

文章编号:1001-9081(2009)02-0474-03

二值图像 Arnold 变换的最佳置乱度

黄良永^{1,2}, 肖德贵¹

(1. 湖南大学 计算机与通讯学院, 长沙 410082; 2. 柳州师范高等专科学校 数学与计算机科学系, 广西 柳州 545004)
(huangliangyong@126.com)

摘要:以数字水印技术为背景,介绍了基于二值图像 Arnold 变换置乱和周期性,详细地讨论置乱度,提出了一种图像分块后像素值方差和像素点与 4 邻域灰度差值相结合的最佳置乱度计算方法。实验结果表明,该最佳置乱度计算方法能很好地反映二值图像的置乱程度并与主观视觉效果相一致。

关键词:置乱; Arnold 变换; 置乱度

中图分类号: TP309.7 **文献标志码:** A

The best image scrambling degree of binary image based on Arnold transform

HUANG Liang-yong^{1,2}, XIAO De-gui¹

(1. School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China;
2. Department of Mathematics and Computer Science, Liuzhou Teachers College, Liuzhou Guangxi 545004, China)

Abstract: In the context of digital watermark technology, this paper introduced binary image based Arnold transform and periodicity, and discussed the calculation methods of image scrambling degree in detail so that it elaborated the best formula of image scrambling degree with the combination of pixel value variance as well as pixels and 4 differ of the gray-level. The results show that the calculating method of the best image scrambling degree can well reveal the consistency of binary image scrambling degree and subjective visual effects.

Key words: image scrambling; Arnold transform; image scrambling degree

0 引言

数字水印作为一种多媒体数字信息版权保护和完整性认证的新技术,近年来已引起了人们的高度重视,成为一个信息安全和版权保护的研究热点。作为一种常用的图像加密方法^[1]的置乱技术在数字水印技术中应用越来越广泛,它利用数字图像具有的数字阵列的特点将原始图像中像素的位置或颜色变得杂乱无章、面目全非,使变换后的图像无法反映原始图像的信息,并呈现出类似均匀分布白噪声的特性。因此,对图像置乱程度评价方法的研究有着重要的理论和实际意义。

置乱技术^[2]可以作为水印图像的预处理和后处理,消除水印图像像素点之间或图像分块之间的相关性,置乱后的图像把原先相对集中的像素分散开来,提高水印图像的隐蔽性和安全性,增强了水印抵抗恶意攻击的能力。常见置乱方法有 Arnold 变换、Hilbert 曲线、仿射变换和正交拉丁方变换等。由于 Arnold 变换计算相对简单直观,容易实现,所以选择使用它来置乱二值水印图像。本文主要讨论基于二值图像 Arnold 变换的置乱程度,提出结合分块像素值方差和像素点与 4 邻域灰度差值的计算方法来选取最优视觉效果的置乱图像。

1 Arnold 变换及其周期

Arnold 变换^[3]是 Arnold 在遍历理论研究中提出的一种变换,又称猫脸变换(cat mapping),是一种传统的混沌系统。根据所选择不同的相位空间可分为二维、三维、四维直至 N 维的 Arnold 变换,本文的 Arnold 变换指的是二维 Arnold 变

换。对于一幅 $N \times N$ 的二值图像,基于像素点坐标离散化的 Arnold 变换图像置乱定义为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \pmod{N} \quad (1)$$

其中 $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$ 为变换矩阵,简称 Arnold 变换。 (x, y) 表示原图像某一像素点, $x, y \in (0, 1, 2, \dots, N-1)$, (x', y') 表示置乱后的像素点。 N 是图像的阶数。

经实验计算,在不同大小的水印图像的情况下,置乱变换算法具有周期性,即在二维的 Arnold 置乱中,当变换经过一定的迭代次数 T 后,将重新获得原始的水印图像。不同大小的图像矩阵阶数 N 下 Arnold 变换的周期 T 如表 1 所示(限于篇幅只列出部分图像大小的置乱周期)。

