

一种与 JPEG 图像压缩编码结合的细胞自动机域盲水印算法

吴慧琳^① 周激流^① 龚小刚^① 李炳法^② 文扬^② 尹皓^②

^①(四川大学电子信息学院 成都 610064)

^②(四川大学计算机学院 成都 610064)

摘要: 该文结合 JPEG 图像压缩编码和细胞自动机, 提出一种用于 JPEG 压缩图像的数字盲水印算法。该算法先用 Moore 型细胞自动机对水印图像进行置乱; 随后用 2 维正交细胞自动机变换将原始灰度图像进行分解, 并在分解后得到的低频细胞自动机域系数中嵌入置乱后的水印信息。最后将嵌入了水印的图像按 JPEG 图像压缩标准进行编码。水印的提取是在解码过程中进行的。实验结果表明, 该水印算法有较好的隐蔽性; 对常见的攻击如 JPEG 压缩、滤波、剪切、旋转以及加性噪声攻击等有较好的鲁棒性。

关键词: 数字水印; 细胞自动机; 细胞自动机变换; JPEG

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)04-0844-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00667

A Novel Blind Watermarking Algorithm Joint JPEG Image Encoding and Cellular Automata

Wu Hui-lin^① Zhou Ji-liu^① Gong Xiao-gang^① Li Bing-fa^② Wen Yang^② Yin Hao^②

^①(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

^②(School of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Cellular Automata (CA) and Cellular Automata Transform (CAT) are introduced, and a novel watermark algorithm joint JPEG image encoding and cellular automata is proposed. An image watermark is scrambled by Moore CA firstly. And then is embedded into the low-frequency subband, which is obtained after the transform of original image with CAT. Then the watermarked image is encoded according the JPEG image compression standard. The watermark is extracted in the decoding process. The experiments show that the proposed algorithm is robust to the common watermark attacks, such as JPEG compression attack, filter attack, rotation attack, and additive noise attack and so on.

Key words: Digital watermark; Cellular Automata (CA); Cellular Automata Transform (CAT); JPEG

1 引言

数字水印是将一个信号(水印)以不可见方式嵌入另一个信号(宿主信号, 原始信号)的处理过程, 其中宿主信号可以是图像、音频或视频; 被嵌入的水印信号最后可以被提取或检测出来。自 1954 年水印技术问世以来, 已经涌现出大量适用于不同应用的静态图像的水印算法。现有的数字图像水印算法多适用于静态图像; 而近年来国际上趋向于采用简单可行的软硬件实现水印算法^[1]。因此结合了数字图像水印技术与图像压缩标准的、计算复杂度低、易于硬件实现且健壮性较好的压缩图像水印算法吸引了许多研究人员进行研究。

细胞自动机变换提供了一种把细胞自动机理论

和数学、物理、工程等理论联系起来工具^[2]; 被用于图像增强、边缘检测、降噪处理、图像加密等; 但将其及其变换应用到数字图像水印中, 是近几年才开始出现的。文献[3]提出一个基于细胞自动机变换的数字图像水印算法的框架结构。文献[4]利用细胞自动机的混沌特性, 对图像进行扩频调制将水印嵌入在图像的频域。文献[5]利用细胞自动机的分形特性来对图像进行处理, 并将水印嵌入处理后的图像中。文献[6]提出一个基于细胞自动机变换的水印算法, 该算法适用于普通未压缩的图像, 且水印的提取需要依赖原始图像。

JPEG 是当前广泛使用的图像压缩标准之一, 与其相关的水印算法, 按照算法输入输出的不同大体可以分为两类。第 1 类的输入输出均为 JPEG 压缩文件, 如文献[7,8]; 第 2 类的输入为原始文件, 输出为 JPEG 文件, 如文献[9-11]。其中大部分算

法是在进行 JPEG 压缩的量化步骤时嵌入水印。本文的算法，属于第 2 类。

本文结合 JPEG 图像压缩编码和细胞自动机，提出一种用于 JPEG 压缩图像的数字盲水印算法。该算法先用 Moore 型细胞自动机对水印图像进行置乱；随后用细胞自动机变换对原图进行分解，并在分解后得到的低频系数子带中嵌入置乱后的水印信息。最后将嵌入了水印的图像按 JPEG 图像压缩标准进行编码。水印的提取是在解码过程中进行的。实验证明该算法在保证水印不可见性的同时，对常见的攻击如 JPEG 压缩攻击，滤波攻击，高斯噪声攻击，旋转攻击等有较好的鲁棒性。

