

一种可抵抗几何攻击的 Directionlet 变换域盲水印算法

刘晶^{*①} 王映辉^① 刘刚^② 何文娟^①

^①(西安理工大学计算机科学与工程学院 西安 710048)

^②(西安电子科技大学计算机学院 西安 710071)

摘要: 抵抗几何攻击是数字水印研究领域具有挑战性的课题。该文提出一种利用 Directionlet 变换构造水印同步信息的盲水印算法: 通过边缘检测算子锁定图像边缘; 利用拉格朗日定理求取边缘斜率; 选取两条边缘, 用其斜率构成 Directionlet 变换的采样矩阵; 在 Directionlet 变换域内自适应嵌入水印, 排除几何攻击对水印检测的影响。仿真实验结果表明, 该算法抵抗旋转等几何攻击具有很好的鲁棒性能。

关键词: 水印算法; Directionlet 变换; 拉格朗日定理; 采样矩阵

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)02-0442-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00166

Blind Watermarking Algorithm Against Geometric Attacks Based on Directionlet-domain

Liu Jing^① Wang Ying-hui^① Liu Gang^② He Wen-juan^①

^①(Faculty of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

^②(School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Watermark robustness to geometric attacks is still a challenging issue. A blind watermarking scheme is proposed against geometric attacks to construct watermark synchronization information by using Directionlet: Firstly, the edge detection operator is utilized to extract image edges; Then, the slope of those edges are computed according to Lagrange theorem; Finally, the direction vector of the two choosed edges constitute the generator matrix of Directionlet; Watermark are adaptively embedded into Directionlet coefficients of the selected cosets. It is Directionlet matrix formed of image edges that eliminates the effect of geometric attacks. Experimental results show the proposed watermarking algorithm is robust, especially at the geometric attacks such as rotation.

Key words: Watermarking algorithm; Directionlet transform; Lagrange theorem; Generator matrix

1 引言

数字水印是随着多媒体技术和计算机网络飞速发展而兴起的一种重要的版权保护手段。近年来, 为取得较好的水印透明效果, 基于小波变换(Wavelet)的多尺度分解方法^[1-3]被广泛运用于数字水印技术中, 并取得很大成功。目前, 出现了一些基于Contourlet的水印算法^[4-7], 相对于Wavelet, Contourlet变换^[8]允许每个尺度上有不同数目的变换方向, 能够更好地捕捉图像的边缘信息。文献[4-7]通过利用Contourlet方向子带的几何特性, 较好地协调了水印透明性与鲁棒性之间的矛盾。但Wavelet和Contourlet变换方向都为有限的几个标准方向, 与图像边缘方向没有任何关联。当在这样的变换域中

通过调整变换系数达到嵌入水印目的时, 水印对抗常规信号处理具有鲁棒性, 面对旋转等几何攻击就显得力不从心。这时, 算法必须借助于其它手段提取图像特征, 才能对抗几何攻击。

本文算法在Directionlet的理论和特性研究基础上, 提出通过Directionlet变换自身构造水印同步信息的抗几何攻击盲水印算法。将图像两条边缘的方向指定为Directionlet的变换方向, 水印信息则沿着图像边缘方向嵌入到Directionlet变换域中, 从而使算法具有强抗几何攻击性。

2 Directionlet 变换

Directionlet^[9,10]可以简单理解为斜的各向异性的小波变换。斜表示变换方向不止只有水平和垂直方向, 还可以为任意有理斜率的方向。各向异性表示沿着两个方向应用1维小波变换的次数可以不同(即 $n_1 \neq n_2$), 各向异性变换记为AWT(n_1, n_2)。Directionlet变换不仅保留了标准2维小波的可分离

