

抵抗多种攻击的视频水印新方案

吕安强

(华北电力大学电子与通信工程系,保定 071003)

摘要 随着多媒体技术的发展,数字视频的版权保护变得越来越重要。为了设计一种更加实用的数字视频水印,提出了集成多种技术的、对多种攻击鲁棒的自适应、盲检测视频水印新算法。首先,利用 Arnold 置乱技术将水印置乱,并进行 Turbo 编码,以提高其安全性;然后,根据视频的特征,即归纳的频率敏感性、色度敏感性、运动敏感性、纹理敏感性和亮度敏感性选取关键帧,并运用分块技术将关键帧进行 3 维分块;再进行 3 维小波分解,选中低频区域作为嵌入域;此外,为了抵抗旋转、缩放攻击,采用了一种新方法,即用 Zernike 矩提取视频的旋转、缩放不变信息;最后采用盲检测技术提取水印。通过对典型视频数据的攻击和测试,得出了水印的鲁棒性指标。结果表明,本文水印适合多种内容特点的视频,能够抵抗目前常见的各类攻击,具有一定的实用价值。

关键词 视频水印 水印攻击 Turbo 码 Zernike 矩 视频分块

中图法分类号: TP309 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)11-2205-07

A Novel Video Watermarking Scheme Against Manifold Attacks

LÜ An-qiang

(The Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003)

Abstract The copyright protection of digital videos is becoming more important with the development of multimedia technology. A novel adaptive video watermarking scheme integrated of several techniques is proposed in this paper in order to obtain one practical watermarking. The scheme is robust against manifold attacks and the watermark can be retrieved blindly. First, the watermark was scrambled by Arnold scramble and Turbo coded to obtain the improved security. Secondly, the key frames were selected based on the video characteristics such as frequency sensitivity, chroma sensitivity, movement sensitivity, texture sensitivity and luminance sensitivity which were summarized in this paper. Then the key frames were segmented to three dimension blocks and the watermark was embedded into the middle-low frequency domain of the three dimension wavelet decomposed coefficients of the blocks. In addition, a new method was adopted which can extract the invariable information of rotated and zoomed videos by Zernike movement. The invariable information can be used to conquer rotating and zooming attacks. Finally, the watermark was retrieved blindly. The robustness was obtained with attacks and tests to the typical videos. Experimental results demonstrate that the scheme is accommodated to videos with various content characteristics and can conquer the present attacks. It has certain practical values.

Keywords video watermark, watermarking attacks, Turbo code, Zernike moment, video segmentation

1 引言

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。为了解决加密技术在解密后不能保护视频内容的困难,发明了数字水印,它在数字内容被解密后仍能保护其内容,使其不被非法使用。

收稿日期:2008-01-23;改回日期:2008-09-01

第一作者简介:吕安强(1979~),男,讲师,2005 年于华北电力大学获通信与信息系统专业硕士学位。主要研究方向为数字图像处理、数字水印。E-mail:lvaqdz@163.com

近些年,数字水印的研究发展很快。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],在此基础上,提出了抵抗某种攻击或抵抗几种攻击的水印算法。Song 等人提出的基于能量的水印方法^[2]可以抵抗多种几何攻击,但是不能抵抗裁剪攻击,对于信号处理攻击的抵抗力一般;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^[3],该算法可以较好地抵抗多种类型的几何攻击,但其抗有损压缩的能力较弱;Zhao 等人对 Haitsma 算法进行改进,提高了检测准确率^[4],但其抗有损压缩的能力仍然较弱;Sun 等人提出的基于 ICA (independent component analysis) 提取视频特征的水印算法^[5]可以较好地抵抗多种类型的帧编辑攻击,还可以抵抗常见的压缩,但对于几何攻击没有抵抗力。