本文余下部分的内容安排如下。第 2 章提供了关于细胞自动机的理论基础。第 3 章先介绍了基于细胞自动机的图像置乱；同时详细给出了基于 JPEG 图像压缩编码的细胞自动机域数字盲水印算法的嵌入与提取算法。第 4 章展示了仿真实验与实验结果。第 5 章是结论。

2 背景知识

2.1 Moore 邻域细胞自动机

Moore 邻域是由细胞 a_{ij} 自身及其上、下、左、右的 4 个细胞，与对角线上 4 个细胞共同构成，如图 1(a) 中所示，表达式如式(1)。

$$N_{(i,j)}^M = \{(x,y) : |x-i| \leq r \wedge |y-j| \leq r\} \quad (1)$$

若状态集 $S = \{0,1\}$ ，邻域半径 $r = 1$ ，Moore 邻域细胞自动机的局部规则为“外全加”如式(2)所示。规则编号由式(3)确定。

$$a_{i,j}^{t+1} = f(a_{i,j}^t, a_{i-1,j-1}^t + a_{i-1,j}^t + a_{i-1,j+1}^t + a_{i,j-1}^t + a_{i,j+1}^t + a_{i+1,j-1}^t + a_{i+1,j}^t + a_{i+1,j+1}^t) \quad (2)$$

$$R = \sum_{s=1}^2 \sum_{n=1}^9 f(s,n) 2^{2n+s} \quad (3)$$

其中 s 表示状态集的个数； n 表示细胞邻域内元素个数。根据组合排列，可以得知共有 $2^{2 \times 9} = 262144$ 种映射，即规则。

2.2 二维细胞自动机变换

细胞自动机变换 (Cellular Automata Transform, CAT) 的主要优势是可以得到大量不同性质的正交、半正交、双正交，非正交等的基函数。

(1) 变换与逆变换 由 $N \times N$ 个细胞构成的二维细胞空间，二维细胞自动机变换与逆变换如式(4)所示。

$$f_{ij} = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} c_{kl} \mathbf{A}_{ijkl}, \quad c_{kl} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f_{ij} \mathbf{A}_{ijkl} \quad (4)$$

其中 f_{ij} 表示原始图像系数； c_{kl} 表示变换系数；

$\mathbf{A} \equiv \mathbf{A}_{ijkl} (i, j, k, l = 0, 1, \dots, N-1)$ 是细胞自动机基函数。如式(5)所示，本文采用由一维细胞自动机基函数衍生二维细胞自动机基函数的方式，即 Type8 类型基函数。

$$\mathbf{A}_{ijkl} = \mathbf{A}_{ik} \mathbf{A}_{jl} = L_w \left\{ (a_{ik} a_{ki} + a_{jl} a_{lj}) \bmod L_w \right\} - (L_w - 1) \quad (5)$$

其中 $L_w \geq 2$ 表示的是细胞可能有的所有状态的数量。在二值状态的细胞自动机空间，二维细胞自动机基函数可表示为式(6)。

$$\mathbf{A}_{ijkl} = (2a_{ik} a_{ki} - 1)(2a_{jl} a_{lj} - 1) \quad (6)$$

(2) 图像的细胞自动机变换 细胞自动机变换是一种分层编码方案^[12]。设给定原始图像为 $w \times h$ ，其中 $w = 2^m$ ， $h = 2^n$ (要求 m 和 n 都是正整数，若 2 的整数次幂则通过补 0 的方式满足要求)。将原始图像分成 $2(m+n)/(8 \times 8)$ 个字块，每个子块有 64 个像素。对每个子块进行二维正交细胞自动机变换，则变换系数 C_{kl} 落在 4 个不同的子带中。即当 k 和 l 都为偶数时， C_{kl} 为低频系数。将所有表示低频的系数分离出来，可以组成一幅新的低分辨率图像，称为 LL 子带。 k 为偶数和 l 为奇数时，得到 HL 子带； k 为奇数和 l 为偶数时，得到 LH 子带； k 和 l 都为偶数时，得到 HH 子带。后 3 个子带，均表示图像的高频部分，如图 1(b) 所示。图 1(c) 展示的是一个 Type8 类型二维正交基函数。图 1(d) 是对图像 Baboon 进行二维细胞自动机变换分解后，得到的 4 个子带图。

