

# 一种改进的基于 MRF 模型的斑块检测算法

徐进 孙军 王兴东 翟广涛

(上海交通大学图像通信与信息处理研究所, 上海 200240)

**摘要** 斑块是一种常见的电影胶片损伤。提出了一种基于马尔可夫随机场(MRF)的改进的多步斑块检测及验证算法(MDV)。MDV检测算法分3个步骤。第1步将斑点检测索引算法(SDIp)和等级顺序差分检测算法(ROD)相结合以提高斑块检测算法的检全率。第2步的改进的MRF算法以第1步检测结果为运算定义域,大大减小了MRF算法的运算量。第2步随后在原始帧和运动补偿帧分别进行MRF算法检测,并通过添加去噪因子降低了改进的MRF算法的误检率。第3步通过时域的匹配技术将斑块进一步去伪存真。实验结果表明,在与现有的算法的对比中,该方法不仅有着更高的检全率和更低的误检率,而且计算速度也大大提高。

**关键词** 数字电影修复 斑块检测 马尔可夫随机场

中图法分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1006-8961(2009)11-2401-05

## An Improved MRF-based Algorithm for Blotch Detection in Archived Film

XU Jin, SUN Jun, WANG Xing-dong, ZHAI Guang-tao

(Institute of Image Communication and Information Processing, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

**Abstract** Blotch is one of the most common artifacts in archived film. This paper proposed an improved MRF-based blotch detection algorithm named MDV. The MDV algorithm has 3 steps. In the first step, SDIp and ROD algorithms are combined to increase the Recall rate in blotch detection. The definition of the second MRF-based step is restricted within the former result, which reduces the computational burden. The improved MRF-based algorithm then uses the combination of original frame and motion-compensated frame and the new denoising factor to reduce the false alarm rate. At the last step, spatio-temporal based matching algorithm is introduced for further refinement. The experimental results and comparative study with existing algorithms confirm that the proposed MRF method not only has higher recall rate and fewer false alarms, but also improves the computational speed significantly.

**Keywords** digital film restoration, blotch detection, Markov random field

## 1 引言

电影胶片是人类的重要文化遗产。然而由于材质老化和保存不当,目前大多数老电影胶片受到了严重的损伤。而传统的基于手工的电影胶片修复方法很难有效地处理电影中存在的多种损伤,海量的

电影数据也使得传统修复方式无法在胶片修复产业中得到实用。近年来,随着数字多媒体技术的发展,电影胶片数字修复技术也不断发展,可以处理多种损伤的各种算法通过软件或硬件的方式在处理平台上的快速处理,实现了对受损老电影的实用有效修复<sup>[1-2]</sup>。斑块、划痕、噪声、帧抖动、帧闪烁是最为常见的5种胶片损伤,而这也就是数字修复技术的处理重

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2008AA01A318)

收稿日期:2009-08-07;改回日期:2009-08-20

第一作者简介:徐进(1979~),男,上海交通大学图像通信与信息处理研究所博士研究生。主要研究方向为数字电影修复,数字图像处理。E-mail:jackxuzhyer@gmail.com

点。本文中,主要针对斑块损伤的检测进行了研究。

斑块是一种常见的电影损伤,电影胶片表面由于环境悬浮杂质影响而附着了灰尘、污点,或者由于环境温、湿度影响而产生了霉斑,以及由于电影胶片的操作不当而刮擦掉胶片上的凝胶,都会产生黑色或白色斑块。

## 2 传统斑块检测算法

### 2.1 算法分类

传统的斑块检测算法可以初步分为单帧检测和多帧检测。单帧检测采用中值滤波器<sup>[3]</sup>和形态学算法<sup>[4]</sup>在一帧内提取出突变像素点并将其视为斑块,然而该算法容易将非斑块信息引入到检测结果中,误检测率一般比较高。而多帧检测是目前的主流斑块检测方法,它可以进一步分为计算比较简化的 ROD 算法(SROD)<sup>[2]</sup>、斑点检测索引算法(SDIp)<sup>[5]</sup>和等级顺序差分检测算法 ROD<sup>[6]</sup>,以及计算较为复杂的 3 维自回归(3DAR)算法<sup>[7]</sup>和马尔可夫随机场(MRF)算法<sup>[7]</sup>。这些算法都以有效的运动估计补偿技术为前提,通过有效的运动获得当前帧的前后参考帧。

