

基于帧间中频能量关系的自适应视频水印算法*

杨列森^{1,2+}, 郭宗明^{1,2}

¹(北京大学 计算机科学技术研究所,北京 100871)

²(北京大学 文字信息处理技术国家重点实验室,北京 100871)

An Adaptive Video Watermarking Scheme Based on the Middle-Frequency Energy Relationship Between Adjacent Frames

YANG Lie-Sen^{1,2+}, GUO Zong-Ming^{1,2}

¹(Institute of Computer Science and Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

²(National Key Laboratory of Text Processing Technique, Peking University, Beijing 100871, China)

+ Corresponding author: E-mail: yangliesen@icst.pku.edu.cn, <http://www.pku.edu.cn>

Yang LS, Guo ZM. An adaptive video watermarking scheme based on the middle-frequency energy relationship between adjacent frames. *Journal of Software*, 2007,18(11):2863-2870. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/2863.htm>

Abstract: The approximate invariance of the middle frequencies energy relationship between video adjacent frames under photometric distortion and spatial desynchronization is discovered by analysis. Based on this approximate invariance, a new robust video watermarking scheme is proposed. It can adjust embedding strength adaptively according to human visual system features. Experimental results show that the proposed scheme is resilient to photometric distortion, spatial desynchronization and combined distortion effectively.

Key words: approximate invariance; adaptive video watermarking; robust; photometric distortion; spatial desynchronization; geometric distortion

摘要: 通过分析发现了视频帧间中频能量关系对于光度失真和空间同步失真的近似不变性.基于这种近似不变性,提出了一种可以根据人类的视觉系统特性,自适应地调整嵌入强度的鲁棒视频水印算法.实验表明,该算法可以有效抵抗光度失真、空间同步失真及其组合失真.

关键词: 近似不变性;自适应视频水印;鲁棒;光度失真;空间同步失真;几何失真

中图法分类号: TP309 文献标识码: A

互联网的迅猛发展使得数字视频的消费需求不断增长,随之而来的各种版权问题也日益突出.虽然在传输过程中可以通过加密技术有效保护数字内容不被非法使用,但是,一旦数字内容到达最终用户并被合法解密之后,加密技术就不能对其进行任何保护了.人们迫切需要一种新的技术,在数字内容被解密后仍能保护其内容.数字水印技术则有能力满足这些要求.

* Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.20060101Z3006 (国家高技术研究发展计划(863)); the National Key Technology R&D Program of China under Grant No.2006BAH02A10 (国家科技支撑计划课题)

Received 2006-03-08; Accepted 2006-11-03

作为版权保护的一项最新技术,数字水印在真正应用之前必须解决很多问题,其中一个核心问题是水印的鲁棒性,就是经历了常规的信号处理后,仍能准确检测出水印的能力.对于视频而言,常规的信号处理包括光度失真(如有损压缩、噪声、滤波、对比度/亮度调整等)、空间同步失真(也称几何失真,如裁剪、放缩、平移、旋转、透视、非线性变换、球形变换、局部几何变换等各种几何变换)、时间同步失真(如帧插入、帧删除、帧交换、帧频转换等)等几类处理^[1].

在有针对性地解决某一类或者几类失真的鲁棒性的研究成果中,一般水印算法常常只对某类失真具有鲁棒性,而对其他类失真没有鲁棒性,或者鲁棒性很差.比如早期的鲁棒性算法,往往是针对一般光度失真具有鲁棒性,对于几何变换导致的空间同步失真没有任何鲁棒性.后来出现的抗空间同步失真的很多算法抵抗光度失真的能力又很差.还有一些算法对时间同步失真具有很好的鲁棒性,对于空间同步失真的抵抗力则很差.而在实际应用,如视频编辑中,光度失真、空间同步失真往往是同时发生的,时间同步失真有时也会发生.仅对某一类失真具有鲁棒性,对其他类失真不具备鲁棒性的算法,往往很难投入实际应用.

本文从实际应用出发,提出了一种新的视频水印算法.该水印算法不但对光度失真、空间同步失真具有很强的鲁棒性,而且对其组合也具有很强的鲁棒性.此外,对时间同步失真也具有一定程度的鲁棒性.

本文第 1 节回顾分析相关研究的进展.第 2 节详细描述本文所提算法的基础.第 3 节详细描述视频水印嵌入和检测方案.第 4 节给出算法的实验结果和分析讨论.第 5 节给出本文的结论.

