

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)07-1134-06

论文索引信息: 彭飞, 雷瑜洲, 孙星明. 2维CAD工程图小波域可逆水印[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(7): 1134-1139

2维CAD工程图小波域可逆水印

彭飞, 雷瑜洲, 孙星明

(湖南大学信息科学与工程学院, 长沙 410082)

摘要: 针对2维CAD工程图对高精度的要求, 提出一种采用改进量化索引调制(IQIM)的2维CAD工程图小波域可逆水印算法。该算法首先提取2维CAD工程图中所有实体的顶点信息, 并对顶点信息依次进行顶点变换和离散小波变换以获取仿射变换不变性, 然后使用改进的量化索引调制算法将加密后的水印信息嵌入到所有的细节系数中。实验结果表明, 该算法具有良好的可逆性、不可见性和较大的水印容量, 且对图形平移、旋转、均匀缩放等攻击具备较好的鲁棒性。

关键词: 可逆水印; 2维CAD工程图; 量化索引调制; 小波变换

Reversible watermarking algorithm in wavelet domain for 2D CAD engineering graphics

Peng Fei, Lei Yuzhou, Sun Xingming

(School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082 China)

Abstract: Since 2D CAD engineering graphics require high precision, a wavelet domain based reversible watermarking algorithm for 2-Dimensional CAD engineering graphics by using improved quantization index modulation (IQIM) is proposed in this paper. First, all vertices in the 2D CAD engineering graphics are extracted, and then Log-polar Mapping and discrete wavelet transform are done to them respectively to achieve the invariance of affine transform. Finally, the encrypted watermark is embedded into detailed coefficients by using improved quantization index modulation (IQIM) scheme. Experimental result shows that the proposed algorithm has a large capacity, good invisibility, and robust against the attacks such as transformation, rotation, equal scaling etc.

Keywords: reversible watermark; 2D CAD engineering graphic; quantization index modulation; wavelet transform

0 引言

由于数字水印的嵌入不可避免地会修改原始载体数据, 因此如何平衡水印算法的不可见性、鲁棒性及水印容量之间的矛盾, 保证水印载体的可用性是数字水印技术研究的一个重要内容。可逆水印技术允许在提取水印后, 将含水印载体完整恢复为原始载体数据, 不影响原始载体的可用性, 故特别适合某

些不容许任何篡改或具有高精度要求的数字媒体, 如医学影像、矢量地图、工程图形等。

近年来, 可逆数字水印技术的研究开始受到重视, 已有一些可逆水印方法公开发表, 但已有研究主要集中在栅格图像领域^[1-3], 在矢量图形领域的研究相对较少。一些学者研究了3维模型^[4-6]和矢量地图^[7-9]的可逆水印算法, 针对2维CAD工程图形的可逆水印算法极少^[10]。文献[10]提出一种基于改进量化索引调制的2维CAD工程图可逆水印方

收稿日期: 2010-06-09; 修回日期: 2010-07-21

基金项目: 湖南大学中央高校基本科研业务费专项资金项目。

第一作者简介: 彭飞(1977—), 男, 副教授。2006年于华南理工大学获电路与系统专业工学博士学位, 主要研究方向为数字取证、数字水印。E-mail: eepengf@yahoo.com.cn。

法(IQIM),并提出两种应用算法:IQIM-A与IQIM-P。但是,IQIM-A算法的鲁棒性不高,无法抵抗均匀缩放操作;IQIM-P算法的不可见性相对较弱。

为提高算法的综合性能,在IQIM方法的基础上,结合小波域的能量集中性和平移不变性等特点,提出一种2维CAD工程图的小波域可逆水印算法,进一步提高算法的鲁棒性、不可见性与水印容量。

1 IQIM方法简介

由于量化误差的影响,传统的量化索引调制方法无法直接应用于可逆水印。文献[10]对传统量化索引调制的嵌入和提取方法进行了改进,避免了量化误差的影响,从而使其可应用于可逆水印技术。该方法适用于任何以实型数据表示的载体(如矢量图形)。

在量化索引调制方法中称载体中的一个待调制数据为一个量化系数。假设待量化系数为 f , b 为水印的嵌入强度,水印信息 $w \in \{0, \dots, 2^b - 1\}$ 为由 b bits的二值水印转换得到的十进制数,则水印的嵌入、提取以及数据恢复过程分别为:

