迭代示意图

3 视频降噪算法

在进行视频降噪处理时,不仅要考虑到帧内的降噪,也要考虑到帧间联系,帧间的关联性可以使视频更加流畅,降噪效果更好。本文将上述 DDID 中的空域双边滤波器改造为一个迭代的时空双边滤波器,以提高降噪性能。

在原 DDID 算法中第一次迭代使用的参考图是原图本身。如果在原图中有大噪声或者原图被噪声污染过重,那么在第一次迭代时就会保留大量噪声作为图像本身信息,由于在后续迭代中是用前一次迭代结果作为参考图,最终的滤波结果将有较大误差,因此本文第一次迭代参考图采用双边空域叠加图以取代原图。

假设某像素在本帧的值为 $P(t)$,则其对应点可由运动估计在前一帧中找到对应块中的对应像素值为 $P(t-1)$,可以根据前一帧的对应像素值对本帧像素值进行控制,而前一帧的像素值又受之前帧对应点像素值的控制,则:

$$\begin{aligned} \bar{P}(t) &= (1-w)P(t) + w\bar{P}(t-1) = (1-w)P(t) + w(1-w)P(t-1) + w^2(1-w)\bar{P}(t-2) \\ &= (1-w)P(t) + w(1-w)P(t-1) + \dots + w^i(1-w)P(t-i) + \dots + w^i P(0) \end{aligned} \quad (11)$$

其中, w 是控制系数,通过 w 可调节前一帧对本帧的影响。 $\bar{P}(t)$ 为滤波后的本帧像素值, $P(t)$ 是输入的待滤波的本帧像素值。

根据双边滤波中灰度相关性因素的原理,可以对 w 进行调节,即加入一个灰度调节因子 w' ,则:

$$w' = e^{-\frac{|P(t) - \bar{P}(t-1)|^2}{2\sigma^2}} \quad (12)$$

在本文实验中,各处理块的 σ 值由本帧待处理像素所在分块的各像素值分别计算。

由式(12)可以分析得出:当本帧像素值与前一帧像素值相近时, w' 较大(接近于1),前一帧像素值对本帧像素值的影响较大,控制力度大,有利于帧与帧之间的平滑性,使输出图像视觉效果更好;而当前一帧像素值与本帧像素值相差较大时,说明此点可能为运动较强点,那么 w' 值较小(接近于0),前一帧像素对本帧像素值控制力度变小,滤波输出的 $\bar{P}(t)$ 中前一帧 $\bar{P}(t-1)$ 的分量较小,从视觉效果来看,不会出现因时域滤波而出现的拖尾现象,改善了画面质量。

由此,新的控制系数可以改写为:

$$W = w \cdot w' = w \cdot e^{-\frac{|P(t) - \bar{P}(t-1)|^2}{2\sigma^2}} \quad (13)$$

同时,为了保证 $\bar{P}(t)$ 的增益不改变,对 $P(t)$ 的权重系数进行归一化处理:

$$W' = (1-w) \cdot \frac{1}{(1-w) + w' \cdot w} \quad (14)$$

那么,

$$\begin{aligned} \bar{P}(t) &= W'P(t) + W\bar{P}(t-1) \\ &= (1-w) \cdot ((1-w) + w'w)^{-1}P(t) + w'w\bar{P}(t-1) \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)的结果可以看成是一个时空域双边滤波器。在实验中可以发现,本文提出的滤波器对视频的降噪有着更好的效果,对信噪比也有一定的提升。

图2是本文算法的流程图。结合经改进DDID滤波后的第 $N-1$ 帧,用时域双边滤波处理第 N 帧图像数据,得出的结果作为参考图,对待处理图像进行双城滤波,最后得到滤波输出的图像。

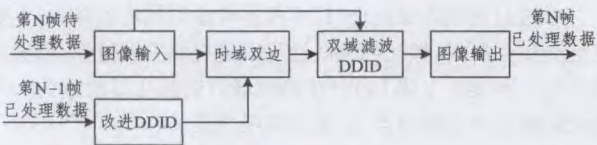


图2 算法流程图

4 实验结果

选取几种算法与本文提出的算法进行降噪效果对比。峰值信噪比(PSNR)和均方误差(MSE)都是对图像质量评估的标准,这里采用峰值信噪比。

根据文献[10]对于双城滤波的研究和测试以及保证对比的统一性,采用与其算法测试参数相同的经验值。本文对标准测试序列 akiyo 第20帧、bus 第36帧等序列进行降噪处理,加入高斯噪声[0, 1.0]。

