

# 一种基于光流法与数字全息的视频水印<sup>①</sup>

陈丽萍, 孔祥增

(福建师范大学 数学与计算机科学学院, 福州 350007)

**摘要:** 提出了一种基于全息图和光流技术的新的视频水印技术。首先在视频序列时间轴上利用局部光流信息检测一个关键帧, 然后利用全息技术得到原始水印图像全息图, 之后将其嵌入宿主视频关键帧的离散余弦变换域的中频系数, 并将水印添加位置和原来关键帧中的边信息作为恢复水印信息的密钥, 提取水印的过程无须原来的视频, 从而该算法具有较好的安全性。对算法的测试结果也表明, 该算法对帧剪切、加噪声、帧交换, MPEG 压缩和格式转换等常见的视频处理操作具有较高的稳健性。

**关键词:** 水印; 光流法; 全息

## Video Watermarking Based on Optical Flow and Digital Hologram

CHEN Li-Ping, KONG Xiang-Zeng

(College of Mathematics and Computer Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** A novel video watermarking algorithm is proposed based on the hologram of the original watermark and optical flow. In the beginning, the key-frame is selected by the local optical flow. Then the hologram is embedded in the median-frequency coefficients in the DCT domain. The position of watermark and side information are adopted to retrieve the watermark without the original host image, so that the algorithm is secure. Numerical experiments show that the embedded watermark is robust to usual video manipulations, such as superposing frame cropping, noise, frame exchanging and MPEG compression and format exchanging.

**Key words:** video watermark; optical flow; digital hologram

数字水印技术是实现版权保护和认证的有效方法, 涉及到信号处理, 图像处理, 机器视觉, 信息安全等学科。近年来, 信息光学理论被应用到数字水印领域<sup>[1-3]</sup>, 显示出其独特的魅力, 全息概念应用到数字水印中则使水印具有良好的抗剪切性。文献[1]提出了一种基于数字全息和小波系数块能量分析的水印算法, 让水印图像通过在空域零扩展后生成其傅里叶全息图, 将原宿主图像进行小波分解, 把全息图嵌入在分块能量较大的小波系数中, 但水印的提取过程需要原来的宿主图像。文献[2]利用全息技术得到原始水印图像的菲涅耳全息图, 之后将其嵌入宿主图像离散余弦变换域的中频系数, 将水印添加位置和光学系统的几何结构参数作为恢复水印信息的密钥, 虽然实现了

盲水印技术, 但由于原像素值用其邻近的没有叠加信息的原像素均值来替代, 人为地降低了分辨率, 也影响了恢复水印信息的质量。目前数字全息在水印中的应用主要集中在图像水印, 在视频水印中少有引入数字全息的技术。当前的视频水印技术主要分两类, 一类是将水印信息直接嵌入到原始视频图像序列进行视频水印的嵌入<sup>[4]</sup>, 第二类则是把水印信息嵌入到视频压缩码流中<sup>[5]</sup>, 第一类方法对各种针对视频的攻击都具有较好的稳健性, 对于不需要压缩的视频数字水印技术来说, 文献[4]把水印信息嵌入到视频的每一帧中, 由于视频的帧与帧在时间轴上具有相同场景, 有着大量的信息冗余, 攻击者容易对这些帧进行对比, 重构以及通过邻近帧与帧之间信息的累加来进一步破坏嵌

① 基金项目:福建省自然科学基金(2008J0013);福建省教育厅 B 类基金(JB08048)

收稿时间:2011-04-01;收到修改稿时间:2011-04-26

入的水印。如果仅对关键帧进行水印嵌入的话则可以避免此类的恶性攻击,况且数字视频信息量十分巨大,如果针对关键帧进行处理的话,可以大大减少运算量。

本文在上述文献的基础上,提出了一种基于光流法的关键帧提取和数字全息的视频水印技术,一方面在视频序列时间轴上利用局部光流信息检测关键帧,然后把水印全息图嵌入到视频的关键帧离散余弦变换域的中频系数,增加了水印的鲁棒性,而且由于数字全息图本身具有不可撕毁性,提高了水印的抗剪切能力,提取过程中充分利用边信息,使得提取过程不需原始宿主图像的参与,因此大大增强了水印的安全性和实用性。

### 1 基于视频光流场的关键帧提取

光流反映了序列图像中的速度场。光流场方法善于在运动场景中捕捉运动对象的运动特性,文中关键帧检测算法正是基于图像光流场进行计算<sup>[5-8]</sup>。Wolf<sup>[6]</sup>提出的运动极小值算法,利用光流场为每个镜头计算了一条运动曲线,把关键帧选取在这条曲线的极小点上。