2010-03-01 收到, 2010-11-16 改回

国家自然科学基金(61072151), 陕西省教育厅产业中试项目(09JC08)和陕西省教育厅科学研究计划项目(2010JK7008)资助课题

*通信作者: 刘晶 liujing@xaut.edu.cn

滤波、严格临界采样和计算简单等特性,还克服了标准 2 维小波不能有效捕捉图像方向信息的缺陷,是 Contourlet 之后,又一种新的非常有效的多尺度分析工具。

众所周知,标准 2 维小波只有水平、垂直两个变换方向,而图像涉及的方向远不止这两个标准方向。Directionlet 变换可以涉及多个方向,它在任意两个有理方向上都有消失矩。它借助计算机图形学的数字线理论重新组织点阵图中的像素。图 1(a)用 36 个像素(黑色圆点)表示一幅图像,要对该图沿斜率为 1 的方向进行 1 维小波变换,则先用数字线 $y = x + b$ 分割点阵(图 1(b)),并以图 1(c)中箭头所示的顺序扫描排列各像素,得到另一个 6 行 6 列的点阵。对这个新点阵沿水平或垂直方向进行 1 维小波变换,等效于图 1(a)沿斜率为 1 的方向进行小波变换。用数字线描述像素集,使 Directionlet 很好地解决了任意方向变换的问题。

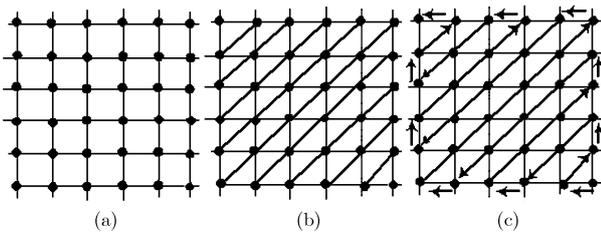


图 1 数字线表示 45° 方向像素

然而,仅数字线理论并不能为 Directionlet 变换提供一个有效的框架。当 Directionlet 的两个变换方向非正交时,采样滤波过程会产生方向感应,不能达到图像稀疏表示的要求。因此,Directionlet 变换前还需栅格采样,陪集分解。栅格采样矩阵 M_A 由两个线性无关向量的线性组合确定:

$$M_A = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 a_1, a_2, b_1, b_2 都为整数。由 M_A 采样将点阵图分解得到 $|\det(M_A)|$ 个陪集,每一个陪集由平移向量 $s_k (k = 0, 1, \dots, |\det(M_A)| - 1)$ 确定。当采样矩阵为 $M_A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$ 时,点阵图采样结果如图 2(a)所示:

黑色、灰色点表示的像素分属于两个不同陪集。无论黑色点还是灰色点表示的陪集,都是由斜率为 $m_1 = b_1 / a_1 = 1$ 与斜率为 $m_2 = b_2 / a_2 = -1$ 的数字线求交得到的。在黑色点表示的陪集中,沿图 2(b)实线方向(斜率为 1)所示应用 1 维滤波,重采样以后,保留下来的点都串在第 1 条数字线(斜率为 -1)上(见图 2(c)),从而避免了方向互感现象。我们把沿

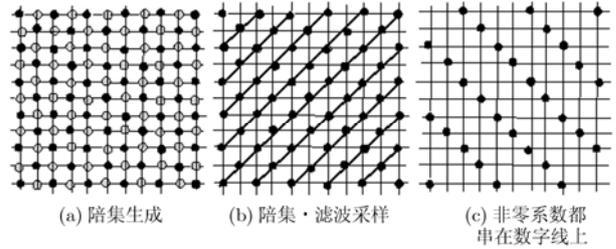


图 2 整数栅格应用

着第 1 个矢量 d_1 (第 1 条数字线)的方向称作变换方向,类似地,沿着第 2 个矢量 d_2 (第 2 条数字线)的方向称作队列方向。

综上所述,Directionlet 变换可以分为两步:第 1 步是利用采样矩阵对图像进行陪集分解;第 2 步是对每个陪集单独处理,在变换方向上进行 1 维滤波和子采样。虽然 Directionlet 的提出是为解决图像稀疏表示,在图像压缩^[11,12]、去噪^[13]方面已取得成功应用,但其变换方向可以指定特性有助于构造水印同步信息,方便水印检测。可以说,Directionlet 变换应用于数字水印技术中,潜力与优势是 Wavelet 与 Contourlet 无法比拟的。