1 相关研究进展

在水印鲁棒性研究的成果中,Cox等人提出的扩展频谱的嵌入和检测思想很好地解决了保真度和鲁棒性方面的矛盾,成为鲁棒性水印的奠基性算法思想^[1].此外,一般提高水印鲁棒性常用的思想方法还有冗余嵌入、在感知上的重要系数中嵌入、在已知鲁棒性的系数中嵌入等^[1].而对抗时间和空间同步失真的一般思想则是穷举搜索、同步模板、自相关、不变水印等.不过,这些思想方法只是一些基本的提高水印鲁棒性的思想和方法,并不是专门解决水印抵抗某一类失真的鲁棒性问题的完整方案.

为了有效抵抗其中的某一类失真,研究人员通常把这 3 大类失真分开来逐个独立研究.如在变换域中频系数里嵌入水印,可以在相当程度上抵抗轻度的光度失真^[1];利用RST(rotation, scale, translation)不变嵌入子空间等,抵抗因为简单几何变换(RST)带来的轻度的空间同步失真^[1];Eugene用有限状态机作为帧水印密钥生成器,可抵抗随机的帧删除、帧插入、帧交换等时间同步攻击^[2,3].

另一方面,在实际应用时,如视频编辑,视频可能经历多种变换和处理,光度失真、空间同步失真往往是同时发生的,时间同步失真有时也会发生.只抵抗某一类失真的算法往往无能为力.为了解决这个问题,部分研究人员开始研究同时抵抗多种类型的失真问题.

Haitsma提出了通过调制每一帧的平均亮度,按帧嵌入水印信息的水印算法^[4].该算法可以较好地抵抗多种类型的空间同步失真,但其抗有损压缩等光度失真的能力较弱.Zhao等人对Jaap Haitsma算法进行改进,提高了检测准确率^[5],但其抗有损压缩等光度失真的能力仍然较弱.Song等人提出的基于能量的水印方法^[6]可以抵抗多种几何变换导致的空间同步失真,但是不能抵抗裁剪导致的空间同步失真,对于光度失真的抵抗力一般.此外,该算法需要对每一帧图像作整体离散傅里叶变换,计算量很大.

Niu等人提出的沿时间轴嵌入水印的算法^[7]可以抵抗一定频率的丢帧导致的时间同步失真,可以抵抗多种几何变换导致的空间同步失真,对于有损压缩导致的光度失真也有较好的抵抗力.但是,该方法选择水印嵌入点的方法过于复杂,而且不能抵抗各类可导致水印嵌入点在帧内产生相对偏移的空间同步失真.陈真勇等人提出了可同时较好地抵抗空间同步失真和轻度时间同步失真的水印算法^[8].但是,当视频画面变化较快、或者视频水印序列较长时,水印相关性检测失效概率非常高.这样,实际有效的视频水印序列必然很短,这就导致水印空间很小,容易遭受穷举方式的攻击,而且检测的虚警率比较高.此外,该方法对于抵抗光度失真的能力较弱.

Jung等人提出的基于“场景”的视频水印算法^[9]可以较好地抵抗多种类型的时间同步失真和简单几何变换导致的空间同步失真,但其算法计算量大,且视频质量下降明显.Sun等人提出的基于ICA(independent component

analysis)提取视频特征的水印算法^[10]可以较好地抵抗多种类型的时间同步失真,还可以抵抗常见的光度攻击,如压缩等,但对于空间同步失真则没有抵抗力。

此外,基于三维变换的方法如基于 3D DCT(discrete cosine transform)变换^[11]、3D DWT(discrete wavelet transform)变换^[12]等方法,可在不同程度上抵抗这 3 大类失真中的部分类型的处理引起的失真,但都存在计算复杂性高等问题。张立和的 3D Gabor变换对于帧删除和视频压缩有一定的效果^[13],但其计算过于复杂,而且几乎不能抵抗空间同步失真。

在实际应用中,视频的光度失真、空间同步失真往往是同时存在的,但是,目前国内外研究成果中尚未发现可同时有效抵抗空间同步失真和光度失真的视频水印算法。本文提出了一种新的视频水印方法,该方法可以同时抵抗大多数类型光度失真、空间同步失真及其组合,同时可以抵抗一定程度的随机帧插入和帧删除导致的时间同步失真。