首先利用 Horn 计算光流的基本方法<sup>[5,7,8]</sup>来计算出各点的 x 方向光流速度。Horn 在 1981 年提出了计算光流约束等式,若设帧图像平面上的点 (x, y) 在 t 时刻的亮度为  $E(x, y, t)$ :

$$\frac{\partial E(x, y, t)}{\partial x} O_x(i, j, t) + \frac{\partial E(x, y, t)}{\partial y} O_y(i, j, t) + \frac{\partial E(x, y, t)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

如果在当前像素点的一个足够小的邻域内(如当前像素点的八邻域),各像素点拥有相差甚微的速度,当前即假设其相差为 0,就可以域内各点两两联立求得当前像素点所确定的式(1)与邻域内各点两两联立求得八组光流速度。选择其中速度居中、大小接近的 3 个邻接点与当前点组成 4 个置信点,用最小二乘法求解由各置信点对应的光流约束方程组成的超定方程组求出 x 方向光流速度  $O_x(i, j, t)$  和 y 方向的光流速度  $O_y(i, j, t)$ 。

这样可以计算出该帧图片的总光流运动量:

$$M(t) = \sum_i \sum_j |O_x(i, j, t)| + |O_y(i, j, t)| \quad (2)$$

然后如果我们将视频中的每一帧图片的运动量  $M(t)$  连成一条曲线,从中可以看出极小运动量所在帧。在实际操作中我们可以直接计算出相邻帧之间运动量

之差,一旦大于阈值的话会设定标记,两个相邻标记中光流运动量最小的帧即为关键帧。

### 2 数字全息的记录与再现

全息图<sup>[1,2,10]</sup>的记录过程如图 1 所示,设被记录的物体位于  $\xi-\eta$  平面,记录数字全息图的 CCD 位于 x-y 平面,数字再现像位于  $\xi'-\eta'$  平面,全息面与物面和像面的距离分别为  $Z_0$  和  $Z_i$ 。

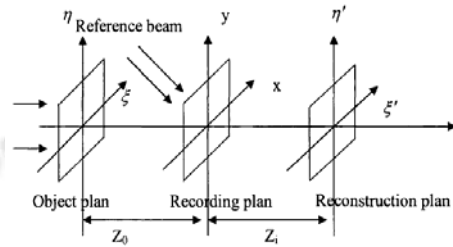


图 1 全息图的记录与再现

设物光波全息面的复振幅为  $U(x, y)$ , 参考光的复振幅为  $R(x, y)$ , \* 为共轭量。则物光与参考光在全息面上的干涉场的光强分布为:

$$\begin{aligned} H(x, y) &= |U(x, y) + R(x, y)|^2 \\ &= U(x, y)U^*(x, y) + R(x, y)R^*(x, y) \\ &\quad + U(x, y)R^*(x, y) + R(x, y)U^*(x, y) \end{aligned} \quad (3)$$

若设 CCD 光敏面的长为  $L_x$ , 采样点数为 M, 宽为  $L_y$ , 采样点数为 N, 则将上式离散化, 即为物体的数字全息图。

$$H(m, n) = H(x, y) \text{rect} \left[ \frac{\zeta}{L_x}, \frac{\eta}{L_y} \right] \sum_{m=-M/2}^{M/2} \sum_{n=-N/2}^{N/2} \delta(\zeta - m \cdot \frac{L_x}{M}, \eta - n \cdot \frac{L_y}{N}) \quad (4)$$

与传统全息的再现通过让光波照明全息图产生衍射类似, 数字全息的再现是利用衍射积分公式进行数值计算得到再现光场。设计算机模拟的再现光为  $C(m, n)$  则计算机模拟再现光波的复振幅为  $C(x, y)$

在满足菲涅尔衍射条件公式下, 在菲涅尔衍射距离内, 距离全息面  $Z_i$  (通常  $Z_i = Z_0$ ) 处的再现像为

$$\begin{aligned} U(k, l) &= \frac{i}{\lambda Z_i} \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} Z_i) \exp[-i \frac{\pi}{\lambda Z_i} (k^2 \Delta \zeta'^2 + l^2 \Delta \eta'^2)] \\ &\quad \times \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} C(m, n) I(m, n) \exp[-i \frac{\pi}{\lambda Z_i} (m^2 \left(\frac{L_x}{M}\right)^2 + n^2 \left(\frac{L_y}{N}\right)^2)] \\ &\quad \times \exp[i \frac{2\pi}{\lambda Z_i} (mk \left(\frac{L_x}{M}\right) \Delta \zeta' + nl \left(\frac{L_y}{N}\right) \Delta \eta')] \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $k=0, 1, \dots, M-1; l=0, 1, \dots, N-1; \zeta', \eta'$  为再现像的采样

间隔。

### 3 水印的嵌入与提取方法

#### 3.1 水印的嵌入方法

Step1: 生成水印的信息的数字全息图  $H$ , 大小为  $m \times n$ .

