

## 图像序列中亮度闪烁去除

湛安军<sup>①②</sup> 滕升华<sup>①②</sup> 邹谋炎<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100080)

**摘要:** 保存和修复旧电影是非常迫切的一项任务。在电影修复过程中, 闪烁去除是经常遇到的一个问题。然而大多数闪烁去除算法中并没有考虑局部运动造成的影响。基于这一点, 该文提出了一种采用余弦基和逐次超松弛迭代法的闪烁去除方法。方法中充分考虑了局部闪烁和局部运动的影响, 在对实际旧电影图像处理中达到了比较满意的效果。

**关键词:** 亮度闪烁; 余弦基; 逐次超松弛迭代

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0039-04

## Removing Intensity Flicker in Image Sequences

Chen An-jun<sup>①②</sup> Teng Sheng-hua<sup>①②</sup> Zou Mou-yan<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>②</sup>(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** It is extremely needed to conserve and restore old films. Intensity flicker is a common artifact in old black-and-white film sequences. Unfortunately, the existing algorithms removing intensity flicker do not consider the effect of local motion. To improve this point, a method based on the cosine basis and the successive over-relaxation is developed in this paper. Both local motion and local flicker are considered in this method. Experiments for real-world old film sequences shows that the result is satisfactory.

**Key words:** Intensity flicker; Cosine basis; Successive over-relaxation

### 1 引言

电影的发明是人类史上一个飞跃式的进步。在电影的发展过程中, 出现过许许多多的非常优秀的具有历史、文化和艺术价值的影片。但是由于当时的科学技术条件的限制, 使得许多优秀影片都已经损坏丢失或者老化。保存和修复这笔珍贵的人类财产已经是我们刻不容缓的责任。现代数字技术的发展使得修复工作进入了一个新的时期。国外在这方面做了大量的研究工作, 然而国内还没有人涉足这方面的工作。

在旧电影修复中, 所遇到一些主要问题有划痕、斑点、噪声和闪烁去除。本文讨论的是闪烁去除。闪烁是指视频图像空间上和时间上亮度不自然的随机变化。这种随机变化并不是场景中的原始亮度变化反映, 给人一种一闪一闪的视觉效果, 使人的眼睛非常容易疲劳。造成闪烁的主要原因是胶片老化、化学变化、胶片不同曝光时间以及质量较差胶片转换拷贝。在现代电影拍摄当中, 从不同视角拍摄同一物体也会因为摄像机的性能和不同光照条件出现闪烁的情况。闪烁处理初看起来是一个非常简单的问题, 但事实并非如此。在前期研究中, 一些研究者<sup>[1,2]</sup>用均衡直方图或者连续帧均值的简单方法进行处理。这些方法对于一些人工闪烁或者轻微

老化的影片还比较实用, 但是对于大多数实际旧电影处理, 效果非常不理想。在当前的研究中, 闪烁问题处理的主要思路<sup>[3-6]</sup>是建立闪烁模型(包括线性模型和非线性模型), 然后根据观察值估计模型参数, 达到去除闪烁的目的。引起注意的是文献[3,4,6]中并没有考虑由于局部运动造成的局部区域参数估计不正确的问题。文献[5]中虽然考虑了局部运动, 但是其本身参数估计方法就不是很精确, 在有比较严重局部闪烁的时候, 处理效果不佳。

根据实际电影修复中遇到的一些问题, 本文充分考虑了局部运动和局部闪烁造成的影响, 提出了一种采用余弦基和逐次超松弛迭代法的闪烁去除方法。仿真结果显示对于比较严重的闪烁电影图像也有不错的效果。