3 与 JPEG 图像编码结合的细胞自动机域盲水印算法

本文所提的与 JPEG 图像编码结合的水印算法，其整体流程如图 2 所示。

3.1 水印嵌入算法

如图 3 所示，为水印嵌入算法图示。

(1) 用二维 Moore 型细胞自动机对二值水印图像进行置乱。设需要置乱的图像 I ，大小为 $m \times n$ ， $I(i,j)$ 表示图像 I 在 (i,j) 的像素值。演化次数(迭代次数)为 k 。 P 是 $m \times n$ 的零矩阵，设置计数器 $t = 0$ 。水印图像置乱算法步骤如下：

(a) 由种子 δ 生成与图像 I 等大同维的随机矩阵 \mathbf{E}_0 ，其中只含有 0 和 1 元素。

(b) 将随机初始矩阵 \mathbf{E}_0 与图像 I 按坐标位置一一对应起来。按光栅扫描线顺序，从上到下、从左到右扫描 \mathbf{E}_0 。每当扫描到 $\mathbf{E}_0(i,j) = 1$ ， $1 \leq i \leq m$ ， $1 \leq j \leq n$ ，就按顺序将图像 I 中 (i,j) 位置的像素

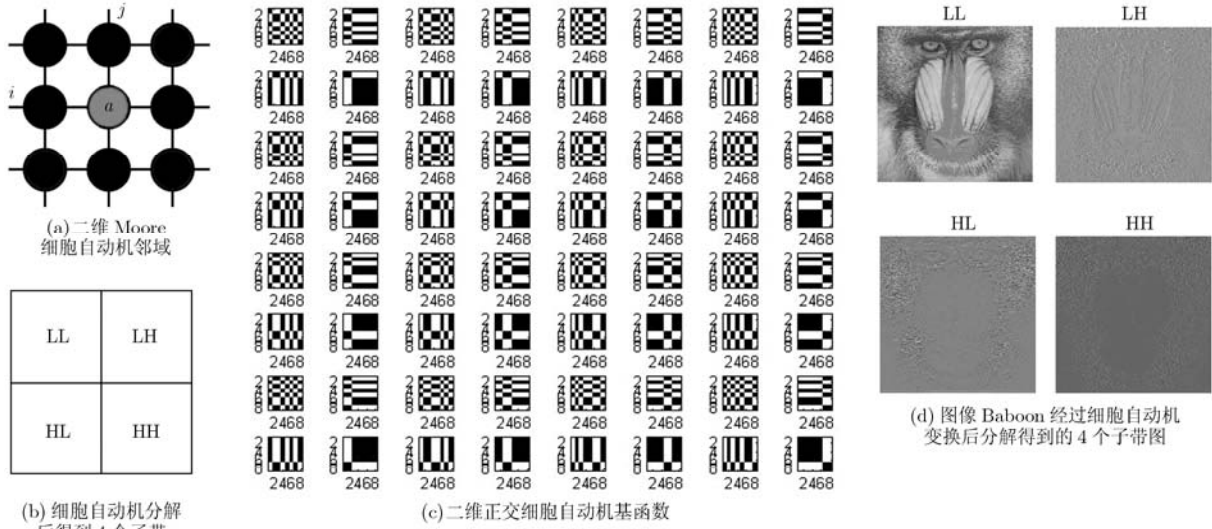


图 1 Moore 邻域细胞自动机

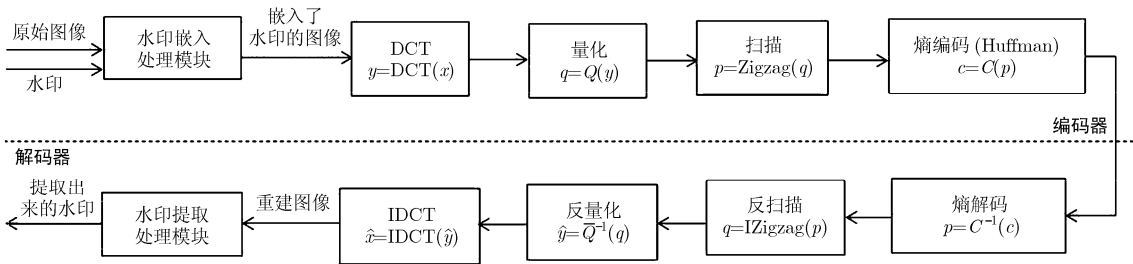


图 2 本文算法中的与 JPEG 图像编码结合的水印算法

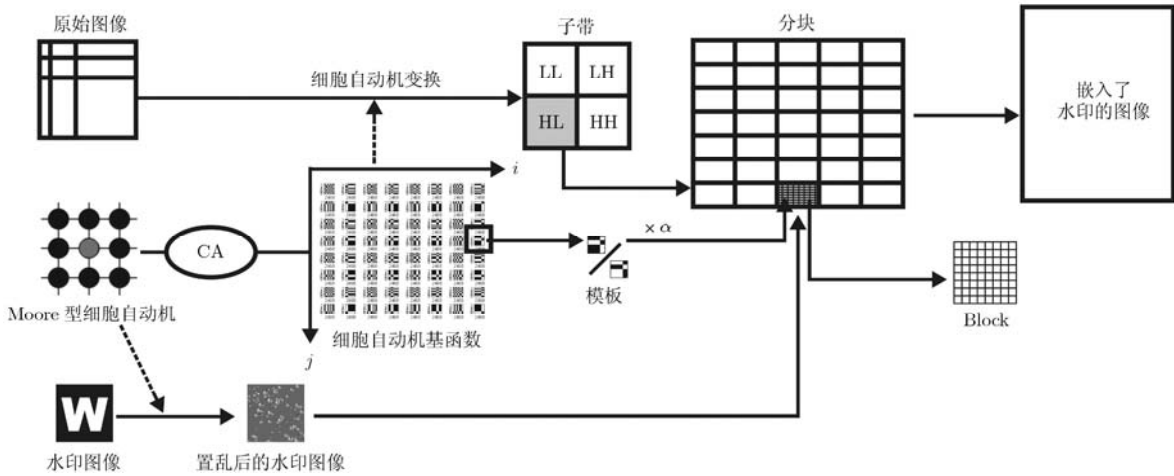


图 3 水印嵌入算法图示

值取出来，以扫描线策略存放在 P 中。

(c) 选取具有混沌性质的总和规则，将 E_0 作为 Moore 邻域细胞自动机初始构形，若 $t < k$ ，则执行①到③步操作。

