

基于 Zernike 矩的视频对象零水印算法

徐达文¹⁾ 王继成¹⁾ 王让定²⁾

¹⁾(同济大学计算机科学与技术系,上海 201804) ²⁾(宁波大学纵横智能软件研究所,宁波 315211)

摘要 针对几何攻击所导致的水印不同步问题,提出了一种结合 Zernike 矩和图像归一化的有效视频对象水印算法。Zernike 矩的幅度具有旋转不变性,缩放和平移不变性通过图像归一化取得。水印嵌入采用零水印方案,解决了基于 Zernike 矩的图像重构效果不理想和重构过程中复杂度高的问题。实验结果表明,该水印算法对旋转、缩放等几何操作具有鲁棒性,同时对压缩、滤波、高斯噪声等常见的图像处理操作也具有鲁棒性。

关键词 Zernike 矩 零水印 视频对象 图像归一化

中图法分类号: TP309.2 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)09-1825-07

An Object-based Video Zero-watermarking Algorithm Using Zernike Moments

XU Da-wen¹⁾, WANG Ji-cheng¹⁾, WANG Rang-ding²⁾

¹⁾(Department of Computer Science and Technology, Tongji University, Shanghai 201804)

²⁾(CKC Software Laboratory, Ningbo University, Ningbo 315211)

Abstract In order to resist geometrical attacks, an object-based video watermarking algorithm using Zernike moments and image normalization is proposed in this paper. Rotation invariance is achieved by taking the magnitude of the Zernike moments. Image normalization method is used for scale and translation invariance. Though watermark signal can be embedded by modifying the Zernike moments of the cover image, the reconstruction procedure will suffer the fidelity degradation. Also, the reconstruction procedure requires Zernike moments with high order and this leads to a heavy computation load. In order to solve these problems, zero-watermarking technique is employed. Instead of embedding watermark, zero-watermarking technique extracts some essential characteristics from the host signal and uses them for watermark detection. Experimental results show that the scheme is robust against rotation, scaling, as well as a variety of common manipulations such as lossy compression, filtering and additive noise.

Keywords Zernike moment, zero-watermarking, video object, image normalization

1 引言

基于对象的编码是 MPEG-4 视频编码最重要的特点之一,用户可以随机访问每个视频对象,能对视频对象进行旋转、缩放、平移等各种几何操作。这使得视频水印技术更加复杂,水印必须能抵抗几何变

换的攻击。因此,开发一种鲁棒的视频对象水印极其重要。基于对象的视频水印方案也是视频水印技术的一个新的研究热点和难点。

早期的视频对象水印方案^[1-2]由于没有考虑同步问题,在进行去同步攻击后将无法检测到水印信息。为了解决同步问题,Lu^[3]和 Guo^[4]分别提出用特征向量和惯量椭圆(inertia ellipse)进行视频对象的同步恢复,该方法可有效抵抗旋转和翻转攻击,但

基金项目:国家自然科学基金项目(60672070);宁波市自然科学基金项目(2006A610018)

收稿日期:2008-04-10;改回日期:2008-07-15

第一作者简介:徐达文(1981~),男,讲师,同济大学计算机应用专业博士研究生。主要研究方向为视频数字水印、图像取证技术。

E-mail:dawenxu@126.com

对于缩放和扭曲攻击比较敏感。Ho^[5]和Fu^[6]提出利用二阶中心矩对视频对象进行归一化,以解决同步检测问题。此外,Pham^[7]还提出利用尺度不变特征变换(SIFT)特征点抗几何攻击的对象水印算法。与其他不变矩相比,Zernike矩具有旋转不变性、对噪声的鲁棒性、多层次表达以及能描述运动图像等^[8-9],为此,研究者开始探索将Zernike矩引入抗几何攻击的图像水印算法中^[10-11]。

