

基于张量奇异值分解的鲁棒视频水印算法

黄江涛^{1,2}, 孙辛烨¹, 马叶灵^{1*}, 杜 萌²

(1. 宁波大学科学技术学院, 浙江 宁波 315300; 2. 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对视频的版权保护, 提出了一种基于张量奇异值分解(T-SVD)的鲁棒视频水印算法. 不同于图像, 视频具有多维度的特点, 能够被看作一个高阶张量, 并通过张量奇异值分解以保留帧内和时域的相关性, 从而提高水印鲁棒性. 首先, 对视频帧的亮度分量进行离散小波变换(DWT), 计算得到低频子带(LL), 并将每 3 帧的 LL 作为一个三阶张量; 其次, 将三阶张量分成不重叠块, 并进行张量奇异值分解, 计算得到对角张量; 最后, 利用包含强相关性的对角线张量的奇异值嵌入水印以增强鲁棒性. 此外, 还采用密钥随机提取视频帧, 以加强算法的安全性. 实验结果表明, 提出的算法能够抵抗多种视频攻击, 具有较强的鲁棒性.

关键词: 鲁棒水印; 张量奇异值分解; 对角张量; 离散小波变换

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 05-0079-07

随着互联网和计算机技术的快速发展, 数字多媒体得到了广泛应用. 为满足人们娱乐活动的需求, 网上视频越来越多, 内容也越来越丰富. 然而, 随之而来的安全隐患也越来越多, 例如视频被非法篡改、下载以及复制等. 如何有效地保护视频的版权成为了一个亟待解决的问题^[1-2], 而数字水印技术为视频的版权保护提供了有效途径^[3-6].

视频水印根据变换域可分为基于空域的水印和基于频域的水印. 基于空域的视频水印直接修改图像的像素值来实现水印的嵌入^[7-8]. 空域视频水印计算简单, 但是较容易在图像攻击下丢失水印信息, 鲁棒性较差, 主要用于篡改检测. 相比基于空域的视频水印, 基于频域的视频水印可以抵抗各种恶意攻击, 具有较好的鲁棒性^[9-10]. 该类算法通常首先将视频转换为频域, 然后通过修改频域中的系数嵌入水印, 常见的频域变换方式有离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)、离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)、奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)等^[11-12]. Nguyen 等^[13]提出了一种基于 DCT 的视频水印算法, 该算法将灰度水印分解为位平面, 然后利用奇偶

量化将水印嵌入到视频帧亮度分量的 DCT 低频系数. Thanh 等^[14]将水印图像嵌入到 DCT 系数, 并利用 KAZE 特征自适应检测嵌入和提取的水印区域. Preda 等^[15]将水印嵌入到视频帧的高频子带(HH)和中频子带(HL、LH)的小波系数中, 从而实现水印鲁棒性. 此外, 在此基础上, Preda 等^[16]通过扩频和量化相结合, 将水印嵌入 DWT 中频子带的小波系数, 以提高水印鲁棒性. Bhardwaj 等^[17]利用原始视频帧数、块的大小和嵌入容量之间的关系来确定关键帧的帧数, 并对关键帧进行提升小波变换(Lifting Wavelet Transform, LWT), 最后将水印嵌入低频子带(LL), 从而实现鲁棒性. 相比单变换, 混合变换更能够提取视频的主要特征, 从而增强水印的鲁棒性. Faragallah 等^[18]提出了一种基于 SVD 和 DWT 的视频水印算法, 首先将视频帧进行 DWT 变换, 并将提取的 HH、HL 和 LH 进行 SVD, 最后将水印嵌入到相应的对角矩阵. 熊祥光等^[19]提出了混合整数小波变换和 SVD 的视频水印算法, 将水印嵌入最大奇异值. Sathya 等^[20]利用场景变换检测提取视频的关键帧, 进行 DWT 和 SVD 的混合变换提取鲁棒特征, 并嵌入水印. 除了鲁棒性, 郑秋梅等^[21]

收稿日期: 2021-12-12.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(61971247).

第一作者: 黄江涛(1996-), 男, 安徽芜湖人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 数字图像水印. E-mail: hjtgen@163.com

*通信作者: 马叶灵(1988-), 女, 浙江慈溪人, 硕士/工程师, 主要研究方向: 数据挖掘、数字图像水印. E-mail: mayeling@nbu.edu.cn

则提出一种均衡特征的动态视频水印算法来提高水印的嵌入容量.

