

基于三维小波变换的视频水印嵌入与盲提取算法

霍菲菲 高新波

(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)

摘要: 为了寻求有效的数字媒体保护方法, 该文提出了一种在三维小波变换域内基于二值运算的数字视频水印嵌入算法。为了实现水印的获取, 提出了一种相应的水印盲提取算法。水印的嵌入与提取算法每次只对 4 帧图像进行小波分解, 不仅充分利用了小波变换良好的空时多分辨特性, 而且占用内存空间少、时延低, 适合视频流的在线水印嵌入和提取, 并易于硬件的实时实现。实验结果表明, 该文所提出的视频水印算法对高斯噪声、MPEG 编码、帧平均、帧抽取和帧置乱具有良好的鲁棒性。

关键词: 数字视频水印; 三维小波变换; 实时嵌入; 盲检测

中国分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)02-0447-04

A 3D Wavelet Based Video Watermarking Embedding and Blind Extraction Algorithm

Huo Fei-fei Gao Xin-bo

(School of Electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: To develop an effective digital media protection method, an algorithm for digital video watermarking is proposed based on binary operation in 3D wavelet transform domain. For realizing the extraction of watermark image, a blind detection and restoration algorithm is presented, which does not require the original video. The proposed watermarking embedding and extracting algorithm uses only four image frames for performing wavelet decomposition per operation with lower memory demands and short delay, which suits for watermark online embedding and extracting and real-time implementation with hardware. The experimental results illustrate that the proposed watermarking algorithm is robust to video degradation and distortion attacks, such as Gaussian noise, MPEG coding, frame averaging, frame dropping and frame swapping.

Key words: Digital video watermarking; 3D wavelet transform; Real-time embedding; Blind detection

1 引言

随着计算机网络技术的迅猛发展和信息媒体的数字化, 信息表达的效率和准确性得到了极大地提高。但是另一方面也随之出现了十分严重的问题, 如作品侵权更加容易, 篡改也更加方便。为此, 人们提出了数字水印(digital watermarking)技术, 即将数字、序列号、文字、图像标志等版权信息嵌入到多媒体数据中, 以起到版权保护、信息隐藏、防篡改和数据文件的真伪鉴别等作用^[1-3]。

本文研究的是非压缩域视频水印算法, 即将水印直接嵌入到原始视频数据中。变换域视频水印算法是近年来国内外研究的热点, 人们提出了很多变换域水印算法。Deguillaume 等提出将扩频水印嵌入到视频序列的 3D-DFT 系数上^[4], 同时嵌入一个三维网格模板, 用来在水印提取时判定嵌入水印后的视频可能遭到的几何攻击, 以便有效地恢复出水印信息; 张立和等人提出基于 Gabor 变换的基函数波形和人类视

觉皮层简单细胞感觉响应曲线相似的特性^[5], 将水印信息嵌入在视频信号三维 Gabor 变换系数的幅值上; Swanson 等利用时域小波变换和频率掩蔽特性相结合^[6], 提出了一种多分辨率的视频水印算法, 该算法对有色噪声、MPEG 编码、帧抽取、帧重复和帧置乱具有较好的鲁棒性, 但是需要占用大量的内存空间, 而且计算复杂、延时较大, 因此不便于实际的推广应用, 这也是目前大多数小波域视频水印的普遍弱点^[7]。鉴于此, 本文提出了一种改进的三维小波域自适应盲视频水印算法。该算法每次只对 4 帧图像进行小波分解, 充分利用了三维小波变换良好的空时多分辨特性, 而且占用内存空间少, 可实现视频水印的实时在线嵌入。本文安排如下: 第 2 节介绍三维小波变换在线实现方法; 第 3 节给出基于在线三维小波变换的视频水印算法; 第 4 节分析实验结果; 最后对本文进行总结。

2 三维小波变换在线实现

本文应用了一种改进的三维小波变换在线实现方法^[8]。假设有 M 帧图像, 每次有 $m(2 \leq m \leq M)$ 帧参加小波变换, 并且 M, m 都是 2 的倍数, 则时域小波变换具体步骤如下。

2005-06-27 收到, 2006-03-13 改回
教育部留学回国人员实验室、新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0948)和教育部重点项目(104173)资助课题

(1)输入前 m 帧子图像, 对其进行一级时域小波变换, 得到 $m/2$ 个高通帧和 $m/2$ 个低通帧;

(2)再顺序输入 $m/2$ 帧新子图像, 并将其和从步骤(1)得到的 $m/2$ 个低通帧进行一级时域小波变换, 又得到 $m/2$ 个高通帧, 同时 $m/2$ 个低通帧也发生了变化;