2 基本事实

2.1 帧间DCT中频能量关系的近似不变性

以下讨论中的 DCT 变换除非特别指明,都是指视频的亮度分量按 8×8 分块的 DCT 变换。

设 f_{me} 为视频 1 帧内各个 8×8 块的 DCT 变换的中频能量和的平均值,记 $f_{me}(p)$ 为视频第 p 帧的各个 8×8 块的 DCT 变换的中频能量和的平均值。

$$f_{me}(p) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{i=S}^T (DCT(p, m, i) \times DCT(p, m, i)) \tag{1}$$

其中, M 为该视频 1 帧内 8×8 块的个数, $DCT(p, m, i)$ 为第 p 帧中的第 m 个 8×8 块(记为 $Block(p, m)$)的 DCT 变换依照 Zig-Zag 顺序的第 i 个系数。 S, T 分别为 DCT 变换依照 Zig-Zag 顺序的中频系数的起点和终点。

我们考察了一段视频内各帧 f_{me} 的变化规律。图 1 是帧大小为 QCIF(quarter common intermediate format)的视频片段 Foreman 的一段在不同情况下的 $f_{me}(p)$ 曲线。

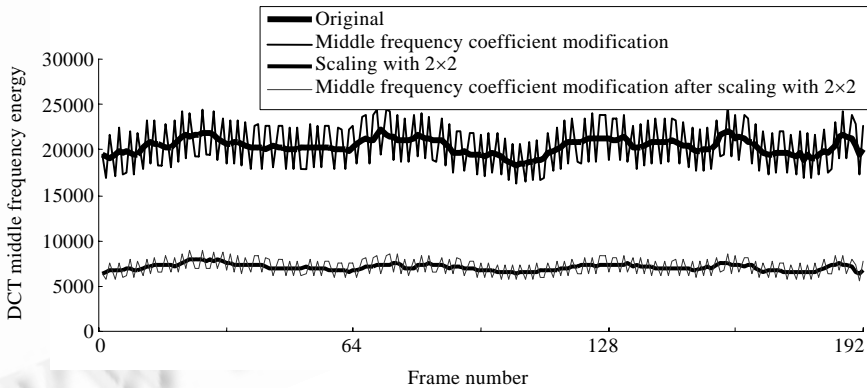


Fig.1 Curves of $f_{me}(p)$ in different cases

图 1 不同情况下 $f_{me}(p)$ 曲线

经过多次实验我们发现,在一段视频内,各帧的 f_{me} 有如下特性:

- 1) 距离、内容相近的帧,其 f_{me} 也非常接近。
- 2) 在保证保真度的情况下,通过一定方式调整一帧之内各个 DCT 块的部分中频系数大小,可以显著改变当前帧的 f_{me} ,从而改变该帧的 f_{me} 和前后帧的 f_{me} 的相对大小关系。
- 3) 虽然调整后一帧的 f_{me} 会随着不同的空间同步失真、光度失真而变动,但各帧 f_{me} 的相对大小关系几乎不受各种空间同步失真和光度失真等的影响。这就是视频帧间 DCT 中频能量关系的近似不变性。

根据以上观察可以得出:

- 1) 原始视频的 $f_{me}(p)$ 与 $\frac{f_{me}(p-1)+f_{me}(p+1)}{2}$ 非常接近;
- 2) 通过调整原始视频第 $p-1$ 帧,第 p 帧,第 $p+1$ 帧这3帧中DCT块的部分中频系数,可以使调整后的视频的 $f_{me}(p)$ 与 $\frac{f_{me}(p-1)+f_{me}(p+1)}{2}$ 差距显著增大,而且其相对大小关系满足我们设定的要求,比如 $f_{me}(p) > \frac{f_{me}(p-1)+f_{me}(p+1)}{2}$.这样就可以利用视频的第 $p-1$ 帧,第 p 帧,第 $p+1$ 帧3帧的这一相对大小关系和视频各帧DCT中频能量关系的近似不变性嵌入1位水印. $f_{me}(p)$ 与 $\frac{f_{me}(p-1)+f_{me}(p+1)}{2}$ 的差距越大,它们之间的相对大小关系就越可能在经历了空间同步失真、光度失真后保持下来,从而该处水印信息就越可能生存下来,水印的鲁棒性就越强.