1) 水印嵌入 首先计算 f 的模数 m 和余数 r :

$$m = \left\lfloor \frac{f}{2^b \Delta} \right\rfloor \quad (1)$$

$$r = f - m2^b \Delta \quad (2)$$

式中, Δ 为量化步长。然后可计算嵌入水印后的量化系数为

$$f' = m \times 2^b \Delta + w \Delta + \frac{r}{2^b} \quad (3)$$

2) 水印提取 对于给定的含水印的量化系数 f' ,计算 f' 的模数 m' 和余数 r' :

$$m' = \left\lfloor \frac{f'}{\Delta} \right\rfloor \quad (4)$$

$$r' = f' - m' \Delta \quad (5)$$

然后计算得到水印信息为

$$w = m' - \left\lfloor \frac{m'}{2^b} \right\rfloor \times 2^b \quad (6)$$

3) 数据恢复 在已知 f' 的前提下,恢复原始量化系数

$$f = \left\lfloor \frac{m'}{2^b} \right\rfloor \times 2^b \Delta + 2^b r' \quad (7)$$

然而,由于计算机表示数据的精度有限,上述计算过程中可能存在舍入误差,从而导致水印提取错误。为避免舍入误差的影响,算法要求水印载体数据须多存储 $\lceil \lg 2^b \rceil$ 位精度。因此,对数据存储精度要求为 p 位的载体数据,在嵌入水印后,水印载体数

据实际存储精度应为 $p + \lceil \lg 2^b \rceil$ 位,其中 b 为嵌入强度。此外,量化步长 Δ 还应满足: $\Delta > 10^{-p}$ 。

文献[10]将上述IQIM方法应用于2维CAD工程图,并提出两种应用算法:IQIM-A与IQIM-P。这两种算法都基于极坐标映射变换,其不同之处在于:IQIM-A在极轴中嵌入水印信息;IQIM-P在极角中嵌入水印信息。IQIM-A与IQIM-P算法的水印容量均为每个顶点中可嵌入 b 比特水印信息;在鲁棒性方面,IQIM-A算法可抵抗旋转、平移攻击,而IQIM-P算法可抵抗旋转、缩放、平移攻击;另外,IQIM-A算法比IQIM-P算法具有更好的不可见性。

2 顶点LPM变换与顶点小波变换

为提高2维CAD工程图可逆水印的鲁棒性、水印容量以及不可见性,引入对顶点LPM(log-polar mapping)变换与顶点小波变换对2维CAD工程图的顶点信息进行处理,以便选择合适的载体数据进行水印的嵌入。

2.1 顶点LPM变换

2维CAD工程图通常由点、直线、多段线、圆等多种类型的实体组成,每种实体都包含一个或多个顶点。对于一幅给定的2维CAD工程图 G ,首先提取 G 中所有实体的顶点信息,按照2维CAD工程图的读取顺序组成一个顶点集合 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n\}$,其中 $V_i = (V_{ix}, V_{iy})$, V_{ix} 与 V_{iy} 分别为顶点 V_i 的横、纵坐标, n 为 G 中顶点的数量。以密钥 K 作为种子,使用随机数发生器从顶点序列 V 中随机选取一个顶点作为参考点 V_k ,计算其余顶点的相对坐标 $V'_i = (V'_{ix}, V'_{iy})$:

$$V'_{ix} = V_{ix} - V_{kx} \quad (8)$$

$$V'_{iy} = V_{iy} - V_{ky} \quad (i \neq k)$$

然后,对相对顶点坐标 V'_i 做LPM顶点映射变换:

$$V'_{ix} = e^u \cos \theta \quad (9)$$

$$V'_{iy} = e^u \sin \theta$$

式中, (u, θ) 为LPM域的坐标表示, u 为幅值, θ 为相位。LPM变换有如下特征^[11]:

$$(V_{ix}, V_{iy}) \cdot \rho \Leftrightarrow (u + \ln \rho, \theta) \quad (10)$$

$$(V_{ix}, V_{iy}) \cdot \begin{pmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \Leftrightarrow (u, \theta + \delta) \quad (11)$$

式中, ρ 为缩放因子, δ 为旋转角度。由式(10)(11)可见,对于顶点 V_i ,其在笛卡尔坐标系中的缩放和旋转分别等价于其在LPM域中幅值 u 和相位 θ 的平移。