### 2.2 MRF 算法

图像的马尔可夫随机特性是指帧中任一像素的灰度值只会受到它周围像素灰度值的影响,而与帧内其他不相邻的像素灰度值无关。Kokaram 等人将马尔可夫随机场(MRF)模型用于斑块检测<sup>[7]</sup>,检测模型如下:

$$P(d_k(\mathbf{i}) | z(\mathbf{i}), Z_{mc}(\mathbf{i}, t+k)) = \frac{1}{Z} \exp \left( -\frac{1}{T} \sum_{i \in S} [\alpha(1 - d_k(\mathbf{i})) \cdot (z(\mathbf{i}) - z_{mc}(\mathbf{i}, t+k))^2 + \beta_1 f(d_k(\mathbf{i})) + \beta_2 d_k(\mathbf{i}))] \right) \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{i}$  表示帧内的像素矢量,  $Z(\mathbf{i})$  表示当前帧内该矢量位置的像素值,  $Z_{mc}(\mathbf{i}, t+k)$  表示该矢量在前后运动补偿帧内对应位置的像素值。  $d_k(\mathbf{i})$  表示位置  $\mathbf{i}$  处的像素是否被判定为斑块, 其中的  $k \in \{1, -1\}$  表示在前后两个参考帧中选取一帧用于检测。上式中  $S$  是 MRF 的定义域, 表示当前帧中所有的空间位置。  $Z$  是一个标准化常数,  $T$  表示模拟退火算法中的温度常数。式中, 以  $\alpha$  为系数的第 1 项因子表达了斑块的灰度特性, 处于斑块位置的像素灰度应该与前后帧像素灰度相差比较大; 第 2 项因子  $f(d_k(\mathbf{i}))$

表示  $d_k(\mathbf{i})$  周围的一阶近邻像素中与  $d_k(\mathbf{i})$  的值不相同的点的个数。如果获得的斑块掩模局部不连续, 那会产生过大的  $\beta_1 f(d_k(\mathbf{i}))$  而导致过小的  $P(d_k(\mathbf{i}))$  值, 降低该点被判定为斑块的概率。该项表示了斑块的局部像素关系特性。第 3 项  $\beta_2 d_k(\mathbf{i})$  是对一帧图像内的斑块区域进行限制的惩罚项, 它表示了斑块的分布特性, 即在当前帧中不可能存在很多像素都属于斑块区域。式(1)常采用模拟退火算法实现概率最大化, 获得斑块检测结果。当前后参考帧的检测模板都判定某一像素为斑块时, 该点即被认为是斑块。在式(1)中, 前后帧分别用  $k=1$  以及  $k=-1$  来表示。这样最终的斑块掩模公式可表示为:

$$d_{\text{MRF}}(\mathbf{i}) = \begin{cases} 1 & \text{如果 } (d_1(\mathbf{i})=1) \cap (d_{-1}(\mathbf{i})=1) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

## 3 改进的基于 MRF 的斑块检测算法

本文提出了一种改进的基于 MRF 的斑块检测算法。该算法主要通过初步检测、MRF 细化、时域校验 3 个步骤, 来实现对斑块的检测。具体过程如下。

### 3.1 初步检测

初步斑块检测算法是通过相对简单的计算对图像中的斑块位置进行粗略确定, 它的目的在于获得所有可能属于斑块的区域。在这里将 SDIp 算法和 SROD 算法组合以尽可能包含所有潜在斑块区域。具体算法如下:

$$SROD(\mathbf{i}) = \begin{cases} \min(p_k) - z(\mathbf{i}) & \text{如果 } \min(p_k) - z(\mathbf{i}) > 0 \\ z(\mathbf{i}) - \max(p_k) & \text{如果 } z(\mathbf{i}) - \max(p_k) > 0, \\ & k=1, \dots, 6 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$SDIp(\mathbf{i}) = \begin{cases} \min(z(\mathbf{i}) - z_{mc}(\mathbf{i}, t+1))^2 & \text{如果 } (z(\mathbf{i}) - z_{mc}(\mathbf{i}, t+1)) \cdot (z(\mathbf{i}) - z_{mc}(\mathbf{i}, t-1))^2 \times \\ & (z(\mathbf{i}) - z_{mc}(\mathbf{i}, t-1)) > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$d_{\text{firstmask}}(\mathbf{i}) = \begin{cases} 1 & \text{如果 } SDIp(\mathbf{i}) > T_1 \\ 1 & \text{如果 } SDIp(\mathbf{i}) < T_1 \cap SROD(\mathbf{i}) > 0 \text{ 且 } T_1 > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式(3)中的  $p_k$  取值详见文献[2]。该式表明,在 SDIp 检测算子中,当前帧与前后参考帧的差值都超过一定阈值时,该点被判定为斑块。而当当前帧与前后参考帧的差值没有都超过一定阈值时,则用 SROD 算子对当前像素进行判定,这样可以保证所有潜在斑块被检测到。