上述视频水印算法只是将视频当作连续的静止图像,并没有考虑到视频时域的相关性.视频既具有多维度特点,时域间又具有强相关性,因此若只是对某一帧提取特征,则将忽略视频帧间的强相关性,导致不能较好地抵抗视频特有的攻击,例如帧丢失、帧交换、H.264 和 MPEG-2 等. Zhang 等^[22]提出了一种基于张量分解的视频水印的算法,该算法将视频看作一个三阶张量,然后对视频进行张量分解,利用奇偶量化实现水印的嵌入,但该算法对 H.264 和 MPEG-2 等攻击鲁棒性较差.

为了更好地保护视频的版权,多个连续帧将被看作高阶张量.由于张量奇异值分解(Tensor-Singular Value Decomposition, T-SVD)能够较好保留视频帧内的相关性和时域的相关性,本文由此提出一种结合 T-SVD 的鲁棒视频水印算法,利用 T-SVD 将视频分为 2 个正交张量和 1 个对角张量,对图像进行分块,并对每块进行 T-SVD 分解,计算得到的对角张量.最后,将彩色图像水印的对角张量嵌入到视频的对角张量,从而实现水印嵌入.

1 背景知识

1.1 张量

1.1.1 张量的定义

随着互联网的发展,多媒体数据正朝着多维的方向发展.张量是多维数据的一种表现形式,它能够存储大量的信息.设 P 阶张量表示为:

$$\mathcal{A} = (a_{i_1 i_2 \dots i_p}) \in R^{l_1 \times l_2 \times \dots \times l_p}, \quad (1)$$

其中, $l_1, l_2, \dots, l_p \in \mathbb{Z}$ 代表每个维度元素的数量.采用一组矩阵表示为高阶张量,例如,三阶张量分为前向切片、水平切片和横向切片,分别表示为 $\mathcal{A}_{k::}$ 、 $\mathcal{A}_{::k}$ 和 $\mathcal{A}_{:k}$, 其中 $k \in \{1, 2, 3\}$.

1.1.2 张量相关操作

首先为循环矩阵的计算.当向量的第一列被指定时,该向量能够被转换为循环矩阵^[23].设向量 $\mathbf{v} = [v_0, v_1, v_2, v_3]^T$, 则转换的循环矩阵为:

$$\text{cicr}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} v_0 & v_3 & v_2 & v_1 \\ v_1 & v_0 & v_3 & v_2 \\ v_2 & v_1 & v_0 & v_3 \\ v_3 & v_2 & v_1 & v_0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

此外,通过归一化离散傅里叶矩阵,循环矩阵被对角化.例如,设向量 $\mathbf{v}$ 的大小为 $n \times 1$, $\mathbf{F}_n$ 和 $\mathbf{F}_n^*$ 分别是大小为 $n \times n$ 的离散傅里叶矩阵及其共轭转置矩阵,则对角矩阵 $\text{diag}(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 计算如下:

$$\text{diag}(v_1, v_2, \dots, v_n) = \mathbf{F}_n \text{cicr}(\mathbf{v}) \mathbf{F}_n^*, \quad (3)$$

其中, 对角矩阵 $\text{diag}(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 能够通过计算向量 $\mathbf{v}$ 的快速傅里叶变换计算得到.

其次,通过张量的切片,计算得到块循环矩阵.以三阶张量为例,令 $\mathcal{C} \in R^{l_1 \times l_2 \times l_3}$ 为三阶张量,其中前向切片 $C_1, C_2, \dots, C_{l_3}$ 的大小都为 $l_1 \times l_2$, 块循环矩阵的计算如下:

$$\text{cicr}(\mathcal{C}) = \begin{bmatrix} C_1 & C_{l_3} & \dots & C_2 \\ C_2 & C_1 & \dots & C_3 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{l_3} & C_{l_3-1} & \dots & C_1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