坐标 (u, θ) 的值可由下式计算得到:

$$\begin{cases} u = \ln \sqrt{V'_{ix}{}^2 + V'_{iy}{}^2} \\ \theta = \arctan\left(\frac{V'_{ix}}{V'_{iy}}\right) \end{cases} \quad (12)$$

经过上述变换后,由顶点序列 V 可分别计算得到一个幅值集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 和一个相位集合 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ 。

2.2 顶点小波变换

由 2.1 节的顶点 LPM 变换,可得到 LPM 域的一个长度为 n 的幅值集合 U 。顺序划分 U 中每 64 个幅值系数为一组,并按行列顺序扫描各组系数为一个 8×8 的矩阵;依此类推可得到 $\lfloor N/64 \rfloor$ 个 8×8 的矩阵。然后对上述各矩阵分别做二级 Haar 小波变换,得到如图 1 所示的小波系数子带,其中子带 LL2 为近似系数,子带 LL1、LH1、HL1、HH2、LH2、HL2 均为细节系数。

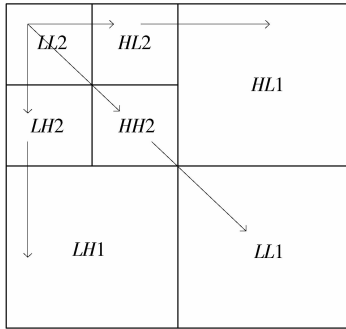


图 1 小波分解树结构图

Fig. 1 The structure of wavelet decomposition

将所有的细节系数子带按照行列顺序依次扫描得到一个系数集合: $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$, 其中 $m = \lfloor N/64 \rfloor \times 60$ 为小波细节系数的总数。

3 本文算法

3.1 水印生成

设待嵌入的水印是长度为 N 的二值水印序列 W , 水印的生成过程如下。

1) 选择初始值 x_0 , 在 Logistic 混沌映射作用下产生一个长度为 N 的混沌序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ (其中: $x_i \in (0, 1)$), 经二值化后得到二值化序列 Q , 将 S 与 W 异或得到加密后的二值水印序列 L , 即

$$L = W \oplus Q \quad (13)$$

将初始值 x_0 作为密钥 K 保存。

2) 若嵌入强度为 b , 则将加密后的水印序列 L 按如下方式顺序编码得到待嵌入的水印序列 S :

$$S_i = l_{(i-1)b+1}2^{b-1} + l_{(i-1)b+2}2^{b-2} + \dots + l_{ib}2^0 \quad (14)$$

$$l_j \in L, i \in \{1, 2, \dots, \lfloor N/b \rfloor\}$$

3.2 水印嵌入

水印的嵌入过程描述如下:

1) 顶点 LPM 变换 遍历待嵌入水印的 2 维 CAD 工程图 G 中的所有实体, 读取所有的顶点信息组成一个 2 维顶点集合 V 。按照 2.1 节描述的方式对 V 做顶点 LPM 变换, 得到 LPM 域的幅值集合 U 。

2) 采用 2.2 节描述的方式对幅值集合 U 做二级 Haar 小波变换, 得到系数集合 C 。

3) 对 C 中所有系数使用 IQIM 算法循环嵌入水印信息 S , 得到嵌入水印后的系数序列 C' 。需要注意的是, 水印系数的存储精度与量化步长的设置须满足 3.4 节的要求。

4) 先后对步骤 3) 2) 1) 过程进行逆处理, 将 C' 逆变换为嵌入水印后的顶点序列 V' , 重画图形后可得嵌入水印后的 2 维 CAD 工程图形 G' 。

3.3 水印提取和数据恢复

水印的提取过程描述如下:

1) 与嵌入算法类似, 首先遍历待检测的 2 维工程图形 G' 中的所有实体, 读取所有的顶点信息组成一个 2 维顶点序列 V' 。然后, 对 V' 依次做顶点 LPM 变换和小波变换, 得到待检测的 1 维小波细节系数序列 C' 。

2) 对系数序列 C' 使用 IQIM 算法提取水印信息, 按照选取法则得到 S' 。

3) 使用密钥 K , 解密得到水印信息 W' , 并计算其与原始二值水印信息 W 的相关系数 NC 。相关系数为

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^N W_i W'_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (W_i)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (W'_i)^2}} \quad (15)$$