2.2 人类视觉特性

由于人类的视觉暂留特性,当视频图像序列中相邻画面的变化剧烈时,人眼的分辨力会快速下降.这就是人类对于视频画面感知的时域中的掩蔽效应.因此,在保证人眼不可感知的情况下,变化剧烈的画面比变化平缓的画面可以允许更大的变化量.利用这一特性,可以根据每一帧画面相对于前一帧的变化程度,自适应地调整画面的变化强度,而不被人所察觉.

此外,Watson给出了二维DCT变换系数的敏感度的模型^[1].对于不同的系数,敏感度不同.利用这一特性,可以自适应调整每个系数的变化程度,而不被人所察觉.

3 视频水印算法

根据前一节的分析,本文提出了利用DCT中频能量关系的近似不变性来嵌入水印,并利用人类视觉系统特征,自适应调整地嵌入强度的鲁棒性视频水印算法.该算法包括嵌入方案和检测方案两部分.

3.1 嵌入方案

设编码、扩频、调制后的水印是长度为 N 的双极性二值伪随机序列 $w(n)$,其中, $w(n) \in \{-1, 1\}, n=0 \sim N-1$.设 $w(n)$ 嵌入到视频的第 $p-1$ 帧,第 p 帧,第 $p+1$ 帧,则水印的嵌入方法可以简单描述如下:

当 $w(n)=-1$ 时,要调整第 $p-1$ 帧,第 p 帧,第 $p+1$ 帧DCT中频系数,使得

$$f_{me}(p) < \frac{f_{me}(p-1)+f_{me}(p+1)}{2} \quad (2)$$

当 $w(n)=1$ 时,要调整第 $p-1$ 帧,第 p 帧,第 $p+1$ 帧DCT中频系数,使得

$$f_{me}(p) > \frac{f_{me}(p-1)+f_{me}(p+1)}{2} \quad (3)$$

要使式(2)成立,只要按一定幅度减小 $f_{me}(p)$,同时增大 $f_{me}(p-1), f_{me}(p+1)$ 即可.式(3)正好相反.通常调整数据大小有两种方式:一种是加法,一种是乘法.在本算法中,我们采取加法和乘法相结合的方式,分别根据数据大小和加性阈值以及乘性阈值来进行设置.而乘性阈值是由最小阈值和最大阈值组合而成的,组合系数则是根据画面变化程度动态调整的,以增强嵌入强度.

记整段视频的各个基本嵌入参数分别为:加性嵌入阈值 ADD_T 、乘性嵌入阈值的最大值 MAX_T 和最小值 MIN_T ,满足 $ADD_T \leq MIN_T \leq MAX_T$.设定每个 8×8 块乘性嵌入阈值初始组合系数为 α_0 .具体嵌入过程描述如下:

首先选定嵌入的起始点帧.从嵌入起点帧开始,连续 N 次依次往后读取视频帧,每次读取3帧.对于第 n 次获取的3帧视频,准备用来嵌入水印序列的第 n 位水印 $w(n)$,其中, $n=0 \sim N-1$.设其中间帧相对于当前嵌入起点的帧序号为 p ,有 $p=n \times 3+1$.其中, $n=0 \sim N-1$.嵌入第 n 位水印 $w(n)$ 的过程如下:

(1) 调整视频第 p 帧的DCT变换的中频系数

首先计算第 p 帧相对于第 $p-1$ 帧的变化程度(可以用对应像素点亮度差的平均值来描述),并据此确定该帧的基本乘性嵌入阈值组合系数 $\alpha(p)$.

$$\alpha(p)=\alpha_0+\beta(p) \tag{4}$$

其中, $\beta(p)$ 为自适应调整量, 为第 p 帧相对于第 $p-1$ 帧的变化程度的函数.

对于第 p 帧中的第 m 个 8×8 块 $Block(p,m), m=0 \sim M-1$.

