

数字图像水印算法抗几何攻击鲁棒性研究

袁大洋 肖俊 王颖

(中国科学院研究生院信息安全国家重点实验室 北京 100049)

摘要: 数字水印对抗各种攻击的鲁棒性一直是水印研究者所关注的一个焦点, 其中几何攻击是实际应用中经常出现的一种攻击方式, 而常规的水印算法对几何攻击却无能为力, 因此水印算法对几何攻击的鲁棒性被认为是数字水印技术走上商用的一个关键点。该文总结了已有的典型抗几何攻击数字水印算法, 从理论分析和实验验证两个角度对他们进行了比较和分析, 并指出了下一步可能的发展方向, 对抵抗几何攻击水印算法的发展具有一定的指导作用。

关键词: 数字水印; 几何攻击; 同步模板; 绝对同步; 不变水印

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)05-1251-06

Study on the Robustness of Digital Image Watermarking Algorithms to Geometric Attacks

Yuan Da-yang Xiao Jun Wang Ying

(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Information Security State Key Laboratory, Beijing 100049, China)

Abstract: The robustness of digital watermarking to various attacks is a focus of researchers, while geometric attacks are very common attacks in practical applications. But conventional watermarking algorithms are helpless in face of geometric attacks, so the robustness to geometric attacks is called a bottleneck of commercial digital watermarking. The existing typical watermarking algorithms robust to geometric attacks are summarized, then they are compared and analyzed from the points of theoretical analyses and experimental validations. The possible development trends are pointed out, which can instruct the development of watermarking algorithms resistant to geometric attacks.

Key words: Digital watermarking; Geometric attack; Synchronization template; Absolute synchronization; Invariable watermarking

1 引言

各种数字作品在其传输和使用过程中, 必然会经历各种操作或攻击, 这些操作或攻击有的是无意的, 有的是有意的。数字作品在存储、分发、打印和扫描等过程中引入的各种失真, 被称为无意攻击; 而对新技术的好奇、盗版带来的巨额利润等也能成为攻击的动机, 由此而导致的攻击称为恶意攻击。按照攻击原理和目的又可以将攻击分为简单攻击、同步攻击、分析攻击、解释攻击和拷贝攻击等五类^[1]。攻击会使相应的水印系统检测工具无法正确地恢复水印信号, 或不能检测到水印信号的存在, 因此数字水印对抗各种攻击的鲁棒性, 一直是水印研究者所关注的焦点之一。在众多攻击中, 几何攻击作为同步攻击的一种特殊形式, 在水印实际应用中会经常遇到, 且难于抵抗, 因而更是备受关注。

几何攻击通过对含水印图像做各种全局或局部仿射、投影变换等进行攻击, 包括平移、旋转、缩放、纵横比改变、水平翻转、镜像、投影失真和删除行列等。其中旋转(Rotation)、缩放(Scale)和平移(Translation)通常简称为RST, 也称为仿射变换。在几何攻击下, 水印仍然存在于被

攻击的数字作品中, 甚至幅度都没有变化, 但是水印信号已经错位, 不能维持正常水印提取过程所需要的同步性。目前, 一些典型的数字水印算法^[2,3]能抵抗有限的简单攻击, 如低通滤波、数据压缩、线性滤波和添加噪声等, 而对于诸如缩放、剪切、旋转等几何同步攻击则效果不佳, 因此几何攻击被认为是数字水印技术走上商用的瓶颈, 是一个十分困难而极具挑战性的课题。

国内外已有许多学者从攻击特性、载体特性和多水印等方面考虑并设计了一些抗几何攻击的水印算法, 归纳起来主要有穷举法^[4]、同步模板法^[5-12]、不变水印法^[13-21]和绝对同步法^[15-28]等4类方法。本文主要介绍抗几何攻击的主要原理和典型水印算法, 对已有方法的优缺点进行分析, 并对各类方法中的典型算法进行实验比较和分析, 同时探讨数字水印算法抵抗几何攻击的发展方向。