式中 N 为水印信息比特数。如果 NC 为 1.0 表示图形未被恶意篡改, 即没有遭受除旋转、平移、均匀缩放以外的任何攻击, 此时使用 IQIM 算法可逆恢复水印小波系数序列 C' , 设恢复的小波系数为 C 。否则, 表明图形已被恶意篡改, 无法可逆恢复, 但此时仍可设定一个检测阈值 T , 用以检测 2 维 CAD 工程图的版权归属。如若 $NC \geq T$, 则可证明该 2 维 CAD

工程图形的版权。

4)若步骤 3)中计算得到的 NC 系数为 1.0,则将恢复的小波细节系数序列 C 做步骤 1)的逆变换,重画图形后得到恢复的 2 维 CAD 工程图形 G 。

3.4 存储精度和量化步长的选取

定理 1 若 C 中所有系数能在 $p + \max_{c_j \in C} \{\lfloor \lg e^{c_j} \rfloor\} + 2$ 位精度下可逆恢复,则可保证所有空域顶点在 p 位精度下可逆恢复。

证明:假设空域顶点 $V_i(V_{ix}, V_{iy})$ 嵌入水印并可逆恢复后顶点坐标为 $V_i^*(V_{ix}^*, V_{iy}^*)$ 。因为 V_i 在 p 位精度下能可逆恢复,故有 $-5 \times 10^{-(p+1)} < V_{ix}^* - V_{ix} \leq 5 \times 10^{-(p+1)}$,即 $-5 \times 10^{-(p+1)} < (e^{u^*} - e^u) \cdot \cos \theta \leq 5 \times 10^{-(p+1)}$ 。因为 $\cos \theta \in [-1, 1]$,所以 $-5 \times 10^{-(p+1)} < e^{u^*} - e^u \leq 5 \times 10^{-(p+1)}$; $-5 \times 10^{-(p+\lfloor \lg e^{u^*} \rfloor + 2)} < u^* - u \leq 5 \times 10^{-(p+\lfloor \lg e^{u^*} \rfloor + 2)}$ 。

因为 DWT 是一个线性变换且具有能量集中性,所以 $-5 \times 10^{-(p+\lfloor \lg e^{c_j} \rfloor + 2)} < c_j^* - c_j \leq 5 \times 10^{-(p+\lfloor \lg e^{c_j} \rfloor + 2)}$ ($1 \leq j \leq m$)。

因此,为保证所有空域顶点在 p 位精度下可逆恢复, C 中所有系数均须在 $p + \max_{c_j \in C} \{\lfloor \lg e^{c_j} \rfloor\} + 2$ 位精度下可逆恢复。证毕。

由于 IQIM 算法要求水印载体数据须多存储 $\lceil \lg 2^b \rceil$ 位精度,以保证水印信息的正确提取,因此,水印系数序列 C' 的存储精度应为

$$x = p + \max_{c_j \in C} \{\lfloor \lg e^{c_j} \rfloor\} + 2 + \lceil \lg 2^b \rceil \quad (16)$$

同时,量化步长的取值范围应满足 $\Delta > 10^{-x}$ 。

4 实验结果与分析

为验证和分析所提出算法的性能,在配置为 CPU 2.2 GHz, RAM 1 GB, Windows XP SP2, Visual C++6.0, DWGDirect 4.0, AutoCAD 2006 Professional 以及 Matlab 7.0 的计算机上对 50 幅标准 2 维 CAD 工程图形进行了实验,部分图形的信息如表 1 所示。这里,采用矢量图中常用的衡量指标 RMS 对水印工程图形的不可见性进行评估。RMS 为

$$RMS = \frac{1}{N} \|V - V^w\| \quad (17)$$

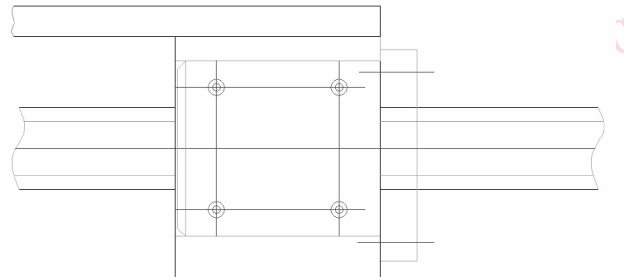
式中: V, V^w 分别是遍历原始工程图与嵌入水印后 2 维 CAD 工程图所有实体提取的顶点序列; N 为顶点数量。以编号为 G2 的 2 维 CAD 工程图的局部放大图

