

基于混沌映射的鲁棒性图像水印算法

张春田, 张 静

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘 要: 本文提出一种基于混沌映射的强鲁棒性数字图像水印算法, 首先用一混沌动态系统对水印信息进行预处理, 而后将其扩频调制在图像空间域, 并且使水印嵌入强度自适应于图像; 通过预置已知模板和嵌入多块水印可实现水印检测位置的几何校准. 实验结果表明, 采用该算法实现的水印对常见的图像处理和几何变换具有很好的鲁棒性.

关键词: 数字图像水印; 混沌映射; 几何校准; 鲁棒性

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2002) 01-0069-04

Robust Image Watermarking Based on Chaotic Mapping

ZHANG Chun-tian, ZHANG Jing

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper presents a robust digital image watermarking algorithm based on chaotic mapping. The watermark is pre-processed with a chaotic dynamical system and spread adaptively over the image spatial domain. Geometric calibration before watermark detection can be achieved through a preset known mask and the watermark multiple embedding. The experimental results demonstrate that the watermark is robust to general image processing techniques and geometric distortions.

Key words: digital image watermarking; chaotic mapping; geometric calibration; robustness

1 引言

计算机网络的普及和数字多媒体产品的大量涌出, 使得在数字产品版权保护方面具有巨大商业潜力的数字水印技术日益为学界和商界所关注. 但现在的水印算法, 较少能具有比较全面的鲁棒性. 如 Voyatzis 等给出的混沌数字水印算法^[1], 将一混沌置乱后的二值图标嵌入灰度图像中, 该算法嵌入信息量较大, 抗滤波和有损压缩效果较好, 但不能抗几何操作; 而 Kutter 所提出的具有一般几何变换不变性的数字水印算法^[2], 把一个 32 位的数字签名嵌入到彩色图像中, 此算法虽对一般的几何变换, 如移位、剪切、旋转、缩放等鲁棒性较好, 但含有水印的图像经 JPEG 压缩 ($Q < 90\%$) 后, 已不能成功提取出水印信息. 目前, 如何设计具有较全面鲁棒性的数字系统依然是水印研究的关键问题之一.

本文提出一种鲁棒性较强的基于混沌映射的空间域扩频自适应水印算法, 如图 1 所示. 该算法在水印编码过程中, 首先对水印信息进行混沌预处理, 由混沌映射确定嵌入点的位置, 预处理不但实现了嵌入点位置的随机分布, 同时还将原始水印信息变成一混沌序列, 从而可进一步增强水印信息的保密性; 确定嵌入点 (P) 的位置后, 在原始图像中围绕 P 点进行局部活动性分析, 求得局部视觉掩模 M_p , M_p 乘以混沌序列中

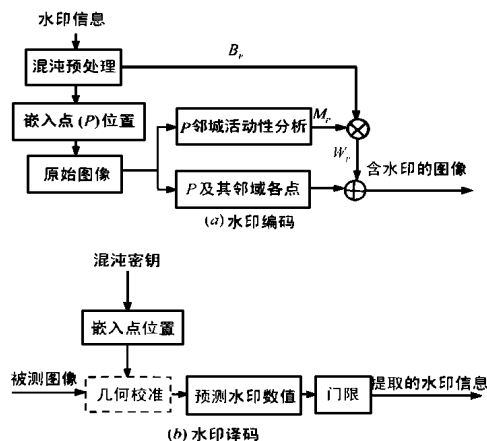


图 1 水印算法框图

对应于 P 点的信息位 B_p , 得到经视觉加权后的水印模板 W_p , P 及其邻域各点像素与 W_p 叠加后便得到含水印的图像. 水印译码过程中, 若被测图像已经过几何变换, 则先进行水印检测位置的几何校准, 而后根据混沌映射所确定的嵌入位置提取出水印信息. 实验结果表明, 采用该算法实现的水印具有较全面的鲁棒性.