2 穷举法

穷举法在定义各种失真参数可能值和搜索分辨率的范围之后, 检查参数的每种组合, 其中失真参数值的每种组合都代表了一种假定的失真, 这是在水印嵌入作品后可能遭受的失真。

穷举法存在两方面的问题, 第1, 穷举法需要计算的次

数随搜索空间的增大而增加,会引起计算开销问题。以二维作品为例,设想一个穷举搜索要检查间隔为 1° ,范围为 -179° 到 $+180^\circ$ 之间的所有旋转,增量为 1% 、范围为 50% 到 200% 间的所有水平和垂直方向上的缩放,以及增量为 1 个像素、范围为 ± 100 个像素的水平 and 垂直平移,该搜索需要大约 $N = 330M$ 次检测操作。第2,由于一个水印检测器的多重应用,会引起较高的虚警率。对每个未带水印的作品,需要测试 N 种失真版本。如果在这些版本里发现一个水印,就将产生虚警,用 P 表示作品任何单个版本的随机作品虚警率, N 个版本中至少有一个会导致虚警的概率达到 $N \times P$,当 N 很大时,这是不可接受的。

可见,穷举法校准效率低,而且搜索空间大小是影响计算开销和虚警率的两个实际因素,因此穷举搜索的有效使用依赖于形成小搜索空间的技术^[4]。也正因为如此,穷举法虽然思想简单,但是在实际应用中却有较高的复杂度,很少被采用。

3 同步模板法

同步模板法在嵌入有效水印信息的同时,嵌入一个专门用于同步的信号,称为同步模板,它专门用来检测载体作品所经历的几何变换。由于离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)在几何变换方面具有较好的性质,目前大多数基于同步模板的水印算法^[5-9]都是DFT域的,不同的算法体现在组成模板的点数、强度和嵌入位置的不同。

1999年Pereira等提出了基于对数-极坐标映射和对数-对数映射来抗几何失真的水印算法^[5]。该算法在图像离散傅里叶变换的25个系数中嵌入同步模板;检测时通过对待检测图像进行离散傅里叶变换,并对其幅度值进行对数极坐标映射,从而将新坐标系下的旋转和缩放都转化为平移,进而可以利用穷举搜索的方法匹配失真图像中25个模板系数的坐标与原始图像中模板系数的坐标。该算法只能对抗单一的旋转攻击或缩放攻击,而且实时性不高。尽管如此, Deguillaume等将此算法推广到三维^[7],并运用于视频水印中。随后, Pereira等于2000年提出了一种改进算法^[8],克服其1999年提出的算法的一些缺点,但是往往不能准确实现模板匹配。2003年Kang等在Pereira等的算法基础上,提出了基于DFT-DWT (Discrete Wavelet Transform)的复合域水印算法^[9],该算法将多个水印信息嵌在不同的变换域,以避免相互干扰。此外, Kang等还利用水印结构设计和2-D交错等方法来进一步增强算法在抗旋转、缩放、剪切和错切(X-shearing、Y-shearing和XY-shearing)等几何失真方面的效果,但检测时要知道原始图像的大小。

在基于同步模板的算法中,有些算法所嵌入的水印既作为同步模板,又作为有效载荷,检测时通过预测并计算水印的自相关函数来计算图像遭受的仿射变换参数,因此也称作自相关方法^[10-12]。这些方法对旋转、缩放、平移和纵横比改变有较好的鲁棒性,但该算法不能很好地抵抗剪切和镜像

等攻击。

总的来说,同步模板法存在一些弱点。首先,同步模板和有效水印信息之间可能相互干扰;其次,同步模板的使用有负面的安全隐患。典型情况下,把相同的同步模板应用于不同的作品,可以减轻检测器寻找失真同步模板的工作量,但敌手可以从水印作品集中发现同步模板。此外,同步模板的嵌入会使载体作品的质量降低,如果降低嵌入幅度以保持作品的保真度,则鲁棒性又会降低。