最后,张量的展开为:

$$f(\mathcal{C}) = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_{l_3} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中, $f(\bullet)$ 表示张量的展开^[24], 其操作将 $l_1 \times l_2 \times l_3$ 的三阶张量转换为 $l_4 \times l_2$ 的矩阵, 其中 $l_4 = l_1 \times l_3$. 用 $f^{-1}(\bullet)$ 命令, 使 $f(\mathcal{C})$ 转换为张量形式:

$$f^{-1}(f(\mathcal{C})) = \mathcal{C}. \quad (6)$$

块循环矩阵能够被对角化, 其计算过程如下:

$$\text{diag}(C_1, C_2, \dots, C_{l_3}) = (\mathbf{F}_{l_3} \otimes \mathbf{I}_{l_1}) \times \text{cicr}(f(\mathcal{C}) \times (\mathbf{F}_{l_3}^* \otimes \mathbf{I}_{l_2})), \quad (7)$$

其中, $\otimes$ 为 Kronecker 积; $\mathbf{I}_{l_1}$ 和 $\mathbf{I}_{l_2}$ 为单位矩阵, 大小分别为 $l_1 \times l_1$ 和 $l_2 \times l_2$; $\mathbf{F}_{l_3}$ 为大小是 $l_3 \times l_3$ 的离散傅里叶矩阵; $\mathbf{F}_{l_3}^*$ 是 $\mathbf{F}_{l_3}$ 的共轭转置矩阵.

1.2 从 SVD 到 T-SVD

SVD 是线性代数中一种重要的分解技术, 将 1 个二阶矩阵分解成 2 个正交矩阵和 1 个对角矩阵.

设 $\mathbf{B} \in R^{m \times n}$ 为图像矩阵, 进行 SVD 运算, 将 $\mathbf{B}$ 进行分解:

$$\mathbf{B} = \mathbf{U} \times \mathbf{S} \times \mathbf{V}^T, \quad (8)$$

其中, $\mathbf{U} \in R^{m \times m}$ 和 $\mathbf{V} \in R^{n \times n}$ 为正交矩阵, $\mathbf{S} \in R^{m \times n}$ 为对角矩阵, 其对角线上的值为 $\mathbf{B}$ 的奇异值.

二阶矩阵被认为二阶张量, 而高阶矩阵则被认为高阶张量, 则需要高阶奇异值分解. T-SVD 是

一种比较有效的高阶奇异值分解方法. 以三阶为例, 令 $\mathcal{B} \in R^{l_1 \times l_2 \times l_3}$ 为三阶张量, 定义为:

$$\mathcal{B} = \mathcal{U} \times \mathcal{S} \times \mathcal{V}^T, \quad (9)$$

其中, $\mathcal{U} = R^{l_1 \times l_1 \times l_3}$ 和 $\mathcal{V} = R^{l_2 \times l_2 \times l_3}$ 为正交张量, $\mathcal{S} = R^{l_1 \times l_2 \times l_3}$ 为对角张量. 则式(9)被称为 T-SVD, 其结构如图 1 所示.

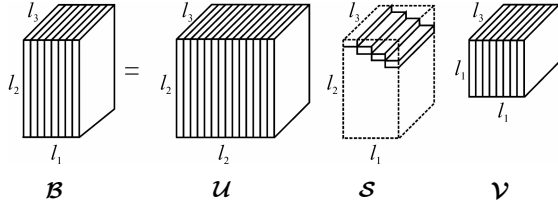


图 1 T-SVD 结构图

2 基于张量奇异值分解的视频水印算法

将视频进行 T-SVD, 计算得到 2 个正交张量和 1 个对角张量. 由于对角张量的奇异值包含了视频的主要能量, 因此将其进行修改, 进而嵌入鲁棒水印. 如图 2 所示, 首先, 确定选择视频的帧数, 并提取视频帧. 其次, 对视频帧分别进行 DWT 变换, 并提取每帧的低频子带(LL). 然后, 为保留视频时域之间的强相关性, 将每 3 帧的 LL 看作一个三阶张量, 并进行分块. 最后, 对每视频块进行 T-SVD 变换, 得到对角张量, 并嵌入水印. 水印的提取则为水印嵌入的逆过程(图 3).