3 水印算法的实现

3.1 采样矩阵选取

由以上分析可以看到,采样矩阵对水印信息嵌入的方向、位置起着决定作用,直接影响水印抵抗攻击的能力。那么,确定采样矩阵 M_A 时,应该考虑那些因素呢?本文通过实验和分析,认为至少下面 5 个因素要考虑:

- (1)满足栅格采样要求,即 a_1, a_2, b_1, b_2 属于整数, d_1, d_2 为有理数。
- (2)保证分解得到的陪集每一维大小必须为 2 的整数次幂。因为每个陪集之后还要进行多次小波变换分解,因此,确定 M_A 时,必须考虑经它采样得到的陪集大小是否为 2 的整数次幂。
- (3)陪集个数 $|\det(M_A)|$ 与水印嵌入容量成反比。水印容量大,陪集个数应当尽量少。
- (4)优先选取具有直线特性,斜率在 $[-3, 3]$ 之间的有理数的图像边缘构成采样矩阵 M_A 。水平或垂直的边缘更好,如果图中没有这样的边缘,可以选取符合式(3)的曲线边缘;太陡峭的边缘(垂直边缘除外),有可能使 $|\det(M_A)|$ 值过大,导致每个陪集过小,不能满足水印容量要求。
- (5)选取的边缘应该具有稳定性,受到图像常规处理和几何攻击,边缘的方向斜率不应该变化。

图像经 Canny 算子运算,并依据上述 5 个原则选取图像边缘后,边缘方向的斜率由拉格朗日定理

(Lagrangian)定量计算(式2):

$$f'(\xi) = (f(b) - f(a)) / (b - a) \quad (2)$$

其中 a, b 为边缘 f 横坐标的起始点, $f(a), f(b)$ 为其纵坐标值, $\xi \in (a, b)$ 。再计算(式3):

$$abs(f'(\xi_1) - f'(\xi_2)) < \varepsilon \quad (3)$$

其中 $\xi_1, \xi_2 \in (a, b)$ 之间的任意两点, ε 为指定的一个很小的阈值。如果任意两点的 $f'(\xi)$ 的差值绝对值小于某个数值(式3), 这条边缘可能就是我们所选。实际上, 当它们的差值为零时, 这条边缘具有直线特性; 当 $f'(\xi)$ 值本身为零或无穷大, 该条边缘应该是垂直或水平的。尽量将这样的边缘作为 Directionlet 变换采样矩阵的一个方向矢量。我们用图3说明如何选取两条边缘来构成采样矩阵, 图3(b)的原图是图3(a), 其它两图的原图见图4(b), 图4(c)。首先, 粗略瞄准边缘图中的两条边缘, 再用拉格朗日定理求出这些边缘的斜率, 比较后锁定符合构成采样矩阵要求的边缘。图3(b)-3(d)中白色圆点标记的边缘斜率值分别为 0.0001(倒数), 2.004, 0.0003(倒数), 2.002, 0.0001, $-1/2.003$, 即 Barbara, Baboon 两图, 都可以选垂直边缘及 1 条斜率为 2 的边缘来构成采样矩阵, 采样矩阵为 $M_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$; 而 Peppers

图, 选取的第 1 条边缘可以认为是水平的, 第 2 条边缘的斜率可以看作 $-1/2$, 则采样矩阵为 $M_A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & 1 \end{bmatrix}$ 。3 个采样矩阵, 都对应有 $|\det(M_A)| = 2$ 个陪集。假设 Barbara 图的大小为 512×512 的话, 每个陪集的大小应为 256×512 , Directionlet 变换的基函数取 $AWT(M_A, 2, 1)$, 进行一层分解, 每个陪集可以产生 2^{2+1} 个频域子带, 每个子带大小为 128×128 , 能够嵌入 128×128 bit 大小的水印容量。