4 不变水印法

通常的不变水印法指的是RST不变水印法,它在作品中寻找或建立相对于旋转、缩放和平移固定的特征矢量,并将有效水印信息嵌入其中。由于Fourier-Mellin变换(FMT)具有RST不变性,数字图像的Zernike矩具有旋转不变性,Radon变换具有缩放和旋转不变性,所以这些技术常用于设计或寻找特征矢量,下面依次介绍基于这些设计方法的水印算法。

4.1 基于Fourier-Mellin变换的水印算法

由于Fourier-Mellin变换综合了傅里叶变换和对数极坐标变换的特性,空域中的旋转和比例缩放对应于对数极坐标中的平移变换,且傅里叶变换具有平移不变性(对幅度谱而言),它很早就被数字水印技术研究者用于设计对抗几何失真的数字水印算法。这类算法^[13-16]通常首先利用FMT变换来寻找具有几何变换不变性的特征矢量,然后将水印信息嵌入其中,从而使得水印算法具有对几何变换的强鲁棒性。

1998年O'Ruanaidh等利用快速傅里叶变换来消除平移的影响,通过FMT变换获得具有RST不变性的变换系数,进而在这样的系数中嵌入水印信号以达到对抗几何攻击的目的,从而实现了一种对抗几个攻击的图像水印算法^[13]。但该算法实现较困难,且图像会有较明显的振铃效应。有鉴于此,2001年Lin等对其进行了改进^[14]。他们利用FFT变换和对数极坐标映射来对抗平移和缩放,通过一维投影将旋转转换为圆周移位,这样,在检测时只需对投影变换后的系数采取圆周移位相关检测,从而使得算法的复杂度低于O'Ruanaidh等的算法。然而,这种复杂度的降低是以相关检测作为代价的,即只能检测到水印的有无。此外,还有一些类似的基于FMT变换的算法^[15,16],这里不一一介绍。

4.2 基于Zernike矩的水印算法

Zernike矩是单位圆上的函数在Zernike正交基函数上的投影,它具有旋转不变性和翻转不变性。利用Zernike矩特性设计对抗几何攻击的水印算法时,先计算载体图像的Zernike矩,之后将水印信息嵌入到合适的Zernike矩系数中,再利用对应的Zernike基函数从含水印的Zernike矩中重构含水印图像。

2001年Farzam等首次利用Zernike矩的旋转不变性来设计抗几何失真的数字水印算法^[17]。该算法通过将图像分解为同心环子图像,并将水印信息嵌入到每个同心环的Zernike

矩中, 之后重构含水印图像。然而, 重构水印图像的过程计算复杂, 含水印图像的保真度较差, 且不能抗缩放和平移等几何失真。鉴于此, 2003 年 Hyung 等提出了一种综合利用 Zernike 和图像归一化技术的水印算法^[18], 他们利用 Zernike 矩来抗旋转失真, 利用图像归一化技术来实现对抗缩放和平移的鲁棒性。但该算法嵌入水印后的失真仍然比较大, 且只能嵌入 1bit 水印。考虑到基于 Zernike 矩的水印算法的缺点, 2004 年 Xin 等对矩的阶数和次数进行了分析^[19], 在此基础上通过选择最合适的 Zernike 矩系数来提高此类算法的性能, 但该算法存在不能抵抗线性变换攻击的不足。

4.3 基于 Radon 变换的水印算法

Radon 变换常用来计算指定方向上图像矩阵的投影, 并构建具有平移、缩放以及旋转变换不变性的特征量。因此常用来实现在二维图像的 Radon 变换空间的平移和比例矩不变量中嵌入水印信息。

1999 年 Wu 等首先提出一种基于 Radon 变换的算法^[20], 但该算法仅仅是 O'Ruanaidh 算法^[13]的一个简单变形。2003 年 Simitopoulos 等提出了基于广义 Radon 变换的抗几何失真水印算法^[21], 引入了两种广义 Radon 变换来抵抗缩放攻击和旋转攻击, 通过图像特征点的方法来抵抗平移攻击。此外, 该算法中采用拐角检测算法(corner detection)检测图像中的拐角, 并选择其中鲁棒性最强的拐角作为两个广义 Radon 变换的原点, 从而进一步提高了算法对抗旋转和缩放等攻击的能力, 但该方法只能嵌入 1bit 水印信息。