表 1 不同图像阶数 N 的 Arnold 变换周期

阶数 N	周期 T	阶数 N	周期 T	阶数 N	周期 T	阶数 N	周期 T
1	0	16	12	90	60	180	60
2	3	20	30	100	85	190	90
3	4	30	60	110	30	200	150
4	3	32	24	120	60	210	120
5	10	40	30	128	96	220	30
6	12	50	150	130	210	230	120
7	8	60	60	140	120	240	60
8	6	64	48	150	300	250	750
9	12	70	120	160	120	256	192
10	30	80	60	170	90		

可以看出,Arnold 变换的周期 T 与二维矩阵阶数 N 的大

收稿日期:2008-09-02;修回日期:2008-10-21。 基金项目:广西青年科学基金资助项目(0832029)。

作者简介:黄良永(1971-),男,广西柳州人,硕士研究生,讲师,主要研究方向:数字图像处理、数字水印;肖德贵(1972-),男,湖南南县人,副教授,博士,主要研究方向:多媒体信息的处理与存储、无线网、Internet 上视频传输的差错控制和错误恢复。

小有关,总的趋势是随 N 值的增加而变大,但并不是简单的正比关系,局部会有一些振荡。

2 二值图像 Arnold 变换的置乱度

图像置乱的目的在于打乱原图像,使非法者无法识别原图像内容。图像置乱度^[4]表明了图像被打乱的程度,图像经过置乱变换,越“乱”效果越好,保密性越好。图像置乱度评价标准有观察者的主观评价标准,也有客观标准。主观评价标准^[5]可以按照人眼对原始图像和置乱后的图像的视觉感官观测来给出评价。依据主观感受来划分等级,由于每个人视觉的敏感程度各不相同,不同的个体之间存在着差异,要想从主观上得到一个正确的质量评价结果,是非常麻烦的。但是它对最终的质量评价和测试很有用,对研究和开发过程中,需要经常进行质量的评价,则不适用。因此这就需要一种能与人类视觉感官判决相一致的客观评价置乱的标准。

客观的置乱度评价标准目前尚无统一的数学模型,文献[7]提出了用图像置乱前后像素点移动的距离来表示置乱程度,认为置乱后的像素距离原位置越远,置乱效果越好,则其置乱度越高。但实验结果表明,这种方法单纯考虑像素的位移,忽略了像素值本身对视觉效果和像素分散程度的影响,具有很大的局限性,很有可能导致最终置乱程度度量结果的不准确。文献[6]提出用图像分块方差表示图像置乱度,认为各图像分块中各点的像素值与均值的差别越大,图像变化越剧烈,置乱效果越好。经仿真实验该评价方法也存在置乱程度与主观视觉效果不一致的地方,算法判定部分置乱效果最优的图像仍存在一定的纹理效果,即主观视觉效果上判定不一致。另外衡量置乱度的方法还有距离度量^[7]、距离置乱因子和灰度置乱因子^[4]、信息熵度量^[8]以及噪声图像度量^[9]等。我们认为图像的“乱”应只与置乱后图像中像素值的大小和是否均匀分布有关,希望置乱后的水印图像呈现出类似于均匀分布噪声的特征,并且满足每个像素点的灰度值和周围像素点灰度值之差最大。基于这一思想我们引入文献[6]中有关置乱度的计算方法并结合像素点与4邻域灰度差值的计算方法来选取最优视觉效果的置乱图像,提出了一种客观评价二值图像置乱度与主观视觉效果相结合的方法。

定义1 对二值图像 $I(N \times N)$ 进行 Arnold 变换,其图像 I 的第 t 次置乱后其图像置乱度 $D(t)$ 为:

$$D(t) = \lambda \times \theta_1(t) + (1 - \lambda) \times \theta_2(t) \quad (2)$$

其中 $\theta_1(t)$ 为文献[6]中提出的分块像素值方差置乱程度, $\theta_2(t)$ 为置乱后图像像素点与4邻域灰度差值的置乱程度。 $\lambda \in [0, 1]$ 是本文中引入的加权系数来体现 $\theta_1(t)$, $\theta_2(t)$ 两种不同置乱方法在计算 $D(t)$ 值中所起的作用。 $D(t)$ 值越大图像越乱。