为例,采用文中算法嵌入水印和恢复后的图形如图 2 所示。嵌入水印后 2 维 CAD 工程图经过放大后从视觉上存在微小的失真,但恢复后的图形在视觉上与原始图形完全一样。在实验中,上述算法、IQIM-A 和 IQIM-P 算法选择的量化步长分别为 $10^{-8}, 10^{-4}, 2\pi/10^8$,嵌入强度 b 均为 1,该实验中水印序列 $W =$ “Hunan University”, $x_0 = 0.824321$ 。

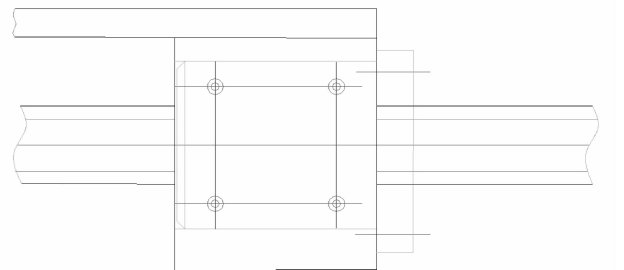
表 1 恢复图形与原始图形之间的 RMS 值

Tab.1 The RMS of the recovered graphics

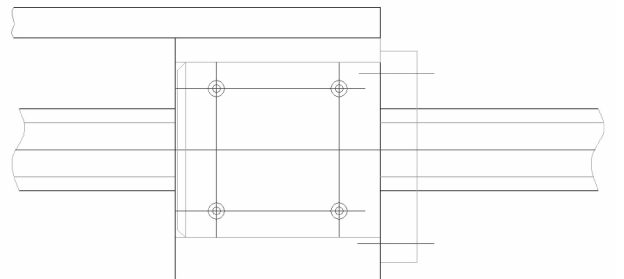
工程图编号	顶点数量	RMS/ 10^{-12}
G1	3 031	0.921 87
G2	9 483	1.151 6
G3	9 461	0.563 34
G4	13 372	0.698 29
G5	6 262	7.616 3
50 幅平均	9 308	1.211 3



(a) 原始 2 维 CAD 工程图 G2



(b) 嵌入水印后的图形



(c) 恢复后的图形

图 2 嵌入水印和可逆恢复后的图形

Fig.2 The graphics without watermark and with watermark

4.1 可逆性

通常,2 维 CAD 工程图顶点数据的存储精度要求在 6~8 位。因此,只要恢复的 2 维 CAD 工程图顶点坐标在小数点后 6~8 位有效数字与原始图形一致,则表示两者是相同的,即水印算法是可无损恢复的。为评价算法的可逆性,考虑使用 RMS 来量化恢复图形与原始图形间的差异。表 1 所示为 5 幅标准的 2 维 CAD 工程图分别使用文中算法嵌入水印,得到的恢复图形与原始图形的 RMS 值。由表 1 中数据可见,恢复的图形与原始图形之间的 RMS 值很小,完全可满足工程应用对 2 维 CAD 工程图顶点数据的高精度要求。

4.2 不可见性

水印的不可见性与量化步长和嵌入强度两个因素有关。如图 3 所示,RMS 值随着量化步长的增大而递增,这意味着嵌入水印后图形的不可见性逐渐下降,但是不同图形不可见性下降的程度不一,这主要是由图形本身顶点间的相关性决定的。图 4 为对 G4 分别使用文中算法、IQIM-A、IQIM-P 算法嵌入水印得到的嵌入强度与 RMS 的关系图。由图 4 可见,随着嵌入强度的加大,RMS 值逐渐增大,即水印图形的不可见性逐渐下降;但是文中算法的 RMS 值上升程度最缓,而后依次是 IQIM-A 算法与 IQIM-P 算法。因此,在相同的嵌入强度下,本文算法较 IQIM-A 与 IQIM-P 算法具有更好的不可见性。