2 水印信息混沌预处理

自同构是强混沌系统 Anosov 微分同胚的特例^[3]. 一个二维的 toral 自同构可看作是方形平面区域的空间变换, 它可用如下的映射来描述^[1]:

$$\Phi: U \rightarrow U, U = [0, 1) \times [0, 1), U \subset R^2$$

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix} \pmod{1} \quad (1)$$

这里 $a_{ij} \in Z, i, j = 1, 2, \det A = 1$ 且 A 的两个特征根 $\lambda_{1,2} \notin \{-1, 0, 1\}$.

Φ 对点 $r_0 \in U$ 重复作用就形成如下的强混沌动态系统

$$\Phi^{(n)}: U \rightarrow U, r_{n+1} = A^n r_0 \pmod{1} \quad (2)$$

或者 $r_{n+1} = A r_n \pmod{1}, n = 0, 1, 2, \dots$

点集 $\theta(r_0) = \{r_0, r_1, r_2, r_3, \dots\}$ 称为系统的一个轨道.

考虑 U 的离散子集 $\bar{U} = \{(x, y) | x = k/N, y = l/N, k, l \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}\}$, 若 $r_0 \in \bar{U}$, 则 $\theta(r_0)$ 是周期轨道, 且 $\theta(r_0)$ 中每一元素仍属于 $\bar{U}$ ^[1]. 于是我们考虑如下映射:

$$A_N(k): L_N \rightarrow L_N, L_N = \{(k, l) | 0 \leq k < N, 0 \leq l < N\}$$

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ k & k+1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix} \pmod{N} \quad (3)$$

$(x_n, y_n) \in L_N, k \in [1, N) \in Z$

可以证明, $A_N(k)$ 的所有轨道都是不稳定的周期轨道, 它们与实数空间自同构的周期轨道具有相同的性质^[1]. 显然, $A_N(k)$ 可直接作用于方形矩阵.

我们的目标是要在 $N \times N$ 的原始图像中嵌入由 L 位二进制比特 $B = \{b_0, b_1, b_2, \dots, b_{L-1}\}$ 所代表的信息. 为增强水印的鲁棒性, 我们在对水印信息混沌预处理时, 结合空间域水印扩频算法^[4], 把 L 维的消息向量 B 重复叠放形成一 $L \times L$ 维向量 E , 把 E 放入 $M \times M (L < M < N)$ 的方阵 W 中, 让映射 $A_N(k)$ 重复作用于 W 足够多次, 得到具有一定混沌效果的方阵 W' , 把 W 置入 $N \times N$ 的原始图像中某一位置 (该位置由向量 $S = (s_1, s_2)$ 决定), 便可得到各嵌入点的位置. 这样, 定义在 L 维空间的消息向量 B 就被混沌映射到 $L \times L$ 维空间. 在映射过程中, 记录下各点的位置对应关系, 检测时即可根据此对应关系恢复出 B . 具体操作如图 2 所示.

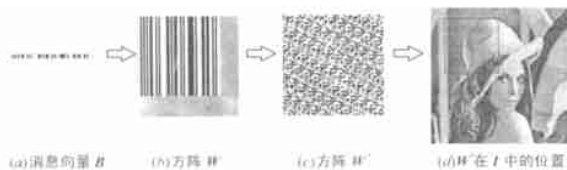


图2 水印信息混沌预处理

3 水印嵌入

水印嵌入过程中, 为提高水印的鲁棒性, 我们采取了以下措施:

(1) 使水印具有低通特性

水印嵌入时, 将如上生成的单极型的混沌序列 (形如 $\{0, 1\}$) 转化成双极型序列 (形如 $\{-1, 1\}$), 由每一位的符号决定对应像素灰度值的增减. 但假若只对孤立的像素点增减其灰度值, 则水印能量主要集中于图像高频部分, 这将使水印对低通滤波、有损压缩极为敏感. 考虑到这一点, 我们在水印嵌入时首先用嵌入点 $(P) 3 \times 3$ 邻域平均值 $\bar{I}_P$ 取代 P 点灰度值 I_P , 而后对 $\bar{I}_P$ 做修改, 嵌入时不仅仅只增减 P 点的灰度值, 同时对 P 点 3×3 邻域各点的灰度值也做一定幅度的增减, 这样嵌入的水印具有明显的低通特性, 从而增强了水印抵抗低通滤波、有损压缩的能力.