2.1 分块方差 $\theta_1(t)$ 的计算

对于图像 I 先将其划分为 L 个 $K \times K$ 大小的分块 $I_n(x, y)$, $n = 1, 2, \dots, L$, $x, y = 1, 2, \dots, k$, 然后计算每个分块 $I_n(x, y)$ 的灰度均值 α_n 和方差 β_n^2 , β_n^2 反映了每个分块图像的变化程度,其值越大,说明各点的灰度值与均值的差别越大,图像就越乱。则图像 I 的方差为:

$$I(\beta^2) = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \beta_n^2 \quad (3)$$

设一个 Arnold 变换周期的方差均值为 $I_{\text{avg}}(\beta^2)$, 第 t 次置乱后图像的方差为 $I_t(\beta^2)$, 则变换后图像的置乱程度为:

$$\theta_1(t) = \frac{I_t(\beta^2)}{I_{\text{avg}}(\beta^2)} \quad (4)$$

由于方差描述的是随机变量相对于均值的波动程度,方差越小波动程度越小,方差越大波动程度越大。也就是说, $\theta_1(t)$ 越大,整体上图像越“乱”,置乱效果越好。

2.2 4 邻域差值 $\theta_2(t)$ 计算方法

一幅数字图像可以看作是一个矩阵,矩阵中的元素为图像上各像素点的灰度值,矩阵的相邻元素之间有相关性。当图像置乱后各像素点的相关性变小,即相邻像素值差距变大,置乱效果最好。因此,可知图像置乱程度的大小与图像的相关性有关,相关性越小说明置乱程度越高,效果越好。基于此我们提出像素点与4邻域灰度差值的方法。

设图像 I 大小为 $N \times N$, 某像素点 (x, y) 的灰度值为 $f(x, y)$, 则该像素与4邻域(上、下、左、右)像素点的灰度值的差定义为:

$$\begin{cases} S_1 = |f(x, y) - f(x - 1, y)| \\ S_2 = |f(x, y) - f(x + 1, y)| \\ S_3 = |f(x, y) - f(x, y - 1)| \\ S_4 = |f(x, y) - f(x, y + 1)| \end{cases} \quad (5)$$

像素点 $f(x, y)$ 和4邻域灰度差值的均值 $S(x, y)$ 定义为:

$$S(x, y) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 S_i, i = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

图像 I 的4邻域灰度差值为:

$$I(S) = \frac{1}{N \times N} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N S(x, y) \quad (7)$$

设 $I_{\text{avg}}(S)$ 一个置乱周期内的图像4邻域灰度差值的均值,则第 t 次置乱程度 $\theta_2(t)$ 定义为:

$$\theta_2(t) = \frac{I_t(S)}{I_{\text{avg}}(S)}, t = 1, 2, \dots, T \quad (8)$$

小结 从定义1可以看出,本文提出的图像置乱度评价方法即考虑了灰度值在整个图像上的均匀分布,也考虑了图像细节上像素点之间的相关性,与人类主观视觉效果相一致。 $\theta_1(t)$ 值越大则表示分块图像像素灰度值与灰度均值的差别越大,置乱后视觉效果越乱; $\theta_2(t)$ 值越大则表示置乱后的图像像素点的相关性越小,置乱效果越好;引入 λ 值来确定二者之间的权重。因此, $D(t)$ 值越大,说明图像置乱的效果越好。

3 $D(t)$ 与视觉效果的仿真实验

为了验证本文提出的衡量最佳置乱度方法的有效性,进行了大量的二值图像置乱和计算最佳置乱度的实验,实验的置乱变换结果以及置乱度的计算主要是使用 Matlab7 工具模拟实现的。限于篇幅在此我们只列出了实验采用带有“湖南大学”字样的二值图像,图像大小为 128×128 像素置乱变换和置乱度的计算。图1是该图像的一个周期 ($T = 96$) 中部分的 Arnold 变换部分置乱结果, t 表示置乱的次数。