在实际应用中,视频所遭受的各种攻击往往是同时存在的,只有能够同时抵抗各种攻击的水印算法才是具有实际意义的。本文设计了一种新的视频水印算法,该算法综合利用多种技术,采用自适应嵌入和盲检测,对多种攻击具有鲁棒性。

2 视频水印的攻击方法及抗攻击策略

视频水印的攻击方法可以分为几何攻击、信号处理攻击、格式转换攻击、帧编辑攻击、共谋攻击以及上述攻击方法的综合。

数字水印作为版权保护的有力工具,应能抵抗各类攻击,但目前国内外的水印算法一般都只能抵抗一类或几类攻击,因此设计一种能够抵抗各类攻击的综合水印算法是很有意义的。

不同的攻击方法有不同的特点,应该有针对性地采用不同的方法加以克服。针对几何攻击中的旋转、缩放,采用 Zernike 矩^[6]的方法加以克服;对于剪裁、行列删除、纵横比变化等数据删除性攻击,以及数字信号处理攻击,采用水印纠错编码的方法加以克服;针对格式转换攻击,根据 Cox 等人提出的 NEC 算法思想,即将水印信息嵌入到视觉上最重要的地方将具有更高的鲁棒性,将水印数据嵌入小波变换后的中低频分量中;对于帧编辑攻击,采用重复嵌入的方法加以克服;对于共谋攻击,通过计算帧间相似性,并结合 3 维分块技术,将水印嵌入不相似的帧中。以上方法需要在满足不可见性的前提下集成到一起。

3 水印嵌入算法

3.1 水印的处理

数字水印系统可以被看作是一个通信系统的实例^[7],即宿主视频数据可以看作是通信信道,水印数据可以看作是信道中传输的信号,水印攻击可以被看成是加在信道上的噪声。根据香农定理^[7],信号的随机性越强,信道抵抗噪声的能力就越强,即水印数据的随机性越强,则水印方案抵抗各种攻击的能力就越强。采用的 Turbo 编码^[8]是目前具有最好纠错性能的随机编码,用它来抵抗剪裁、行列删除、纵横比变化等数据删除性攻击,以及数字信号处理攻击。

为了提高水印的安全性,在编码之前先将水印进行置乱。置乱的方法有多种,例如幻方、Hilbert 曲线、IFS 模型、Arnold 变换和混沌置乱等,它们的置乱性能逐渐增强,但复杂度也相应增加。综合考虑算法的置乱性能和复杂度,采用了 Arnold 置乱算法。

采用 64×64 的二值图像作为待嵌入的水印数据。采用穷举法来确定最优的 Arnold 变换次数和 Turbo 码编码器结构。方法如下:假设 Arnold 变换的周期为 N ,再选用 M 种纠错性能较好的 Turbo 码,则有 $M \times N$ 种置乱编码组合,依次选用某一种组合对水印进行置乱编码,然后对置乱编码后的水印数据进行攻击(如删除、换位、增加、滤波等),再对攻击后的水印解码、反置乱,通过与原水印的相似性比较,确定最优的置乱编码组合。表 1 列出了穷举过程中几组较好组合的性能。第 1 列是 Arnold 置乱的次数,第 2 列是 4 种 Turbo 编码结构,第 3 列是多种攻击后恢复水印与原始水印的相似性(SIM)。

表 1 不同组合遭受攻击后与原水印的相似性
Tab. 1 Similitude between original and attacked watermark in different combinations

Arnold 置乱	Turbo 编码	SIM (%)
8	结构 1	100
15	结构 2	98.6
28	结构 3	97.4
35	结构 4	99.1

采用式(1)所示的 Arnold 变换,变换周期为 48,采用的变换次数为 8 次。Turbo 编码器采用结构 1,其传输函数如式(2)所示。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \pmod{N} \quad (1)$$

$$\begin{cases} G(D) = \left[1, \frac{g_1(D)}{g_0(D)} \right] \\ g_0(D) = 1 + D_2 + D_3 \\ g_1(D) = 1 + D + D_3 \end{cases} \quad (2)$$

