

基于独立分量分析的盲视频水印方案

孙建德, 刘 琚

(山东大学信息科学与工程学院, 山东济南 250100)

摘 要: 本文提出一种新的盲视频水印方案. 该方案利用独立分量分析方法根据相邻的视频帧提取相应的运动分量, 并且把这些运动分量进行小波变换, 采用邻近特征值平均法, 将水印嵌入到运动分量中. 运动分量是视频的重要特征, 压缩的处理对于它的影响较小, 因此可以提高鲁棒性. 基于帧的运动分量的提取避免了基于块的重复性操作, 小波域的水印嵌入可以将水印带来的影响分散到整个帧上, 具有良好的不可见性.

计算机仿真结果表明, 该方法能够保证很好的视频质量, 对于常见的视频处理有较好的鲁棒性, 能够进行水印的盲检测, 虚警概率小.

关键词: 数字水印、视频水印、盲检测、独立分量分析

中图分类号: TNTP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 09-1507-04

A Blind Video Watermarking Scheme Based on Independent Component Analysis

SUN Jiande, LIU Ju

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract: A novel blind video watermarking scheme is proposed. In this scheme, independent component analysis (ICA) is used to extract the motion component between the consecutive frames and the watermark is embedded into the wavelet coefficients of the motion component according to the mean of the neighboring wavelet coefficients. Motion component is important to the video, but it is not obviously affected by compression. So, the robustness is improved by embedding the watermark into the motion components. Frame based motion extraction avoids the repeat operations of block based extraction and reduces the complexity. Embedding watermark in wavelet domain disperses the effects caused by watermark to the whole frame. Better invisibility can be achieved. The simulation results show that the proposed scheme can preserve high video quality. The watermark can be extracted blindly and is robust to common video processing with little probability of false positive.

Key words: digital watermark; video watermark; blind detection; independent component analysis (ICA)

1 引言

数字水印是用于数字产品版权保护和认证的一门新兴的技术, 它将数字、图像、声音、文本等能够进行版权证明的信息, 嵌入到图像、声音、视频等多媒体产品中, 以起到版权保护、秘密通信、辨别数据文件真伪等作用. 随着数字视频产品在网络和现实社会中的广泛传播, 用于保护视频产品的视频数字水印逐渐成为了现在数字水印领域研究的重点, 并且已经在视频点播 VOD、交互式电视、DVD 等方面得到了应用. 作为视频数字水印除了具有数字水印的一般特性, 如鲁棒性和不可见性等之外, 还必须能够进行盲检测, 即在水印检测的时候不需要原始视频, 只是根据接收到的视频来检测水印. 对于视频来说, 盲检测就意味着节省大量存储资源和计算资源, 因此盲检测的水印方法成为当前主要的研究重点.

视频水印可以根据要嵌入水印的视频分为嵌入到未压缩

的视频里的水印^[1-3]和嵌入到压缩后的视频流中的水印^[4-9]. 虽然不同的方法在鲁棒性和计算量方面各自优缺点, 但是作为视频的所有者, 在拥有未压缩的视频的情况下, 可以选择在未压缩的视频中嵌入水印. M. Barni^[1]等提出将应用在图像水印中的离散傅立叶变换 (DFT) 算法推广到视频当中; J. J. Chae^[2]等提出一种基于视频帧纹理分析的多维网格编码的方法, 但这两种方法都是将图像水印的方案直接扩展到视频水印上来, 并没有利用视频帧的时间冗余性. Xiamu Niu^[3]等利用了视频帧在时间上的相关性, 对原始视频进行三维小波分析, 将置乱的水印图像位平面嵌入到相应的小波系数帧上, 这种方法忽略了位平面级别的不同, 使得鲁棒性受到影响.