纵观 3 类不变水印算法, 其关键均在于寻找不变特征矢量, 而设计特征矢量的方法主要基于 Fourier-Mellin 变换, Zernike 矩和 Radon 变换等, 这些变换都有完美的数学表达, 但运算比较复杂。此外, 由于这些变化都是针对连续信号的, 在处理离散图像信号时, 必定会使用一些数值计算方法, 进而引起一定的误差。这也是此类方法的主要问题所在。同时, 使用这些策略的水印算法只能抵抗 RST 攻击, 不能同时抵抗剪切、长宽比改变和 RST 联合攻击中常伴随的剪切等其它攻击。

5 绝对同步法

绝对同步是指在嵌入和检测水印之前利用载体图像本身的特征对图像进行同步。该方法将水印信息嵌入到与载体作品内容相关的几何位置, 这种基于内容的水印算法提供了一种抗几何攻击的新方法。常见的绝对同步算法多采用图像归一化技术和不变点技术, 下面分别对其进行介绍。

5.1 基于图像归一化的水印算法

基于图像归一化技术的水印算法其基本过程如图 1 所示, 在嵌入水印前, 先将图像归一化为具有一定位置、方向和大小标准图像; 然后, 在标准图像中嵌入水印, 将图像反归一化后得到含水印图像; 提取水印时, 先将待检测图像进行归一化得到标准图像, 然后在标准图像中提取水印。

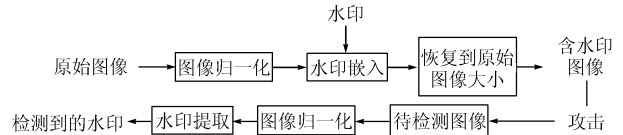


图 1 基于图像归一化的水印系统

2002 年 Dong 等提出了一种通过图像归一化来对抗几何攻击的数字水印算法^[22], 水印信息被嵌入到经过归一化处理的载体图像的块 DCT 系数中。该算法对仿射变换失真有良好的鲁棒性, 但剪切攻击使得归一化过程失效, 从而导致水印提取失败。杨文学等于 2004 年对 Dong 算法^[22]中的归一化方法进行了分析和改进^[23], 去掉了归一化过程中的约束条件, 对其中的保真度问题进行了优化, 但是对剪切攻击的鲁棒性仍然没有解决。2005 年 Dong 等^[24]提出了另一种基于图像归一化的算法, 该算法采用图像归一化技术求得归一化图像的仿射变换参数, 并利用这些参数和 DS-CDMA 技术来重构水印信号, 最后将水印信号与载体图像在空域相加从而得到含水印图像。该算法对于仿射变换和滤波等具有较好的鲁棒性, 但该算法对于剪切攻击仍然无能为力。

5.2 基于不变点的水印算法

基于不变点的水印算法是利用图像中相对稳定的特征点标示水印嵌入的位置, 并在与每个特征点对应的局部区域中独立地嵌入水印, 从而当只有部分图像时, 仍能通过这些特征点来定位水印。

2001 年 Celik 等在提取图像特征点的基础上, 对图像进行分割和变换, 实现了一种对抗几何攻击的数字水印算法^[25]。他们利用提取出的特征点集把图像分割成基本的小块, 同时将这些小块变换成标准几何形式, 最后才在这种标准形式中嵌入水印。理论上该算法可以获得很好的性能, 但该算法检测时很难准确地提取特征点。2003 年 Chotikakamthorn 等针对抗投影变换攻击, 提出了一种利用特征点的水印算法^[26]。该算法根据特征点坐标定位水印嵌入位置, 以解决投影变换之后的同步问题, 因此对投影变换具有较好的鲁棒性, 但该算法不能嵌入多比特水印。此外, Tang 和 Bas 等也利用图像特征点提出了相应的水印算法^[27, 28], 其中 Tang 等提出的算法^[27]综合利用了图像特征点和图像归一化技术。该算法对图像锐化, 加性噪声, JPEG, 剪切和旋转等具有较好的鲁棒性, 但算法实现较复杂, 嵌入的有效载荷较小, 且对均值滤波和缩放攻击的鲁棒性较差。