### 2 亮度闪烁模型

由于造成闪烁的原因非常多, 如果对于每一个原因都建立模型的话, 工作量将是非常的巨大, 而且这显然也没有必要。通常情况下, 可以将亮度闪烁模型分为线性模型和非线性模型。线性模型有着比较广泛的应用。闪烁的一个显著特点是空间分布上是光滑的。也就是说两个像素之间由于闪烁造成的差异不是突变的。在这个机理上, 大多数研究者都把模型定义为以下一个经验公式:

$$I_{n+1}(x, y) = a(x, y)I_n(x, y) + b(x, y) \quad (1)$$

这个公式表达了连续两帧图像之间亮度的关系。其中  $I_n(x, y)$  表示第  $n$  帧图像,  $I_{n+1}(x, y)$  表示第  $n+1$  帧图像,  $a(x, y)$  表示亮度闪烁的乘性因子(或者称为增益),  $b(x, y)$  表示亮度闪烁加性因子(或者称为偏移量)。  $a(x, y)$ ,  $b(x, y)$  空间上都是光滑变化的。这个模型充分考虑了空间上局部闪烁的变化。这也是线性模型主要形式。非线性模型现在研究并不多, 主要是针对直方图的一个灰度非线性变换, 没有考虑空间上局部闪烁的变化, 所以效果并不理想。

根据以上模型, 去除闪烁问题就转化成估计参数  $a(x, y)$ ,  $b(x, y)$ 。参数  $a(x, y)$ ,  $b(x, y)$  是空间上光滑变化的函数, 可以用低阶多项式或者其他基底逼近。在文献[6]中比较详细地讨论这方面的问题。假设  $\Phi$  是函数基底矩阵:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi_1(\mathbf{x}_1) & \phi_2(\mathbf{x}_1) & \cdots \\ \phi_1(\mathbf{x}_2) & \phi_2(\mathbf{x}_2) & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中  $\phi_i(x) = \phi_i(x, y)$ , 可以是多项式表达式或者其他基底表达式。下面给出多项式基底和余弦基底的表达式。

多项式基底为

$$\phi_i(x, y) = x^k y^l \quad (3)$$

这里  $i$  表示第  $i$  阶基底,  $k, l$  是第  $i$  阶基底对应的  $x, y$  的阶次。

余弦基底为

$$\left. \begin{aligned} \phi_{pq}(x, y) &= \alpha_p \alpha_q \cos\left(\frac{\pi p(2x+1)}{2M}\right) \cos\left(\frac{\pi q(2y+1)}{2N}\right) \\ \alpha_q &= \begin{cases} 1/\sqrt{N}, & q=0 \\ \sqrt{2/N}, & 1 \leq q \leq N-1 \end{cases} \\ \alpha_p &= \begin{cases} 1/\sqrt{M}, & p=0 \\ \sqrt{2/M}, & 1 \leq p \leq M-1 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

这里  $\phi_{pq}(x, y)$  是第  $p, q$  阶基底,  $M \times N$  为图像大小。

那么式(1)就可以表示成为

$$I_{n+1}(x, y) = \sum_{i=1}^r a_i \phi_i(x, y) I_n(x, y) + \sum_{i=1}^r b_i \phi_i(x, y) \quad (5)$$

其中  $a(x, y) = \sum_{i=1}^r a_i \phi_i(x, y) I_n(x, y)$ ,  $b(x, y) = \sum_{i=1}^r b_i \phi_i(x, y)$ , 式中  $r$  表示基总阶数。

为了求得参数  $a = (a_1, a_2, \dots, a_r)$ ,  $b = (b_1, b_2, \dots, b_r)$ , 可以按照平方误差最小的原则来估计。

$$\left. \begin{aligned} (\mathbf{a}, \mathbf{b}) &= \arg \min_{(\mathbf{a}, \mathbf{b})} \sum_{(x, y)} \rho \left( I_{n+1}(x, y) - \sum_{i=1}^r a_i \phi_i(x, y) I_n(x, y) - \sum_{i=1}^r b_i \phi_i(x, y) \right) \\ \rho(x) &= \frac{1}{2} \log(1 + x^2) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

求解平方误差最小值, 迭代重加权最小二乘是非常经典的一种方法<sup>[7]</sup>。其算法步骤如下:

(1)初始化参数  $\mathbf{a}, \mathbf{b}$ 。

(2)计算迭代方程:

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{a}^{i+1} \\ \mathbf{b}^{i+1} \end{bmatrix} &= (J^T W^i J)^{-1} J^T W^i I_{n+1} \\ J &= \begin{bmatrix} \phi_1(\mathbf{x}_1) I_n(\mathbf{x}_1) & \cdots & \phi_p(\mathbf{x}_1) I_n(\mathbf{x}_1) \\ \vdots & & \vdots \\ \phi_1(\mathbf{x}_L) I_n(\mathbf{x}_L) & \cdots & \phi_p(\mathbf{x}_L) I_n(\mathbf{x}_L) \\ \phi_1(\mathbf{x}_1) \cdots \phi_p(\mathbf{x}_1) \\ \vdots & & \vdots \\ \phi_1(\mathbf{x}_L) \cdots \phi_p(\mathbf{x}_L) \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中  $L$  为图像总的像素数。

(3)更新加权值

$$W^{i+1} = \frac{\rho \left( I_{n+1}(x, y) - \sum_{i=1}^r a_i \phi_i(x, y) I_n(x, y) - \sum_{i=1}^r b_i \phi_i(x, y) \right)}{I_{n+1}(x, y) - \sum_{i=1}^r a_i \phi_i(x, y) I_n(x, y) - \sum_{i=1}^r b_i \phi_i(x, y)} \quad (8)$$

(4)判断误差值, 如果趋向 0, 则结束, 否则返回(2)。

$$\mathbf{a}^{i+1} - \mathbf{a}^i \rightarrow 0, \quad \mathbf{b}^{i+1} - \mathbf{b}^i \rightarrow 0 \quad (9)$$

计算过程中, 为了使参数  $\mathbf{a}, \mathbf{b}$  误差值收敛, 根据文献[7]一般选取初始值  $\mathbf{a}=1, \mathbf{b}=0$ 。

文献[6]中结论显示采用余弦基比多项式基有更低的误差。我们用 Lena 图像加入人工闪烁进行了仿真试验, 如图 1。结果发现采用多项式基在有噪声干扰的情况下估计精度大大下降, 而采用余弦基几乎不受影响。这里仿真用的噪声是加性高斯噪声, 人工闪烁是用一阶参数按照线性模型得到的。仿真参数  $a=1, b=20$ , 采用余弦基估计的参数为  $a=1.001, b=19.95$ , 采用多项式基估计的参数为  $a=1.05, b=14.36$ 。从图 1(c), 1(d)的比较可以看出, 采用余弦基去闪烁 Lena 图的亮度更接近原图像。为了更清楚显示比较结果, 我们把去闪烁后的图与原图直接相减, 结果显示如图 1(e), 1(f)。从结果可以看出用多项式基去闪烁图与原图像差值图上还能隐约看到一些 Lena 图轮廓, 这说明去闪烁结果不充分, 而采用余弦基去闪烁差值图上基本上没有 Lena 图像的轮廓, 去闪烁效果比较好。

基于以上实验我们采用余弦基来逼近乘性因子和加性因子。

### 3 修正局部运动引起的不正确估计

#### 3.1 局部运动检测

在图像序列中一个非常重要的特征是, 图像中的对象是运动的。对象在运动过程中必然会出现遮挡暴露现象, 这也引起运动区域会有像素的灰度变化。然而第 2 节所叙述的模型中并没有考虑图像中的局部运动。因此在参数估计的过程



图 1 余弦基与多项式基比较

中必然出现在运动区域参数估计的不正确的现象。特别是出现运动区域的灰度变化强度和其他静止区域局部闪烁变化强度接近时,就无法区分是由于运动变化引起的灰度变化还是闪烁引起的灰度变化。因此修正模型中不正确的参数估计是非常必要的。

用常规的运动区域检测的方法在这里是行不通的。原因有两点:(1)图像本身灰度差异比较大,直接检测两帧之间的灰度差异效果不理想;(2)在运动区域由于参数估计不正确造成特征模糊,比较难以提取,即使能找到很好的特征提取方法,也是非常复杂,无谓增加了计算复杂度。因此必须寻找其他思路。

我们分析一下闪烁本身性质。从信号角度看,闪烁主要是一些低频信号构成,在空间上具有比较好的光滑性。根据闪烁的这个性质,我们可以设想一下。对于同一个区域,在闪烁参数光滑的条件下,如果采用左右或者上下相邻区域的闪烁参数对其进行去闪烁处理,得到结果应该差别不是很大。而在运动区域由于遮挡暴露引起的灰度变化,估计出来的闪烁参数会发生变化。因此用运动区域估计出来的闪烁参