3.2 算法描述

水印嵌入的步骤如下:

- (1)按照 3.1 节内容确定采样矩阵 M_A ;
- (2)图像进行 M_A 采样, 得到 $|\det(M_A)|$ 个陪集;
- (3)单独处理每个陪集, 沿变换和队列方向分别进行 n_1 与 n_2 次的 1 维小波变换, 得到 $2^{m_1+m_2}$ 个频域子带;

(4)进行一层 Directionlet 分解, 一个陪集的某中频子图嵌入水印信息, 与其对应的另一个陪集的中频子带用作盲水印提取的参考频带。对子图内所有系数进行如下操作:

$$\rho'(x, y) = \text{sign}(\rho(x, y)) \cdot (abs(\rho(x, y)) + \sigma \cdot w(x, y)) \quad (4)$$

$$\sigma = \left(\sum_{y=1}^n \sum_{x=1}^n p^*(x, y) \right) / n^2 \quad (5)$$

其中 σ 表示水印嵌入强度的控制参数; $\rho(x, y)$ 为水印前中频子图的系数; 嵌入水印信息后系数变为 $\rho'(x, y)$; $p^*(x, y)$ 表示某一频域系数, 该频域与嵌入水印的频域相邻; $w(x, y)$ 表示二值水印图像像素值, 对应一个双极性二值序列。

(5)各频域子图和经水印处理的中频子图进行 Directionlet 逆变换;

(6)依据选择的陪集方向将 Directionlet 逆变换系数加权综合, 得到加载水印后的图像。

水印检测的步骤如下:

(1)确定检测坐标系 在测试图中, 首先找到构成采样矩阵两个方向矢量对应的边缘。如果其中一个边缘具有水平或垂直特性, 就以该边缘作为一个坐标轴, 与其垂直的方向作为另一个坐标轴建立坐标系, 测试图像的左下角坐标可以作为新坐标系的坐标原点; 如果这两个边缘都不具有水平或垂直特性, 那么在嵌入水印过程中, 要记录其中一条边缘与水平或垂直方向的夹角, 建立检测坐标系时, 将与这条边缘构成此夹角的方向作为其中一个坐标轴。