(a) 计算 $Block(p,m)$ 的乘性嵌入阈值

计算 $Block(p,m)$ 相对于 $Block(p-1,m)$ 的变化程度(可以用对应像素点亮度差的平均值来描述)和中频能量, 并据此调整该块的乘性嵌入阈值组合系数. 设 $\alpha(p,m)$ 为 $Block(p,m)$ 的乘性嵌入阈值组合系数, 满足 $0 \leq \alpha(p,m) \leq 1$. 设 $Block(p,m)$ 的乘性嵌入阈值组合系数调整量为 $\beta(p,m)$, 它是 $Block(p,m)$ 相对于 $Block(p-1,m)$ 的变化程度和 $Block(p,m)$ 中频能量、亮度的函数, 则有

$$\alpha(p,m)=\alpha(p)+\beta(p,m) \tag{5}$$

$Block(p,m)$ 的乘性嵌入方式的阈值 $M_T(p,m)$ 为

$$M_T(p,m)=\alpha(p,m) \times MIN_T + (1-\alpha(p,m)) \times MAX_T \tag{6}$$

(b) 计算系数 $DCT(p,m,i)$ 的嵌入强度

根据 Watson 关于 DCT 变换系数的敏感度的模型^[1], 调整其嵌入强度为 $\lambda(i)$

$$\lambda(i)=\max(1, DCT_Freq_Sensitivity(i) \times Scale_D) \tag{7}$$

其中, $DCT_Freq_Sensitivity(i)$ 为 DCT 频率敏感度表按 Zig-Zag 顺序的第 i 个敏感度值; $Scale_D$ 为一个调节系数; $\max(\cdot)$ 为取最大值的函数.

(c) 调整中频系数 $DCT(p,m,i)$

调整根据水印密钥选定的 DCT 变换的部分中频系数. 根据设定的水印嵌入参数和 $DCT(p,m,i)$ 的值, 确定是否需要调整中频系数 $DCT(p,m,i)$. 对于绝对值小于给定参数 ADD_T 的中频系数不作调整; 对于需要调整的, 再根据中频系数绝对值的大小来确定采用加性方式还是乘性方式调整. 记 $DCT(p,m,i)$ 嵌入水印信息后的值为 $DCT'(p,m,i)$, 调整量为 $\Delta(p,m,i)$. 具体计算方法如下:

$$DCT'(p,m,i) = DCT(p,m,i) + \Delta(p,m,i).$$

$$\Delta(p,m,i) = \begin{cases} 0, & |DCT(p,m,i)| < ADD_T \\ \lambda(i)w(n), & ADD_T \leq DCT(p,m,i) < M_T(p,m) \\ -\lambda(i)w(n), & -M_T(p,m) < DCT(p,m,i) \leq -ADD_T \\ \frac{DCT(p,m,i)}{M_T(p,m)} \lambda(i)w(n), & M_T(p,m) \leq |DCT(p,m,i)| \end{cases} \tag{8}$$

(2) 调整视频第 $p-1$ 帧和第 $p+1$ 帧的 DCT 变换的中频系数

分别用 $p-1$ 和 $p+1$ 替换步骤 1) 中的 p , 并用 $-w(n)$ 替换步骤 1) 中的 $w(n)$, 按照步骤 1) 中的步骤和方法, 调整视频第 $p-1$ 帧和第 $p+1$ 帧的 DCT 变换的中频系数.

3.2 检测方案

检测视频是否含有水印的方法如下:

1) 选择检测起点帧.

2) 特征向量. 从当前的检测起点帧开始, 依次往后连续 N 次读取视频, 每次读取 3 帧. 对于第 n 次读取的连续的 3 帧视频, 选择中间帧, 记其相对于当前检测起点的帧序号为 p , 则有 $p=n \times 3 + 1$, 其中, $n=0 \sim N-1$. 检测特征向量 V 的分量 $v(n)$ 的计算方法如下:

$$v(n) = \begin{cases} 1, & \varepsilon(n) > \varepsilon_0 \\ -1, & \varepsilon(n) < -\varepsilon_0 \\ 0, & -\varepsilon_0 \leq \varepsilon(n) \leq \varepsilon_0 \end{cases}, n=0 \sim N-1 \tag{9}$$

其中, ε_0 为一个正常数, $\varepsilon(n)$ 计算方法如下:

$$\varepsilon(n) = f_{me}(p) - \frac{f_{me}(p-1) + f_{me}(p+1)}{2}, n=0 \sim N-1 \tag{10}$$

3) 归一化相关性检测.计算特征向量 $\mathbf{V}=(v(0),\dots,v(n),\dots,v(N-1))$ 与向量 $\mathbf{W}_r=(w(0),\dots,w(n),\dots,w(N-1))$ 的归一化相关性 τ .

$$\tau = \frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{W}_r}{|\mathbf{V}| |\mathbf{W}_r|} \quad (11)$$

设 τ_{nc} 为检测阈值.如果 $\tau \geq \tau_{nc}$,则表明被检测的该段视频有水印,将当前检测起点后移 $N \times 3$ 帧;否则,选择当前检测起点后移1帧.按照步骤2)继续检测水印,直到视频末尾为止.