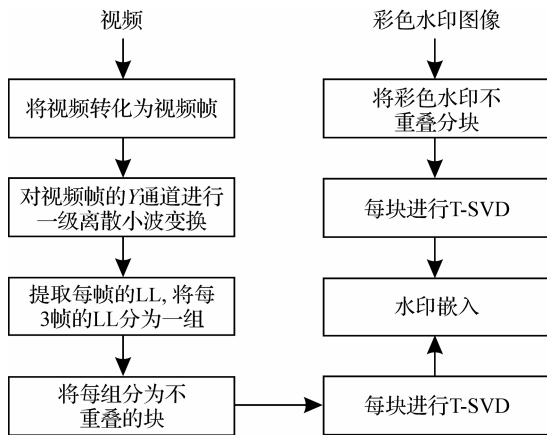


图 2 水印嵌入

2.1 水印嵌入过程

设视频的大小为 $M \times N \times 3$, 彩色图像水印的大小为 $m \times n \times 3$, 水印的嵌入过程具体如下:

步骤 1 根据原始视频帧数、块的大小和嵌入容量之间的关系计算用于嵌入水印的视频帧数.

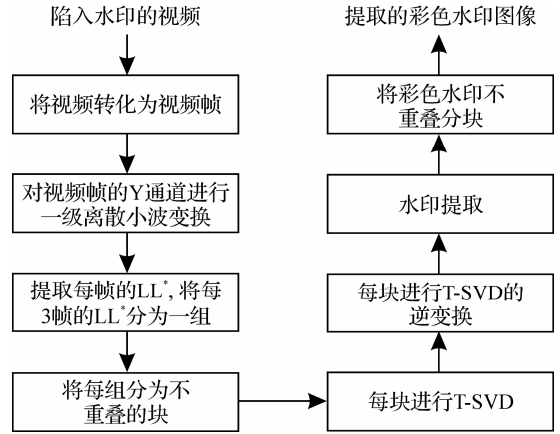


图 3 水印提取

$$R_{NF} = \left\lceil \frac{W_s \times B_s}{F_s / 2^l} \right\rceil, \quad (10)$$

其中, F_s 为 $M \times N$, W_s 为 $m \times n$, B_s 为 $a \times b$.

步骤 2 为了水印安全性, 采用密钥 k 随机提取 R_{NF} 个视频帧用于嵌入水印, 这些视频帧被命名为嵌入帧. 提取嵌入帧的 Y 通道, 并对 Y 通道进行一级 DWT 变换.

步骤 3 提取每个嵌入帧的 LL, 并将每 3 帧的 LL 分为一组, 当作一个三阶张量 $\mathcal{K}$, 其大小为 $(M/2) \times (N/2) \times 3$.

步骤 4 将 $\mathcal{K}$ 分为大小为 $a \times b \times 3$ 的不重叠块 $\mathcal{Y}^j$, 并对每块进行 T-SVD 分解.

$$\mathcal{Y}^j = \mathcal{U}^j \times \mathcal{S}^j \times (\mathcal{V}^T)^j, \quad (11)$$

其中, j 为每块的索引.

步骤 5 将彩色水印分成大小为 $r \times t \times 3$ 的不重叠分块 $\mathcal{Q}^j$, 其中 $a = r, b = t$.

步骤 6 将第 j 块彩色水印 $\mathcal{Q}^j$ 嵌入到 $\mathcal{S}^j$ 中.

$$\mathcal{T}^j = \mathcal{S}^j + \delta \times \mathcal{Q}^j, \quad (12)$$

其中, δ 为嵌入强度.

步骤 7 对 $\mathcal{T}^j$ 进行 T-SVD 分解:

$$\mathcal{T}^j = \mathcal{U}_w^j \times \mathcal{S}_w^j \times (\mathcal{V}_w^T)^j. \quad (13)$$

步骤 8 进行 T-SVD 的逆变换, 得到含水印的块 $\mathcal{Y}_w^j$:

$$\mathcal{Y}_w^j = \mathcal{U}_w^j \times \mathcal{S}_w^j \times (\mathcal{V}_w^T)^j. \quad (14)$$

步骤 9 得到含水印的 LL, 并进行一级 DWT 逆变换, 从而得到含水印的视频帧. 重复步骤, 直至所有视频块被嵌入水印.

2.2 水印提取过程

步骤 1 提取含水印帧的 Y 通道, 并对 Y 通道进

行一级 DWT 变化.

步骤 2 提取每帧的低频子带 LL^* , 并将每 3 帧的 LL^* 分为一组, 当作一个三阶张量 $\mathcal{K}^*$.