独立分量分析 (ICA) 是在研究盲源分离过程中出现的一种全新的信号处理和数据分析方法^[7-10]. 利用 ICA, 可以在不知源信号和传输通道的参数的情况下, 根据输入源信号的统计特性, 仅通过观测信号就能实时地恢复或提取源信号. 它是

当今信号处理领域的又一个研究热点,已经在模式识别、数据压缩、噪声消除等方面得到了应用.

本文提出了一种基于 ICA 的盲视频水印方案.该方案利用独立分量分析,从相邻的视频帧中提取出基于帧的运动分量,对这些运动分量进行小波分析,采用邻近特征值平均法在小波域中嵌入水印.因为运动分量是视频的重要特征之一,在 MPEG 压缩过程中,对它们的影响较小,所以将水印嵌入到运动分量中,一定程度上可以提高鲁棒性.但是, MPEG2 中运动向量的获得是基于块的,它们本身的数据量较小,很容易受到水印嵌入的影响,使得水印嵌入的强度受到了一定的影响.因此,本方案提出在基于帧的运动分量上嵌入水印,将嵌入水印造成的影响分散到整个帧上,在保证良好不可见性的同时,增强了鲁棒性.

2 数字水印模型

基于未压缩视频的数字水印模型如图 1 所示:

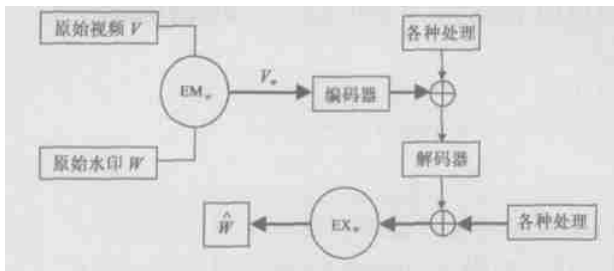


图 1 基于未压缩视频的数字水印模型

用数学公式描述如下:

$$V_w = EM_w(V, W) \quad (1)$$

$$\dot{V}_w = P(V_w) \quad (2)$$

$$W = EX_w(\dot{V}_w) \quad (3)$$

其中, V 表示原始视频, W 表示原始水印, $EM_w(\cdot)$ 表示水印嵌入的过程, V_w 表示未经过任何处理的嵌入了水印的视频, $P(\cdot)$ 表示视频编解码以及编解码过程中遇到的各种处理, $EX_w(\cdot)$ 表示水印提取的过程, \dot{V}_w 表示经过处理的嵌入了水印的视频, W 表示提取出来的水印. 公式(3)的输入只是经过了处理的视频,没有用到原始视频.

基于未压缩视频的数字水印首先要对视频压缩有较强的鲁棒性,如对 MPEG2 压缩标准.在 MPEG2 中重要的就是基于块的运动向量的提取,关于对应块的表示如下:

$$B(i) = B(i-1) + M_B(i-1) \quad (4)$$

当前块 $B(i)$ 是前一块的静态分量 $B(i-1)$ 和前一块的运动分量 $M_B(i-1)$ 的和,并且块的静态分量和运动分量是相互独立的.本文根据静态分量和运动分量之间的这种关系,利用独立分量分析的分离特性,从整个帧的角度来提取运动分量 $F(i) = F(i-1) + M_F(i-1)$,当前帧 $F(i)$ 是与前一帧共有的静态分量 $F(i-1)$ 和相对于前一帧的运动分量 $M_F(i-1)$ 的和,然后在运动分量的小波域采用邻近特征值平均法嵌入水印,并实现盲检测.

3 独立分量分析(ICA)

3.1 ICA 问题的数学模型

混叠信号模型如下:

$$x = As \quad (5)$$

其中 $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ 是 m 维观察信号矢量, $s = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T$ 为 n 维未知源信号矢量. A 是未知的混叠矩阵.

ICA 就是仅根据观察信号 x 来估计源信号 s , 求解分离矩阵 D , 使得通过 $y = Dx = \hat{s}$, 得到 s 的估计. 已经有许多成熟的 ICA 算法, 文章中选用了简单而有效的 Fast ICA 算法^[8].