通过主观视觉对图1进行观察,可以看出置乱96次后恢复到初始图像状态。在一个周期内,置乱程度与 Arnold 变换次数并没有固定的比例关系,置乱次数多并不表示置乱程度高。还可清楚地看出在该周期内,置乱第1、48和95次后的图像效果最差,第2、47、49和94次置乱效果次之,而第3、46、50和93次的置乱仍存在较强的纹理效果。通过以上的对比观察我们发现 Arnold 置乱周期的一半与其置乱程度具有某种程度的对称性,且两端和中间的图像置乱效果较差。

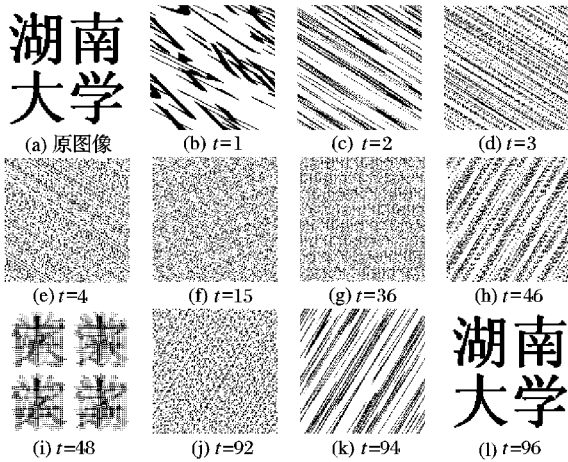
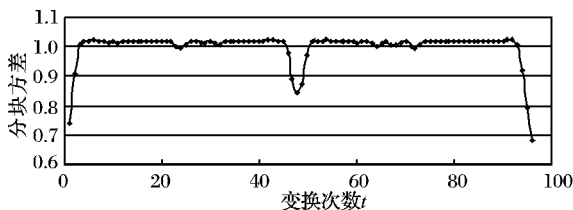


图1 不同置乱次数的 Arnold 变换所对应的图像置乱效果

3.1 分块方差 $\theta_1(t)$ 的实验

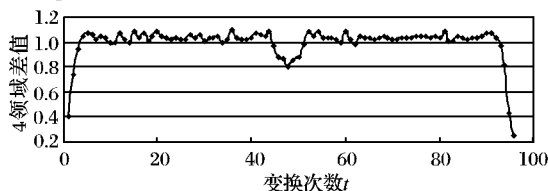
把图像进行分块,分块的大小为 4×4 ,分为 $32 \times 32 = 1024$ 个子块。图2 是不同置乱次数 Arnold 变换所对应的置乱程度 $\theta_1(t)$ 的二维曲线图,置乱程度的计算采用式(3、4)。X 轴为变换次数 t ,Y 轴为每次变换后分块的像素值方差置乱程度 $\theta_1(t)$ 的值。

图2 不同置乱次数的 Arnold 变换所对应的置乱程度 $\theta_1(t)$ 的值

从图2 的实验结果可以看出: $\theta_1(t)$ 的值与图1 的主观视觉效果基本相一致,在该计算方法中,第 92 次置乱后 $\theta_1(92) = 1.023148$ 最大,但仔细观察图1 发现,图像在置乱 92 次后仍存在一定的纹理效果,并不是在视觉效果上最佳的置乱图像,因此该置乱方法得出的置乱结果和人眼观察到的视觉效果不一致,说明了文献[6]中把图像局部块的像素值方差作为置乱度量仍存在一定局限。

3.2 4 邻域差值 $\theta_2(t)$ 的实验

使用置乱程度的计算公式(5、6、7、8)对图像进行像素点相邻元素的灰度差值 $\theta_2(t)$ 的计算,计算结果如图3 所示,X 轴为变换次数 t ,Y 轴为每次变换后图像 I 像素点与 4 邻域灰度差值 $\theta_2(t)$ 的值。

图3 不同置乱次数的 Arnold 变换所对应的 4 邻域灰度差值 $\theta_2(t)$

实验结果显示:一个周期内图像置乱的灰度差值 $\theta_2(t)$ 的均值 1,两端和中间的图像置乱效果较差。当图像置乱 36 次后,图像像素点相邻元素的灰度差值 $\theta_2(t)$ 的值为最大,即 $\theta_2(t) = 1.0915223$,表示该图像 4 邻域灰度差值最大,图像置乱效果最佳。