(2) 利用人眼视觉掩盖特性

水印嵌入强度越大, 其鲁棒性越好. 若水印嵌入强度为一常数 c , 则由于受水印不可见性的约束, c 取值较小, 一般在 $1 \sim 4$ 之间; 而图像的边缘和纹理区, 由于人眼视觉掩盖效应, 一般允许对像素灰度值作较大幅度的修改. 于是, 我们在原始图像上对 P 点 3×3 邻域进行局部活动性分析, 根据 P 点周围亮度变化的剧烈程度 (用 P 点邻域任意相邻两点亮度差值的最大值来表征) 求得局部视觉掩模 M_P , 用 M_P 对水印嵌入强度进行视觉加权, 亮度变化越剧烈, 权系数越大, 从而使水印嵌入强度自适应于图像, 进一步提高了水印抵抗攻击的能力.

$$M_P = \begin{bmatrix} \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \beta_4 & \alpha_P & \beta_5 \\ \beta_6 & \beta_7 & \beta_8 \end{bmatrix} \quad \beta_j \leq \frac{\alpha_P}{2} \quad j = 1, 2, \dots, 8 \quad (4)$$

水印嵌入时, 为确保需要修改灰度值的像素互不交叉重叠, 我们先把混沌后的 W 沿水平和垂直两个方向做 $1/3$ 上采样, 而后再置入原始图像中由向量 $S = (s_1, s_2)$ 决定的某一位置来获得各嵌入点的位置.

4 水印检测

设信息位 b_i 共被嵌入 L 次, 水印检测时根据位置映射关系找到对应于 b_i 的 L 个嵌入点位置, 计算出每一点灰度值 I_P 与其预测值 $\bar{I}_P$ 的差值 δ , 再求出 L 个差值的平均值 $\bar{\delta}$, 最后根据 $\bar{\delta}$ 的符号判断出 b_i 的数值, 即:

$$b_i = \begin{cases} 0 & \text{if } \bar{\delta} < 0 \\ 1 & \text{if } \bar{\delta} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

5 几何校准

上述水印算法在检测水印时, 若含水印的被测图像已经过几何变换, 则必须先对其实施几何反变换, 而后才能正确定位检测位置, 这就是水印检测中所谓的几何校准. 要实现几何校准, 算法就必须具有跟踪图像几何变换的功能.

5.1 旋转校准

为实现旋转校准, 我们在原始图像 I 中嵌入四个完全相同的 W' , 其余三个 W' 与第一个 W' 的位置偏移量分别为 $(\nabla_h, 0)$ 、 $(0, \nabla_h)$ 、 (∇_h, ∇_h) . 校准时, 首先对被测图像 I 实施滤波, 所用滤波器 H 为:

$$H = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

滤波后的结果可看作是对水印的预测,记为 $\tilde{w}(x, y)$, 计算 $\tilde{w}(x, y)$ 的自相关函数 $R_{\tilde{w}, \tilde{w}}(u, v)$, 取 $R_{\tilde{w}, \tilde{w}}(u, v)$ 五个极大值点的坐标, 记为 $MX = (M_0, M_1, M_2, M_3, M_4)$, 其中 $M_i = (u_i, v_i)$, $i = 0, 1, 2, 3, 4$. 如果图像 I 含有水印, 这五个极大值点的位置变化就会准确地反映 I 的旋转角度(如图 3 所示), 因此, 若被测图像 I 发生了旋转变换, 则可根据测出的旋转角度对其实施反旋转变换, 从而正确定位检测位置.