图3为本文提出的改进DDID算法对视频降噪的结果,图3(a)为原序列,图3(b)为经改进DDID降噪之后的序列,图3(c)为加噪声之后的序列。从视觉上来看,改进DDID算法并无小波收缩降噪所产生的振铃效应,也无块匹配产生的明显分界,特别是在细节和纹理区域,改进DDID算法去噪后保留了原图像更多的细节信息。

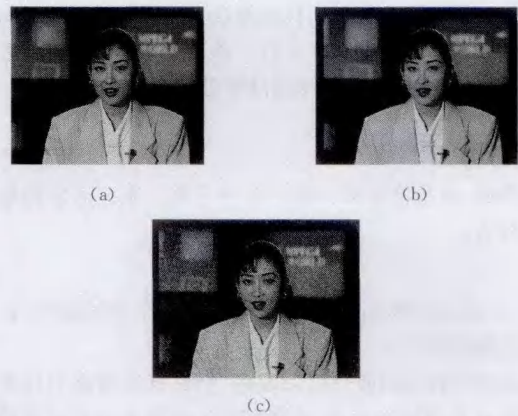


图3 改进DDID降噪实验结果——akiyo(a,b,c)

图4是原图像、改进DDID算法处理后的图像和BM3D处理后的图像对比图。可以发现,改进DDID降噪算法可以很好地恢复原图像,与BM3D效果基本无差别,标准序列waterfall是有着非常多的细节纹理、小边缘的视频序列,颜色上的细小变化很多,甚至优于BM3D算法。



图4 对比图

图5是对实拍图进行降噪的效果图。DDID只在空域对图像进行降噪,所以对于彩色大斑点的降噪效果较差,而本文所提出的改进DDID采用时域降噪,对彩色大斑点有着较好的祛除效果。图5(a)为原图,由于图片亮度较低,在白色墙面上出现大量彩色噪点;图5(b)为DDID降噪后的图;图5(c)为改进DDID降噪后的图,局部放大后可以发现,经改进DDID处理的图像白色墙面颜色更均匀,在时域上的叠加使得祛除彩噪的效果更好。

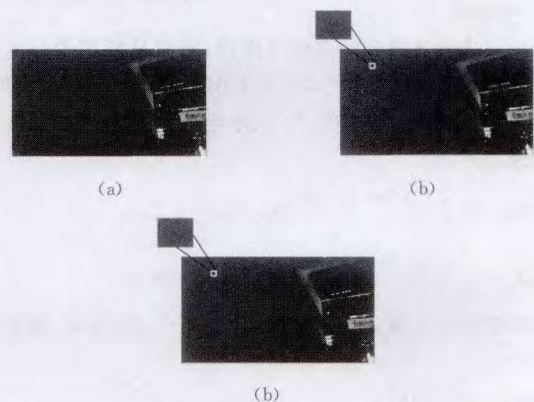


图5 实拍图的降噪效果

- [12] Daras P, Zarpalas D, Tzovaras D, et al. Efficient 3-D model search and retrieval using generalized 3-D radon transforms[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2006, 8(1): 101-114
- [13] Zou K S, Ip W H, Wu C H, et al. A novel 3D model retrieval approach using combined shape distribution[J]. Multimedia Tools and Applications, 2014, 69(3): 799-818
- [14] Daras P, Axenopoulos A. A 3D shape retrieval framework supporting multimodal queries[J]. International Journal of Computer Vision, 2010, 89(2/3): 229-247
- [15] Zhou Yan, Zeng Fan-zhi. An Image Retrieval Algorithm Based on Two-dimensional Compressive Sensing and Hierarchical Feature[J]. Chinese Journal of Electronics, 2016, 44(2): 453-460(in Chinese)
- 周燕, 曾凡智. 基于二维压缩感知和分层特征的图像检索算法[J]. 电子学报, 2016, 44(2): 453-460
- [16] Song B, Xiang B, Wenyu L, et al. Neural shape codes for 3d model retrieval[J]. Pattern Recognition Letters, 2015, 65(c): 15-21
- [17] Papadakis P, Pratikakis I, Theoharis T, et al. Panorama[C]// A 3d Shape Descriptor Based on Panoramic Views for Unsuper-vised 3d Object Retrieval(IJCV 89). 2010: 177-192
- [18] Papadakis P, Pratikakis I, Theoharis T, et al. 3d object retrieval using an efficient and compact hybrid shape descriptor[C]// 3DOR. 2008: 9-16

(上接第 296 页)