① 依照总和规则进行一次迭代演化，将得到的构形记录到一个新矩阵 E_{t+1} 中。 E_{t+1} 与图像 I 等大同维。

② 按扫描线顺序：从左到右、从上到下依次将同时满足式(7)条件的 (i, j) 对应的图像 $I(i, j)$ 像素值取出，存放在矩阵 P 中。

$$\begin{cases} E_t(i, j) = 1 \\ E_m(i, j) = 0 \end{cases}, \quad m = 0, \dots, t-1 \quad (7)$$

③ 令 $t = t + 1$ 。

(d)将 I 中剩余未被提走的像素按扫描线顺序取出,依次加到 P 中。最后 P 就是置乱后的水印图像矩阵。

k 次迭代演化,得到一组构形序列: $\{E_1, E_2, \dots, E_k\}$ 。只要细胞自动机的总和变换规则号固定,种子 δ 不变,则会得到同样的构形序列。将构形序列也即是置乱算法的迁移路线,将 E_1 和 E_k 相接形成环路,则以置乱后的图像矩阵 P 作为初始构形,沿着迁移路线一步一步回退,最终可以得到原图 I 。综上,反置乱步骤与置乱步骤顺序相反,需要将规则号和种子 δ 作为密钥。

(2)用包括 Wolfram 规则号、细胞邻域、细胞初始构形、边界等在内的几个关键值,生成一个二维正交细胞自动机基函数 $B_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, 8)$ 。

(3)对原始图像进行一级正交细胞自动机变换。变换后得到4个子带。其中一个为低频子带 LL,其余均为高频子带。由于 LL 是存有图像的大量信息,选择高频子带 HL 嵌入水印。