本文提出了一种基于Zernike矩的抗几何攻击的视频对象水印算法。虽然理论上Zernike矩幅度具有旋转不变性,但是由于旋转过程中图像大小变化而产生的边缘影响,因此实际计算过程中Zernike矩的幅度是会发生变化。同时,利用图像质心所具有的平移不变性进行平移归一化,仅当背景像素全部为0时有效。针对上述问题,采用视频对象分割的方法,分割出包含视频对象的最小矩形区域,然后再进行归一化处理,从而减小由于平移或旋转带来的影响。水印嵌入采用零水印方案,这是因为利用Zernike矩对图像的重构效果并不是十分理想,而且,重构过程中需要高阶矩,计算复杂度较高。因此,在水印算法的设计中,不能通过直接修改原始图像的Zernike矩并进行重构来嵌入水印。实验结果表明,本文算法对视频对象操作(旋转、缩放)和JPEG压缩攻击的鲁棒性相对于文献[3]、[5]有一定的提高。

2 Zernike矩和视频对象归一化

2.1 Zernike矩

Zernike提出了一组多项式 $\{V_{nm}(x,y)\}$,这组多项式在单位圆($x^2+y^2=1$)内是正交的,具有如下形式^[8]:

$$V_{nm}(x,y) = V_{nm}(\rho,\theta) = R_{nm}(\rho) \cdot \exp(jm\theta) \quad (1)$$

式中, n 为正整数或零, m 为整数,两者满足 $n-|m|$ 为偶数且 $|m| \leq n$ 。 ρ 为原点到像素点 (x,y) 的矢量长度, θ 为矢量 ρ 与 x 轴的夹角(逆时针方向)。 $R_{nm}(\rho)$ 为径向多项式,定义为

$$R_{nm}(\rho) = \sum_s^{n-\frac{|m|}{2}} (-1)^s \cdot \frac{(n-s)!}{s! \cdot \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \cdot \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!} \cdot \rho^{n-2s} \quad (2)$$

Zernike多项式在单位圆($x^2+y^2=1$)内是正交的,即

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} V_{nm}^*(x,y) \cdot V_{pq}(x,y) dx dy = \frac{\pi}{n+1} \delta_{np} \delta_{mq} \quad (3)$$

式中,*表示共轭, $\delta_{np} = \begin{cases} 1 & n=p \\ 0 & n \neq p \end{cases}$ 。

Zernike矩定义为

$$A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x,y) \cdot V_{nm}^*(\rho,\theta) dx dy \quad (4)$$

对于数字图像,积分可由求和代替

$$A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \sum_x \sum_y f(x,y) \cdot V_{nm}^*(\rho,\theta) \quad (5)$$

式中, $x^2+y^2 \leq 1$ 。为计算给定图像的Zernike矩,必须将图像中心作为原点并将像素坐标映射到单位圆内,落到单位圆外部的像素不参加计算。

若已知图像最高 n_{\max} 阶的所有矩,图像重构如下:

$$\hat{f}(x,y) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_m A_{nm} V_{nm}(\rho,\theta) \quad (6)$$

