

陈子健, 陈国栋, 余明磊, 等. 胶片档案中降噪算法的研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(11): 151-155. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.241123

胶片档案中降噪算法的研究

陈子健¹, 陈国栋¹, 余明磊¹, 戴振国¹, 张旭生¹, 林进浔²

(1 福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350108; 2 福建数博讯信息科技有限公司, 福州 350002)

摘要: 胶片档案的修复一直是人们关注的重点, 传统的人工物理或化学修复方法存在低效和不可逆性的缺点, 因此数字化和图像处理技术成为胶片档案修复的热点。本文提出了一种针对彩色胶片档案影像的三维块匹配视频降噪算法。该算法使用连续阶导数的阈值滤波, 并充分利用空域和频域特性, 有效改善了硬阈值滤波引起的去噪图像上的“振铃”效应。此外, 该算法还引入光流估计视频中的运动, 在短时间内修复胶片档案画面。通过与其他滤波算法进行实验比较分析, 证明了该算法在胶片档案修复中的可行性和实用性, 并展示了其在降噪方面的优越性。本文的结果可用于提高胶片档案的质量, 促进文化遗产的保护和传承。

关键词: 胶片档案; 三维块匹配; 连续阶导数的阈值滤波; 光流估计; 视频降噪算法

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)11-0151-05

Research on denoising algorithms for film archives

CHEN Zijian¹, CHEN Guodong¹, SHE Minglei¹, DAI Zhenguo¹, ZHANG Xusheng¹, LIN Jinxun²

(1 College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2 Fujian Shuboxun Information Technology Co., Ltd., Fuzhou 350002, China)

Abstract: The restoration of film archives has always been a focal point of people's attention, in order to avoid the low efficiency and irreversibility of traditional physical or chemical restoration methods, digital and image processing techniques have been adopted for the restoration of film archives. This paper proposes a 3D block matching video denoising algorithm for color film archive images. The algorithm uses threshold filtering of continuous order derivatives and fully exploits the characteristics of space and frequency domains, effectively improving the "ringing" effect on denoised images caused by hard threshold filtering. At the same time, the algorithm also introduces motion estimation in video, to repair the film archive images in a shorter time. Through experimental comparison and analysis of other filtering algorithms for film archive restoration, the feasibility and practicality of this algorithm in film archive restoration are demonstrated, and its superiority in noise reduction is demonstrated. The results of this paper can be used to improve the quality of film archives and promote the preservation and inheritance of cultural heritage.

Key words: film archives; 3D block matching; threshold filtering of continuous order derivatives; optical flow estimation; video denoising algorithm

0 引言

胶片档案作为视频档案信息存在的一种重要形式, 在上个世纪得到广泛应用, 其中详尽记录了当时的社会面貌和重要事件。通过胶片档案, 就可以直观地感受到社会以及文化的变迁, 胶片档案是一个国家和民族宝贵的精神文化财产, 但这一文化财产却正面临着—个很大的难题。由于年代久远、保管

条件限制以及各种历史原因, 档案部门收集保存的许多胶片存在变形、霉变、褪色、划伤甚至破损等现象, 导致其中的信息失真或难以辨识。用物理和化学的传统方法对胶片进行修复, 从某种程度上可以还原胶片的部分原始信息。但是, 这种传统的通过人工方法进行物理或化学的修复效果非常有限, 只能对小的脏点、划痕等损伤做到简单修复, 许多操作还具有不可逆性, 容易对珍贵的档案造成二次伤

基金项目: 福建省科技计划引导性项目(2021H0013); 福建省科技型中小企业创新资金项目(2021C0019)。

作者简介: 陈子健(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 计算机图形图像处理, 深度学习。

通信作者: 陈国栋(1979—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 计算机图形图像处理, 深度学习, 计算机仿真技术。Email: 390693515@qq.com。

收稿日期: 2023-06-02

害^[1]。因此,目前亟需研发一种更为高效且更易实现档案保护的修复方法。

针对上述问题,本文提出了一种三维块匹配视频去噪算法对胶片影像进行降噪,引入C-BM3D思想,将输入的彩色胶片档案影像的RGB色彩空间转换为YUV色彩空间以此来对彩色胶片档案进行降噪^[2]。基于VBM3D算法,在对胶片图像块匹配时引入光流进行帧间搜索来充分地利用时域的信息,能够较好地保留画面细节。并且采用连续阶导数的阈值滤波,能够更好地改善去噪后的图像由硬阈值滤波所引发的“振铃”效应,提高胶片档案的画质。实验结果表明,该算法能够在较短的时间内提高对胶片档案画面的修复性能,极大地节省人力物力资源,对胶片档案的修复具有十分重要的现实意义。