3.2 Fast ICA 算法

Fast ICA 算法是一种快速的定点独立分量分析法则.它首先对观察信号利用主分量分析(PCA)进行预白化,将观察信号 x 变换成 $x = Tv$, 使得 v 的分量具有单位方差且互不相关, v 的自相关矩阵是单位阵, T 为白化阵,具体求解见文献[8].

Fast ICA 利用基于峭度的目标函数:

$$\begin{aligned} \text{kurt}(D^T v) &= E\{(D^T v)^4\} - 3[E\{(D^T v)^2\}]^2 \\ &= E\{(D^T v)^4\} - 3\|D\|^4 \end{aligned} \quad (6)$$

分离矩阵的训练公式为:

$$D(k) = E\{v(D(k-1)v)^3\} - 3D(k-1) \quad (7)$$

其中 k 是迭代次数. 整个的分离矩阵为 $C = DT$.

3.3 用 ICA 提取运动分量

文献[12]证明边缘是图像的独立成分,而视频帧中物体的运动轨迹就是通过边缘体现出来的.根据公式(4)、(5),把前后相邻两帧 $X_{F(i)}$, $X_{F(i-1)}$, 看成是两帧共有的静态分量 $S_{F(i-1)}$ 和两帧的相对运动分量 $S_{M_F(i)}$ 的线性混叠,则下式和 ICA 问题的混叠信号模型是相同的,

$$\begin{bmatrix} x_{F(i)} \\ x_{F(i-1)} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} s_{F(i-1)} \\ s_{M_F(i)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 $x_{F(i)}$ 、 $x_{F(i-1)}$ 、 $s_{F(i-1)}$ 、 $s_{M_F(i)}$ 分别是 $X_{F(i)}$ 、 $X_{F(i-1)}$ 、 $S_{F(i-1)}$ 、 $S_{M_F(i)}$ 按照行列展开的行矢量.因而可以用 ICA 的方法来进行求解运动分量.图 2 为用 Fast ICA 对一段视频中相邻两帧进行分解结果.

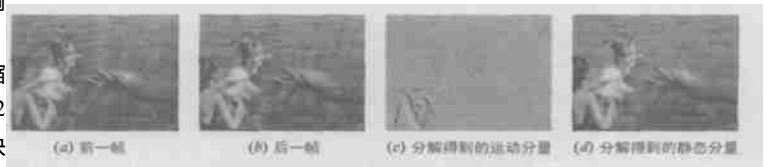


图 2 ICA 分解两相邻视频帧得到的结果

图 2(c) 边缘突出的地方表明发生了剧烈的运动,边缘模糊的地方运动只发生轻微的运动,没有边缘的地方没有相对运动,这一结果反映了视频帧的相对运动分量,有效地描述了视频的运动过程,而提取过程避免了传统运动估计方法中重复性的块操作,减少了计算量.

4 新的视频水印方案

4.1 水印的嵌入

4.1.1 水印嵌入位置的选择

首先,通过 Fast ICA 分析得到

$S_{F(i-1)}$ 、 $S_{M_p(i)}$:

$$\begin{bmatrix} S_{F(i-1)} \\ S_{M_p(i)} \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{F(i)} \\ \mathbf{x}_{F(i-1)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

进而得到两帧共有的静态分量 $S_{F(i-1)}$ 和相对运动分量 $S_{M_p(i)}$ 。然后, 对运动分量 $S_{M_p(i)}$ 进行 2 阶的离散小波分解:

$$[LL_2, LH_2, HL_2, HH_2] = DWT_2[S_{M_p(i)}] \quad (10)$$

根据下面的准则选择水印嵌入区域,

$$\text{host} = \begin{cases} LH_2, & \text{var}_{LH_2} \geq \text{var}_{HL_2} \\ HL_2, & \text{var}_{LH_2} < \text{var}_{HL_2} \end{cases} \quad (11)$$