图1为二值字母C图像(64×64)和Lena灰度图像(128×128)进行Zernike矩的重构结果。

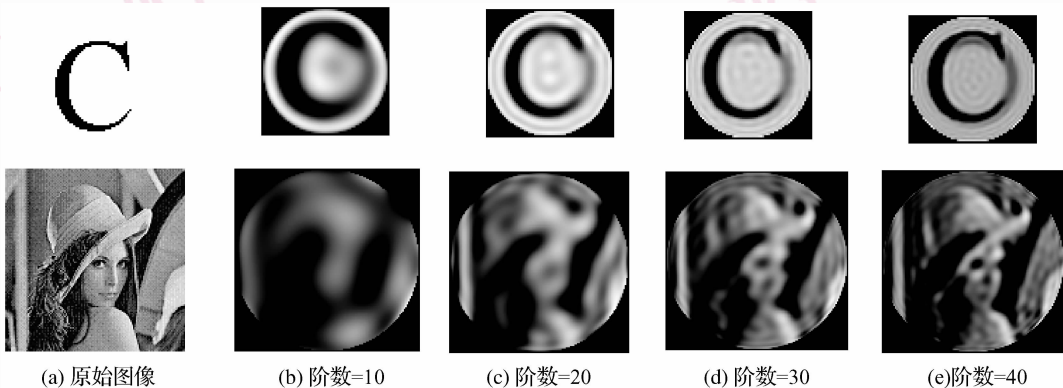


图1 Zernike矩重构结果

Fig. 1 Reconstruction results with Zernike moments

由实验结果可知,低阶 Zernike 矩包含图像的轮廓信息,高阶矩包含图像的细节信息。阶数越高,重构图像的效果越好,但是计算的代价也越大。

2.2 基于 Zernike 矩的图像归一化

2.2.1 旋转不变性

根据式(4),图像 $f(x,y)$ 的 Zernike 矩在极坐标下可以表示为

$$A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} f(\rho, \theta) \cdot V_{nm}^*(\rho, \theta) \cdot \rho d\theta d\rho$$

$$= \frac{n+1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} f(\rho, \theta) \cdot R_{nm}(\rho) \exp(-jm\theta) \cdot \rho d\theta d\rho \quad (7)$$

原始图像经过旋转 α 角度之后图像 $f'(x,y)$ 的 Zernike 矩可表示为

$$A'_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} f(\rho, \theta - \alpha) \cdot R_{nm}(\rho) \exp(-jm\theta) \cdot \rho d\theta d\rho \quad (8)$$

令 $\phi = \theta - \alpha$, 则

$$A'_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} f(\rho, \phi) \cdot R_{nm}(\rho) \exp(-jm(\phi + \alpha)) \cdot \rho d\phi d\rho$$

$$= \exp(-jm\alpha) \cdot \left[\frac{n+1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} f(\rho, \phi) \cdot R_{nm}(\rho) \cdot \exp(-jm\phi) \cdot \rho d\phi d\rho \right]$$

$$= A_{nm} \cdot \exp(-jm\alpha) \quad (9)$$

因此, $|A_{nm}| = |A'_{nm}|$ 。由此可见,Zernike 矩的幅度具有旋转不变性。

2.2.2 平移和缩放归一化

平移归一化是利用图像质心所具有的平移不变性,将图像 $f(x,y)$ 相对于其质心 (x_0, y_0) 做归一化,即

$$f'(x,y) = f(x+x_0, y+y_0) \quad (10)$$

式中, (x_0, y_0) 是图像 $f(x,y)$ 的质心, $x_0 = \frac{m_{10}}{m_{00}}, y_0 =$

$\frac{m_{01}}{m_{00}}$ 。 m_{pq} 是图像的 $(p+q)$ 阶几何矩,定义为

$$m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x,y) \quad (11)$$

经平移处理后,缩放归一化可通过放大或缩小原始图像,使其零阶矩 m_{00} 等于预先设定值 β 。也即将原始图像 $f(x,y)$ 转换为 $g(x,y)$ 形式^[8]:

$$g(x,y) = f\left(\frac{x}{a} + x_0, \frac{y}{a} + y_0\right) \quad (12)$$

式中, $a = \sqrt{\frac{\beta}{m_{00}}}$, β 为预先设定值。

2.2.3 视频对象归一化

但是,上述归一化方法并非总是有效,如图 2 所示。3 幅灰度字母图像大小均为 128×128 ,图 2(a) 为原始图像,图 2(b) 为对应的平移图像。其中字母 A 图像向右平移 40 像素,质心由 $(65.4, 65.1)$ 变为 $(63.7, 65.1)$;字母 B 图像向下平移 40 像素,质心由 $(64.3, 65.8)$ 变为 $(64.3, 63.8)$;字母 B 图像向下平移 40 像素,质心由 $(66.7, 65.9)$ 变为 $(64.0, 63.3)$ 。可见,质心平移与图像平移的像素并不相等。对于背景不为 0 的灰度图像,将图像相对于其质心做平移归一化时,是不能获得平移不变性的。