### 3.2 MRF 优化

传统的 MRF 算法的精确度高的优点往往以巨大的迭代运算计算量为代价。同时传统的 MRF 算法在利用前后运动补偿后的参考帧对当前帧进行斑块检测时,往往会受到运动估计算法的影响,而可能在检测结果中引入新的人为损伤。在这里本文的改进算法如下。

首先计算传统的 MRF 检测结果。将式(1)中的检测范围  $S$  改为  $\hat{S}$ ,使其限制在上述初步检测结果  $d_{\text{firstmask}} = 1$  范围内,这样通过对 MRF 计算定义域进行限制,可以大大降低检测计算量。该步骤的处理结果用  $d_{\text{mc}}$  表示。对前后参考帧的 MRF 处理结果中包含了真正的斑块区域和由运动估计误差引入的新损伤;而直接在前后原始帧上使用 MRF 模型,会获得真正的斑块区域与图像中发生运动的区域。那么将两个结果中的公共区域进行有效提取,就会获得更加准确的斑块区域,实现更优的检测效果,同时排除了运动边缘的干扰。最后,可通过给基于原始帧的 MRF 算法添加去噪因子,以更好地消除由于基于光流的运动估计算法带来的噪声影响。基于前后原始帧的处理公式如下:

$$\begin{aligned} P(d_k(\mathbf{i}) | d_{\text{firstmask}} = 1, z(\mathbf{i}), z(\mathbf{i}, t+k)) \\ = \frac{1}{Z} \exp \left( -\frac{1}{T} \sum_{\mathbf{i} \in \hat{S}} [\alpha(1 - d_k(\mathbf{i}) \cdot \right. \\ \left. (z(\mathbf{i}) - z(\mathbf{i}, t+k))^2 + \right. \\ \left. \lambda_1 \beta_1 f(d_k(\mathbf{i})) + \beta_2 d_k(\mathbf{i})) \right] \quad (6) \end{aligned}$$

在上式中同样将 MRF 定义域  $\hat{S}$  限制在初步检测结果  $d_{\text{firstmask}} = 1$  的范围内。式(6)左端的  $p(d_k(\mathbf{i}) | d_{\text{firstmask}} = 1, z(\mathbf{i}), z(\mathbf{i}, t+k))$  表示该检测结果基于上面的初始检测步骤的结果  $d_{\text{firstmask}}$ 。 $z(\mathbf{i}, t+k)$  表示相邻的未经运动补偿的原始帧。这样  $z(\mathbf{i}) - z(\mathbf{i}, t+k)$  就表示相邻的原始帧之间的对应像素灰度的差值。在这里,为了对噪声以及斑块的不确定边缘部分予以抑制,降低误检测概率,相关因子  $\beta_1 f(d(\mathbf{i}))$  也被加强为  $\lambda_1 \beta_1 f(d(\mathbf{i}))$ 。其中  $\lambda_1$  为

$$\lambda_1 = \begin{cases} \tau & \text{如果 } 2 \leq f(d(\mathbf{i})) \leq 4 \\ 1 & \text{如果 } 0 \leq f(d(\mathbf{i})) \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

对于被误检测为斑块的噪声块,它所包含的大部分像素与周围背景相邻,它们的  $f(d(\mathbf{i}))$  值也常为 2~4,通过  $\lambda_1 \beta_1 f(d(\mathbf{i}))$  这个参数的设定,就会提高噪声块被判定为斑块的代价,减少潜在斑块中的噪声含量,该步骤的处理结果用  $d_{\text{or}}$  表示。