1 三维块匹配视频去噪算法概述

1.1 VBM3D算法的基本流程

VBM3D算法是一种用于视频去噪的算法,主要基于块匹配和3D变换。VBM3D算法流程如图1所示。由图1看到,算法分为2个部分,分别是基础估计阶段和最终估计阶段,每个部分均包含分组、变换域协同滤波和聚合三个步骤^[3]。

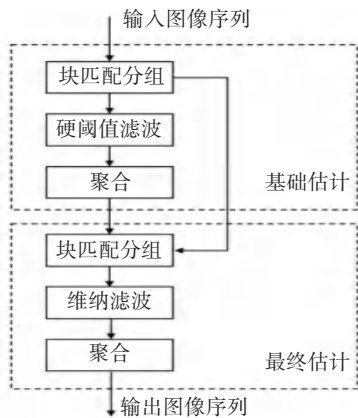


图1 VBM3D算法流程

Fig. 1 Flowchart of the VBM3D algorithm

在VBM3D算法中,基础估计和最终估计都是用于去噪的估计过程。

基础估计是指在块匹配和过滤阶段中,对当前块进行的初步估计。具体来说,基础估计使用了非本地块平均(NL-means)滤波算法。该算法估计了噪声的方差,并根据局部相似度对当前块进行了滤波^[4]。基础估计旨在去除噪声并保留图像的细节,为最终估计提供更好的初始条件。

最终估计是指对去噪后的块进行的最终估计,

该过程目标是进一步降低噪声并提高图像的质量。最终估计通过加权聚合的方式,将多个基础估计结果进行加权平均,以获得更平滑的结果^[5]。加权聚合的权重由块匹配的相似度和基础估计的质量共同决定,相似度和质量越高的结果权重越大。最终估计的结果通常比基础估计更平滑,更符合人眼视觉感受,并且具有更高的信噪比。

在此基础上,对流程中涉及的各模块功能做阐释分述如下。

(1)块匹配分组:将输入视频序列按照一定的大小进行分割,将每个子序列称为一个组。这个过程是为了让算法能够处理较大的视频序列,并且只对每个小组,而不是整个视频序列进行处理。

(2)硬阈值滤波:接下来将对上述得到的三维块 $P(p)$ 进行硬阈值滤波,而后再将其聚合到输出的图像中。对所有块进行三维变换,进行硬阈值滤波,滤波后再进行反变换得到处理后的结果,用公式表示为:

$$\hat{P}(p) = T_{3D}^{-1}(HT_A(T_{3D}(P(p)))) \quad (1)$$

(3)维纳滤波:最终估计步骤中使用了维纳滤波,以去除块内和块间的噪声,进一步提高图像质量。维纳滤波器是一种经典的最小均方滤波器,可以在恢复图像时最小化噪声引入的误差^[6]。是基于信号的功率谱和噪声功率谱之间的比率进行计算的,因此这里涉及的噪声功率谱和信号功率谱就必须已知。在VBM3D算法中,这些功率谱是从估计得到的块中求出来的。

(4)聚合:在基础估计和最终估计中,硬阈值滤波和维纳滤波后,需要对每个块进行估计,基于块匹配的相似性和基础估计的质量,计算权重系数。在计算过权重系数后,VBM3D算法将每个块的基础估计结果做加权平均,以获得最终估计结果。最后,VBM3D算法将重叠区域中的不同块的估计结果进行平均,以避免出现边界伪影^[7]。

1.2 胶片档案降噪算法

胶片档案降噪算法整体含两个大步骤,分别是基础估计和最终估计。算法流程如图2所示。

在进行基础估计前,需要将输入的彩色胶片档案影像的RGB色彩空间转换为YUV色彩空间,这是因为YUV色彩空间的Y分量包含了更多的图像信息,例如边缘、材质和纹理,并且具有更高的信噪比^[8]。因此,在搜索相似块时选择使用Y分量进行搜索,同时使用和Y分量相同的相似块位置信息来搜索UV分量。这样做不仅可以提高搜索效率,还可

以获得更准确的基础估计结果。 RGB 和 YUV 色彩空间的转换公式如下:

$$\begin{pmatrix} \hat{Y} \\ \hat{U} \\ \hat{V} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.168 & -0.331 & 0.500 \\ 0.500 & -0.419 & 0.081 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{R} \\ \hat{G} \\ \hat{B} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, Y 表示明亮度; U 和 V 表示色度; R 、 G 、 B 分别表示红、绿、蓝三原色的亮度。