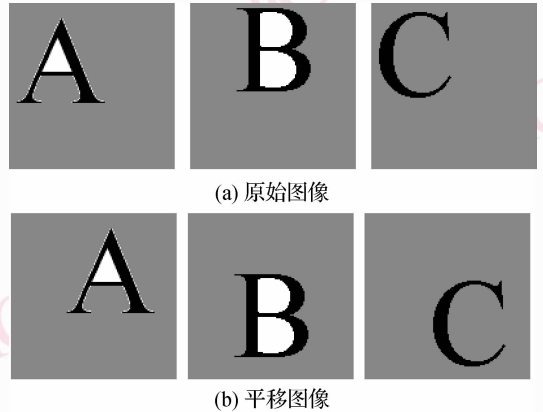


图 2 图像平移
Fig. 2 Image translation

同时,旋转不变性是在假设图像旋转前后有相同的内容被映射到单位圆的基础上成立的。但是,图像旋转时,旋转后的图像比原始图像尺寸要大一些。例如图像原始尺寸为 128×128 ,经过 $15^\circ, 45^\circ, 300^\circ$ 旋转后图像大小分别为 $157 \times 157, 182 \times 182, 175 \times 175$ (如图 3)。

旋转后图像的 Zernike 矩为

$$A'_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} f(\rho', \theta - \omega) \cdot R_{nm}(\rho') \exp(-jm\theta) \cdot \rho' d\theta d\rho'$$

$$= \frac{n+1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} f(\rho', \phi) \cdot R_{nm}(\rho') \exp(-jm(\omega + \phi)) \cdot \rho' d\phi d\rho'$$

$$= \exp(-jm\omega) \left[\frac{n+1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} f(\rho', \phi) \cdot R_{nm}(\rho') \exp(-jm\phi) \cdot \rho' d\phi d\rho' \right] \quad (13)$$

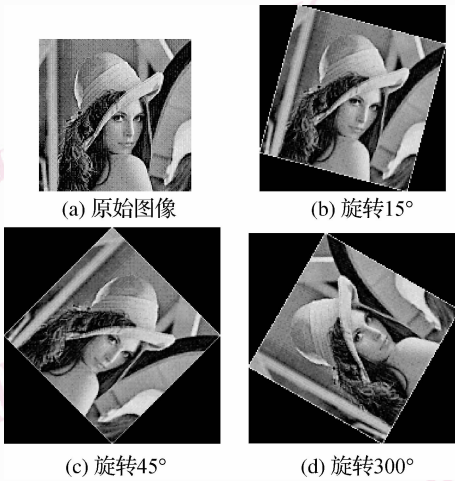


图 3 图像旋转

Fig. 3 Image rotation

式中, ρ 为原始图像极半径, ρ' 为旋转后图像极半径。由于旋转过程中图像大小发生了变化, 将原始图像和旋转图像同时映射到单位圆内, 此时, $\rho' \neq \rho$, 因此, $|A'_{nm}| \neq |A_{nm}|$ 。

针对上述问题, 为了提高矩的不变性, 采用视频对象分割的方法, 分割出包含视频对象的最小矩形区域, 然后再进行归一化处理, 从而减小由于平移或旋转带来的影响。

3 水印算法

由前面的实验结果可以看出, 利用 Zernike 矩对图像的重构效果并不是十分理想, 而且, 重构过程中需要高阶矩, 计算复杂度较高。因此, 在水印算法的设计中, 不能通过直接修改原始图像的 Zernike 矩并进行重构来嵌入水印。针对这种情况, 采用“零水印^[12]”方案。所谓“零水印”是指利用原始图像的重要特征来构造水印, 而不对原始图像作任何修改的水印技术。

3.1 零水印构造算法

(1) 读入一帧视频图像, 采用基于块的对象分割方法提取视频对象^[13]。

(2) 利用式 (12) 将原始视频对象归一化为标准图像, 计算标准图像的 Zernike 矩 A_{nm} 。将矩的幅度构造为特征矢量, 即

$$\vec{p} = (p_1, p_2, \dots, p_N) \\ = (|A_{20}|, |A_{22}|, |A_{31}|, \dots, |A_{n_{\max} n_{\max}}|)$$