设  $d_{\text{mc}}$  中被检测为斑块的区域用  $A$  表示; $d_{\text{or}}$  中被检测为斑块的区域用  $B$  表示, $d_{\text{mc}}$  和  $d_{\text{or}}$  的合并结果用  $d_{\text{comb}}$  表示, $d_{\text{comb}}$  的斑块区域用  $C$  表示,  $C = A \cup B$ 。设  $C$  中包含  $C_1, \dots, C_p$  一共个  $p$  区域,所要求的  $d_{\text{comb}}$  中的斑块区域记做  $d_{\text{secondmask}}$ 。那么  $d_{\text{secondmask}}$  的定义如下。设  $l \in (1, p)$ ,对于每一个区域  $C_l, \forall (i, j) \in C_l$ ,

$$C_l = \begin{cases} 1 & \text{如果 } d_{\text{mc}}(i, j) \in A \cap d_{\text{or}}(i, j) \in B \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$d_{\text{secondmask}} = \begin{cases} 1 & \text{如果 } C_l = 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

上式表明,如果  $d_{\text{mc}}$  中斑块区域的任何一个点,该点在  $d_{\text{or}}$  中也属于斑块区域,那么该点在  $A$  和  $B$  的并集  $C$  中的所属的局部斑块区域也被判定为斑块。 $d_{\text{secondmask}}$  中综合了基于参考帧和基于原始帧的处理结果,实现了对传统算法的有效改善。

### 3.3 时域校验

由于运动估计精度有限,图像中运动景物的部分边缘区域往往在其前后参考帧内也呈现为灰度突变,满足上述各约束条件而出现在  $d_{\text{secondmask}}$  中,造成误检测。可发现,真正的斑块区域在前后帧邻近区域内没有与之相似的部分,而图中完整的景物块在前帧或者后帧的斑块附近区域可以找到与之形状灰度相似的像素区域。利用这一性质,可以将斑块区域在其前后帧的邻近区域内进行匹配,只有当前后帧的匹配度都很低时,才认为当前斑块属于真实斑块。具体的匹配准则按照最小均方误差(MSE)准则。

## 4 实验结果

对本文提出的斑块检测算法进行仿真测试。根据一种人工斑块生成算法<sup>[7]</sup>将无损图像加入人工生成的斑块获得受损图像。

本文采用的测试序列为从 MOBCAL 原始序列中截取的 31 帧  $256 \times 256$  像素大小的新的 MOBCAL 图像序列。算法测试中首先对新生成的 MOBCAL

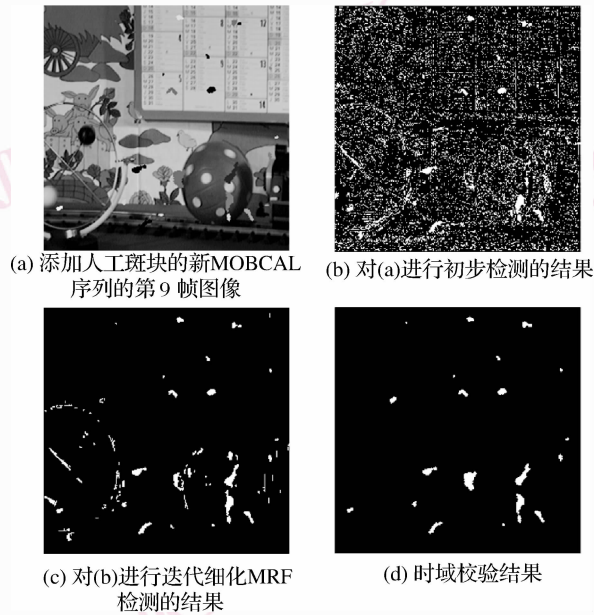


图1 检测算法 MDV 的处理流程

Fig. 1 The detection procedure of the MDV method

序列人工添加中等大小的斑块,在文献[7]提供的斑块生成算法公式中,相关参数 $\beta$ 和 $\kappa$ 分别取10和0.3。 $\alpha$ , $\beta_1$ , $\beta_2$ 和 $\tau$ 分别被设置为0.1,5,20和10。实验部分对添加了斑块后的第9帧图像进行检测,如图1所示。

从图中可以看出,MRF细化步骤有效去除了孤立的噪声点以及由运动估计误差引入的新损伤。而时域校验算法有效地去除了图中由景物形成的伪斑块。还将本文检测算法MDV与SDIp检测算法和MRF检测算法在新MOBCAL图像序列内进行了仿真对比,并以检全率和误检率作为评价指标。检全率是指正确检测到的斑块面积占实际斑块面积的比例。误检率是指误检测斑块的面积与非斑块区域面积的比例。以这两个指标为坐标轴,检测算法的对比结果如图2所示。