3.2 水印的嵌入

3.2.1 使用 Zernike 矩抵抗旋转缩放攻击

Zernike 矩是一种非常精确的形状描述子,具有旋转缩放不变性的宝贵特性,在形状描述领域中有重要的应用。MPEG-7 已经将 Zernike 矩作为对视频对象形状描述的重要组成部分。

文献[6]利用 Zernike 矩的这一特性提出了一种能够有效抵抗旋转和缩放等几何变换的图像水印算法。假设点 (u, v) 为图像的中心点,其半径 R_{ref} 是满足所包含圆的平均亮度等于圆周上的像素平均亮度的最小圆的半径。对图像做规范化处理后,经过 Zernike 矩变换得到二阶 Zernike 矩 Z_1 和 Z_2 ,再由 Z_1 和 Z_2 生成两个密钥 k_1, k_2 ,根据式(3)得到 r_1, r_2 。

$$k_1 = r_1 R_{ref}, k_2 = r_2 R_{ref} \quad (3)$$

由 r_1, r_2 得到两个圆 C_1 和 C_2 ,对圆 C_1 和 C_2 上

各个像素的亮度相加,得到一个新的概念圆 C ,根据 C 上亮度值最大和最小的像素之间的距离 D 来判断水印信息,如式(4)所示。

$$f(u, v) = \begin{cases} 0 & D \geq \pi \\ 1 & D < \pi \end{cases} \quad (4)$$

对文献[6]中的算法加以改进,改进算法详见水印嵌入过程。通过算法改进使得水印的嵌入只和图像本身的特性相关,同时不改变原有算法抗旋转和缩放的能力。

3.2.2 水印的自适应嵌入

在嵌入水印时应该考虑两件事情:一个是选择嵌入位置,另一个是确定嵌入方法。

用于版权保护的数字水印在尽量提高鲁棒性的同时还要满足人类的视觉极限,因此必须根据 HVS^[9] 找到嵌入位置。本文将 HVS 归纳为频率敏感性、色度敏感性、运动敏感性、纹理敏感性和亮度敏感性。在接下来的嵌入过程中,充分利用了这些特性。嵌入过程如图 1 所示。