其中, N 为特征矢量的长度, n_{\max} 是 Zernike 矩的阶,

实验中取 $n_{\max} = 20$ 。

(3) 将特征矢量 \vec{p} 二值化, 得到二值水印序列 W 。即:

$$W_i = \begin{cases} 1 & \text{若 } p_i > T \\ 0 & \text{若 } p_i \leq T \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

式中, T 为阈值。实验中取 $T = 10^4$ 。

(4) 为了增强算法的安全性, 对水印序列 W 进行加密处理。由密钥 K 生成一个长度为 N 的序列 S :

$$S = \{s(i) \in [1, N], s(i) \neq s(j), i, j = 1, 2, \dots, N\}$$

用序列 S 中的元素作为 W 中元素的索引, 产生置乱后的特征水印序列为

$$\tilde{W} = \{\tilde{w}(i) = w(s(i)), i = 1, 2, \dots, N\}$$

将此信息保存, 作为判定版权的依据。

(5) 重复 (1), 直到嵌入所有的水印。

3.2 零水印检测算法

(1) 与水印构造步骤类同。将待检测视频对象归一化为标准图像, 计算其 Zernike 矩 \hat{A}_{nm} 及特征矢量 \hat{p} 。

(2) 将特征矢量 \hat{p} 二值化, 得到二值水印序列 \hat{W} 。

(3) 将存储的水印信息 \tilde{W} 用密钥 K 解密, 得到 W , 然后与 \hat{W} 取相关值, 相关值为

$$Sim = \frac{W \cdot \hat{W}}{\sqrt{W \cdot W}} \quad (15)$$

$0 \leq Sim \leq 1$, Sim 值越大, 表明水印相似度越高。设定阈值 T_p , 当 $Sim > T_p$ 时, 即认为水印存在, 否则水印不存在。综合考虑虚警率和漏警率, 并经过反复实验后, 将阈值 T_p 设为 0.7。

4 实验结果与分析

实验中选取 akiyo 和 vectra 作为原始视频序列, 视频中的一帧图像分别如图 4(a) 和图 5(a) 所示。为简单起见, 只考虑视频帧中仅含一个视频对象且图像背景较为单一的情况。

在未受任何攻击的情况下, 计算得到的水印相似度为 1。图 4(b) 和图 5(b) 分别给出了未受攻击时相关检测的结果。图中横坐标代表 1 000 个随机水印序列, 其中第 500 个为原水印序列, 纵坐标为相似度值。由图中结果可知, 在横坐标为 500 处的相似度值明显高于其他检测值, 由此可以判断水印存在。