根据MOBCAL帧序列的特点,SDIp算法的检测阈值 $T$ 设定为12,MRF算法的相关参数也根据文献[7]中的约束关系分别设置为 $\alpha = 0.1$ , $\beta_1 = 15$ , $\beta_2 = 60$ 。本文算法的各参数如前文所示。从图中可以看出,在同样的误检测概率下,MDV算法的检全率相对MRF算法的检全率平均提高0.1左右。

另外,也对斑块检测算法的用时与传统算法进行了对比。实验的软硬件配置为:CPU 2.4 GHz,内

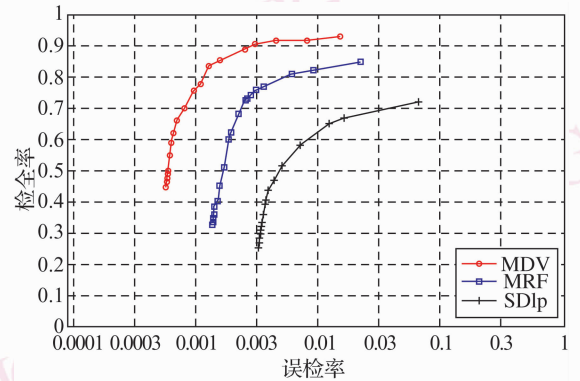


图2 基于帧序列的本文算法及传统检测算法的对比  
Fig. 2 The result comparison of the proposed and the traditional detection methods over frames

存1G,Windows XP操作系统和Matlab仿真环境。可以看到MDV算法通过对MRF算法的定义域进行限制,大大减少了模拟退火算法中迭代计算所用的时间,尽管相对于传统MRF算法增加了时域校验算法,总体耗费时间还是远少于传统MRF算法的时间。处理结果如图3所示。

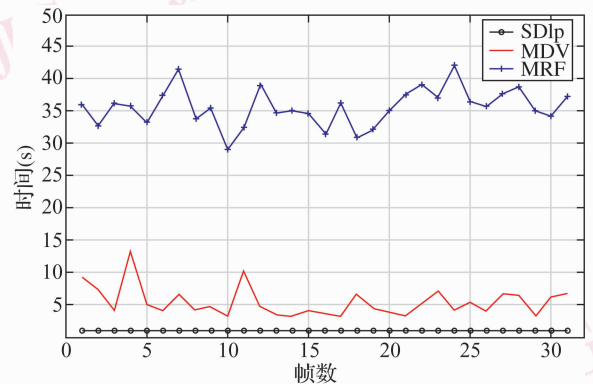


图3 多种检测算法在多帧图像内的处理时间对比  
Fig. 3 The process time of several blotch detection algorithms over frames

## 5 结论

本文提出了一种改进的基于MRF的斑块检测算法MDV。该算法综合了SROD,SDIp和MRF算法的优点,可以检测出更多的斑块,而有效的斑块校验算法也提高了检测的准确度,使得误检测率降低。最终的实验结果表明,本文提出的检测算法能够更加有效地检测图像序列中的斑块损伤,同时所耗费的运算时间也要少于传统算法。

### 参考文献 (References)

- 1 Kokaram A, Bornard R, Rares A. Robust and automatic digital restoration systems: Coping with reality [J]. *Journal of the SMPTE*. 2003, **112**(7/8):225-231.
- 2 Roosmalen P M B. Restoration of Archived Film and Video [D]. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 1999.
- 3 Alp B, Haavisto P, Jarske T. Median-based algorithms for image sequence processing [A]. In: *Proceedings of the International SPIE Visual Communications and Image Processing [C]*, Lausanne, Switzerland, 1990:122-133.
- 4 Buisson O, Besserer B, Boukir S. Deterioration detection for digital film restoration [A]. *International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, San Juan, Puerto Rico, 1997:78-83.
- 5 Kokaram A. Motion Picture Restoration [D]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University, 1993.
- 6 Nadenau M J, Mitra S K. Blotch and scratch detection in image sequences based on rank ordered differences [A]. In: *Proceedings of the 5th International Workshop on Time-varying Image Processing [C]*, Florence, Italy, 1996:27-35.
- 7 Kokaram A, Morris R D, Fitzgerald W J, *et al.* Detection of missing data in image sequences [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, **4**(11):1496-1508.