方差大的子带包含的边缘分量更丰富, 适合于隐藏信息, 可以达到较好的不可见性。

4.1.2 在选中的子带上采用 6 近邻的特征值平均法嵌入水印^[11] 假如要在系数 $p(i, j)$ 上要嵌入水印, 它的近邻系数有 8 个, 分别是: $p(i-1, j-1)$, $p(i-1, j)$, $p(i-1, j+1)$, $p(i, j-1)$, $p(i, j+1)$, $p(i+1, j-1)$, $p(i+1, j)$, $p(i+1, j+1)$ 。

首先在这 9 个系数上都加上这个 3×3 块内最大的系数绝对值 $\max_{p(i, j)}$,

$$\max_{p(i, j)} = \max_{\substack{a=\pm 1, 0 \\ b=\pm 1, 0}} (|p(i+a, j+b)|) \quad (12)$$

然后选择 6 个近邻系数进行近邻特征平均值计算, 这个近邻平均值 $m_{p(i, j)}$ 为:

$$m_{p(i, j)} = \frac{1}{6} \sum_{\substack{a=\pm 1, 0 \\ b=\pm 1, 0}} p(i+a, j+b) \quad (13)$$

将计算得到的邻近特征值通过加权因子 β 修正为 $m'_{p(i, j)}$, $m'_{p(i, j)} = \beta \cdot m_{p(i, j)}$, 然后根据这个修正后的邻近特征值设置标志 $\text{Sign}_{p(i, j)}$, $\text{Sign}_{p(i, j)} = \text{round}(\frac{p(i, j)}{m'_{p(i, j)}})$ 。根据这个标志的奇偶性嵌入水印:

当嵌入水印 $W(n)$ 值为 1 时,

$$p'(i, j) = \begin{cases} \text{Sign}_{p(i, j)} \cdot m'_{p(i, j)}, \text{mod}(\text{Sign}_{p(i, j)}, 2) = 1 \\ (\text{Sign}_{p(i, j)} - 1) \cdot m'_{p(i, j)}, (\text{mod}(\text{Sign}_{p(i, j)}, 2) \\ = 0) \wedge (p(i, j) \leq \text{Sign}_{p(i, j)} \cdot m'_{p(i, j)}) \\ (\text{Sign}_{p(i, j)} + 1) \cdot m'_{p(i, j)}, (\text{mod}(\text{Sign}_{p(i, j)}, 2) \\ = 0) \wedge (p(i, j) > \text{Sign}_{p(i, j)} \cdot m'_{p(i, j)}) \end{cases} \quad (14)$$

当嵌入水印 $W(n)$ 值为 0 时,

$$p'(i, j) = \begin{cases} \text{Sign}_{p(i, j)} \cdot m'_{p(i, j)}, \text{mod}(\text{Sign}_{p(i, j)}, 2) = 0 \\ (\text{Sign}_{p(i, j)} - 1) \cdot m'_{p(i, j)}, (\text{mod}(\text{Sign}_{p(i, j)}, 2) \\ = 1) \wedge (p(i, j) \leq \text{Sign}_{p(i, j)} \cdot m'_{p(i, j)}) \\ (\text{Sign}_{p(i, j)} + 1) \cdot m'_{p(i, j)}, (\text{mod}(\text{Sign}_{p(i, j)}, 2) \\ = 1) \wedge (p(i, j) > \text{Sign}_{p(i, j)} \cdot m'_{p(i, j)}) \end{cases} \quad (15)$$