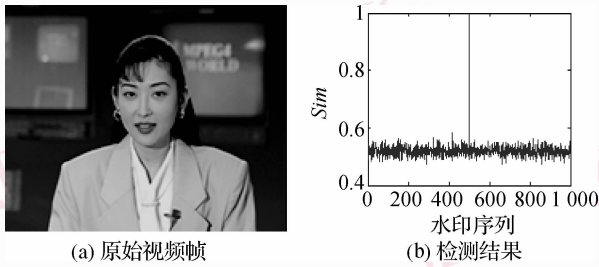


图4 Akiyo对象及检测结果

Fig. 4 Akiyo object and detection result

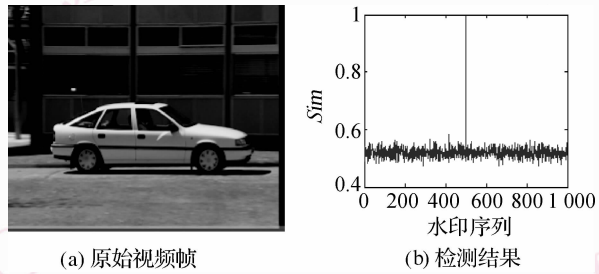


图5 Vectra对象及检测结果

Fig. 5 Vectra object and detection result

4.1 鲁棒性测试

为了测试本文算法的鲁棒性,进行了多种攻击实验。

(1) 噪声攻击

加入高斯噪声后,水印检测响应曲线如图6(a)所示,其中横坐标表示噪声强度。图6(b),图6(c)分别是 akiyo 加入高斯噪声强度 30 时的水印图像及

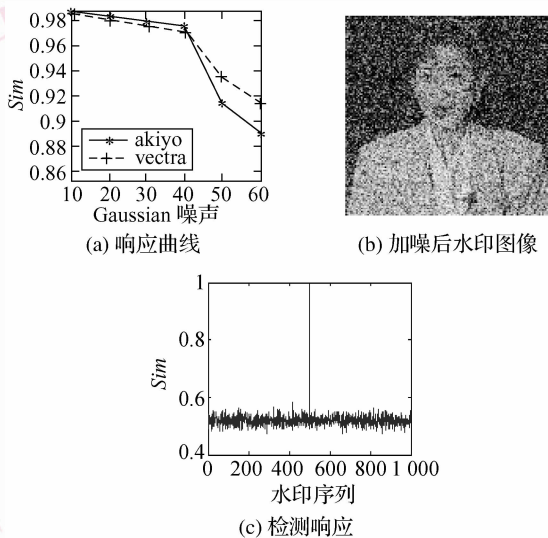


图6 噪声攻击测试结果

Fig. 6 Detection result after add noise

水印检测响应,此时水印图像已明显退化,但算法能可靠、清晰地检测出水印。

(2) 滤波攻击

滤波攻击后的水印检测响应曲线如图7(a)所示,其中横坐标从左到右分别表示 5×5 中值滤波, 3×3中值滤波, 3×3 均值滤波, 5×5 均值滤波。图7(b)和图7(c)分别是 akiyo 经 5×5 均值滤波后的水印图像及水印检测响应,此时水印图像已模糊,但检测结果非常明显。

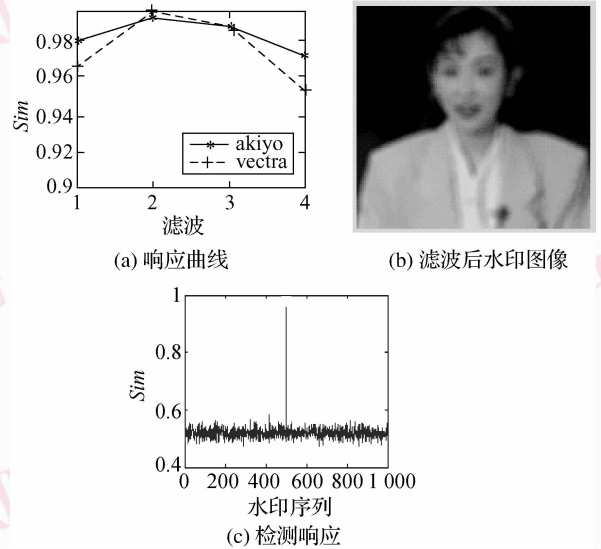


图7 滤波攻击测试结果

Fig. 7 Detection result after filtering

(3) 旋转攻击

旋转攻击后的水印检测响应曲线如图8(a)所示。可以看出,相关值均大于阈值 $T_p = 0.7$, 嵌入水印的图像对于旋转攻击具有良好的鲁棒性。图8(b)和图8(c)分别是 akiyo 旋转 30°后的水印图像及水印检测响应。

(4) 缩放攻击

缩放攻击后水印检测的响应曲线如图9(a)所示,算法的检测结果非常理想。图9(b)给出了 akiyo 缩小 50% 后的水印检测响应,水印能被可靠地检测出。

(5) 压缩攻击

这里选择对某一帧视频图像进行 JPEG 压缩处理。视频帧图像经 JPEG 压缩攻击后的水印检测响应曲线如图10(a)所示,可见算法对 JPEG 图像压缩有较好的鲁棒性。图10(b)和图10(c)给出了质量百分数为 20% 的 akiyo 图像和检测响应,这时压缩