步骤 3 将 $\mathcal{K}^*$ 分为不重叠的块 $\mathcal{Y}^{*j}$, 大小为 $a \times b \times 3$, 并对每块进行 T-SVD 分解.

$$\mathcal{Y}_w^{*j} = \mathcal{U}_w^{*j} \times \mathcal{S}_w^{*j} \times (\mathcal{V}_w^{*j})^T. \quad (15)$$

步骤 4 进行 T-SVD 逆变换得到 $\mathcal{T}^{*j}$:

$$\mathcal{T}^{*j} = \mathcal{U}_w^{*j} \times \mathcal{S}_w^{*j} \times (\mathcal{V}_w^{*j})^T. \quad (16)$$

步骤 5 计算得到彩色图像水印块 $\mathcal{Q}^{*j}$:

$$\mathcal{Q}^{*j} = (\mathcal{T}^{*j} - \mathcal{S}^j) / \partial. \quad (17)$$

步骤 6 将彩色图像块组合在一起, 提取彩色图像水印, 从而确认视频版权.

3 实验结果与讨论

使用 Freman、Akiyo、Mother and Daughter 和 Mobile 视频序列对本文算法进行测试, 其大小为 $352 \times 288 \times 3$, 共计 300 帧, 块的大小为 $8 \times 6 \times 3$. 彩色水印 Candy 和 Tree 的大小为 $176 \times 144 \times 3$, 选择视频帧数为 24 帧. 图 4 和图 5 分别显示了测试视频序列和彩色水印图像. 归一化相关系数(NC, 变量名 R_{NC})用于评估提取的原始水印与原始水印之间的相似性, 即鲁棒性为:

$$R_{NC} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{s=1}^n \sum_{g=1}^3 (W \times W^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{s=1}^n \sum_{g=1}^3 (W \times W)} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{s=1}^n \sum_{g=1}^3 (W^* \times W^*)}}, \quad (18)$$



(a) Freman



(b) Akiyo



(c) Mother and Daughter



(d) Mobile

图 4 测试视频序列

其中, W 和 W^* 分别为原始水印图像大小和提取的水印图像大小, $m \times n$ 为水印图像的大小. 采用峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)用于评估原始视频和含水印的视频之间的相似性, 以及检测水印不可感知性.



(a) Candy



(b) Tree

图 5 彩色水印

3.1 不可感知和鲁棒性

彩色水印 Candy 嵌入到视频序列 Freman 和 Mother and Daughter, 它们的 PSNR 分别为 38.22 dB 和 38.91 dB, 彩色水印图像 Tree 嵌入到视频序列 Akiyo 和 Mobile, 它们的 PSNR 分别为 38.31 dB 和 37.56 dB. 图 6 显示了视频在没有任何攻击下提取的彩色水印, 相应的 NC 值都接近于 0.99. 因此, 显示了算法的有效性.



(a) 从 Freman 提取
($R_{NC}=0.994\ 8$)



(b) 从 Akiyo 提取
($R_{NC}=0.993\ 6$)



(c) 从 Mother and Daughter 提取
($R_{NC}=0.995\ 0$)



(d) 从 Mobile 提取
($R_{NC}=0.991\ 9$)

图 6 从不同视频提取的彩色水印

为证明所提出视频水印算法的鲁棒性, 对视频序列进行不同攻击, 例如椒盐噪声、高斯噪声、JPEG 压缩、滤波、帧交换等. 在不同的攻击下, 提取水印的 NC 值实验结果见表 1, 由表中数据可见,

提取水印的 NC 值都高于 0.8, 证明水印具有较高的鲁棒性, 从而可以有效地保护视频版权. 其主要原因是本算法采用的 T-SVD 能保留视频帧间的相关性, 从而增强水印的鲁棒性.

表 1 不同攻击下, 彩色水印图像嵌入到视频序列的 NC 值

攻击	Freman	Mother and daughter	Akiyo	Mobile
椒盐噪声(0.01)	0.981 7	0.973 1	0.879 2	0.970 2
高斯噪声(0.01)	0.971 8	0.951 4	0.810 5	0.948 7
JPEG(90)	0.994 8	0.995 0	0.993 6	0.990 5
JPEG(40)	0.980 5	0.985 5	0.993 7	0.969 1
锐化(0.1)	0.994 8	0.994 9	0.993 1	0.991 9
平均滤波(3×3)	0.923 4	0.942 1	0.945 4	0.898 5
平均滤波(5×5)	0.879 2	0.892 1	0.883 3	0.849 8
中值滤波(3×3)	0.932 5	0.959 4	0.960 6	0.911 1
中值滤波(5×5)	0.888 8	0.907 4	0.900 5	0.860 6
高斯滤波(3×3)	0.967 0	0.982 5	0.978 7	0.943 2
高斯滤波(5×5)	0.966 8	0.982 4	0.978 7	0.943 1
帧交换	0.994 4	0.961 4	0.942 6	0.885 4