4.3 水印容量

和 IQIM-A、IQIM-P 算法一样,本文算法也基于

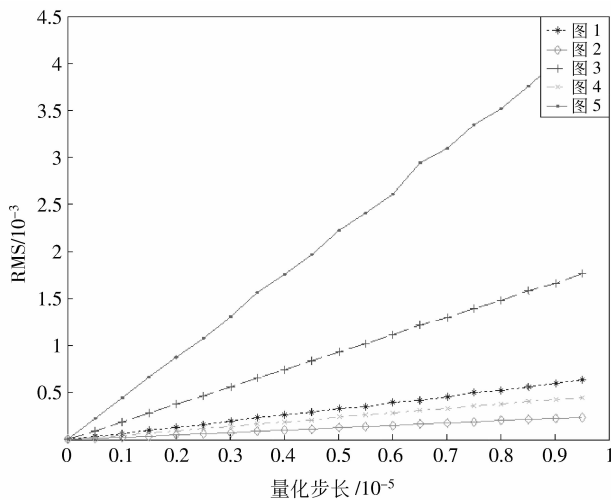


图 3 量化步长与不可见性的关系图 ($b=1$)

Fig. 3 The relation between quantization step size and the invisibility ($b=1$)

IQIM 算法,因此亦可通过嵌入强度调节水印容量。图 5 为对 G4 分别使用上述 3 种算法得到的不可见性与水印容量的关系图。理论上,由于本文算法没有在小波域的近似系数中嵌入水印信息,因此在相同的嵌入强度下,本文算法的水印容量较另外两种算法低;但是,由图 4 所可知,随着嵌入强度的增大,本文算法嵌入强度-RMS 的关系曲线上升幅度最缓,故本文算法即使在嵌入强度较大的情况下,RMS 值仍然较低。因此,由如图 5 可知,在同等不可见性下(RMS 值相同),本文算法的水印容量比 IQIM-A、IQIM-P 算法大,这是由小波变换良好的能量集中性决定的。因此,在实际应用中,本文算法的水印容量要大于 IQIM-A、IQIM-P 算法。

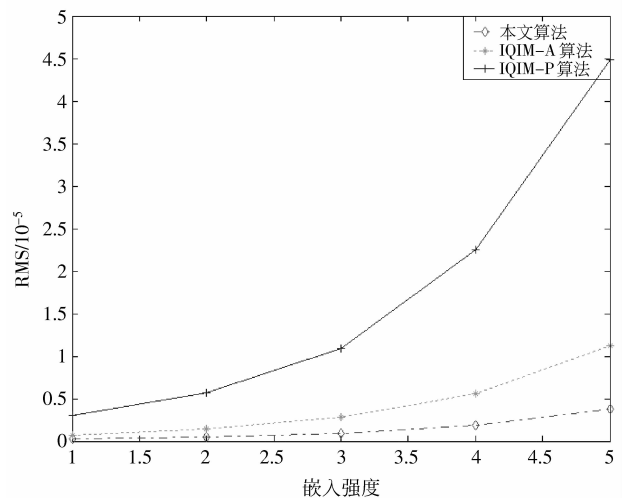


图 4 嵌入强度与不可见性的关系图

Fig. 4 The relation between embedded strength and invisibility

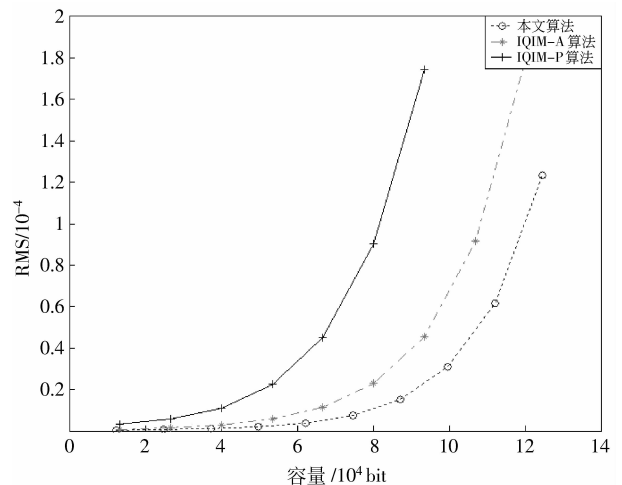


图 5 水印容量与不可见性关系图

Fig. 5 The relation between watermark capacity and invisibility

4.4 鲁棒性

分别对 50 幅 2 维 CAD 工程图使用文中的算法嵌入水印信息,并对嵌入水印后的图形分别施加平移、旋转、缩放、3 种攻击的组合攻击和顶点篡改攻击后,计算提取的水印信息与原始水印信息的相关系数如表 2 所示。由表 2 可见,对于平移、旋转、缩放及 3 种攻击的组合攻击,相关系数均为 1.0,因此该算法对这些攻击是鲁棒的。对于篡改攻击,此时无法恢复原始工程图形,但当篡改的顶点数量不多时,如篡改 10%~20% 数量的顶点,提取的水印和原始水印仍有较强的相关性。