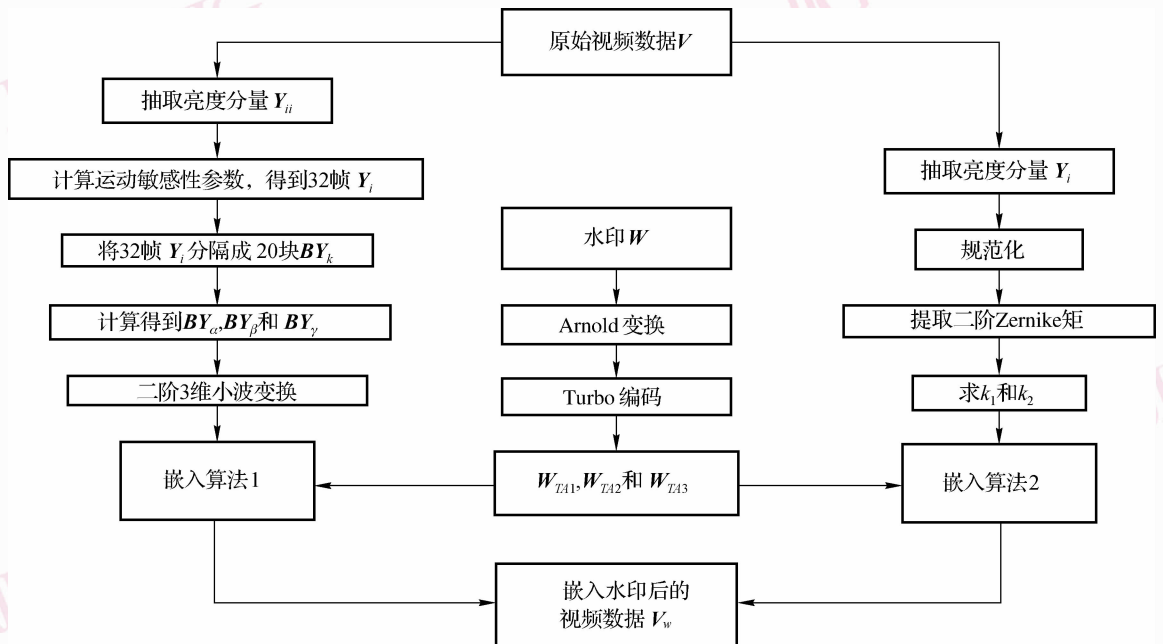


图 1 水印嵌入过程

Fig. 1 Watermaking embedding process

第 1 步,将 2 维的二值水印图像数据 $W(64 \times 64)$ 扫描到 2 维的矩阵中并实施 Arnold 变换,从而得到置乱后的 2 维矩阵 W_A 。然后,将 W_A 扫描成 1 维二进制序列并输入前面介绍的 Turbo 编码器进行编码,编码输出为 $64 \times 64 \times 3$ 的二进制序列 W_{TA} (多

出来的数据是纠错码的冗余位,靠这些冗余位来提高纠错能力)。接下来,将 W_{TA} 等分成 64×64 的 3 块 W_{TA1}, W_{TA2} 和 W_{TA3} 以方便后面的嵌入,如图 1 中间分支所示。

第 2 步,从视频文件中抽取亮度分量 Y ,因为它

是最有效的数据,根据 NEC 算法,嵌入到它里面的水印才具有最强的鲁棒性。根据式(5)所示的运动敏感性阈值计算公式,寻找 32 帧满足敏感性大于此阈值的视频帧 $Y_i (i=1, 2, \dots, 32)$ 。

$$Y_{\Delta moment} = \frac{1}{352 \times 288} \sum_{m=1}^{352} \sum_{n=1}^{288} Y_{\Delta}(m, n) \quad (5)$$

式中, $Y_{\Delta}(m, n) = |Y_{t+\Delta t} - Y_t|$ (t 代表当前帧的编号)。

接下来,将 Y_i 按照 64×64 的尺寸切分成 20 块 $BY_j (j=1, 2, \dots, 20)$, 于是可得到 20 块尺寸为 $64 \times 64 \times 32$ 的 3 维数据块 $BY_k (k=1, 2, \dots, 20)$, 如图 2 所示。

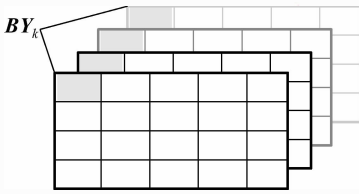


图 2 亮度分量的分块

Fig. 2 Segmentation of luminance

$$c'(u, v) = \begin{cases} c(u, v) - c(u, v) \bmod S + T_1 & \text{当 } w(u, v) = 1 \text{ 且 } c(u, v) \geq 0 \\ c(u, v) + |c(u, v)| \bmod S - T_1 & \text{当 } w(u, v) = 1 \text{ 且 } c(u, v) < 0 \\ c(u, v) - c(u, v) \bmod S + T_2 & \text{当 } w(u, v) = 0 \text{ 且 } c(u, v) \geq 0 \\ c(u, v) + |c(u, v)| \bmod S - T_2 & \text{当 } w(u, v) = 0 \text{ 且 } c(u, v) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $w(u, v)$ 是水印序列 W_{TA1} , W_{TA2} 和 W_{TA3} 中的数据, $c(u, v)$ 是小波变换后 $HLL2$ 和 $LHL2$ 中的系数, $c'(u, v)$ 是嵌入水印后的系数, S 是非负整数(且满足 $T_1 = S/4, T_2 = 3T_1$)