(4)将高频子带 HL 分成不重复的块,每个块包含 $8 \times 8 = 64$ 个像素。每一块将被嵌入一位水印。

(5)生成两个小于 8 的随机整数 x 和 y ,目的是为了组合起来得到一个坐标 (x, y) 。然后从 64 个基函数中选择坐标为 (x, y) 的基函数子块作为一个模板 $P_1 = B_{ij} (i = x, j = y)$ 。由于细胞自动机的基函数取值范围 $S = \{0, 1\}$,对选择的模板 P_1 取反,则得到模板 P_0 。

(6)用两个模板 P_1, P_0 以及一个强度因子 α ,根据式(8),将置乱后的水印按位(watermark bit)嵌入到 HL 子带中。

$$HL = \begin{cases} HL + \alpha P_0, & \text{watermark bit} = 1 \\ HL + \alpha P_1, & \text{watermark bit} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

(7)执行细胞自动机逆变换,将所有分块重组,得到嵌了水印的图像。

(8)对图像进行标准 JPEG 压缩处理。即将嵌了水印的图像分成 8×8 的块,对每个块进行 DCT 变换。随后使用 64 元素量化表,对每个 64 的系数进行量化。量化后的系数,采用 Zigzag 扫描方式进行扫描,最后使用 Huffman 编码方式进行编码。这些操作完成后,就可以得到嵌入了水印的压缩图像数据。

3.2 水印提取算法

如图 2 中所示,本算法的解码,是在标准 JPEG 解码器的离散余弦反变换(IDCT)步骤后多了一个水印提取处理模块。该模块主要是从重建的图像中提取水印,其操作步骤如下:

(1)对嵌入了水印的 JPEG 压缩图像数据,进行反熵编码,反 Zigzag 扫描,反量化,离散余弦反变换(IDCT)等操作。得到一个重建的图像信号 \hat{x} 。

(2)使用与水印嵌入算法中相同的细胞自动机关键值,生成相同的二维正交细胞自动机基函数 $B_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, 8)$ 。

由于不同的关键值,可以生成不同的细胞自动机基函数;所以当关键值不同时,细胞自动机基函数就无法被反算出来。这就增加了水印算法的安全性。

(3)对重建的图像信号 \hat{x} 进行细胞自动机变换。得到 4 个细胞自动机变换系数子带。

(4)选取 HL 低频系数子带,将其分成多个互不重叠的分块,每一块大小为 8×8 。

(5)用与嵌入算法中相同的两个随机整数 x 和 y ,组合为坐标 (x, y) 。从 64 个基函数中选择一个基函数,即模板 P_1 ;求补集得到模板 P_0 。

(6)用模板 P_1 (或模板 P_0),与 HL 低频系数子带的每一个 8×8 的分块进行相关性判断,从而将嵌入在每一分块中的每一位水印(watermark bit)提取出来,提取如式(9)所示。

$$\text{watermark bit} = \begin{cases} 1, & \text{correlation} > 0 \text{ (若相关性大于0)} \\ 0, & \text{correlation} < 0 \text{ (若相关性小于0)} \end{cases} \quad (9)$$

(7)将提取出来的水印图像,进行 Moore 型细胞自动机反置乱。反置乱步骤与 3.1 节中置乱步骤顺序相反。

4 实验与结果

为了检验本文水印算法的性能,选取了 3 个大小均为 512×512 的灰度图 Lena, Crowd 和 Goldhill 进行多组试验。其中图 Lena 含有较小的细节;图 Crowd 相比之下含有大量的细节。以二值图像 'W' (32×32)作为水印图像。用于生成 Type8 正交细胞自动机基函数的关键值如表 1 所示。

选取具有混沌性质的,规则号为 224 的;转换规则为外全加规则;对应的映射函数 $f(1,2)=1, f(0,3)=1, f(1,3)=1$ 且其他状态值均为 0 的 Moore 型细胞

表 1 产生 Type8 型的细胞自动机关键值

Wolfram 规则	142
块的大小	8
初始构型	01101010
边界条件	Cyclic 周期型
基函数类型	正交 Type8

自动机对二值水印图像进行置乱。设定置乱次数 k 为 100。

4.1 隐蔽性分析

在不改变图像压缩率的前提下, 水印的隐蔽性与式(8)中的强度因子 α 相关。 α 取值较小时算法具有很好的水印隐蔽性, 鲁棒性较差。 α 取值较大时算法鲁棒性较好, 水印隐蔽性较差。在理想状况下, 经过多次实验发现, 当强度因子取值为 4 时, 本文算法的水印隐蔽性较好。故本实验强度因子取值为 $\alpha = 4$ 。