3.3 $D(t)$ 和视觉效果的适应性实验

本文提出的有关置乱度的计算方法,即结合分块像素值方差和像素点 4 邻域灰度差值来选取最佳视觉效果的置乱图

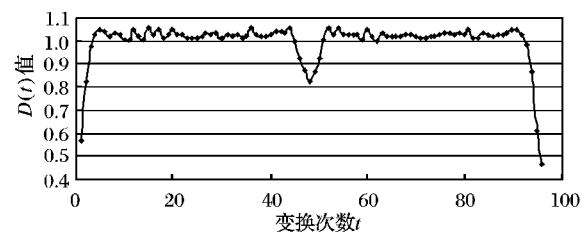
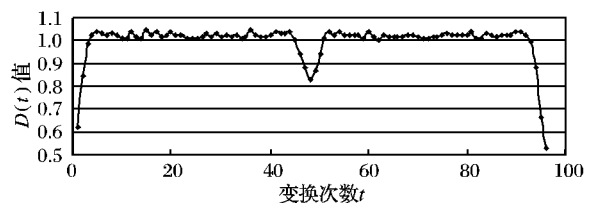
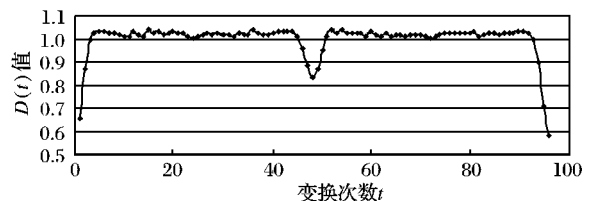
像。考虑了图像中像素灰度值分布的均匀性,也考虑了图像的细节部分(像素之间的相关性),并引入加权系数 λ 来计算图像的置乱度。

显然,在一幅二值图像中黑点和白点数目相同的情况下,图像的最佳置乱应满足于黑点尽可能地均匀分布,即无论是在图像局域分块上,还是在细节到每一个像素点上,要求 $\theta_1(t)$ 和 $\theta_2(t)$ 的值同等重要,此时, λ 应取值为 0.5;当图像中黑点少白点多,最佳置乱的图像应首先满足于黑点尽可能地均匀分布于每个图像分块,即在每个图像局域分块上有相同数目的黑点,此时要求 $\theta_1(t)$ 的系数比 $\theta_2(t)$ 的系数值大, λ 应取值大于 0.5;反之在黑点多白点少的情况下,应充分考虑 $\theta_2(t)$ 的值所占的比重,即 λ 应取值小于 0.5;下面给出不同二值图像 λ 加权系数值的计算方法。

定义 2 设二值图像 $I(N \times N)$ 上所有黑色像素点的占总像素点的比例为 $I(black)$, 则:

$$\lambda = 1 - I(black) \quad (9)$$

根据定义 2 可知 λ 的值与 $I(black)$ 成反比,经计算可得“湖南大学”图像的 λ 值为 0.76318。下面我们进行对比实验,分别取 $\lambda = 0.5$ 、 $\lambda = 0.65$ 和 $\lambda = 0.76318$ 时,根据式(1)得到图像置乱度的计算结果如图 4~6 所示。

图4 $\lambda = 0.5$ 时 Arnold 变换对应的置乱度 $D(t)$ 图5 $\lambda = 0.65$ 时 Arnold 变换对应的置乱度 $D(t)$ 图6 $\lambda = 0.76318$ 时 Arnold 变换对应的置乱度 $D(t)$

下面列出部分置乱次数与置乱度数据如表 2 所示进行分析验证。当取 $\lambda = 0.5$ 时,表示图像置乱度 $D(t)$ 的计算中分块像素值方差 $\theta_1(t)$ 和像素点相邻元素的灰度差值 $\theta_2(t)$ 处于同等重要的位置。最佳置乱度 $D(t)$ 判定选取第 36 次变换后的图像。当取 $\lambda = 0.65$ 时,表示图像最佳置乱度 $D(t)$ 的计算过程中,侧重于满足于黑点尽可能地在整个图像中均匀分布,即在每个图像局域分块上有相同数目的黑点,判定最佳置乱图像为第 15 次变换后的图像。最后,根据我们所提出的计算置乱的方法,使用定义 2 计算得出 $\lambda = 0.76318$ 时,再利用式(1)判定则选取为第 15 次变换后的图像为最佳置乱的图像。