数和相邻静止区域估计出来的闪烁参数同时对同一区域去闪烁结果差别就会比较大。利用闪烁光滑的性质,为我们检测运动区域提供了思路。实验结果表明这个思路也是行得通的。

具体算法如下:

(1)将图像分成多个矩形区域,每个矩形区域与相邻区域重叠一个像素,如图 2。矩形大小选取不宜太小,矩形太小,重叠像素就太少,使得闪烁参数波动太大,矩形也不宜选取太大,矩形太大不能充分反应局部闪烁的特征,一般选取 20~30 像素为宜;

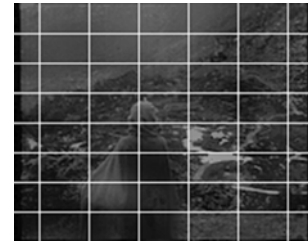


图 2 矩形分块例子

(2)利用第 2 节算法得到的闪烁参数  $a(x,y)$ ,  $b(x,y)$ , 计算每个矩形块内闪烁参数的均值;

(3)在重叠像素上分别用对应的矩形平均闪烁参数计算去闪烁结果;

(4)在重叠像素上比较去闪烁结果,首先计算不相似像素的个数,公式如下:

$$n_{m,n} = \sum_{(x,y) \in R_{m,n}} \text{bool}(|I_m(x,y) - I_n(x,y)| > T_r) \quad (10)$$

式中  $m,n$  分别标注相邻的两块矩形区域,  $R_{m,n}$  表示相邻区域重叠的像素组,  $T_r$  表示相似度阈值,反映同一个像素上用相邻区域闪烁参数去闪烁后的相似程度,  $I_m$  和  $I_n$  分别是  $m,n$  区域去闪烁后的灰度值,  $\text{bool}(\cdot)$  是布尔函数, true 为 1, false 为 0。

然后比较不相似的像素个数  $n_{m,n}$  是否超过阈值  $n_{\max}$ , 如果  $n_{\max}$  大于就标定两个区域都为运动区域。

这里要说明一点,上面方法所检测出来的运动区域并不是精确的运动区域检测,但是对于闪烁参数估计来说,由于其本身光滑性,并不要求非常精确的运动区域检测。

### 3.2 运动区域参数修正

上面大致检测出对象运动区域,也就是说这些区域的参数估计是不正确的或者说是不可靠的。由于闪烁参数光滑的性质,插值和平滑处理就非常适合接下来的处理。通过插值和平滑技术,利用邻近区域的闪烁参数来重新估计运动区域的闪烁参数,并对整个参数进行空间平滑。逐次超松弛迭代法(successive over-relaxation)<sup>[7]</sup>是非常适合闪烁参数插值和平滑的算法。此算法在插值的同时也进行了平滑的作用。这里仅用乘性因子来说明参数修正的过程,加性因子的过程类似。计算过程如下:

(1)对不可靠区域赋初始值,这里我们赋为1;

(2)计算迭代权值,公式如下:

$$W_{x,y} = \begin{cases} 0, & \text{var}(I(x,y)) < T_n \\ \sqrt{\frac{\text{var}(I(x,y)) - T_n}{T_n}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

这里  $W_{x,y}$  是迭代权值,  $T_n$  是噪声阈值。

(3)计算残余迭代项,公式如下:

$$r_{x,y}^{k+1} = W_{x,y}(a_{x,y}^k - a_{x,y}^0) + \lambda(4a_{x,y}^k - a_{x-1,y}^k - a_{x+1,y}^k - a_{x,y-1}^k - a_{x,y+1}^k) \quad (12)$$

(4)乘性因子迭代,公式如下:

$$a_{x,y}^{k+1} = a_{x,y}^k - \omega \frac{r_{x,y}^{k+1}}{W_{x,y} + 4\lambda} \quad (13)$$