3.2 对比实验

为证明本文算法的鲁棒性, 分别与文献[9]和文献[20]进行比较. 从表 2 可知, 大部分本文算法提取的 NC 值优于文献[9]和文献[20], 尤其是高斯噪声(0.01)、平均滤波(3×3)以及平均滤波(5×5). 例如, 在高斯噪声(0.01)攻击后, 提取的 NC 值要比文献[9]的 NC 值高 0.2, 并比文献[20]的 NC 值高 0.1. 尽管

表 2 受攻击视频序列 Freman 中提取彩色水印图像 Candy 的 NC 值

攻击	本文算法	文献[9]	文献[20]
椒盐噪声(0.01)	0.981 7	0.943 7	0.919 1
高斯噪声(0.01)	0.971 8	0.702 9	0.802 7
JPEG(90)	0.994 8	0.997 7	0.990 3
JPEG(40)	0.980 5	0.974 8	0.963 9
锐化(0.1)	0.994 8	0.995 7	0.988 3
平均滤波(3×3)	0.923 4	0.876 6	0.879 3
平均滤波(5×5)	0.879 2	0.741 9	0.642 3
中值滤波(3×3)	0.932 5	0.983 9	0.961 6
中值滤波(5×5)	0.888 8	0.918 1	0.804 4
高斯滤波(5×5)	0.966 8	0.932 2	0.381 8
H.264	0.931 9	0.391 4	0.279 4
帧交换	0.994 4	0.964 8	0.941 2
均值	0.953 4	0.869 2	0.749 6

当视频受到中值滤波(3×3)攻击后, 本文算法提取的 NC 值要比文献[9]的 NC 值低 0.1, 但是在受到 H.264 攻击后, 本算法提取的 NC 值明显高于文献[9]和文献[20]. 从表 2 中还可以看出, 本算法提取水印的 NC 平均值要高于文献[9]和文献[20]. 因此, 实验结果证明本文算法的鲁棒性优于文献[9]和文献[20].

图 7 显示了从受到不同攻击的 Freman 中提取的彩色水印图像 Candy. 从图可知, 提取的水印图像可全部被识别, 并具有较高的 NC 值.

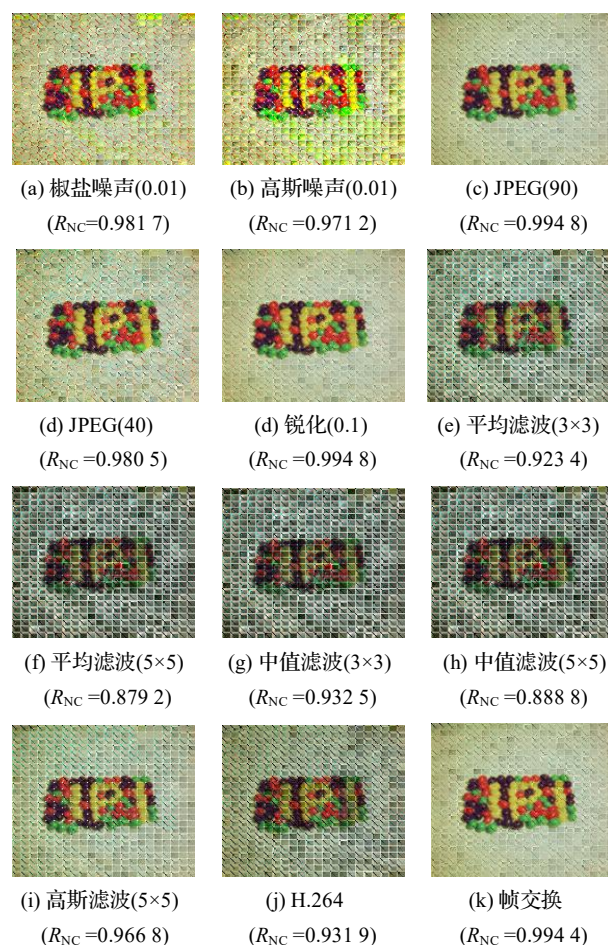
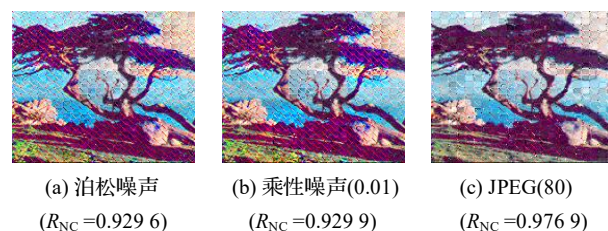