(2)该坐标下, 用 M_A 对测试图像采样, M_A 为嵌入过程的采样矩阵, 可以得到 $|\det(M_A)|$ 个陪集。

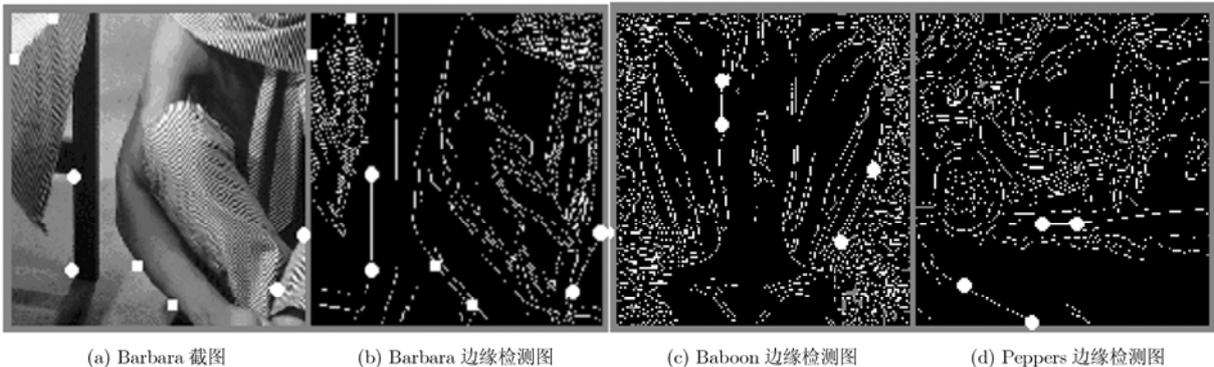


图3 图像边缘方向构造Directionlet采样矩阵

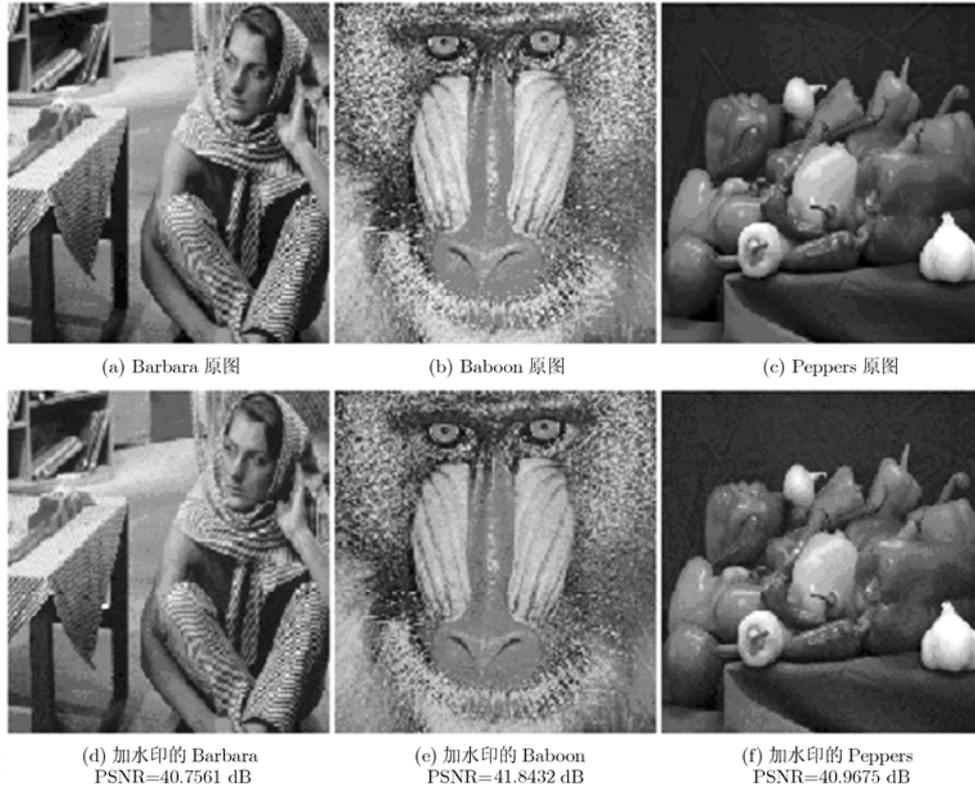


图4 图像加水印效果对比

(3)对每个陪集,按嵌入步骤(3)处理。

(4)找到嵌入水印的中频子图,对子图内所有系数进行如下操作:

$$w'(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{abs}(\rho'(x,y)) > \text{abs}(\rho''(x,y)) \\ 0, & \text{abs}(\rho'(x,y)) \leq \text{abs}(\rho''(x,y)) \end{cases} \quad (6)$$

$w'(x,y)$ 为提取的水印图像, $\rho'(x,y)$ 、 $\rho''(x,y)$ 分别为携带水印信息和参考频带的中频子带系数,对应测试图像两个不同陪集的同—中频子带。

(5)进行水印相似值NC计算,若值在0.7以上,说明载体图像嵌有该水印,提取成功。

4 实验结果与分析

4.1 检测性能测试

为了验证本文算法性能,选取3幅 $512 \times 512 \times 8$ bit标准灰度图像: Barbara, Baboon和Peppers进行测试;水印图像也选取3幅,每幅都是 64×64 二值图像;限于篇幅,下面显示的实验数据是同一载体图像加载3幅水印图像的平均数值。1维小波变换采用常见的Haar小波基,参数 σ 依据载体图像不同而不同,由式(5)计算得到。3幅载体图像的 σ 值分别为7.8645, 15.8771, 6.9462。采用峰值信噪比(PSNR)评价载体图像与含水印图像之间的差别;用原始水印与提取水印的相似度NC来评价水印质量,将文献[2](基于Wavelet算法)和文献[7](基于Contourlet算