综上所述, 两类绝对同步水印算法也存在各自的弱点。基于图像归一化的水印算法受归一化技术本身的限制, 对于可能造成图像内容丢失的攻击无能为力; 而基于不变点的水印算法的关键在于提取出在几何攻击下有很好鲁棒性的特征点, 其鲁棒性依赖于特征点提取算子的可重复性及准确性。

6 典型算法的性能比较与分析

上面抵抗几何攻击的4类方法的基本原理和其中具有代表性的算法进行了介绍,本节选择具有代表性的6种算法,对其性能进行比较与分析。算法1是基于同步模板的算法^[8];算法2是基于对数极坐标映射和傅里叶变换的算法^[13];算法3是基于 Zernike 矩的算法^[17];算法4是基于 Radon 变换的算法^[21];算法5是基于图像归一化的算法^[22];算法6是基于不变点的算法^[26]。

6.1 算法性能定性分析

根据相关文献中的原理介绍,这里首先对这6种算法整体性能进行定性比较,结果如表1所示。可见,基于 Radon 变换和不变点算法不能嵌入多比特水印信息,其他4种算法都能嵌入多比特水印。

此外,从抗攻击的种类来看,就能够嵌入多比特水印信息的4种算法而言,基于同步模板的算法抗攻击种类最多,基于对数极坐标映射和基于 Zernike 矩的算法抗攻击种类最少。基于对数极坐标映射的算法和基于 Zernike 矩的算法均不具有抗线性变换和抗错切失真的鲁棒性。这主要是由于对于数字图像来说,目前还没有找到既对旋转和缩放具有不变性,又对错切等操作具有不变性的域。此外,由于 Zernike 矩对于平移和剪切比较敏感,所以基于 Zernike 矩的算法不能抗带剪切的旋转攻击。基于对数极坐标映射的水印算法检测时,需要原始图像,这在很多应用中受到限制。

6.2 StirMark 攻击下算法性能定量分析

本节使用StirMark 4.0 标准测试程序^[29]分析4种可嵌入多比特水印的算法对几何攻击的鲁棒性。实验中,选择512×512的灰度图像作为载体,选择50bit的二值图像作为水印信息,用峰值信噪比(PSNR)度量嵌入失真,并使得含水印图像的PSNR为45dB;以误码率衡量算法对抗攻击的鲁棒性。本文对大量图像进行了测试,下面给出针对10幅典型图像的平均实验结果。

缩放攻击下,4种算法的比较结果图2所示,显然,归一化算法可以获得最优性能;而基于 Zernike 矩的算法次之,基于同步模板的算法的性能最差。4种算法对抗旋转攻击的比较结果如图3所示,其中归一化算法的误码率仍然最低;基于 Zernike 矩的算法与之非常接近,而基于同步模板的算

法的性能仍然最差。图4显示的是剪切攻击下的比较结果,可见,当剪切较小时,基于 Fourier-Meilin 变换和同步模板的算法可以获得较好的性能;而当剪切较大时,4种算法的误码率都较高。图5显示了在 StirMark 4.0 默认的8种线性变换(横坐标中的1-8分别对应于 StirMark 4.0 中默认的8种线性变换)攻击下,4种算法的鲁棒性比较,可见,4种算法都不能完全提取水印信息,但基于归一化的算法可以获得相对较好的性能。在删除行列的攻击下,4种算法的误码率比较如图6所示,可见基于归一化的算法在大多数情况下均可以完全提取水印信息;基于 Fourier-Meilin 变换的算法在删除间隔比较大的情况也可以获得较好的性能;而基于同步模板的算法性能不稳定。