表 2 恶意攻击后提取的水印信息与原始水印的相关系数
Tab.2 The correlation coefficients between the attacked watermark and the original watermark

工程图 编号	G1	G2	G3	G4	G5	50 幅平均
平移 (100, 50)	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
旋转(60°)	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
缩放 ($\rho=0.5$)	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
组合攻击	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
篡改 攻击						
10% 顶点	0.928 9	0.922 7	0.968 3	0.935 3	0.932 7	0.941 8
20% 顶点	0.846 0	0.816 0	0.822 9	0.846 9	0.865 7	0.821 3
50% 顶点	0.641 3	0.564 2	0.576 4	0.657 1	0.645 4	0.599 8

5 结 论

提出一种面向 2 维 CAD 工程图的小波域改进量化索引调制水印算法。通过采用改进传统的量化索引技术,避免了量化误差的影响,保证了水印可逆性;通过将顶点信息从空域变换到小波域,在所有的细节系数中嵌入水印,根据小波域的能量集中性质,有利于进一步提高水印的不可见性。实验结果表明,该水印方法能够对常见的变换攻击(旋转、缩放、平移及三者的组合攻击)和部分篡改攻击鲁棒,并且在不可见性相同的情况下,该算法的水印容量较文献[10]中的方法更大。下一步的研究工作是研究能抵抗实体添加和删除等去同步攻击的 2 维工程图可逆水印算法。

参考文献 (References)

- [1] Alattar A M. Reversible watermark using the difference expansion of a generalized integer transform [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(8):1147-1156.
- [2] Ni Zhicheng, Shi Yunqing, Nirwan Ansari, et al. Reversible data hiding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2006, 16(3):354-362.
- [3] Kamstra Lute, Heijmans H J A M. Reversible data embedding into images using wavelet techniques and sorting [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12):2082-2090.
- [4] Sun Zhen, Lu Zheming, Li Zhen. Reversible data hiding for 3D meshes in the PVQ-compressed domain [C]// Proceedings of the 2006 International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia. Washington: IEEE Computer Society, 2006: 593-596.
- [5] Wang Pengcheng, Wang Chunming. Reversible data hiding for point-sampled geometry [J]. Journal of Information Science and Engineering, 2007, 23: 1889-1900.
- [6] Wu Haotian, Dugelay, Jean luc. Reversible watermarking of 3D mesh models by prediction-error expansion [C]// Proceedings of the 10th IEEE International Workshop on MultiMedia Signal Processing. Cairns, Australia: IEEE, 2008: 797-802.
- [7] Shao Chengyong, Wang Xiaotong, Xu Xiaogang, et al. Study on lossless data hiding algorithm for digital vector maps [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(2):206-211. [邵承勇,王孝通,徐晓刚,等. 矢量地图无损数据隐藏算法研究 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(2):206-211.]
- [8] Wang Xiaotong, Shao Chengyong, Xu Xiaogang, et al. Reversible data-hiding scheme for 2-D vector maps based on difference expansion [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2007, 2(3): 311-320.
- [9] Zhou Lu, Hu Yongjian, Zeng Huafei. Reversible data hiding algorithm for vector digital maps [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(4):990-993. [周璐,胡永健,曾华飞. 用于矢量数字地图的可逆数据隐藏算法 [J]. 计算机应用, 2009, 29(4):990-993.]
- [10] Peng Fei, Lei Yuzhou, Li Changtsun. A reversible watermarking scheme for 2D engineering graphics based on improved quantisation index modulation [C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Imaging for Crime Detection and Prevention (ICDP-09). London, UK: IET, 2009: 1-4.
- [11] Li Changli, Lu Zhaoyang. Desynchronization attacks on digital watermarks and their countermeasures [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(4):403-409. [李昌利,卢朝阳. 数字水印的去同步攻击及其对策 [J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(4):403-409.]