法)与本文算法进行比对。

图4为本文算法水印嵌入前后对比图,从图中可以看出原图像与加水印图像在视觉上并没有明显差别,图像加水印后的峰值信噪比PSNR值都在40 dB以上。可见,算法能获得较高的视觉质量。

4.2 抗攻击能力测试

为了检测本文算法的鲁棒性能,实验中对加水印图像进行JPEG压缩等常信规号处理攻击及旋转等几何攻击。在保证水印不可见前提下,3种算法提取水印相似度及运行时间的对比结果见表1和表2。表1数据说明,对常规信号处理攻击,3个算法性能不相上下,本文算法没有特别优势。但表2数据显示,对几何攻击,尤其旋转攻击,本文算法表现特别强势,例如旋转 30° 时,提取的水印相似度仍旧很高,接近1。表1第3行、表2第3列显示的是每幅图在不同攻击下算法运行的平均时间。陪集分解和合成是算法主要的时间开销,本文对所有测试图像都进行2个陪集分解,完全满足水印嵌入与检测的要求,而算法花费的时间与基于Wavelet的水印方法接近,这对实际应用来说具有现实意义。

总之,无论从视觉效果及抗攻击性的指标方面还是从算法花费的时间开销方面来衡量,本文算法都具有优势。

4.3 实验分析

算法的关键是基于Directionlet的变换方向可以

表1 常规信号处理攻击下提取水印的相似度(NC)及所用时间

图像	算法	Barbara			Peppers			Baboon		
		文献[2]	文献[7]	本文方法	文献[2]	文献[7]	本文方法	文献[2]	文献[7]	本文方法
平均运行时间(s)		61	243	95	64	265	87	59	239	98
攻击类型	JPEG压缩30	0.9721	0.9709	0.9853	0.9821	0.9864	0.9913	0.9794	0.9769	0.9859
	JPEG压缩60	1	0.9827	1	1	0.9878	1	1	0.9783	1
	中值滤波	0.9681	0.9765	0.9836	0.9764	0.9875	0.9921	0.9835	0.9853	0.9894
	高斯噪声	0.9748	0.9732	0.9841	0.9722	0.9791	0.9759	0.9869	0.9786	0.9932
	椒盐噪声	0.9789	0.9781	0.9898	0.9763	0.9697	0.9843	0.9789	0.9812	0.9879

表2 各种几何攻击下提取水印的相似度(NC)及所用时间

图像	算法	平均运行时间(s)	攻击类型									
			旋转5°	旋转15°	旋转30°	缩放0.8	缩放1.2	参考边缘剪切	非水印部位剪切	水印部位剪切	向下平移5行	向右平移5行
Barbara	文献[2]	63	0.6342	-	-	-	-	1	1	0.9102	1	1
	文献[7]	259	0.7368	0.5349	0.3284	0.8906	0.9048	1	1	0.9102	1	1
	本文方法	98	1	1	0.9987	0.9669	0.9892	0.9878	1	0.9102	1	1
Baboon	文献[2]	64	0.7497	0.3542	-	-	-	1	1	0.9475	1	1
	文献[7]	248	0.7376	0.6597	0.4983	0.9329	0.9145	1	1	0.9475	1	1
	本文方法	101	1	1	1	0.9761	0.9834	0.9137	1	0.9475	1	1
Peppers	文献[2]	56	0.7183	0.5447	-	-	-	1	1	0.9322	1	1
	文献[7]	251	0.8356	0.7693	0.5821	0.9278	0.9392	1	1	0.9322	1	1
	本文方法	94	1	1	0.9879	0.9734	0.9576	0.6432	1	0.9322	1	1