(3)重复步骤(2), 直到没有新的子图像输入为止。图 1 为 8 帧子图像序列时域小波变换过程($m=4$)。

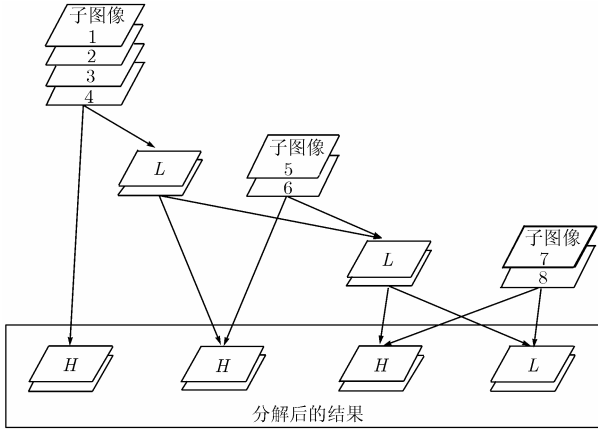


图 1 8 帧子图像序列时域小波变换过程图

3 基于在线三维小波变换的视频水印算法

3.1 水印图像预处理

为了保证水印的安全性, 在将水印 W 嵌入到视频之前, 先由一个密钥 $key1$ 将水印图案随机置乱, 使加载了水印的视频具有抗剪辑能力, 并增强了水印算法的保密性, 其效果如图 2 所示。



图 2 密钥 $key1$ 用于将原二值水印图像置乱

3.2 水印的嵌入算法

本文所提算法对视频经在线三维小波变换后得到的系数进行修改, 将水印数据自适应地嵌入到视频序列的低通和高通帧中, 从而实现了视频水印的多级、多层次嵌入。同时, 为了提高视频水印检测的可靠性, 随机地选取一些小波系数和以它们为中心的邻域, 通过系数与邻域间的关系来隐藏信息(水印)^[9]。

水印的嵌入算法包括以下步骤:

(1)先输入前 4 帧视频图像 $F_k(k=1,2,3,4)$, 对每幅图像作空域二维离散小波变换(2D-DWT), 并提取每帧变换后得到的低频子图像 $R_k(k=1,2,3,4)$, 然后对这 4 个低频子图像 $R_k(k=1,2,3,4)$ 再作时域一维离散小波变换(1D-DWT), 从

而得到三维小波系数帧 $\tilde{R}_k(k=1,2,3,4)$, 其中包含 2 个低通帧 \tilde{R}_1, \tilde{R}_2 和 2 个高通帧 \tilde{R}_3, \tilde{R}_4 ;

(2)将水印嵌入到 $\tilde{R}_k(k=1,2,3,4)$ 中, 从而得到嵌入水印的三维小波系数帧 $\hat{R}_k(k=1,2,3,4)$, 然后进行三维小波逆变换即得到嵌入水印的前 4 帧视频图像 $\hat{F}_k(k=1,2,3,4)$;

(3)再顺序输入 2 帧新视频图像 $F_k, F_{k+1}(k \geq 5)$, 先对每幅图像作空域 2D-DWT, 并提取每帧变换后得到的低频子图像 R_k, R_{k+1} 然后将其与从前一步中得到的未嵌入水印的 2 个低通帧 \tilde{R}_1, \tilde{R}_2 再作时域 1D-DWT, 又得到 2 个高通帧 $\tilde{R}_k, \tilde{R}_{k+1}$, 同时 2 个低通帧 \tilde{R}_1, \tilde{R}_2 也发生了变化。将水印嵌入到 $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_k, \tilde{R}_{k+1}$ 中, 从而得到嵌入水印的三维小波系数帧 $\hat{R}_1, \hat{R}_2, \hat{R}_k, \hat{R}_{k+1}$, 然后进行三维小波逆变换即得到嵌入水印的后续 2 帧视频图像 \hat{F}_k, \hat{F}_{k+1} ;

(4)令 $k = k + 2$, 返回步骤(3), 直到没有新的视频图像输入为止。

上述步骤中视频水印的嵌入算法给出如下:

用密钥 $key2$ (位置密钥)随机选取视频序列三维小波系数帧 $\tilde{R}_k(k=1,2,\dots,n)$ 中的 $\tilde{R}_k(i,j)$ 作为嵌入水印的小波系数, 同时定义 $g(i,j) = \text{mean}\{\tilde{R}_k(i,j-1), \tilde{R}_k(i-1,j), \tilde{R}_k(i+1,j), \tilde{R}_k(i,j+1)\}$, 即为 $\tilde{R}_k(i,j)$ 四邻域的均值。则根据 $\tilde{R}_k(i,j)$ 与其四邻域间的相关性, 按如下算法来嵌入水印。

$$\hat{R}_k(i,j) = \tilde{R}_k(i,j) + \alpha \cdot W_k(i,j) \cdot |\tilde{R}_k(i,j)| \quad (1)$$

$$W_k(i,j) = \begin{cases} 1, & \tilde{R}_k(i,j) \geq g(i,j) \\ -1, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$\hat{W}_k(i,j) = \begin{cases} 1, & W_k(i,j) = 1, \tilde{W}(i,j) = 1 \\ & \text{或 } W_k(i,j) = -1, \tilde{W}(i,j) = -1 \\ -1, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $W_k(i,j)$ 是嵌入到三维小波系数中的水印; $\tilde{W}(i,j)$ 是原水印经置乱后的水印; $\hat{W}_k(i,j)$ 是通过二值运算后得到的伪水印图像序列, 用于后续的水印盲检测。

3.3 水印的提取

水印的提取算法包括以下步骤:

(1)将待测的视频序列按 3.2 节中相同的在线三维小波变换进行分解, 先作空域 2D-DWT, 再作时域 1D-DWT, 取变换后得到的三维小波系数帧 $\tilde{R}'_k(k=1,2,\dots,n)$ 。

(2)用和 3.2 节中相同的位置密钥 $key2$ 选取视频序列三维小波系数帧 $\tilde{R}'_k(k=1,2,\dots,n)$ 中的 $\tilde{R}'_k(i,j)$ 作为嵌入水印的小波系数, 并且计算其四邻域的均值 $g'(i,j)$ 。则根据 $\tilde{R}'_k(i,j)$ 与其四邻域间的相关性, 按式(4)来提取水印:

$$\hat{W}'_k(i,j) = \begin{cases} 1, & \tilde{R}'_k(i,j) \geq g'(i,j), \tilde{W}_k(i,j) = 1 \\ & \text{或 } \tilde{R}'_k(i,j) < g'(i,j), \tilde{W}_k(i,j) = -1 \\ -1, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

(3) 经置乱后的水印图案 \tilde{W}' 可按式(5)计算得到:

$$\tilde{W}'(i, j) = \begin{cases} 1, & \sum_k \tilde{W}'_k(i, j) \geq 0 \\ -1, & \text{其他} \end{cases}, \quad \forall(i, j) \quad (5)$$

(4) 提取到置乱的水印图案 \tilde{W}' 后, 通过相同的置乱密钥 key1, 最后还原成原始的水印图案 W' 。提取水印的正确率 (BCR) 可按式(6)度量:

$$\text{BCR} = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q W(i, j) \oplus W'(i, j)}{p \times q} \times 100\% \quad (6)$$

4 实验结果与分析

本文采用标准的视频序列 Tabletennis, Football, Coast 作为测试视频, 在图 3 中分别表示为 Sequence1, Sequence2, Sequence3。宿主视频是 64 帧的真彩色视频序列, 视频图像的大小为 288×352 ; 水印为一个二值图像, 大小为 35×40 , 其中嵌入强度 $\alpha = 0.02$ 。将所提出的基于在线三维小波变换的视频水印算法(在后文中称其为算法 1)和文献[10]中所提算法(在后文中称其为算法 2)进行了对比实验, 并引入三维小波域视频水印算法 3 作为参照。算法 3 也只占用 4 帧的内存空间, 水印的嵌入与检测过程也同算法 1, 所不同的是在对视频序列进行时域小波变换时, 不再利用前一步骤中得到的两个低通帧, 而是直接对视频序列的低频子图像每 4 帧作时域的一维小波变换。算法 1, 算法 2, 算法 3 的实验数据在图示中分别表示为 algorithm1, algorithm2, algorithm3。对于鲁棒性测试, 考察了几种常见的针对视频的致命攻击, 如帧平均、帧抽取、帧置乱、MPEG 压缩等。图 3 是 64 帧的视频序列基于算法 1 在嵌入水印前后, 其中第 16 帧的显示图像。从主观视觉上看所提出的算法 1 满足水印的不可见性。

4.1 噪声攻击

本实验中, 用不同强度的高斯白噪声对嵌入水印的视频进行攻击。在不同的峰值信噪比情况下, 水印算法的有效性用提取水印的正确率 (BCR) 来衡量。图 4(a)–图 4 (c)给出了在不同峰值信噪比下, 提取水印正确率的变化曲线; 图 4(d)–