为了对水印算法进行客观的评价, 本文用峰值信噪比(Peak Signal Noise Ratio, PSNR)作为一个衡量标准, 以便清晰地判断出原始图像和受到攻击后的嵌有水印的 JPEG 压缩图像之间的差别, 如式(11)所示。

$$\begin{aligned} \text{PSNR} &= 10 \times \lg \frac{(\text{PSV})^2}{\text{MSE}} \\ &= 10 \times \lg \left(\frac{255}{\sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x(i,j) - \bar{x}(i,j))^2}} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

用归一化相关系数(Normalized Correlation, NC)作为提取出的水印与原始水印相似度的评价指标。NC 值越大, 表明两者相似度越大, 即水印提取效果越好。NC 定义如式(12)所示。

$$\text{NC} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M W(i,j)W^*(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M W(i,j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M W^*(i,j)^2}} \quad (11)$$

对图像 Lena, Crowd 和 Goldhill 分别进行水印嵌入和水印提取实验。图 4 显示的是 Lena 图实验结果。其中 4(a)是 Lena 原始图像; 4(b)表示未嵌入水印的 JPEG 压缩格式的 Lena。此时图像的压缩比为 4.0815, PSNR 为 33.07。4(c)是嵌入了水印的 JPEG 压缩格式 Lena。原始图像与嵌入了水印的 JPEG 格式 Lena 的图像压缩比为 3.8370, PSNR 为 32.63。此时原始水印与提取出来的水印的 NC 值为 0.98。此外, 图像 Crowd 与图像 Goldhill 的实验结果为: (1)Crowd: 原始图与未嵌入水印的 JPEG 格式图像的压缩比为 2.6336, PSNR 为 26.14。原始图与嵌入了水印的 JPEG 格式图像的压缩比为 2.5428, PSNR 为 26.05。此时原始水印与提取出来的水印的 NC 值为 0.9698。(2)Goldhill: 原始图与未嵌入水印的 JPEG 格式图像的压缩比为 2.5550, PSNR 为 26.84。原始图与嵌入了水印的 JPEG 格式图像的压缩比为 2.4521, PSNR 为 26.72。此时原始水印与提取出来的水印的 NC 值为 0.9844。

从视觉上看, 嵌入了水印的压缩图像与原图基本一致。由实验结果可以得出, 嵌入了水印以后的



图 4 Lena 的实验结果

图像的压缩率有所降低, PSNR 有所减小, 但是提取出来的水印与原始水印的相似度很高。说明本文水印算法的隐蔽性较好。




















































4.2 鲁棒性检测实验

为了检测水印的鲁棒性, 我们对 Lena, Crowd 和 Goldhill 分别进行了几组攻击实验。包括加性噪声攻击, 高斯低通滤波攻击, 剪切攻击, 旋转攻击, JPEG 压缩攻击, 直方图均衡化攻击以及线性锐化攻击等。实验结果表明该算法具有较好的鲁棒性, 且可以将 NC 值(约 0.8), 作为对水印图像存在的阈值。实验结果如表 2 所示。

5 结论

本文提出了一种与 JPEG 图像压缩编码相结合的细胞自动机域数字盲水印算法。该算法不同于常规压缩图像水印算法, 首先利用 Moore 型细胞自动机对水印图像进行置乱。随后对图像进行细胞自动机变换, 变换后的系数被分为 4 个子带; 选取其中表示低频系数的子带, 将置乱后的水印图像嵌入; 利用反变换生成嵌入水印后的图像。最后, 对嵌入了水印的图像进行 JPEG 压缩编码, 得到压缩后的嵌入了水印的图像。即本文所提水印算法可以用于