因此,就单一的攻击而言,没有一种方法能够对抗所有攻击。但基于归一化的算法能对抗缩放、旋转、线性变化和删除行列等大多数攻击;而基于同步模板的算法在大多数攻

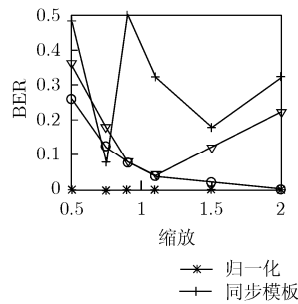


图2 不同缩放程度下的误码率比较

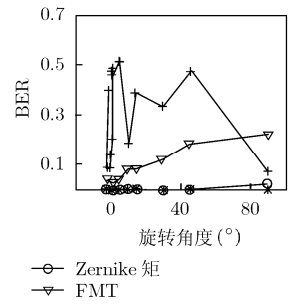


图3 不同旋转角度下的误码率比较

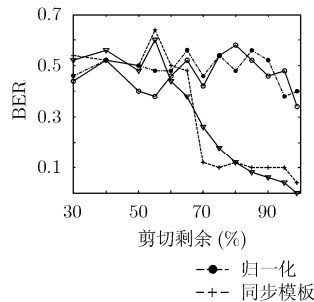


图4 不同剪切程度下的误码率比较

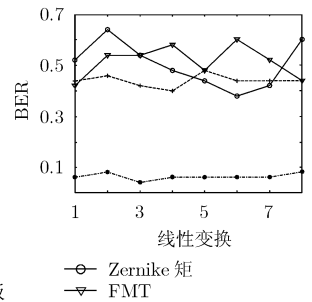


图5 不同线性变换下的误码率比较

表1 典型算法性能的定性比较

	基于同步模板的算法	基于 LPM 的算法	基于 Zernike 矩的算法	基于 Radon 变换的算法	基于图像归一化的算法	基于不变点的算法
嵌入多比特	是	是	是	否	是	否
盲检测	是	否	是	是	是	是
抗带剪切旋转	是	否	否	否	否	否
抗不带剪切旋转	是	是	是	是	是	是
抗缩放	是	是	是	是	是	是
抗错切	是	否	否	否	是	是
抗剪切	是	是	否	否	否	否
线性变换	是	否	否	是	是	是

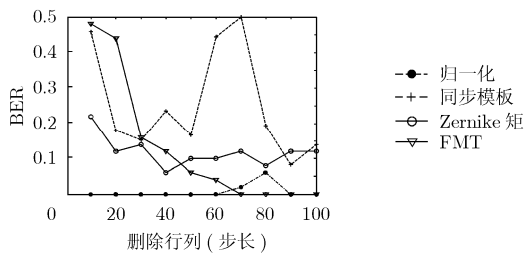


图 6 不同程度删除下的误码率比较

击下, 性能最差。

此外, 我们对带缩放的旋转和带剪切的旋转等组合攻击下的鲁棒性也进行了测试, 如图 7 和图 8 所示。可见, 在较小强度的攻击下, 除基于同步模板的算法外, 另 3 种算法的误码率还可以接受; 但随着旋转角度增大, 误码率都急剧上升。

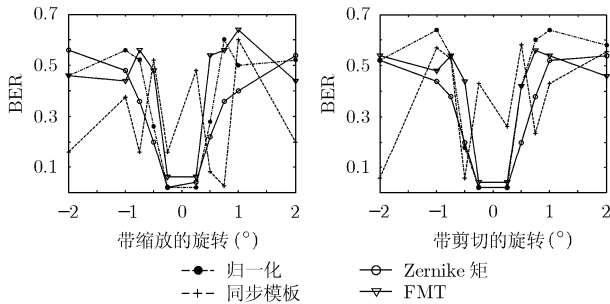


图 7 不同缩放和旋转下的误码率比较

图 8 不同剪切和旋转下的误码率比较

7 结束语

本文从理论分析和实验验证两个角度对已有的典型抗仿射变换数字水印算法进行了研究。从抗几何攻击的种类来看, 基于同步模板的算法抗攻击的种类最多, 但该算法存在同步模板不能有效提取的缺点; 基于图像归一化技术的算法具有较好的抗仿射变换性能, 但嵌入失真较大, 且不能抗剪切; 基于不变域水印技术的算法一般只能抗旋转和缩放攻击, 对于错切攻击和线性变换等则无能为力。此外, 各种算法均不能抵抗组合攻击, 而实际应用中, 多种攻击可能同时存在, 因此抗几何攻击仍是一个值得进一步研究的方向。