(a) 原始 64 帧视频序列中第 16 帧的显示图像



(b) 嵌入水印后的 64 帧视频序列中第 16 帧的显示图像

图 3 原始视频与嵌入水印后视频的比较

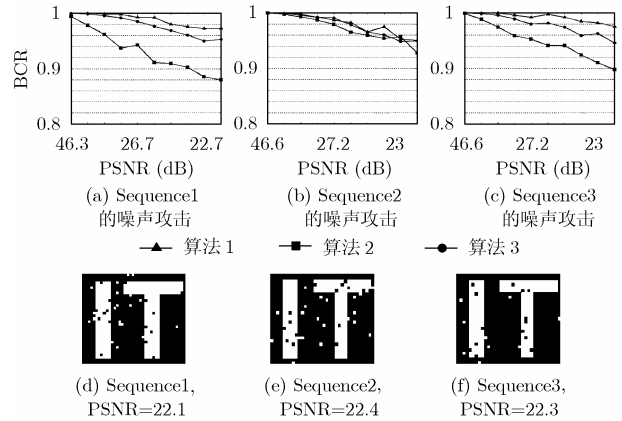


图 4 随机噪声对水印算法的影响

图 4 (f)给出了算法 1 的重构水印图像。通过 3 组实验结果的对比可见算法 1 的鲁棒性优于算法 2 和算法 3。

4.2 MPEG 压缩

视频水印最基本的攻击方式就是 MPEG 压缩, 在这种攻击下视频水印应该具有鲁棒性。将嵌入水印的视频序列进行 MPEG 压缩, 图 5(a)–图 5(c)给出了在不同压缩参数下, 提取水印的正确率的变化曲线, 图 5(d)–图 5(f)给出了算法 1 的重构水印图像。可见本文视频水印算法 1 的性能优于算法 2 和算法 3。

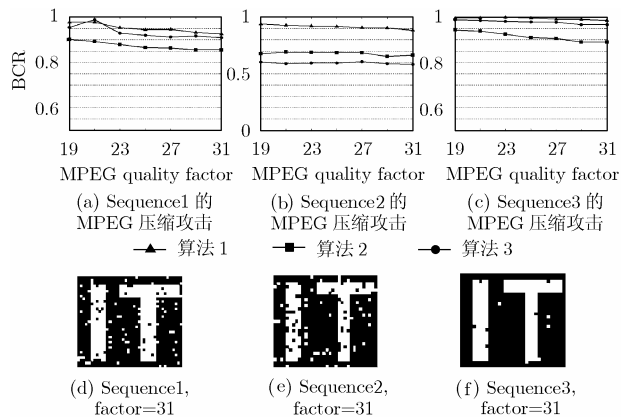


图 5 MPEG 压缩对视频水印的影响

4.3 帧平均

帧平均是视频水印特殊的攻击方式。从直觉上可以很明显地看出多帧平均会破坏视频序列中的动态成分。而由前面的介绍可知, 该水印算法可以抵御这种攻击。实验中的帧平均模式可按式(7)定义:

$$R_k(i, j) = \frac{1}{3} [R_{k-1}(i, j) + R_k(i, j) + R_{k+1}(i, j)], \quad k = 2, 4, \dots, n-1 \quad (7)$$

实验结果表明对于 3 段视频序列, 算法 1、算法 2 和算法 3 提取水印正确率的变化曲线完全重合, 说明本文的 3 种算法都可以很好地抵御帧平均攻击。

4.4 帧抽取

实验中从嵌入水印的视频序列中随机地抽取某些帧, 并且每组实验都是相互独立的。图 6(a)–图 6(c)给出了提取水印的正确率随抽取帧数的变化曲线; 图 6(d)–图 6(f)给出了算

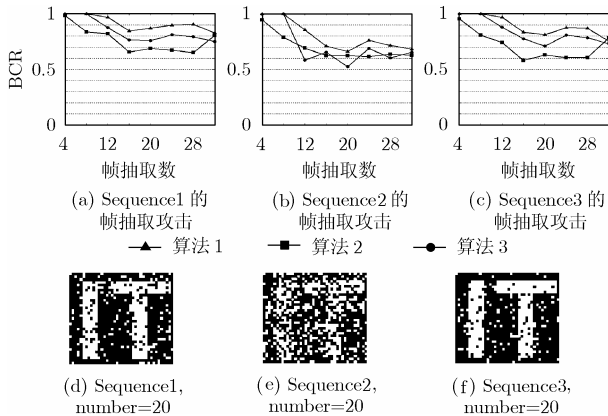


图6 帧抽取对视频水印的影响

法 1 重构水印图像。由 3 组实验结果的对比如可见算法 1 的鲁棒性优于算法 2 和算法 3。

4.5 帧置乱

帧置乱也是视频水印的特殊攻击方式，可以破坏视频序列的动态成分和嵌入的视频水印。通过实验可以证明本文所提算法 1 对视频的帧置乱攻击，具有很强的鲁棒性。实验中采用的帧置乱模式是交换相邻两帧，可按式(8)定义：

$$R_k(i, j) \Leftrightarrow R_{k+1}(i, j), \quad k = 1, 3, \dots, n-1 \quad (8)$$