最后将这个块上的系数都减去 $\max_{p(i, j)}$, 进行逆离散小波变换, 再利用分离阵的逆进行 ICA 反变换, 就得到嵌入水印的视频。

4.2 水印的提取

检测水印时, 先将要检测的视频按照嵌入水印那

样, 得到运动分量, 对运动分量进行 2 阶离散小波变换, 然后按照嵌入时候的方法产生邻近特征标志 $\text{Sign}_{p(i, j)}$, 依据下面的公式来提取水印:

$$W(n) = \begin{cases} 1, \text{mod}(\text{Sign}_{p(i, j)}, 2) = 1 \\ 0, \text{mod}(\text{Sign}_{p(i, j)}, 2) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

最后用相似函数来计算原始水印 W 和提取出来的水印 W 之间的相关性,

$$\text{sim}(W, W) = \frac{\sum_{n=1}^N W(n) \cdot W(n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N W^2(n)}}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

其中 N 为水印长度。

如果相似度大于设定的门限 T , 就认为视频帧中有水印。

由于提取水印是在每两个相邻帧之间进行的, 所以在判定整个视频中是否存在水印时, 利用所有帧检测结果的平均值和检测结果超过门限的帧数目联合进行判断, 使错误概率更小。如果平均值超过门限并且超过门限的帧的数目多于一半, 确定视频中有水印存在, 反之, 则不存在水印。

虚警概率公式^[13]如下:

$$P_{fp} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{T \sqrt{N}}{\sigma_w \sigma_{\max} \sqrt{2}}\right) \quad (18)$$

其中, σ_w 表示水印的方差, σ_{\max} 为所有视频帧方差中的最大值, $\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ 。在本文试验中设为 0.51, 保证帧虚警概率在 0.01% 以下。

5 仿真实验

实验选用 Fast ICA 来分析视频, 视频帧大小为 352×272 的传输速率为 30 帧/秒, 视频长度为 1 秒。水印采用伪随机的 $[0, 1]$ 序列。图 3(a) 为原始视频中的一帧, 图 3(b) 为嵌入水印后视频帧, 图 3(c) 为嵌入水印后整个视频帧的 PSNR 质量。对嵌入水印的视频进行三种攻击试验, (1) 剪裁视频帧, (2) 伸缩视频帧, (3) MPEG2 编解码。受攻击的视频帧分别如图 3(d), (e), (f) 所示。

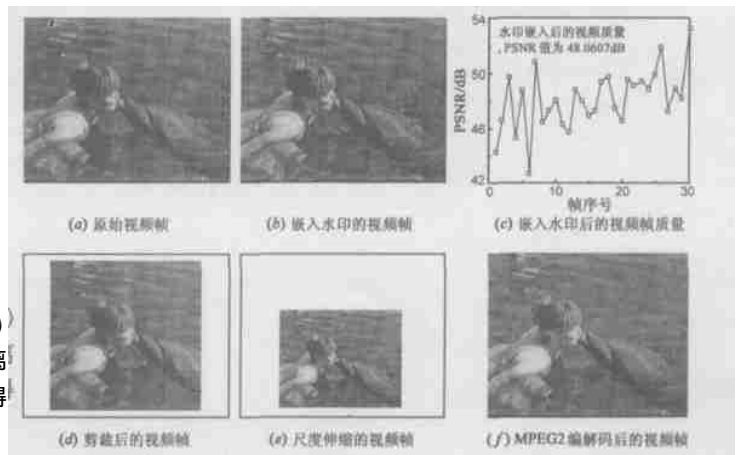


图 3 受到攻击的视频帧

表 1 水印的检测结果

	平均相似度	超过门限的帧数
剪切视频帧	0.5251	20
伸缩视频帧	0.5224	23
MPEG2 压缩	0.5328	23

如果用未加水印的视频帧来进行检测, 平均检测系数为: 0.5034, 超过门限的帧的数目: 12

实验结果表明, 本方法不但能够保证很好的视频质量, 而且对于常见的视频处理有较好的鲁棒性, 还不至于发生虚警的情况。

6 结论

本文提出了一种基于独立分量分析的盲视频水印方案, 仿真试验证明了这个方案的可行性. 进一步的提高这种方案实现的实时性和对于几何攻击的鲁棒性是下一步的研究方向, 独立分量分析在视频分析中的应用也是我们关注的问题。