指定特性,由拉格朗日定理定量求取边缘斜率,由图像两个边缘的斜率构成Directionlet采样矩阵。选取具有水平或垂直特性的边缘作为采样矩阵的一个方向矢量,要是图中没有这样特殊的边缘,则需要记录其中一条边缘与水平或垂直方向轴的角度。水印检测过程中,以这条边缘或以与这条边缘成一定角度的方向(没有特殊边缘条件下)作为一个坐标轴建立坐标系,采用与嵌入相同的采样矩阵,就可以排除几何攻击对水印检测的干扰。图5(a)的采样矩阵为

$$\mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 2 \end{bmatrix},$$

由图3(b)中白色圆点标记的两条边缘斜率构成;图5(c)的采样矩阵为

$$\mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix},$$

由图3(b)中白色方块标记的两条边缘斜率构成。受到旋转攻击后见图5(b),图5(d),与图5(a),图5(c)对比,可以看到:采样矩阵不同,水印嵌入位置及方向是不同的,采样矩阵决定水印嵌入位置;在图

5(a)中,采样矩阵有图像垂直边缘信息(注:由于 $|\det(\mathbf{M}_A)| > 0$,采样矩阵中将图像垂直边缘用水平矢量 $[1 \ 0]$ 表示),在进行水印检测时,在以图5(b)中的桌子腿方向作为一个坐标轴建立的坐标系下检测水印,水印的位置就如同在图5(a)中的位置,排除了几何攻击的影响;现在,假设图Barbara没有水平、垂直这样特殊的边缘,选取图3(b)中白色方块标记的两条边缘(± 1 两个方向):1条边缘为桌沿,与垂直轴成 45° ,记录此角度。测试图像无论旋转多少角度,直接与桌沿成 45° 的方向(即桌子腿的方向)作为一个坐标轴建立坐标系,检测水印,水印位置应该与图5(c)一致,仍旧可以消除几何攻击的干扰。又因为Directionlet变换实质是某方向上的多次1维小波变换,算法对抗JPEG压缩等常规信号处理攻击能力应与基于小波域的水印算法相当。

5 结论

本文提出了一种新的能够抵抗几何攻击的盲水印算法。利用Directionlet变换方向可以指定特性,

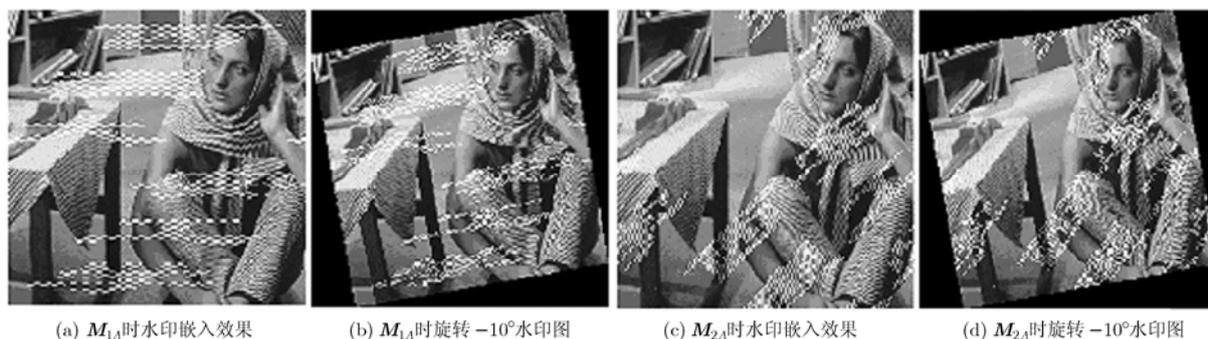


图5 水印嵌入方向与检测坐标系的关系

将图像两条边缘的斜率作为Directionlet采样矩阵的两个方向矢量,构造水印同步信息;通过不同陪集同一频带具有相似特性实现水印盲检测;结合拉格朗日定理,定量描述图像边缘变化趋势,使算法更具有通用性;直接以图像边缘的方向为参考方向进行水印嵌入,使水印检测过程中,无需校准图像,无需原始图像。大量仿真实验表明,本文方法是行之有效的,且具有明显优势。