嵌入完成后,对 $c'(u, v)$ 实施反 2 阶 3 维小波变换就得到了嵌入水印后的视频数据,再将它们放回原来的位置即可。

上述方法可以有效抵抗信号处理攻击、格式转换攻击、共谋攻击和除旋转、缩放之外的几何攻击。为了提高水印抗旋转、缩放攻击和帧编辑攻击的性能,应该在上述嵌入过程的同时,进行另外的嵌入过程,这个过程要应用 Zernike 变换(抗旋转、缩放攻击),又因为仍然选用同一个水印,所以这也是一个重复嵌入的过程(抗帧编辑攻击)。这个过程如图 1 中的右侧分支所示。

首先,从提取的亮度分量中选择 64 帧数据 $YY_i (i=1, 2, \dots, 64)$ (这 64 帧数据必须满足两个条件:其一,不是前面用到的那 32 帧亮度数据;其二,

根据式(6)和式(7)所示的亮度敏感性 L_k 和纹理敏感性 D_k 阈值计算公式,通过计算,选择计算值都高于以上二值的 20 块数据中的 3 块 BY_{α}, BY_{β} 和 $BY_{\gamma} (\alpha, \beta, \gamma \in [1, 20])$ 作为水印的嵌入块。

$$L_k = \frac{1}{32 \times 64 \times 64} \sum_{k=1}^{32} \sum_{m=1}^{64} \sum_{n=1}^{64} Y_k(m, n) \quad (6)$$

$$D_k = \frac{1}{32 \times 64 \times 64} \sum_{k=1}^{32} \sum_{m=1}^{64} \sum_{n=1}^{64} w(L_k) \frac{|Y_k(m, n) - L_k|}{L_k} \quad (7)$$

式中, $Y_k(m, n)$ 是 BY_k 中的亮度数据, $w(L_k) = (1/L_k)^{\rho}, \rho = 0.6 \sim 0.7$ 。

第 3 步,折中考虑复杂度和性能,对选定的 3 块数据 BY_{α}, BY_{β} 和 BY_{γ} 实施了 2 阶 3 维小波变换。根据 NEC 算法的思想,且为了抵抗滤波和压缩攻击,将置乱和编码后的水印序列 W_{TA1}, W_{TA2} 和 W_{TA3} 嵌入到了中低频小波系数 $c(u, v)$ 中($c(u, v)$ 是 $HLL2$ 和 $LHL2$ 中的小波系数),详见式(8)。

在每一帧数据中都能找到 64×3 个 Zernike 二阶矩的圆心点)。然后将它们规范化,并提取二阶 Zernike 矩,求出 k_1, k_2 , 每帧亮度数据中嵌入 64×3 位水印信息。嵌入完成后,同样将各帧数据放回视频文件的原位置,构成最终的嵌入水印后的视频文件。

需要说明的是,在整个嵌入过程中,所有用到的参数都应作为密钥保留。

4 水印提取算法

水印提取是嵌入的逆过程,本文采用水印盲提取算法,具体过程如图 3 所示。

从待提取水印的视频数据 V'' (可能是被攻击过后的视频)中抽取出亮度分量 Y' , 这些亮度分量可以分成两类,一类是采用 Zernike 矩方法嵌入水印的部分,另一类是采用自适应算法嵌入水印的部分。根据密钥,从第 1 类中抽出 64 帧亮度分量 Y''_i , 从第