Step2: 计算选取没有经过 MPEG 压缩的宿主视频序列 {格式: YCbCr} 中的每一帧  $\text{Frame}(M \times N)$  的光流运动量, 并依照 Wolf 法提取关键帧

Step3: 对于关键帧的亮度通道进行  $8 \times 8$  分块. 并对每个分块进行离散余弦变换.

Step4: 根据文献[4]给出的视频序列的人类视觉屏蔽特性, 在每一块 DCT 中频分量中根据第一密钥选择  $\text{round}(\frac{64 \times m \times n}{M \times N})$  个系数应用加法公式把水印嵌入进去, 同时原系数数据组成一个新块  $s_{m \times n}$  作为边信息保留, 并把其作为第二密钥, 这样水印序列就能嵌入到细节子带中。

$$B(a, b) = B(a, b) + \alpha \cdot H(i, j) \quad (6)$$

此时  $\alpha H(i, j) \leq JND$

Step5: 对水印信息嵌入后的图像块进行离散余弦反变换, 就得到添加水印后的视频帧的亮度分量。

#### 3.2 水印的提取算法

Step1: 计算选取没有经过 MPEG 压缩的宿主视频序列 {格式: YCbCr} 中的每一帧  $\text{Frame}(M \times N)$  的光流运动量, 并依照 Wolf 法提取关键帧

Step2: 将待检测视频序列关键帧的亮度通道进行  $8 \times 8$  分块. 并对每个分块进行离散余弦变换

Step3: 根据第一密钥检测每一个水印嵌入的秘密位置, 并把相应系数之间的组成一个新块  $D_{m \times n}$ ,

Step4: 与原来的第二密钥边信息  $s_{m \times n}$  作按照如下公式提取全息图:

$$H(i, j) = (D(i, j) - S(i, j)) / \alpha \quad (7)$$

Step6: 对得到的数字全息图重建恢复出水印信息

### 4 算法实验

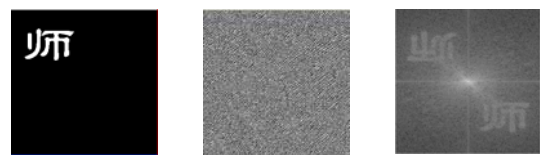
在 MATLAB 7.0 仿真实验平台下, 实验从 ITE (image information and television engineers) 标准视频序列中选取 2 个标准视频序列 BUS, MOBILE, 每个视频序列的长度都是 150 帧, 大小为  $704 \times 576$ , 颜色的格式为 YCbCr, 水印的图像水印为的二值小图标 ( $264 \times 264$ ); 水

印的图像水印为的小图标(如图 2), 其全息图根本看不出水印信息, 安全性很高. 这些视频通过 Wolf 法提取关键帧后, 对其亮度分量进行分块, 在每一分块中按密钥选取 11 个离散余弦变换的系数进行水印嵌入。将水印嵌入测试视频后图像帧后基本无法觉察, BUS 图像帧平均的峰值信噪比为 45.12, MOBILE 图像帧平均的峰值信噪比为 41.32. 攻击者如果不知道水印添加位置、水印大小无法提取水印, 而且数字全息本身就是一种很好的数据隐藏, 这样增强了水印算法的安全性, 使得该算法具有较强的抵抗恶意攻击的能力。



(a) BUS (b) mobile (c) 含水印 BUS (d) 含水印视频  
MOBILE

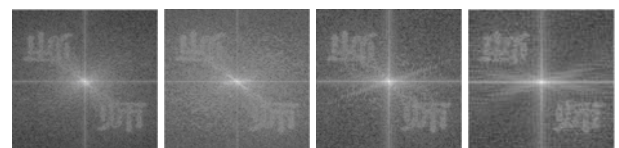
图 2 测试视频及嵌入水印后视频



(a) 嵌入的水印 (b) 全息图 (c) 提取的水印

图 3 测试视频及嵌入水印后视频

视频序列中最常见的攻击是帧裁剪、帧图像压缩、添加噪声、帧交换, MPEG 压缩和格式转换。帧裁剪是将视频序列中的每一帧都进行了裁剪攻击, 为了验证该算法抗剪切的鲁棒性, 对视频序列中的每一帧进行 25%, 50%, 75% 和 87.5% 的裁剪, 从中恢复出来的图像如图 4。当裁剪量达到 87.5% 时还能分辨出嵌入的水印, 该算法抵制帧裁剪的效果非常好, 在实际中有很强的应用价值。