4 实验结果

我们采用多种类型的视频片段进行实验.实验中所用的素材共5个,分别为 car-phone,flower,paris,football,stefan,其中,前3个素材的帧大小为 CIF(common intermediate format),后2个素材的帧大小为 SIF(source intermediate format).

由于水印是在视频的亮度分量上进行嵌入和检测的,因此,所有只影响色度的变换和处理,都不会给水印检测带来任何影响.这里,我们只给出抵抗空间同步失真和光度失真的实验结果.空间同步失真和光度失真的类型非常多,受篇幅所限,表1~表3只给出部分类型的水印检测结果.实验中 N 取64.部分加入水印后的视频以及加入水印后经历组合失真的视频如图2所示.其中:(a)带水印的 Car-Phone;(b)带水印的 flower;(c)带水印的 football;(d)带水印的 stefan;(e)经历组合失真:裁剪+非等比放缩(取中间 144×144 放缩至 352×240)+噪声后的带水印的 Car-Phone;(f)经历组合失真:旋转 45° +裁剪+滤波后的带水印的 flower;(g)经历组合失真透视+幅度调整后的带水印的 football;(h)经历组合失真:旋转 5° +裁剪(4边各裁掉64)+非等比放缩(至SIF)+有损压缩(video compact disc,简称VCD)后的带水印的 stefan.

Table 1 Watermark detection results under spatial desynchronization

表1 空间同步失真下水印的检测结果

Sequence	Frames	NOWE	Number of watermarks detected (NOWD) under spatial desynchronization						
			Scaling (XY:1/4)	Scaling (XY:4)	Scaling (X:1/2, Y:5/4)	Rotating 5 degrees, clipping	Rotating 45 degrees, clipping	Perspective transforming	Clipping to a center part (144×144), scaling to 352×240
Car-Phone	400	2	2	2	2	2	2	2	2
Flower	250	1	1	1	1	1	1	1	1
Paris	1 065	5	5	5	5	5	5	5	5
Football	250	1	1	1	1	1	1	1	1
Stefan	600	3	3	3	3	3	3	3	3

Table 2 Watermark detection results under photometric distortion

表2 光度失真下水印的检测结果

Sequence	Frames	NOWE	NOWD under spatial desynchronization and photometric distortion			
			Adding noise	Amplitude changing (Brightness+ Contrast+Gamma correction)	Linear filtering (Gaussian filtering, radius=5)	Compression (VCD)
Car-Phone	400	2	2	2	2	2
Flower	250	1	1	1	1	1
Paris	1 065	5	5	5	5	5
Football	250	1	1	1	1	1
Stefan	600	3	3	3	3	3

Table 3 Watermark detection results under spatial desynchronization and photometric distortion

表3 空间同步失真和光度失真同时发生时水印的检测结果

Sequence	Frames	NOWE	NOWD under photometric distortion			
			Clipping, scaling, adding noise	Rotating 45 degrees, clipping, linear filtering	Perspective transforming, amplitude changing	Rotating 45 degrees, clipping, scaling, compression
Car-Phone	400	2	2	2	2	2
Flower	250	1	1	1	1	1
Paris	1 065	5	5	5	5	5
Football	250	1	1	1	1	1
Stefan	600	3	3	3	3	3