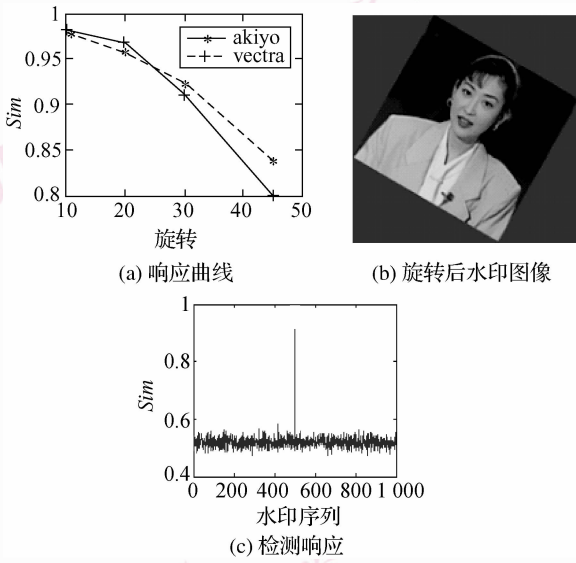


图 8 旋转攻击测试结果
Fig. 8 Detection result after rotation

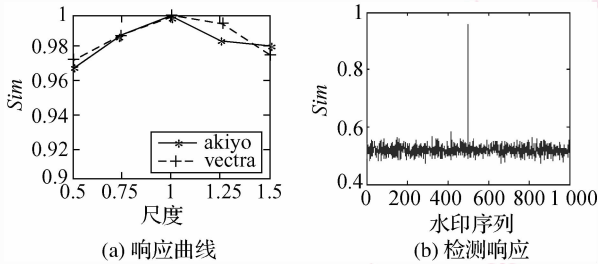


图 9 缩放攻击测试结果
Fig. 9 Detection result after scaling

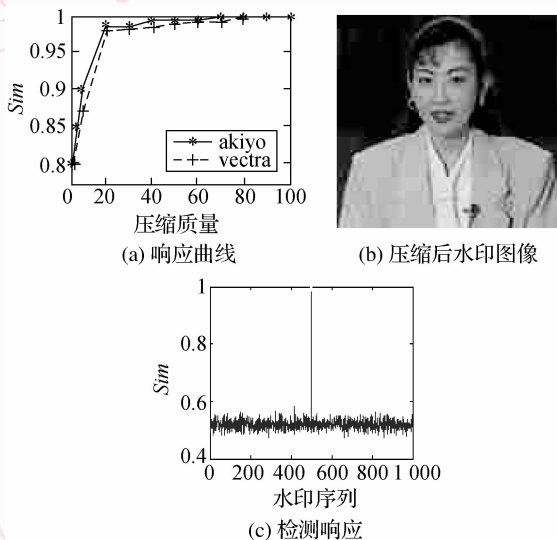


图 10 压缩攻击测试结果
Fig. 10 Detection result after compression

带来的图像失真已经非常明显了,但算法的检测结果是显著的。

(6) 性能比较

图 11 给出了本文算法与文献[3]和文献[5]中算法的性能比较结果,其中横坐标从左到右分别表示无攻击、125% 放大攻击、20° 旋转攻击、均值滤波 (3×3)、高斯噪声攻击 ($\sigma = 20$) 和 JPEG 压缩。从图中结果可以看出,本文算法对视频对象操作 (旋转、缩放) 和 JPEG 压缩攻击方面的性能有一定的提高。