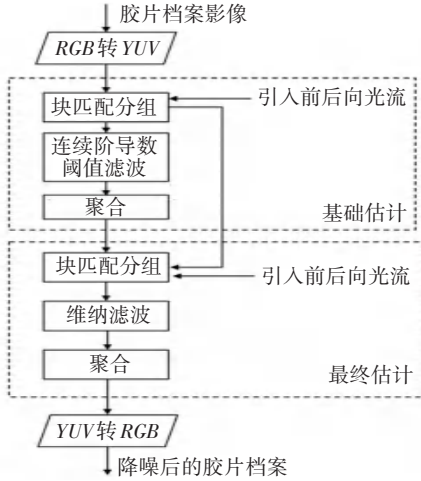


图 2 胶片档案降噪算法

Fig. 2 Denoising algorithm for film archives

1.2.1 基础估计

(1) 块匹配分组: 基于 VBM3D 中所采用的预测搜索, 对不同帧之间进行相似块搜索, 能够充分利用时域上的信息。VBM3D 在帧内的相似块搜索和 BM3D 类似, 其搜索原理为:

假定 p 和 q 是位于 (x, y, t) 和 (x', y', t') 的 2 个块区域, 如果正则化距离大于阈值, 认为 p 和 q 不能归为相似块。假定 p 为参考块, 位于 (x, y, t) , 此时将在 t 帧附近的 $2N_f + 1$ 帧的窗口中搜索到若干相似块。将这些块堆叠到一个三维块中, 并按照各块到 p 的距离进行排序。帧间搜索公式如下:

$$d(x, y) = \begin{cases} \|p - q\|_2^2 - d, & \text{if } x = x', y = y' \\ \|p - q\|_2^2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $d(x, y)$ 表示 p 和 q 之间的正则化距离, 如果 $d(x, y)$ 大于阈值 τ , 认为 p 和 q 不能归为相似块。假定 p 为参考块, 位于 (x, y, t) , 此时将在 t 帧附近的 $2N_f + 1$ 帧的窗口中搜索到 N 个相似块 L 。将这些块堆叠到一个三维块中, 并按照各块到 p 的距离进行排序。

在基本估计中的帧间搜索引入前后向光流来引导在搜索区域搜索匹配块, 即在被搜索的多个帧画面上的搜索窗的中心遵循参考块依照光流估计的运动轨迹进行搜索^[9]。前向光流估计的运动轨迹如下:

$$\begin{aligned} \varphi_{x,y,t}(h) &= o_f([\varphi_{x,y,t}(h-1)], h-1) + \\ &\varphi_{x,y,t}(h-1), h = t+1, \dots, t+N_f \end{aligned} \quad (4)$$

其中, t 表示参考帧位于的时间点, 这通常是光流估计算法中用于比较和计算的基准时间点。 N_f 表示正在被搜索的帧画面数量, 对在 $t + N_f$ 上估计的光流称为前向光流; $\varphi_{x,y,t}$ 表示 $t + N_f$ 上某一坐标 (x, y, t) 的运动轨迹。同理, 在 $t - N_f$ 上估计的光流称作后向光流, 后向运动轨迹的计算只需要使用后向光流估计即可。

(2) 连续阶导数阈值滤波: 在 VBM3D 的基础估计中, 采用的滤波方式为小波的硬阈值滤波, 这种滤波可以有效地处理大部分的噪声, 但是也带来了一些问题: 硬阈值滤波后小波系数的连续性变差, 去噪后在图像上容易出现“振铃”效应^[10]。因此, 在滤波上, 本次实验将由硬阈值函数改为连续阶导数的阈值函数, 用于改进去噪后的效果。连续阶导数的阈值函数如下所示:

$$\eta_{k(x,T)} = \begin{cases} x + T - \frac{T}{2k+1}, & x < -T \\ \frac{1}{(2k+1)T^{2k}x^{2k+1}}, & |x| \leq T \\ x - T + \frac{T}{2k+1}, & x > T \end{cases} \quad (5)$$