分析抗几何攻击水印算法的原理和性能, 抗几何攻击水印算法可以在以下方面继续进行研究: (1) 寻找更为准确和高效的模板匹配方法, 设计性能更优的同步模板水印算法。(2) 进一步研究基于绝对同步的数字水印算法。一方面, 现存的基于图像归一化的算法具有较好的抗仿射变换性能, 但存在不能抗剪切的缺点, 如果能够与 DFT 变换的抗剪切特性结合起来, 应该会有较好的效果; 另一方面, 基于特征点不变的算法具有较好的抗剪切特性, 但目前的基于特征点不变的算法大多不能嵌入多比特水印。(3) 基于特征点的算法有较大

潜力, 因为它充分利用了图像内容的特性, 但这类算法的进展取决于对于几何失真鲁棒的特征点的取得。(4) 结合密码学、数字认证和数字签名或者数字信封等多种技术来设计数字水印算法, 以对抗组合攻击和扭曲等各种攻击。

参考文献

- [1] 王志雄, 王慧琴, 李人厚. 数字水印应用中的攻击和对策综述. 通信学报, 2002, 23(11): 75-79.
Wang Zhi-xiong, Wang Hui-qin, and Li Ren-hou. Attacks and remedies on application of digital watermarking. *Journal on Communications*, 2002, 23(11): 75-79.
- [2] Chen B and Wornell G W. Quantization index modulation methods for digital watermarking and information embedding of multimedia. *Journal of VLSI Signal Processing Systems*, 2001, 27(1): 7-33.
- [3] Cox I J, Kilian J, and Leighton T, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1997, 6(12): 1673-1687.
- [4] Hartung F, Su J K, and Girod B. Spread spectrum watermarking: malicious attacks and counterattacks. Proceedings of the 1999 Security and Watermarking of Multimedia Contents, San Jose, CA, USA, Jan 25-27 1999, SPIE Vol. 3657: 147-158.
- [5] Pereira S, O'Ruanaidh K J J, and Deguillaume F, et al. Template based recovery of fourier-based watermarks using log-polar and log-log maps. IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems, Florence, Italy, June 7-11 1999, 1: 870-874.
- [6] 康显桂, 黄继武, 林彦等. 抗仿射变换的扩频图像水印算法. 电子学报, 2004, 32(1): 8-12.
Kang Xian-gui, Huang Ji-wu, and Lin Yan, et al. Spread spectrum watermarking resists to affine transformation. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(1): 8-12.
- [7] Deguillaume F, Csurka G, and O'Ruanaidh J J K, et al. Robust 3D DFT video watermarking. Proceedings of the 1999 Security and Watermarking of Multimedia Contents, San Jose, CA, USA, Jan 25-27 1999, SPIE Vol.3657: 113-124.
- [8] Pereira S and Pun T. Robust template matching for affine resistant image watermarks. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, 9(6): 1123-1129.
- [9] Kang X, Huang J, Shi Y Q, and Lin Y. A DWT-DFT composite watermarking scheme robust to both affine transform and JPEG compression. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, 13(8): 776-786.
- [10] Kutter M. Watermarking resistant to translation, rotation and scaling. Proceedings of the 1998 Multimedia Systems and Applications, Boston, MA, USA, Nov 2-4 1998, SPIE Vol. 3528: 423-433.
- [11] Honsinger C and Rabbani M. Data embedding using phase