2 类中抽出 32 帧亮度分量 Y'_i , 然后分别从这两组数据中提取水印。

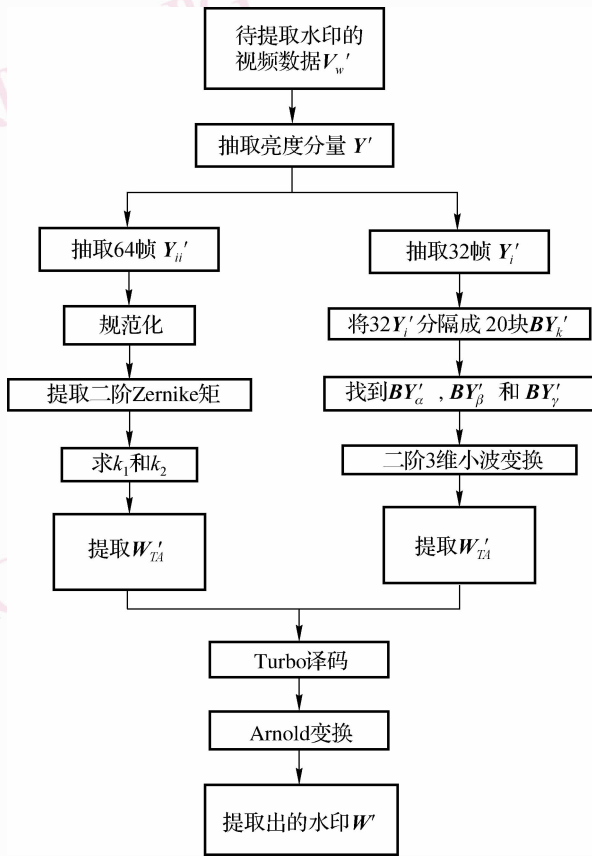


图 3 水印盲提取过程

Fig. 3 Blind watermarking extraction process

如图 3 中左面的分支所示, 首先将 Y''_{ii} 规范化, 然后提取二阶 Zernike 矩, 计算出 k'_1 和 k'_2 , 再根据式 (4) 提取出水印 W''_{TA} 。

在图 3 右面的分支中, 首先将 Y''_i 分隔成 20 块 BY'_k , 并找到和 BY'_α, BY'_β 和 BY'_γ 对应的 BY'_α, BY'_β 和 BY'_γ 。然后, 对 BY'_α, BY'_β 和 BY'_γ 做二阶 3 维小波变换, 根据式 (9) 提取出水印数据 W''_{TA} 。

$$W''_{TA}(u, v) = 1 \quad \text{若 } |c''(u, v)| \bmod S < \frac{T1 + T2}{2}$$

$$W''_{TA}(u, v) = 0 \quad \text{若 } |c''(u, v)| \bmod S \geq \frac{T1 + T2}{2}$$

(9)

式中, $c''(u, v)$ 是小波系数。

最后, 将 W''_{TA} 和 W''_{TA} 分别进行 Turbo 译码, 并将译码输出进行 Arnold 变换, 得到两幅水印图像, 选择质量较好的作为最终提取出的水印。

5 实验结果与性能分析

选用 352×288 的视频流 “mobile. cif (300 帧)”, “vectra. yuv (142 帧)” 和 “tempete. cif (260 帧)” 进行实验, 原因是它们分别代表了不同的视频特点, “mobile. cif” 是具有场景渐变、镜头伸缩特点的视频; “vectra. yuv” 是场景变化明显的视频; “tempete. cif” 是镜头伸缩幅度大、图像细节变化明显的视频。对这 3 种视频做测试, 实验结果将具有普遍性。

按照方案设计的目的, 分别进行不同程度的鲁棒性测试, 并根据式 (10) 计算提取水印与嵌入水印的相似度。

$$SIM(W, W') = \frac{\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^8 W(i, j) W'(i, j)}{\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^8 [W(i, j)]^2} \quad (10)$$

本算法能抵抗多种攻击, 表 2 ~ 表 6 主要列出了有代表性的测试数据, 表中数据为提取出的水印与原始水印的相似度。

表 2 旋转攻击实验性能

Tab. 2 Performance against rotation attacks

旋转 (°)	mobile. cif (%)	vectra. yuv (%)	tempete. cif (%)
5	90.1	91.3	92.1
10	87.6	85.3	90.2
15	86.1	81.1	85.4
20	80.2	79.5	80.1
30	73.6	74.8	76.7