其中, k 表示阈值函数的连续阶数, 阶数越大, 处理效果越好, 但处理所花费的时间也越长; x 表示小波系数; T 表示阈值。

(3) 聚合: 经过连续阶导数阈值滤波后, 每个图像块将得到一个估计值, 将这些估计值融合到原始图像的对应位置, 通过加权平均来计算每个像素的灰度值^[11]。这里的权重取决于相应块中置 0 的像素数和噪声强度, 以此保留尽可能多的图像细节。估计的公式如下:

$$\omega_{ht}(p) = \frac{1}{\sigma^2 N_{\text{hard}}(p)} \quad (6)$$

其中, $N_{\text{hard}}(p)$ 表示硬阈值滤波中非 0 的个数统计。这里考虑到有一个像素 p 必然存在于多个块内, 因此需要对 p 进行加权平均, 以获得估计值。加权平均的过程如下:

$$\hat{u}(p) = \frac{\sum_{\text{patch } p \text{ of } v} \sum_{q \in \hat{P}(p)} \omega_p(\rho) q(\rho)}{\sum_{\text{patch } p \text{ of } v} \omega_p(\rho)} \quad (7)$$

$$\omega_p = \omega_{ht}(p) K(p) \quad (8)$$

其中, $K(p)$ 表示一个大小为 $L_x \times L_y$ 的 Kaiser 窗。

1.2.2 最终估计

(1) 块匹配分组: 相较于基础估计中的块匹配分组, 最终估计是找到原噪声图像以及基础估计图像里面与目前处理图像块相似的所有块进行分组。块搜索的方法和基础估计中块搜索的原理一样, 这样就从噪声序列中估计得到了三维块 $P(p)$ 和基础估计中得到了三维块。

(2) 维纳滤波: 最终估计中的块匹配分组结束后, 将对视频帧序列重新进行块搜索、连同维纳滤波处理。块搜索的方法和基础估计中块搜索的原理一样, 此时就得到了从噪声序列中估计得到的三维块和基础估计中得到的三维块, 并对其进联合维纳滤波。维纳滤波的公式如下:

$$\hat{P}(p) = T_{3d}^{-1}(WF(T_{3d}(P(p)))) \quad (9)$$

$$WF(v) = \frac{\hat{v}^2}{\hat{v}^2 + \sigma^2} f \quad (10)$$

其中, $WF(v)$ 表示在频率 v 处的维纳滤波; \hat{v} 表示基础估计中和 v 频率相同的部分; σ^2 表示图像块噪声的方差; f 表示图像噪声频率。

(3) 聚集: 和基本估计一样, 接下来要对每个像素进行加权聚合得到估计结果, 此时的权值为:

$$\omega_{wf}(p) = \frac{1}{\sigma^2} \left(\sum_{\rho} \left(\frac{\hat{p}_i(\rho)^2}{\hat{p}_i(\rho)^2 + \sigma^2} \right)^2 \right)^{-1} \quad (11)$$

$$\omega_p = \omega_{wf}(p) K(p) \quad (12)$$

最后, 通过 YUV 色彩空间反变换到 RGB 色彩空间, 就得到了胶片档案影像的最终估计结果。

2 实验分析

2.1 数据采集及计算平台

本研究选择了 Linux 操作系统, 核心算法使用 Visual Studio 软件在 PC 机上编程实现。硬件配置方面, CPU 为 Intel Core i7-9700, GPU 为 NVIDIA GeForce GTX 2080Ti 11 GB, 内存大小为 16 GB。所使用的数据集来源于福建省档案馆提供的胶片档案。

为了客观评价实验结果, 本研究采用了图像质量评价的客观指标, 即峰值信噪比^[12]。峰值信噪比越高, 表示胶片档案的还原度越好。

2.2 实验效果对比

针对胶片档案中可能产生的复杂多样的噪声, 本次实验选用 VBM3D 算法和本文降噪方法进行对比。仿真实验效果如图 3~图 7 所示。图中降噪结果表明, 无论是 VBM3D、还是本文方法都能对图片

中大部分的真实噪声进行有效去除。但从图片细节放大中可以看出, 本文降噪方法对细节的保存更趋完好。采用 VBM3D 滤波后, 图像出现了振铃效应, 在同一区域内的像素色彩亮度出现变化震荡。本算法采用了改进阈值滤波函数后可以有效避免振铃效应, 降噪后所呈现出的图像效果在同一区域内更为清晰, 色彩变化更为平稳, 符合人眼的观感。



图3 降噪前图片

Fig. 3 Images before denoising



图4 采用本文算法降噪结果

Fig. 4 Noise reduction results obtained using the proposed algorithms

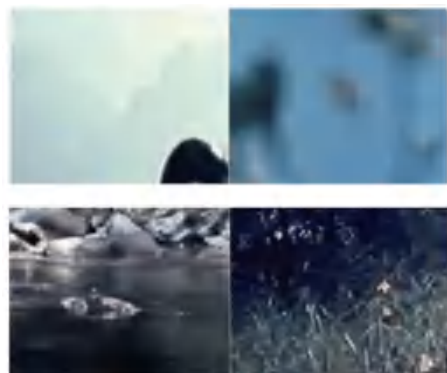


图5 采用本文算法降噪结果的局部放大图

Fig. 5 Local magnification of the noise reduction results using the proposed algorithm