- dispersion. Final Program and Proceedings: IS and T's Annual Conference, Portland, OR, United States, May 26-29 2000: 264-268.
- [12] Honsinger C W and Daly S J. Method for detecting rotation and magnification in image. United States, patent 5835639, 1998.
- [13] O'Ruanaidh J J K and Pun T. Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking. *Signal Processing*, 1998, 66(3): 303-317.
- [14] Lin C Y, Wu M, and Bloom J A, *et al.* Rotation, scale, and translation resilient public watermarking for images. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2001, 10(5): 755-766.
- [15] 孙刚, 谢俊元. 一种基 Fourier-Mellin 变换的数字水印的研究. *计算机工程*, 2004, 30(9): 152-153.
Sun Gang and Xie Jun-yuan. Research on a watermark based on the fourier mellin transform. *Computer Engineering*, 2004, 30(9): 152-153.
- [16] Zheng D, Zhao J, and Saddik A E. RST invariant digital image watermarking based on log-polar mapping and phase correlation. *IEEE Trans. on Circuits and System for Video Technology*, 2003, 13(8): 753-765.
- [17] Farzam M and Shirani S. A robust multimedia watermarking technique using zernike transform. 2001 IEEE fourth Workshop on Multimedia Signal Processing, Cannes, France, Oct 3-5 2001: 529-534.
- [18] Kim H S and Lee H K. Invariant image watermark using Zernike moments. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, 13(8): 766-775.
- [19] Xin Y Q, Liao S, and Pawlak M. A multibit geometrically robust image watermark based on zernike moments. Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, Cambridge, United Kingdom, Aug 23-26 2004, 4: 861-864.
- [20] Wu M, Miller M, Bloom J, and Cox I J. A rotation, scale and translation resilient public watermark. Security and Watermarking of Multimedia Contents II, San Jose, CA, USA, Jan 24-26 2000, SPIE Vol.3971: 90-98.
- [21] Simitopoulos D, Koutsonanos D, and Strintzis M G. Robust image watermarking based on generalized radon transformations. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, 8(13): 732-745.
- [22] Dong P and Galatsanos N P. Affine transformation resistant watermarking based on image normalization. International Conference on Image Processing, Rochester, NY, United States, Sep 22-25 2002, 3: 489-492.
- [23] 杨文学, 赵耀. 抵抗仿射变换攻击的多比特图像水印. *信号处理*, 2004, 20(3): 245-250.
Yang Wen-xue and Zhao Yao. Multi-bits image watermarking resistant to affine transformations based on normalization. *Signal Processing*, 2004, 20(3): 245-250.
- [24] Dong P, Brankov J G, Galatsanos N P, Yang Y, and Davoine F. Digital watermarking robust to geometric distortions. *IEEE Trans. on Image Process*, 2005, 14(12): 2140-2150.
- [25] Celik M U, Saber E, Sharma G, and Tekalp A M. Analysis of feature-based geometry invariant watermarking. Security and Watermarking of Multimedia Contents III, San Jose, CA, Jan 22-25 2001, SPIE Vol.4314: 261-268.
- [26] Chotikakamthorn N, Pantuwong N, and Yawai W. Projective invariant digital image watermarking technique using four Co-Planar feature points. IEEE International Conference on Image Processing 2005, Genova, Italy, Sep 11-14 2005, 1: 1005-1008.
- [27] Tang C W and Hang H M. A feature-based robust digital image watermarking scheme. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2003, 51(4): 950-959.
- [28] Bas P, Chassery J M, and Macq B. Geometrically invariant watermarking using feature points. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2002, 11(9): 1014-1028.
- [29] Petitcloas F A P and Anderson R J. Evaluation of copyright marking systems. Proceedings of the 1999 6th International Conference on Multimedia Computing and Systems, Florence, Italy, Jun 7-11 1999, 1: 574-579.
- 袁大洋: 男, 1981年生, 工程师, 研究方向为图像处理与数字水印.
- 肖俊: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为图像处理与数字水印.
- 王颖: 女, 1969年生, 中国科学院研究生院计算与通信工程学院常务副院长, 博士, 教授, 研究方向为信息安全和数字信号处理.