表 3 缩放攻击实验性能

Tab. 3 Performance against zooming attacks

缩放	单位: %		
	mobile. cif	vectra. yuv	tempete. cif
50	72.3	69.2	73.2
80	79.8	75.6	78.5
95	90.5	92.1	89.6
110	91.9	93.5	92.5
200	80.6	81.4	86.2

表 4 MPEG 压缩实验性能

Tab. 4 Performance against MPEG attacks

MPEG (Mbps)	mobile. cif (%)	vectra. yuv (%)	tempete. cif (%)
6	98.3	90.2	80.5
3	88.6	95.3	84.2

表 5 行列删除攻击实验性能

Tab. 5 Performance against row deleting attacks

行列删除 (行列数)	mobile. cif(%)	vectra. yuv(%)	tempete. cif(%)
20	99.9	98.9	99.5
40	98.0	97.9	98.4
60	92.1	93.3	92.2
80	86.6	87.4	85.3
100	74.3	76.2	75.2

表 6 丢帧攻击实验性能

Tab. 6 Performance against frame dropping attacks

单位: %

丢帧	mobile. cif	vectra. yuv	tempete. cif
2	100	100	100
4	99.2	99.5	98.9
8	94.1	96.8	95.9
16	85.6	82.7	83.1
20	67.2	65.6	67.4

利用 Zernike 矩嵌入的水印被提取出来后与原始水印计算相似度得到表 2、表 3 中的数据。从表中可以看出,Zernike 矩可以有效抵抗旋转和缩放攻击。作为对比,也计算了不使用 Zernike 矩方法后提取的水印与原始水印的相似度,其结果与表 2、表 3 中相差甚远。可见,要抵抗旋转与缩放攻击,Zernike 矩是一个很好的选择。

由于水印数据在嵌入之前进行了 Turbo 编码,所以即使进行表 4 中的行列删除,提取出的水印和

原始水印仍然有很好的相似性。实验结果表明,若不经编码直接嵌入,则经过行列删除后,其相似性平均降低 26% 左右。

MPEG 压缩是视频水印遭受的特有攻击,这种攻击可能是有意的,也可能是无意的。表 5 中对两种压缩率的性能进行了测试,实验结果比较乐观。这主要是因为把水印嵌入了 3 维小波域的中低频部分。

丢帧攻击是视频水印遭受的另一种特有攻击,它依靠破坏水印完整性阻碍水印的提取。由于本算法采用了 Turbo 码和重复嵌入策略,因此可以从纠错和多次提取方面加以克服。实验性能如表 6 所示。

在分块后又选出了 3 块进行嵌入是为了满足不可见性和 NEC 算法思想的要求。

此外,在抵抗共谋攻击方面,因为线性共谋攻击分为两类^[10]:如果水印嵌入者在大量的视觉上相异的视频帧中通过线性组合嵌入相同的水印,那么攻击者就可以估计出水印信息,这种攻击是第 1 类线性共谋攻击;如果水印嵌入者在大量的视觉上相同的视频帧中通过线性组合嵌入不同的水印,那么攻击者就可以估计出原始视频信息,这种攻击是第 2 类线性共谋攻击。本文算法根据帧间相似性选择“不相似帧”,且将选出的帧切分成 3 维数据块后再分别进行小波域自适应嵌入,故不属于线性共谋攻击的两种情况,因此可以有效抵抗线性共谋攻击。