图 7 从受攻击视频序列 Freman 提取彩色水印图像 Candy

图 8 显示了从受攻击的 Akiyo 中提取的彩色图像水印 Tree. 从图可知, 提取的水印能表明视频的



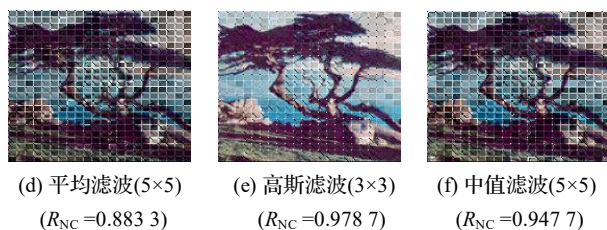


图8 从受攻击视频序列 Akiyo 提取彩色水印图像 Tree 版权信息, 能够较好地保护视频的版权, 该实验进一步证明本算法的鲁棒性.

表3 为在 Akiyo 提取的水印, 当视频受到平均滤波(5×5)攻击下, 本文算法提取的 NC 值比文献[20]高 0.3. 虽然在泊松噪声和乘性噪声攻击后, 本文算法提取的 NC 值略低于文献[9]和文献[20], 但考虑在不同攻击下的 NC 平均值, 本文算法明显高于文献[9]和文献[20]. 因此, 综合以上实验结果, 本文算法具有较高的鲁棒性, 也具有较好的版权保护性能.

表3 从受到攻击视频序列 Akiyo 中提取彩色水印图像 Tree

Attack	本算法	文献[9]	文献[20]
泊松噪声	0.929 6	0.955 0	0.929 4
乘性噪声(0.01)	0.929 9	0.944 4	0.920 8
JPEG(80)	0.979 6	0.969 7	0.986 8
平均滤波(5×5)	0.883 3	0.829 8	0.570 8
高斯滤波(3×3)	0.978 7	0.630 1	0.316 9
中值滤波(5×5)	0.900 5	0.849 6	0.756 8
均值	0.933 6	0.863 1	0.746 9

4 结论

本文提出一种基于张量奇异值分解(T-SVD)的视频水印算法. 利用视频多维度的特点, 将视频看作一个高阶张量, 通过 T-SVD 保留视频帧之间的强相关性, 从而保证水印的鲁棒性. 由于对角奇异值包含了视频的主要能量, 因此通过修改张量对角奇异值进行水印嵌入, 提高了水印鲁棒性. 此外, 为了提高水印安全性, 采用密钥获取视频帧. 实验结果表明, 本文算法鲁棒性好于现有算法. 然而对于平均滤波, 本文算法相应的水印提取方法仍具有一定局限性, 在将来的工作还需进一步改进.

参考文献:

[1] Qasim A F, Meziane F, Aspin R. Digital watermarking:

Applicability for developing trust in medical imaging workflows state of the art review[J]. Computer Science Review, 2018, 27:45-60.