这里,  $\lambda$  是平滑因子,  $\omega$  是松弛因子。

#### 4 仿真结果

本文选取了实际电影中的两帧图像。从图像中能明显看出图4比图3要暗很多,而且每个区域暗的程度并不一样,也就是说闪烁参数在空间上并不是一个常量,与空间位置有关。特别是在图4中靠右侧有一条明显的黑带。图5给出了局部闪烁比较明显的位置。

如果不考虑图像中物体的局部运动,按照文献[6]采用迭代重加权最小二乘法估计闪烁参数,得到的结果如图6。由于局部运动造成了图像中人物的背部衣服非常的模糊,去闪烁效果不佳。应用3.1节提出运动区域检测的方法,在图6的基础上进行了局部运动检测,图7标出了运动检测的结果。这里使用的检测阈值分别是  $T_r = 8.8$ ,  $n_{\max} = 6$ 。再使用逐次超松弛迭代算法对图6进行修正,得到图8。从图中可以看出,图像质量有了很大的改善。逐次超松弛迭代算法中用到的参数分别为  $T_n = 5$ ,  $\lambda = 5$ ,  $\omega = 1$ 。



图3 前一帧图像



图4 后一帧图像

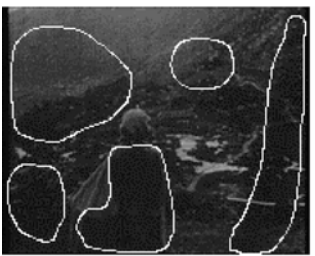


图5 局部闪烁明显的地方



图6 无修正的去闪烁结果

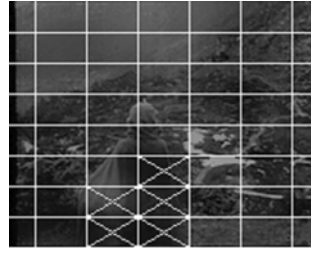


图7 检测出的运动区域



图8 修正后的去闪烁结果

#### 5 结束语

本文提出了一种采用余弦基和逐次超松弛迭代法的闪烁去除方法。方法中充分考虑了局部闪烁和局部运动的影响。将方法应用在比较严重局部闪烁现象的电影上,也得到了不错的效果,证明了方法的有效性。本方法的不足之处在于运算时间有些过长,主要时间消耗在初始闪烁参数的估计上。但这也是应该能够改进的地方,因为闪烁参数光滑性给运算带来非常大的方便。将图像分块后再进行参数估计,然后再利用插值算法计算所有像素点的闪烁参数。当然这只是一个思路,应该还有其他更多更好的方法可以研究出来。比如在模型参数上可以考虑如何设计一个非线性模型形式,这也是今后需要进一步研究之处。

#### 参考文献

- [1] Muller-Seelich H, Plashzug W, and Schallauer P. Digital restoration of 35mm film. In Proc. ECMAST 96, Belgium, 1996: 255-265.
- [2] Richardson P and Stuer D. Restoration of historic film for digital compression: A case study. In Proc. ICIP-95, Washington, DC, 1995: 49-52.
- [3] Ohuchi T, Seto T, and Komatsu T. A robust method of image flicker correction for heavily-corrupted old film sequences. In Proc. ICIP-2000, Vancouver, BC, Canada, 2000: 672-675.
- [4] Naranjo V and Albiol A. Flicker reduction in old films. In Proc. ICIP-2000, Vancouver, BC, Canada, 2000: 657-659.
- [5] Van Roosmalen P M B, Legendijk R L, and Biemond J. Correction of intensity flicker in old film sequences. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 1999, 9(7): 1013-1019.
- [6] Kokaram A C, Dahyot R, and Pitie F. Simultaneous luminance and position stabilization for film and video. Proc. SPIE Volume 5022, Image and Video Communications and Processing, Santa Clara, USA, 2003: 688-699.
- [7] Press W H, Teukolsky S A, and Vetterling W T. Numerical Recipes in C, 2<sup>nd</sup> Ed., U.K: Cambridge University, 1992: 863-870.

谌安军: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为图像修复、无线宽带通信技术。

邹谋炎: 男, 1941年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为信号处理、图像处理和无线宽带通信技术。