图 6 采用 VBM3D 降噪结果

Fig. 6 Noise reduction results obtained using VBM3D

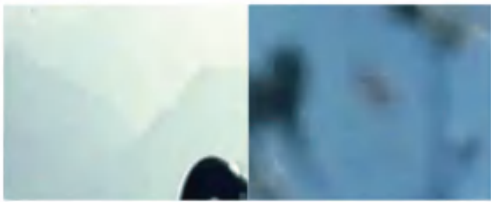


图 7 采用 VBM3D 降噪结果的局部放大图

Fig. 7 Local magnification of the noise reduction results using VBM3D

3 胶片档案实验结果

将 VBM3D 滤波和胶片档案降噪算法滤波的实验结果进行 SNR 测试, 具体的 SNR 数值实验结果见表 1。表 1 中, *PSNR* 和 *SSIM* 可以很好地展现 2 幅图片之间信息的关联, 在降噪任务中, 将以这 2 个指标作为修复评价的客观指标^[13]。实验证明相较于 VBM3D 算法, 胶片档案图像经过本算法降噪后, *PSNR* 和 *SSIM* 都有所提升。

表 1 VBM3D 和胶片档案降噪算法结果对比

Table 1 Comparison of denoising results between VBM3D and film archives

算法	平均 <i>PSNR</i> / dB	平均 <i>SSIM</i>
VBM3D	37.66	0.95
胶片档案	38.67	0.96

4 结束语

在本文中, 提出了一种基于三维块匹配的视频去噪算法, 并将其应用于胶片档案的修复。相较于传统的物理和化学修复方法, 该算法具有更好的去噪效果和修复速度。其核心思想是利用连续阶导数

的阈值滤波, 结合空域和频域的特性, 消除去噪图像上出现的“振铃”效应, 从而最大限度地保留图像细节。另外, 该算法还引入了光流估计视频中的运动, 利用帧间搜索实现了快速的胶片档案画面修复。这项技术的出现, 不仅在胶片档案降噪方面发挥着关键作用, 而且在实际修复工作中也已得到了广泛应用。实际使用效果表明, 该算法能够有效地改善胶片档案画面中存在的问题, 提高画质和修复速度。因此, 该项研究对于胶片档案修复领域的发展有着重要的意义。

参考文献

- [1] 吴兵, 丁友东. 电影胶片档案数字化修复过程研究[J]. 兰台世界, 2015 (26): 96-97.
- [2] DABOV K, FOI A, KATKOVNIK V, et al. Collaborative filtering for noise reduction. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(8): 2080-2095.
- [3] 马玉娇. 基于视觉显著性的图像与视频图像去噪算法研究[D]. 保定: 河北大学, 2018.
- [4] 许娟. 图像去噪的非局部方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [5] 陆欣泽. 一类自适应图像去噪方法研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [6] 官威. 基于维纳滤波的图像增强和消噪技术研究[J]. 现代信息技术, 2022, 6(8): 72-74, 78.
- [7] EHRET T, ARIAS P. Implementation of the VBM3D video denoising method and some variants [J]. arXiv preprint arXiv, 2001. 01802, 2020.
- [8] 张鹏, 陶青川, 黄凤英. 基于 YUV 色彩空间的暗原色单幅图像去雾改进算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(2): 287-292.
- [9] LIU Y, DONG W, SHI G, et al. Video denoising using a low-rank matrix completion and transformation - domain sparsity constraints[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(8): 3395-3408.
- [10] YANG W, LU J, FENG X, et al. Video denoising by sparse 3D transform-domain collaborative filtering [J]. Signal Processing: Image Communication, 2012, 27(4): 399-406.
- [11] 肖进胜, 姜红, 彭红, 等. 一种改进的 3 维块匹配视频去噪算法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(4): 81-86.
- [12] GOYAL B, DOGRA A, AGRAWAL S, et al. Image denoising review: From classical to state-of-the-art approaches [J]. Information Fusion, 2020, 55: 220-244.
- [13] 于虹, 甄彤. 图像去噪经典算法研究[J]. 信息与电脑(理论版), 2020, 32(14): 66-67.