- [2] Ambadekar S P, Jain J, Khanapuri J. Digital image watermarking through encryption and DWT for copyright protection[C]//Recent Trends in Signal and Image Processing, 2019, 727:187-195.
- [3] Yuan Z, Su Q, Liu D, et al. A blind image watermarking scheme combining spatial domain and frequency domain[J]. The Visual Computer, 2021, 37:1867-1881.
- [4] 刘慧超, 王志君, 梁利平. 基于纹理特性的能量差调制视频水印算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(10):116-123.
- [5] Evsutin O, Dzhnashia K. Watermarking schemes for digital images: Robustness overview[J]. Signal Processing: Image Communication, 2022, 100:116523.
- [6] Anand A, Singh A K. Watermarking techniques for medical data authentication: A survey[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(20):30165-30197.
- [7] Chen G, Kang C, Wang D S, et al. A robust video watermarking algorithm based on spatial domain[C]//Proceeding of the 2018 7th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2018). Shenzhen, China. Paris, France: Atlantis Press, 2018.
- [8] Preda R O, Vizireanu N. New robust watermarking scheme for video copyright protection in the spatial domain[J]. UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering, 2011, 73(1):93-104.
- [9] Ayubi P, Jafari B M, Yousefi Valandar M, et al. A new chaotic complex map for robust video watermarking[J]. Artificial Intelligence Review, 2021, 54(2):1237-1280.
- [10] Bayouh I, Ben Jabra S, Zagrouba E. Online multi-sprites based video watermarking robust to collusion and transcoding attacks for emerging applications[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77:14361-14379.
- [11] Kaur H, Karu V. Invisible video multiple watermarking using optimized techniques[C]//2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET). Coimbatore, India. IEEE, 2016:1-9.
- [12] Cheng M Z, Xi M C, Yuan K G, et al. Recoverable video watermark in DCT domain[J]. Journal of Computer, 2013, 8(2):533-538.
- [13] Nguyen T T, Dinh N D. A robust blind video watermarking in DCT domain using even-odd quantization technique[C]//2015 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC).

- Ho Chi Minh City, Vietnaam. IEEE, 2015:439-444.
- [14] Thanh T M, Hiep P T, Tam T M, et al. Robust semi-blind video watermarking technique based on frame-patch matching[J]. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2014, 68(10):1007-1015.
- [15] Preda R O, Vizireanu D N. A robust digital watermarking scheme for video copyright protection in the wavelet domain[J]. Measurement, 2010, 43(10):1720-1726.
- [16] Preda R O, Vizireanu D N. Robust wavelet-based video watermarking scheme for copyright protection using the human visual system[J]. Journal of Electronic Imaging, 2011, 20(1):146-152.
- [17] Bhardwaj A, Verma V S, Jha R K. Robust video watermarking using significant frame selection based on coefficient difference of lifting wavelet transform[J]. Multimedia Tools and Application, 2018, 77(15):19659-19678.
- [18] Faragallah O S. Efficient video watermarking based on singular value decomposition in the discrete wavelet transform domain[J]. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2013, 67(3):189-196.
- [19] 熊祥光, 蒋天发, 蒋巍. 基于整数小波变换和 SVD 的视频水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(1):78-82; 194.
- [20] Sathya S P A, Ramakrishnan S. Fibonacci based key frame selection and scrambling for video watermarking in DWT-SVD domain[J]. Wireless Personal Communications, 2018, 102(2):2011-2031.
- [21] 郑秋梅, 杨亚男, 王风华, 等. 均衡特征的动态视频水印算法[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2021, 35(1):1-9.
- [22] Zhang S Q, Guo X Y, Xu X H, et al. A video watermark algorithm based on tensor decomposition[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2019, 16(5):3435-3449.
- [23] Martin C D, Shafer R, Larue B. An order- p tensor factorization with applications in imaging[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2013, 35(1):A474-A490.
- [24] Kilmer M E, Martin C D. Factorization strategies for third-order tensors[J]. Linear Algebra and its Applications, 2011, 435(3):641-658.

Robust video watermarking method based on T-SVD

HUANG Jiangtiao^{1,2}, SUN Xinye¹, MA Yeling^{1*}, DU Meng²

(1.College of Science & Technology of Ningbo University, Ningbo 315300, China;

2.Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: With a view to better achieve the copyright protection of the video contents, a robust video watermarking method based on Tensor-Singular Value Decomposition (T-SVD) is proposed. In order to preserve strong correlations of the spatiotemporal domain of the video, the video is considered as the high-order tensor, which is transformed using T-SVD to preserve the correlation between the video frames. Firstly, the relationship between the number of video frames, the size of the block, and the embedding capacity is used to determine the number of selected video frames, and to extract the selected video frames. Discrete wavelet transform (DWT) is applied to the luminance components of the selected video frames, and LL sub-bands are extracted. Secondly, LL sub-bands of every three frames are used to construct a third-order tensor. Next, the third-order tensor is divided into non-overlapping blocks, and T-SVD is applied in each block to obtain two orthogonal tensors and one diagonal tensor. Finally, since the singular value of the diagonal tensor includes strong correlations, it can be exploited to embed watermark for robustness. Experiment results shows that the proposed method can resist a variety of image and video attacks.

Key words: robust watermarking; T-SVD; diagonal tensor; DWT

(责任编辑 章践立)