图 4 以视频 mobile. cif 为例,展示了原始视频、嵌入水印后的视频和攻击后的视频,以及提取出的水印情况。

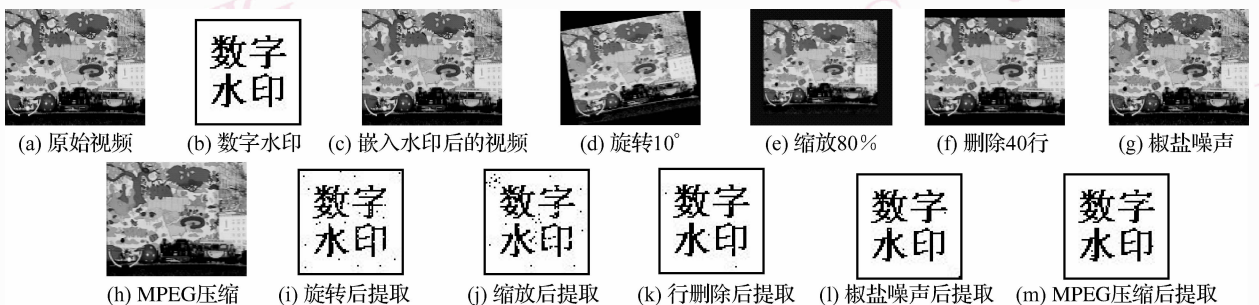


图 4 水印的嵌入、攻击与提取

Fig. 4 Embedding, attacking and extraction of watermark

6 结 论

综合利用多种技术,设计了一种用于版权保护的鲁棒的视频水印新方案,其优点主要集中于以下几点:第一,水印在嵌入前进行了 Arnold 置乱和 Turbo 纠错编码,既提高了水印安全性,又提高了鲁棒性;第二,采用两种方法进行重复嵌入,有效抵抗帧编辑攻击;第三,采用 Zernike 矩,有效抵抗旋转和缩放攻击;第四,采用 3 维小波域自适应嵌入算法,有效抵抗 MPEG 压缩和各种滤波攻击;第五,结合人眼视觉特性和帧间运动敏感性,采用视频分块技术,在满足不可见性和尽量提高水印容量的前提下,有效抵抗共谋攻击;第六,采用水印盲提取方法,使水印算法更具实用性。

另外,Turbo 码译码算法和 3 维小波变换的复杂度是影响水印实时性的两个重要方面,可以通过使用简化算法加以改善。

致 谢 本文受到华北电力大学青年教师基金项目(200611032)的支持,在此表示感谢。

参考文献 (References)

- 1 Cox I J, Miller M L, Bloom J. Digital Watermarking [M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- 2 Sang M D, Yang W X, Zhao Y. Time-axis based video watermarking resisting to geometrical attacks [A]. In: Yuan B, ed. IEEE International Conference on Signal Processing [C], New York: IEEE Press, 2004, 3: 2350-2353.
- 3 Haitsma J, Kalker T. A watermarking scheme for digital cinema [A]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, New York: IEEE Press, 2001: 487-489.
- 4 Zhao Y, Lagendijk R L. Video watermarking scheme resistant to geometric attacks [A]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing [C], New York: IEEE Press, 2002, 2: 45-148.
- 5 Sun J D, Liu J. A temporal desynchronization resilient video watermarking scheme based on independent component analysis [A]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing [C], New York: IEEE Press, 2005, 1: 265-268.
- 6 Zhang Deng-sheng, Lu Guo. Improving retrieval performance of Zernike moment descriptor on affined shapes [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia [C], Chengdu, 2002: 205-208.
- 7 Shannon C E. Mathematical theory of communication [J], B. S. T. J. Vol. 27 Part I: July 1948: 213-220, Part II: Oct. 1948: 152-161.
- 8 Berrou C, Glavieux A, Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communication, New York, USA, 1993: 1064-1070.
- 9 Winkler S. Vision Models and Quality Metrics for Image Processing applications [D]. Berlin: Technische University Wien de Nationalite Autrichienne, 2000: 198-202.
- 10 Su K, Kundur D, Hatzinakos D. Statistical invisibility for collusion-resistant digital video watermarking [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2005, 7(1): 52-60.