表 1 列出文献[14]、文献[10]、文献[17]与本文算法对标准序列降噪的结果。可以看出,改进 DDID 算法对图像降噪

后的 PSNR 值较高,与其他算法相比,在滤波效果和运算时间上均有优势。

表 1 PSNR(dB)对比表

算法	akyio	foreman	waterfall	mobile	bus	Bridge-close	tempete
DCT ^[14]	33.9600	32.1195	28.6330	26.8990	29.0308	29.9680	28.4543
EPLL ^[17]	32.9228	30.8147	28.1779	25.8521	27.1443	29.0197	26.8161
DDID ^[10]	34.49	32.35	28.80	27.00	29.06	30.02	28.62
本文算法	35.19	32.85	28.9654	27.8572	29.9555	30.4112	29.0962

结束语 综合以上的实验结果与分析可知,经改进 DDID 算法降噪后图像的视觉效果比原 DDID 算法的视觉效果更好。对于含有较多细节和纹理的图像,其降噪效果在一定程度上优于 BM3D,并且在算法复杂度上远小于 BM3D,无需进行块匹配运算,有利于硬件实现。时域双边算法在视频降噪过程中更是产生了良好的去噪效果;频域中用 FFT 变换代替小波变换,降低了计算复杂度。

参 考 文 献

- [1] Buades A, Coll B, Morel J M. A review of image denoising methods, with a new one[J]. Multiscale Model. Simul., 2005, 4(2): 490-530
- [2] Kervrann C, Boulanger J. Optimal spatial adaptation for patch-based image denoising[J]. IEEE Trans. Image Process., 2006, 15(10): 2866-2878
- [3] Dabov K, Foi A, Katkovnik V, et al. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering[J]. IEEE Trans. Image Process., 2007, 16(8): 2080-2095
- [4] Dabov K, Foi A, Katkovnik V, et al. A nonlocal and shape-adaptive transform-domain collaborative filtering[C]// Proc. 2008 Int. Workshop on Local and Non-Local Approximation in Image Processing(LNLA 2008). 2008
- [5] Dabov K, Foi R, Katkovnik V, et al. BM3D Image Denoising with Shape-Adaptive Principal Component Analysis[C]// Proc. Workshop on Signal Processing with Adaptive Sparse Structured Representations (SPARS'09). 2009
- [6] Lebrun M. An Analysis and Implementation of the BM3D Image Denoising Method[J]. American Society of Mechanical Engineer, 2012, 2(25): 175-213
- [7] Chatterjee P, Milanfar P. Is denoising dead? [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(4): 895-911
- [8] Levin A, Nadler B. Natural image denoising: Optimality and inherent bounds[C]// CVPR. 2011: 2833-2840
- [9] Levin A, Nadler B, Durand F, et al. Patch complexity, finite pixel correlations and optimal denoising[M]// Computer Vision—EC-CV 2012. Springer, 2012: 73-86
- [10] Knaus C, Zwicker M. Dual-domain image denoising[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. IEEE, 2013
- [11] Petschnigg G, Szeliski R, Agrawala M, et al. Digital photography with flash and no-flash image pairs[J]. ACM Trans. Graph. ACM, 2004, 23: 664-672
- [12] Yu H, Zhao L, Wang H. Image denoising using trivariate shrinkage filter in the wavelet domain and joint bilateral filter in the spatial domain[J]. IEEE Trans. on Image Process., 2009, 18(10): 2364-2369
- [13] Knaus C, Zwicker M. Progressive Image Denoising [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(7): 3114-3125
- [14] 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): 1-17
- [15] Sikora T. Low complexity shape-adaptive DCT for coding of arbitrarily shaped image segments [J]. Signal Process. Image Comm., 1995, 7(4-6): 381-395
- [16] Bi M, Ong S H, Ang Y H. Comment on Shape-Adaptive DCT for generic coding of video[J]. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., 1996, 6: 686-688
- [17] Zoran D, Weiss Y. From Learning Models of Natural Image Patches to Whole Image Restoration[C]// 2011 International Conference on Computer Vision. IEEE, 2011: 479-486
- [18] Zhang Pei, Fan Hong, Hao Yan-rong. Research on MR Image Segmentation Based on Fast FCM Algorithm Combined with Non-local Means[J]. Computer Science, 2014, 41(5): 305-307(in Chinese)
- 张翥, 范虹, 郝艳荣. 结合非局部均值的快速 FCM 算法分割 MR 图像研究[J]. 计算机科学, 2014, 41(5): 305-307