实验结果如图 7(a)–图 7(c)所示，横轴是该段视频序列做了置乱处理的帧数；图 7(d)–图 7(f)给出了算法 1 的重构水印图像。由图 7(a)–图 7(c)可见对于 Sequence1，3 种算法的结果曲线相重合；对于 Sequence2，本文的算法 1 优于算法 2 和算法 3；对于 Sequence3，算法 1 的性能优于算法 2 和算法 3，算法 2 和算法 3 提取水印正确率的变化曲线相重合。由此，本文所提算法 1 不仅可以抵御视频序列的少数几帧置乱，对于多帧置乱也具有很好的鲁棒性。

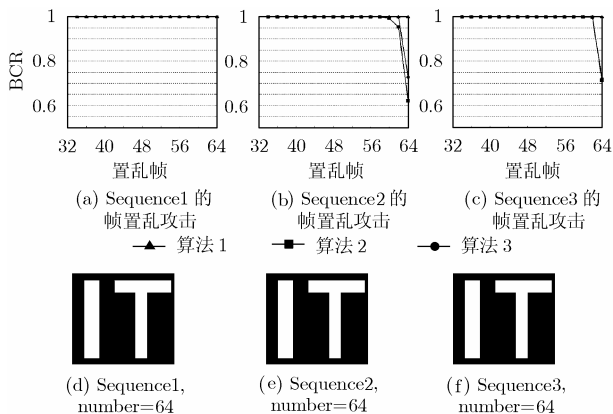


图7 帧置乱对视频水印的影响

5 结束语

本文研究了小波域数字视频水印算法，提出了一种基于改进的在线三维小波变换的自适应盲视频水印算法。该算法每次只对 4 帧图像进行小波分解，占用内存空间少、计算简便，而且充分利用了三维小波变换良好的空时多分辨特性，

理论分析和实验结果均表明了本文所提算法的可行性和有效性。

参考文献

- [1] Cox I J, Kilian J, and Leighton F T, *et al.* Secure spread spectrum watermarking for multimedia. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1997, 12(6): 1672–1687.
- [2] Hsu C T and Wu J L. Hidden digital watermarking in images. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1999, 8(1): 58–68.
- [3] Hartung F and Kutter M. Multimedia watermarking techniques. *Proceedings of IEEE Special Issue on Identification and Protection of Multimedia Information*, 1999, 87(7): 1079–1107.
- [4] Deguillaume F, Csurka G, and Ruanaidh J O, *et al.* Robust 3D DFT video watermarking. *Proceedings of SPIE Security and Watermarking of Multimedia Contents*, San Jose, USA, 1999, 3657: 113–124.
- [5] 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.
Zhang Li-he, Wu Hong-tao, and Hu Chang-li. A Video watermarking algorithm based on 3D Gabor transform. *Journal of Software*, 2004, 15(8): 1252–1258.
- [6] Swanson M D, Zhu B, and Tewfik A H. Multiresolution scene-based video watermarking using perceptual models. *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 1998, 16(4): 540–550.
- [7] Zhang Q and Boston N. A cryptanalytic method for embedding video watermarks. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Philadelphia, USA, 2005, 2: 813–816.
- [8] Moyano E, Quiles F J, and Garrido A, *et al.* Efficient 3D wavelet transform decomposition for video compression. *Proceedings of International Workshop on Digital and Computational Video*, Tampa, USA, IEEE Computer Society Press, 2001: 118–125.
- [9] Hong I, Kim I, and Han S S. A blind watermarking technique using wavelet transform. *Proceedings of ISIE International Symposium on Industrial Electronics*, Pusan, Korea, 2001, 3: 1946–1950.
- [10] Zhuang H Y, Li Y, and Wu C K. A blind spatial-temporal algorithm based on 3D wavelet for video watermarking. *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, Xi'an, China, 2004, 3: 1727–1730.

霍菲菲：女，1979年生，硕博连读生，研究方向为数字视频水印。
高新波：男，1972年生，教授，主要研究方向为图像处理、模式识别和人工智能。