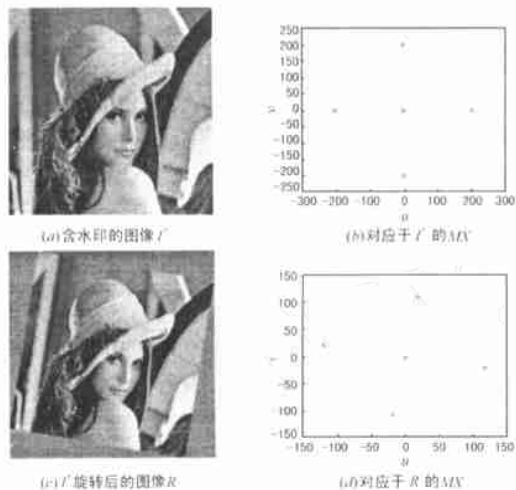


图 3 旋转角度追踪结果

5.2 缩放校准

若被测图像 I 只是经过了简单的纯缩放操作, 则 I 的尺寸与原始图像 I 尺寸相比就可获得缩放系数, 批缩放操作即可实现校准. 若被测图像 I 既有缩放又有旋转变换, 则先按上述旋转校准方法实施反旋转变换, 反旋转变换后提取出有效图像 T' , 图像 T' 与原始图像 I 尺寸相比就可获得缩放系数, 从而由反缩放操作实现校准.

5.3 平移、剪切校准

在嵌入原始图像的 L 位二进制信息中, 取前 P 位为已知数值的比特, 这相当于在图中放入一已知模板, 若被测图像 I 已经过平移、剪切操作, 则采用该模板与水印预测值做相关匹配, 找出匹配最大值处便可确定水印检测位置.

6 实验结果

实验中, 我们采用 $512 \times 512 \times 8$ 的 lena 图像, 由 4 位已知比特 0101 和一个 48 位的数字签名“MYMark”组成 52 维的消息向量 B , 将 B 重复叠放 52 次置入 66×66 的方阵 w 中, 混沌映射时, 取 $k=2$, 迭代次数 $n=12$, 混沌映射过程见图 2. w' 在原图中嵌入了四次, 取 $s=(50, 50)$, $\nabla_h=202$, 局部视觉掩模 M_p 中, 取 $\alpha_p = L_p/5$, $\beta_j = \alpha_p/2$, $j=1, 2, \dots, 8$. (L_p 为 p 邻域任意相邻两点亮度差值的最大值). 原始图像 I 见图 2(d), 嵌入水印后的图像 I' 见图 4(a). 旋转校准中, 首先求出自相关函数 $R_{\tilde{w}, \tilde{w}}(u, v)$ 最大值的坐标 M_0 , 而后将 $R_{\tilde{w}, \tilde{w}}(u, v)$ 最大值及其邻域置零, 再求下一最大值的坐标 M_1 , 以此类推, 直到求出所需的 MX 为止, 旋转角度追踪结果见图 3. 为测试算法的性能, 我们将嵌入水印的图像经常见的图像处理和几何变换后再进行检测, 实验结果见图 4. 从图中可见, 水印图像经各

种处理操作后, 对应于信息位的 δ^b 尽管有时很靠近门限(门限 $T=0$), 但每信息位的 δ 依然落在门限的正确一边, 从而确保水印信息能被成功地提取出来. 实验中发现, 对水印图像进行直方图均衡或锐化操作后, 水印强度反而有所增强, 因而更有利于水印检测; 而有损压缩则会导致水印强度减弱, 从而影响水印检测的可靠性. 对于 JPEG 压缩, 当 $Q \geq 50$ 时, 48 位水印信息均可 100% 地提取出来; 当 $35\% \leq Q < 50\%$ 时, 位错率 $ber \leq 1/48$; 当 $15\% \leq Q < 35\%$ 时, 最大借位率 $Maxber = 4/48$. 实验结果表明, 本文水印算法抗 JPEG 压缩性能优于文献[2].