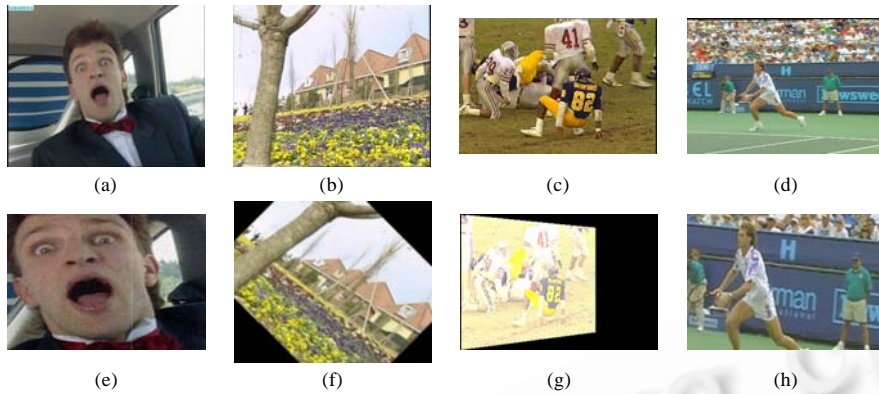


Fig.2 Watermarked video and distortional watermarked video

图 2 带水印的视频及失真后的带水印的视频

从表 1 可以看出,本文所提出的视频水印算法对于非等比放缩、透视、1/4×1/4 的等比缩小和 4×4 的等比放大都达到了 100%的检测准确率.同时,对于组合的几何变换,如裁剪和非等比放缩,同样达到了 100%的检测准确率.这是其他算法难以达到的.这说明,该算法可以有效抵抗空间同步失真.

从表 2 可以看出,该算法对于 4 种主要类型的光度失真——噪声、幅度变化、滤波、有损压缩,其检测准确率都达到了 100%.尤其是有损压缩,在 VCD 级质量的压缩下(低于 VCD 质量的视频一般是人们无法接受的),检测准确率仍然为 100%.这是其他算法难以实现的.

从表 3 可以看出,当空间同步失真和光度失真同时发生时,该算法仍然能达到 100%的检测准确率.这是其他算法难以做到的.

此外,表 4 给出了 3 个视频片段多次随机插入和随机删除的检测结果.从表 4 可以看出,该算法对于随机帧插入和帧删除导致的时间同步失真也具有一定的鲁棒性.

Table 4 Watermark detection results under time desynchronization

表 4 时间同步失真下水印的检测结果

Sequence	Frame Size	Frames	NOWE, 5 times	Randomly inserting, 5 times		Randomly inserting, 5 times		Randomly deleting, 5 times		Randomly deleting, 5 times	
				Frames inserted	NOWD	Frames inserted	NOWD	Frames deleted	NOWD	Frames deleted	NOWD
Flower×4	CIF	1 000	25	10	3	5	6	10	3	5	12
Car-Phone	CIF	400	10	4	2	2	3	4	2	2	2
Paris	CIF	1 065	25	10	6	5	13	10	1	5	10

以上实验结果表明,该算法可以有效抵抗光度失真、空间同步失真及其联合失真,还可以抵抗一定程度的时间同步失真.

本算法的虚警概率非常低.Cox给出了采用近似高斯方法估计归一化相关的虚警概率估计值的方法^[1],根据该方法,扩频调制出的水印越长,水印检测的虚警概率越低.在实验中,水印长度为 $N=64$,当检测阈值为 0.6 时,单次检测的虚警概率约为 $P_{fp}=1.14e-11$.如果需要更低的虚警概率,可以采用更长的水印.

与已有的视频水印算法相比,本文提出的算法在可以抵抗的失真的种类和失真的程度上都有很大的提升,检测准确率也大为提高.相对于文献[4,5],本文提出的算法可以有效抵抗光度失真.与文献[6,7]相比,本文提出的算法可以有效抵抗裁剪导致的空间同步失真,对光度失真的抵抗力也更强,而且嵌入方法更简单,运算量更低.与文献[8]相比,不但适用于画面变化平缓的视频节目,也适用于变化较快的视频节目,抵抗光度失真能力大为增强.与文献[9]相比,可以抵抗更加复杂和剧烈的空间同步失真,而且视频质量没有明显下降.与文献[10]相比,可以抵抗空间同步失真.与文献[11-13]相比,不但低于空间同步失真和光度失真的能力更强,而且计算量非常小.

实验过程中我们还发现,仅仅依靠黄金序列的自同步特性来抵抗时间同步失真,效果是十分有限的.对于帧频发生变化的视频转码,在帧频明显降低的同时,水印没有存活下来,当然也无法检测到了.对于如何使得水印

在经历帧频变换的转码后仍能存活下来并被检测到,需要继续深入研究.