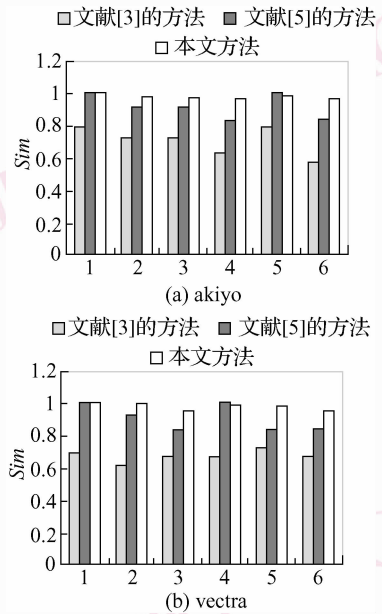


图 11 性能比较结果

Fig. 11 Detection performance compared to other methods

4.2 计算复杂度分析

尽管提出的零水印算法实现简单,但计算量仍相当大,大部分时间用于 Zernike 矩的计算。实验中,采用的机器配置为 Pentium 2.8 GHz CPU, 1 GB 内存。akiyo 视频中完成水印嵌入平均每帧耗时 55.375 0 s, vectra 视频中完成水印嵌入平均每帧耗时 82.109 4 s。在实际应用中,为了提高计算速度,可以采用 Zernike 矩的快速算法^[14]。

5 结论

提出了一种基于 Zernike 矩的视频对象水印算法,具有以下特点:(1) 结合 Zernike 矩和图像归一化方法,水印算法能有效抵抗各种几何操作;(2) 水印嵌入采用了零水印方案,解决了基于 Zernike 矩的

图像重构效果不理想和重构过程中复杂度高的问题;(3)实验验证了该算法在抵抗常见的攻击(如高斯噪声、滤波、压缩等)和几何攻击(如旋转、缩放等)中具有较好的鲁棒性。

参考文献 (References)

- 1 Swanson M D, Zhu B, Chau B, *et al.* Object-based transparent video watermarking [A]. In: Proceedings of IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing [C], Princeton, New Jersey, USA, 1997: 369-374.
- 2 Piva A, Caldelli R, Rosa A D. A DWT-based object watermarking system for MPEG-4 video streams [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Vancouver, Canada, 2000, **3**: 5-8.
- 3 Lu C S, Liao H Y M. Video object-based watermarking: A rotation and flipping resilient scheme [A]. In: Proceeding of 8th IEEE International Conference on Image Processing [C], Thessaloniki, Greece, 2001, **2**: 483-486.
- 4 Guo J, Shi P F. Object-based watermarking scheme robust to object manipulations [J]. Electronics Letters, 2002, **38**(25): 1656-1657.
- 5 Ho Y K, Wu M Y. Robust object-based watermarking scheme via shape self-similarity segmentation [J]. Pattern Recognition Letters, 2004, **25**(15): 1673-1680.
- 6 Fu Y G. Novel object based robust video watermarking scheme [A]. In: Proceedings of 2007 International Conference on Machine Learning and Cybernetics [C], Hong Kong, 2007, **3**: 1705-1710.
- 7 Pham V Q, Miyaki T, Yamasaki T, *et al.* Geometrically invariant object-based watermarking using SIFT feature [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], San Antonio, Texas, USA, 2007. **5**(5): 473-476.
- 8 Khotanzad A, Hong Y H. Invariant image recognition by Zernike moments [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, **12**(5): 489-498.
- 9 Xin Y, Pawlak M, Liao S. Accurate computation of Zernike moments in polar coordinates [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, **16**(2): 581-587.
- 10 Kim H S, Lee H Y. Invariant image watermarking using Zernike moments [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, **13**(8): 766-775.
- 11 Li Lei-da, Guo Bao-long, Sun Lei. RST invariant watermark based on local Zernike moments [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2007, **18**(1): 117-120. [李雷达, 郭宝龙, 孙磊. 基于局部 Zernike 矩的 RST 不变水印 [J]. 光电子·激光. 2007, **18**(1): 117-120.]
- 12 Ma Jian-hu, He Jia-xing. A wavelet-based method of zero-watermark [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, **12**(4): 581-585. [马建湖, 何甲兴. 基于小波变换的零水印算法 [J]. 中国图象图形学报, 2007, **12**(4): 581-585.]
- 13 Won C S. A block-based MAP segmentation for image compressions [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1998, **8**(5): 592-601.
- 14 Chong C W, Raveendran P, Mukundan R. A comparative analysis of algorithms for fast computation of Zernike moments [J]. Pattern Recognition, 2003, **36**(3): 731-742.