目前,我们是在假设图像边缘的斜率必须为有理数的情况下工作的,研究图像边缘斜率为任意值的水印算法将是进一步研究的工作。

参考文献

- [1] 马晓红,孙长富.基于盲源分离的小波域多重音频水印方法[J].电子与信息学报,2008,30(10):2307-2310.
Ma Xiao-hong and Sun Chang-fu. A DWT domain multiple watermarking scheme based on blind source separation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(10): 2307-2310.
- [2] 潘蓉,高有行.小波域内的盲水印提取[J].光子学报,2006,35(10):1613-1616.
Pan Rong and Gao You-xing. Blind image watermarking extraction in DWT domain[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(10): 1613-1616.
- [3] Kang Xian-gui, Zeng Wen-jun, and Huang Ji-wu. A multi-band wavelet watermarking scheme[J]. *International Journal of Network Security*, 2008, 6(2): 121-126.
- [4] Jayalakshmi M, Merchant S N, and Desai U B. Digital watermarking in contourlet domain[C]. Proc. of 18th International Conference Pattern Recognition, Hongkong, Aug. 20-24, 2006: 861-864.
- [5] Song Hao-hao, Yu Song-yu, Yang Xiao-kang, Song Li, and Wang Chen. Contourlet-based image adaptive watermarking [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2008, 23(3): 162-178.
- [6] Sahraeian S M E, Akhaee M A, Hejazi S A, and Marvasti F. Contourlet based image watermarking using optimum detector in the noisy environment[C]. Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Image Processing, San Diego, California, USA, 2008: 429-432.
- [7] 楼偶俊,王征旋.基于特征点模板的Contourlet域抗几何攻击水印算法研究[J].计算机学报,2009,32(2):308-317.
Lou Ou-jun and Wang Zheng-xuan. A contourlet-domain watermarking algorithm against geometric attacks based on feature Template[J]. *Chinese Journal of Computer*, 2009, 32(2): 308-317.
- [8] Minh D N and Martin V. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [9] Velisavljevic V, Beferull-Lozano B, and Vetterli M, et al. Space-frequency quantization for image compression with Directionlets[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(7): 1761-1773.
- [10] Velisavljevic V, Beferull-Lozano B, and Vetterli M, et al. Directionlets: anisotropic multi-directional representation with separable filtering[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(7): 1916-1933.
- [11] Ma Li-hong, Mai Di-ke, Ren Miao, and Lin Chun-yi. Rate-consistent directionlet codestream created by modified BFOS algorithm[J]. *Journal of Electronics (China)*, 2010, 27(1): 118-126.
- [12] Wu Jia-ji, Shi Guang-ming, Niu Yi, and Jiao Li-cheng. Laplacian pyramid-based down sampling combined with directionlet interpolation for low-bit rate compression[C]. MIPPR 2009: Remote Sensing and GIS Data Processing and Applications, Yichang, China, Oct.30-Nov.1, 2009, SPIE 7498, 749598: 1-8.
- [13] Ma Ming, Ruan Feng, Zhou Ze-ming, and Zhang Peng. Adaptive speckle reduction in SAR images combining Directionlet transform with local texture direction[C]. MIPPR 2009, Automatic Target Recognition and Image Analysis, Yichang, China, Oct.30-Nov.1, 2009, SPIE 7495, 749542: 636-640.

刘晶:女,1973年生,博士生,副教授,研究方向为图像处理、数字水印。

王映辉:男,1967年生,教授,博士生导师,研究方向为图形图像处理。

刘刚:男,1969年生,副教授,研究方向为信息安全与数字水印。