5 结 论

我们通过分析发现了视频中帧间 DCT 中频能量均值的相对大小关系在光度失真和空间同步失真情况下的近似不变性.基于这种近似不变性,我们提出了一种新的鲁棒视频水印嵌入方法.同时,根据人们对于变化剧烈画面分辨力会快速下降的特性,以及 Watson 关于 DCT 变换系数的敏感度的模型,自适应调整水印嵌入强度,大幅度地提高了水印的鲁棒性.实验表明,该算法不但能够有效抵抗空间同步失真、光度失真,而且还可以抵抗这两类失真的组合.此外,算法还能抵抗一定程度的时间同步失真.

致谢 在此,我们感谢陈真勇博士公开了其视频水印攻击程序.该程序加快了本文所提算法的研究过程.

References:

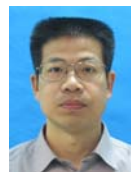
- [1] Cox IJ, Miller ML, Bloom J. Digital Watermarking. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [2] Lin ET, Delp EJ. Temporal synchronization in video watermarking. IEEE Trans. on Signal Processing, 2004,52(10):3007-3022.
- [3] Lin ET, Delp EJ. Temporal synchronization in video watermarking: Further studies. In: Delp III EJ, Wong PW, eds. Proc. of the SPIE-IS & T Electronic Imaging, Security and Watermarking of Multimedia Contents V. SPIE Vol.5020, Santa Clara: SPIE, 2003. 493-504.
- [4] Haitsma J, Kalker T. A watermarking scheme for digital cinema. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Image Processing. New York: IEEE Press, 2001. 487-489.
- [5] Zhao Y, Legendijk RL. Video watermarking scheme resistant to geometric attacks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Image Processing, Vol.2. New York: IEEE Press, 2002. 45-148.
- [6] Sang MD, Yang WX, Zhao Y. Time-Axis based video watermarking resisting to geometrical attacks. In: Yuan B, ed. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Signal Processing, Vol.3. New York: IEEE Press, 2004. 2350-2353.
- [7] Niu XM, Schmucker M, Busch C. Video watermarking resisting to rotation, scaling, and translation. In: Delp III EJ, Wong PW, eds. Proc. of the SPIE, Vol.4675, Security and Watermarking of Multimedia Contents IV. San Jose: SPIE, 2002. 512-519.
- [8] Chen ZY, Deng JH, Tang L, Tang ZS. A novel video watermarking resisting to attacks combined by spatial and temporal desynchronization. In: Zhang YJ, ed. Proc. of the 12th National Conf. on Image and Graphics (NCIG 2005). Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 161-166 (in Chinese with English abstract).
- [9] Jung H, Lee YY, Lee S. RST-Resilient video watermarking using scene-based feature extraction. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2004,2004(14):2113-2131.
- [10] Sun JD, Liu J. A temporal desynchronization resilient video watermarking scheme based on independent component analysis. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Image Processing, Vol.1. New York: IEEE Press, 2005. 265-268.
- [11] Yang J, Hu JP, Liu P. Video watermarking by 3D DCT. In: Yuan B, ed. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Signal Processing, Vol.1. New York: IEEE Press, 2004. 861-864.
- [12] Campisi P, Neri A. Perceptual video watermarking in the 3D-DWT domain using a multiplicative approach. In: Barni M, *et al.*, eds. Proc. of the 4th Int'l Workshop on Digital Watermarking (IWDW). LNCS 3710, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 432-443.
- [13] Zhang LH, Wu HT, Hu CL. A video watermarking algorithm based on 3D Gabor transform. Journal of Software, 2004,15(8): 1252-1258 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1252.htm>

附中 文参 考文 献:

- [8] 陈真勇,邓俊辉,唐龙,唐泽圣.抗时空联合同步攻击的视频水印新方案.见:章毓晋,编.第 12 届全国图象图形学学术会议论文集.北京:清华大学出版社,2005.161-166.
- [13] 张立和,伍宏涛,胡昌利.基于三维 Gabor 变换的视频水印算法.软件学报,2004,15(8):1252-1258. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1252.htm>



杨列森(1974-),男,山东滕州人,博士生,主要研究领域为数字视频处理,数字水印,信息隐藏,数字版权保护.



郭宗明(1966-),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为数字视频处理,数字水印,数字版权保护,计算机辅助卡通动画.