表 2 从各种攻击实验提取出来的水印图像及相关性能数据

水印攻击	图 Lena			图 Crowd			图 Goldhill			
	提取出的水印图像	PSNR(dB)	NC	提取出的水印图像	PSNR(dB)	NC	提取出的水印图像	PSNR(dB)	NC	
校验噪声攻击	0.001		30.85	0.98		25.52	0.96		26.14	0.98
	0.002		29.47	0.97		25.07	0.95		25.68	0.97
	0.005		27.19	0.94		23.98	0.90		24.54	0.95
高斯噪声(0,0.001)攻击		28.12	0.96		26.95	0.91		25.06	0.96	
高斯低通滤波攻击		28.87	0.96		24.57	0.89		25.35	0.93	
旋转攻击	0.10°		31.98	0.98		25.76	0.96		26.36	0.98
	0.15°		30.94	0.97		25.26	0.93		25.83	0.96
	0.20°		29.77	0.90		24.62	0.86		25.18	0.88
	0.23°		29.07	0.81		24.19	0.78		24.75	0.81
剪切攻击	40%		11.66	0.86		9.49	0.84		11.69	0.85
	90		32.67	0.98		26.08	0.97		26.73	0.98
JPEG 压缩攻击(QF)	70		32.10	0.97		25.81	0.97		26.42	0.99
	60		31.31	0.97		25.49	0.97		26.06	0.98
	55		31.55	0.98		25.89	0.96		26.25	0.97
	50		31.84	0.96		27.78	0.93		26.34	0.95
	直方图均衡化攻击		18.24	0.98		12.57	0.97		17.15	0.96
线性锐化攻击		32.63	0.99		26.05	0.97		26.72	0.98	

JPEG 压缩图像。水印的提取是在 JPEG 解码过程中进行的; 实验证明, 该算法在保证水印不可见性的同时, 对常见的攻击如 JPEG 压缩, 滤波, 加性噪声攻击等有较好的鲁棒性。

参考文献

- [1] Ni Zhi-cheng, Shi Yun-qing, *et al.*. Reversible data hiding[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2006, 16(3): 354-362.
- [2] Lefe O E. Method and apparatus for data encryption /decryption using cellular automata transform[P]. Patent, USA, 5677956, 1997.
- [3] Reiko Shiba, Seok Kang, and Yoshinao Aoki. An image watermarking technique using cellular automata transform [C]. *TENCON 2004, 2004 IEEE Region 10 Conference, Japan, 2004*, 1: 303-306.
- [4] Vijay Harishchandra Mankar, Tirtha Sankar Das, *et al.*. Cellular automata based robust watermarking architecture towards the VLSI realization[J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2007, 31(8): 20-29.
- [5] Li Hui-liang and Ye Rui-song. Image scrambling and watermarking technique based on 2D cellular automata[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(11): 2076-2080.
- [6] Li Xiao-wei, Nam Tae-hee, Lee Seok-ki, *et al.*. Digital

- watermarking in transform-domain based on cellular automata transform[C]. 2011 The 2nd International Conference on Next Generation Information Technology (ICNIT), China, 2011: 132-136.
- [7] Wong Peter H W, Chang A, and Oscar A C. Capacity estimation technique for JPEG-to-JPEG image watermarking[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, 13(8): 746-752.
- [8] Wong Peter H W, Chang A, and Oscar A C. On improving the iterative watermark embedding technique for JPEG-to-JPEG watermarking[C]. Proceedings of the 2004 International Symposium, China, 2004: 161-164.
- [9] Mohammad Amrollahzadeh and Siamak Talebi. A blind JPEG image watermarking in the DCT domain[C]. Proceedings of the 18th Conference on Electrical Engineering (ICEE), Iranian, 2010: 311-315.
- [10] Koch E, Rinafrey J, and Zhao J. Copyright protection for multimedia data[C]. Proceedings of the International Conference on Digital Media and Electronic Publishing, Germany, 1994: 321-329.
- [11] Jasni Mohamad Zain. Strict authentication watermarking with JPEG compression (SAW-JPEG) for medical images[J]. *European Journal of Scientific Research*, 2010, 4(2): 232-241.
- [12] Lafe O. Cellular Automata Transforms: Theory and Applications in Multimedia Compression, Encryption, and Modeling (Multimedia Systems and Applications)[M]. 1st Edition, London: Springer, 2000: 31-42.
- 吴慧琳: 女, 1980年生, 博士生, 研究方向为人工智能、数字信息处理等.
- 周激流: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为模式识别、分数阶微分、无线传感器、数字信息处理等.
- 龚小刚: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为模式识别、图像处理、数字信息处理等.