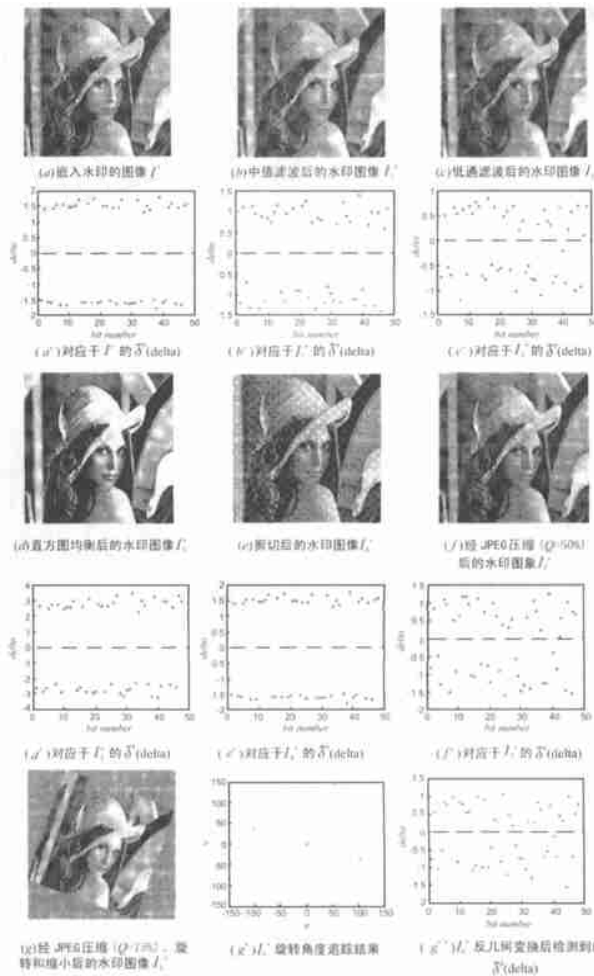


图 4 水印鲁棒性测试结果

就计算时间而言, 旋转校准中求自相关函数与平移、剪切校准中求互相关函数各用到一次 2-D 的 FFT 和 IFFT, 这比文献[2]中需用 6 次 2-D 傅里叶变换计算速度要快. 混沌映射中所花费的时间与迭代次数有关, 当迭代次数较大时, 在对大批图像采用同一混沌密钥并嵌入相同信息的场合, 可将水印信息混沌映射后的结果存储起来, 而不必每次都重复迭代过程.

7 结论

本文给出了一种强鲁棒性的水印算法, 采用 toral 自同构将水印信息混沌扩频调制在原始图像的空间域, 所实现的水印具有如下优点:

(1) 对水印信息的混沌预处理充分体现了密码学技术在水印系统中的运用,增强了水印系统的保密性.

(2) 嵌入水印具有低通特性,因而对滤波和有损压缩等图像处理操作具有很好的鲁棒性.

(3) 将人眼视觉隐蔽特性引入到水印算法,使水印自适应于图像,进一步提高了水印的抗攻击能力.

(4) 算法具有几何校准功能,从而使水印具有一般几何变换不变性.

参考文献:

- [1] G Voyatzis , I Pitas. Digital image watermarking using mixing systems [J]. Computer & Graphic. 1998 ,22 (4) :405 - 410.
- [2] M Kutter. Watermarking resisting to translation ,rotation and scaling [A]. Proc. SPIE Int Symp. on Voice ,Video and Data Communication [C]. Nov. 1998.
- [3] D K Arrowsmith , C M Place. An introduction to dynamical system [M]. Cambridge Univ. Press. 1990.
- [4] J R Hernandez , F Perez- Gonzalez. Statistical analysis of watermarking schemes for copyright protection of images [A]. Proceedings of the IEEE [C]. 1999 ,87(7) .

- [5] M Kutter , F Jordan , F Bossen. Digital signature of color images using amplitude modulation [A]. in Proc. Electronic imaging 1999 (EI97) [C]. San Jose ,CA. Feb. 1997.

作者简介:



张春田 男. 1939 年 2 月出生于天津市. 1963 年毕业于北京大学无线电系, 现任天津大学电子信息工程学院教授、博士生导师. 从事数据压缩与编码理论、信息隐藏与数字水印、数字视频、HDTV 等方面研究.



张 静 女. 1972 年 6 月出生于河南. 天津大学信号与信息处理专业研博士, 主要从事数字图像处理与数字水印技术研究.