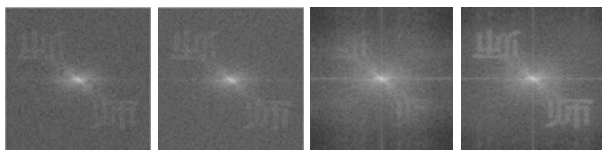


(a) 剪裁 25% (b) 剪裁 50% (c) 剪裁 75% (d) 剪裁 87.5%

图 4 剪裁后提取的水印图

若在视频序列中加入一定量的噪声, 后从被污染

过的视频中重构水印图像。通过实验发现,在对视频序列添加 5%的高斯噪声时,其水印仍可分辨。帧交换是将视频的一些帧相互交换,MPEG 压缩是对视频序列的最基本的攻击方式在 MPEG-1 的压缩处理过程中,对视频的压缩率均为 200kb/s。然后,对进行攻击后的测试视频序列选取关键帧;若对 YUV 视频进行 avi 转换,然后再转换重构 YUV 分量,仍然可以很好地提取水印信息。



(a)5%高斯噪声 (b)帧交换 (c)MPEG 压缩 (d)格式转换

图5 鲁棒性实验

## 5 结论

本文通过全息图的形成与再现数学模型,建立了一个有效的视频水印设计框架,在基于光流法的关键帧提取基础上,把水印的全息图嵌入到关键帧的离散余弦变换的中低频系数中,并充分利用边信息作密钥,使得提取时无须原始视频的参与,理论分析和实验结果表明,该方案对帧裁剪有很强的鲁棒性,即使在每帧剪切掉 87.5%的情况下仍能很好辨别水印,还对抵制添加噪声、帧交换,MPEG 压缩

和格式转换等攻击。

## 参考文献

- 1 吴建华,王铮.基于数字全息和块能量分析的水印算法.计算机工程与应用,2010,46(7):118-120.
- 2 杨涛,徐建锋,杨国光,白剑.基于数字全息和离散余弦变换的数字水印技术.光电工程,2009,12(36):91-96.
- 3 Takai N, Mifune Y. Digital watermarking by a holographic technique. Appl Opt, 2002,41(5):865-873.
- 4 李智,陈孝威.基于熵模型的高透明性自适应视频水印算法.软件学报,2010,21(7):1692-1703.
- 5 侯发忠,邹北骥,等.基于光流场的鲁棒性视频水印算法.计算机工程,2010,(17):234-236.
- 6 Wolf W. Key Frame Selection by Motion Analysis. Proc. of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1996. 1228-1231.
- 7 Horn BKP, Schunck BG. Determining optical flow. Artificial Intelligence,1981,17:185-203
- 8 吕丽,杨树堂,陆橙年,李建华.基于光流法的不良视频检测算法.计算机工程,2007,(12):220-221.
- 9 李超,熊璋.基于帧间差的区域光流分析及其应用.计算机工程与应用,2005,(31):195-197.
- 10 杨涛.数字全息再现像质量及应用的研究.杭州:浙江大学,2010.

(上接第 196 页)

## 参考文献

- 1 刘金焜.先进 PID 控制 MATLAB 仿真.第 2 版.北京:电子工业出版社.2005.
- 2 岳连德.基于神经网络控制的新型智能恒压供水系统.计算机系统应用,2006,15(6):61-63.
- 3 张家骏.基于粒子群算法的 PID 控制器参数优化研究.计算机仿真,2010,27(10):191-193
- 4 Gargari EA, Lucas C. Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. Proc. of the 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation. 4661-4667.
- 5 Jasour AM, Gargari EA, Lucas C. Vehicle Fuzzy Controller Design Using Imperialist Competitive Algorithm. Second First Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems, Tehran, Iran, 2008.
- 6 Dun HB, Xu CF, Liu SQ, Shao S. Template matching using chaotic imperialist competitive algorithm. Pattern Recognition Letters, 2009,(6).
- 7 莫宏伟,左兴权.人工免疫系统.北京:科学出版社,2009.
- 8 Wilson HB. Advanced mathematics and mechanics applications using MatLab. CHAPMAN & HALL CRC. 2003.
- 9 陈伦军,罗艳蕾.一种优化 PID 整定方法在电液阀控系统仿真中的仿真.中国工程机械学报,2005,(10).