参考文献:

- [1] M Bami, F Bartolini, R Caldelli, A De Rosa, A Piva. A robust watermarking approach for raw video[A]. PV2000 10th International Packet Video Workshop[C]. Cagliari, Italy: IPVW, 2000.
- [2] Jong Jin Chae, B S Manjunath. Data hiding in video[A]. Proceedings of the 1999 International Conference on Image Processing [C]. Kobe, Japan: ICIP, 1999.
- [3] Xiamu Niu, Shenghe Sun. A new wavelet based digital watermarking for video[A]. 9th IEEE Digital Signal Processing Workshop [C]. Texas, USA: IEEE, 2000.
- [4] F Hartung, B Girod. Watermarking of uncompressed and compressed video[J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 283-301.
- [5] G C Langelaar, R L Lagendijk, J Biemond. Real-time labeling methods for mpeg compressed video[A]. F M J Willems, T J Tjalkens. Proceedings of the Eighteenth Symposium on Information Theory [C]. In the Benelux, Veldhoven: PESIT, 1997. 25-32.
- [6] M Kutter, F Jordan, T Ebrahimi. JTC1/SC29/WG11, Proposal of a Watermarking Technique for Hiding/Retrieving Data in Compressed and Decompressed Video[S].
- [7] P Comon. Independent component analysis, a new concept[J]. Signal Processing, 1994, 36(3): 287-314.

- [8] Hyvrinen A, Oja E. A Fast fixed point algorithm for independent component analysis[J]. Neural Computation, 1997, 9(7): 1483-1492.
- [9] A Hyvaerinen. Fast and robust fixed point algorithms for independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(3): 626-634.
- [10] Ju Liu, Kaibao Nie, Zhenya He. Blind separation by redundancy reduction in a recurrent neural network[J]. Chinese Journal of Electronics, 2001, 10(3): 415-419.
- [11] 王沛, 余松煜, 袁晓兵. 基于小波变换的图像自适应盲水印算法[J]. 光学精密工程, 2002, 10(3): 247-252.
- [12] Anthony J Bell, Terrence J Sejnowski. Edges are the 'Independent Components' of Natural Scenes[A]. Mozer M C, Jordan M J & Petsche T. Advances in Neural Information Processing Systems 9[C]. Cambridge: MIT Press, 1997.
- [13] T Kalker, G Depovere, J Haitzma, M Maes. On the reliability of detecting electronic watermarks in digital images[A]. Proc IX European Signal Processing Conf [C]. Island of Rhodes, Greece: ESPC, 1998.

作者简介:



孙建德 男, 1978 年 7 月出生于山东莱州, 山东大学信息科学与工程学院博士研究生, 2000 年于山东大学电子工程系获理学学士学位, 2002 年定为山东大学信息科学与工程学院硕博连读生, 2003 年开始博士阶段学习和研究, 研究方向为多媒体信号处理, 数字水印技术, 发表论文 10 余篇。



刘 琚 男, 1965 年 4 月出生于山东临沂, 山东大学信息科学与工程学院通信工程系主任, 《电路与系统学报》和《数据采集与处理》编委, 1986 年 7 月获山东大学无线电电子学系理学学士学位; 1989 年 7 月获山东大学电子工程系(原无线电电子学系)电子学与信息系统专业理学硕士学位; 从 1989 年 8 月开始在山东大学电子工程系任教, 期间 2000 年 4 月于东南大学无线电工程系获工学博士学位, 专业方向为信号与信息处理. 2002 年到 2003 年作为访问教授在西班牙加泰罗尼亚理工大学(Universidad Politecnica de Catalunya UPC) 信号理论与通信系进行合作研究, 主要从事多媒体信息处理和通信信号处理方面的研究, 发表论文 50 余篇。