定位场合。表2给出几种定位算法在计算开销、定位精度、稳定性及可扩展性方面的比较,其中 r 为锚节点数量, T_{inv} 为求LLS算法中广义逆矩阵时间, T_{cl} 为一次三边测量求质心的时间

开销, T_w 为求加权因子的时间开销, T_g 为测量校正所花费时间,可以看出,本文算法在增加一定计算量的条件下,提高了定位精度和稳定性。

表1 实验结果指标统计

定位方法	3个锚节点				4个锚节点				5个锚节点			
	BE	SE	ME	SV	BE	SE	ME	SV	BE	SE	ME	SV
LLS	2.213 9	1.208 6	1.544 3	0.062 2	0.056 3	0.002 8	0.028 8	$0.221 1 \times 10^{-3}$	0.893 6	0.010 7	0.155 4	0.106 1
均值质心	3.557 7	0.470 6	1.531 3	0.976 7	0.121 4	0.002 6	0.034 1	$0.934 1 \times 10^{-3}$	0.112 4	0.016 2	0.041 7	0.001 1
加权质心	3.498 1	0.514 7	1.508 1	0.990 0	0.050 8	0.002 5	0.033 4	$0.951 1 \times 10^{-3}$	0.053 1	0.016 1	0.051 9	0.004 4
DGC-TWCL	3.695 6	0.335 5	1.420 3	0.792 0	0.056 0	0.001 8	0.024 0	$0.346 9 \times 10^{-3}$	0.239 7	0.002 7	0.051 2	0.007 1

表2 几种定位算法性能比较

定位方法	计算开销	定位精度	稳定性	可扩展性
LLS	T_{inv}	较低	较低	较好
均值质心	$(r-2) * T_{cl}$	较低	较低	较好
加权质心	$(r-2) * T_{cl} + T_w$	较低	较低	较好
DGC-TWCL	$(r-2) * T_{cl} + T_w + T_g$	较好	较好	较好

4 结语

无线传感器网络中的节点定位问题由于其低成本特性,不可能通过在每个节点配置如GPS全球定位系统这样直接获得位置信息的方式。大多数节点定位首先需要与位置已知的锚节点进行距离测量,而因为存在测量噪声和估计误差,测距值都是非精确的。本文提出的DGC-TWCL算法,利用Cayley-Menger行列式形成的无线传感网络节点间的二次几何约束关系,以测距平方误差和极小化为优化目标,修正非精确距离量测值。结合二次加权质心计算,得到精度较高和鲁棒性较好的定位结果。

参考文献:

- [1] BLUMENTHAL J, GROSSMANN R, GOLATOWSKI F, *et al.* Weighted centroid localization in Zigbee-based sensor networks [EB/OL]. [2008-06-10]. <http://www-md.e-technik.uni-rosstock.de/veroeff/WISP2007-WeightedCentroidLocalization-InZigBee.pdf>.
- [2] CHEN YINGYING, FRANCISCO J A, TRAPPE W, *et al.* A prac-

tical approach to landmark deployment for Indoor localization [J]. Sensor Review, 2008, 28(2): 115-124.

- [3] SMITH A, BALAKRISHNAN H, GORACZKO M, *et al.* Tracking moving devices with the cricket location system [C]// Proceedings of the 2nd international conference on Mobile Systems, Applications, and Services, New York: ACM, 2004: 190-202.
- [4] DOHERTY L, PISTER KSJ, GHOUAI LE. Convex position estimation in wireless sensor networks [EB/OL]. [2008-06-10]. http://www.eecs.berkeley.edu/~elghaoui/publications_files/pdf-files/Infocom.pdf.
- [5] NICULESCU D, NATH B. Ad-Hoc positioning systems [EB/OL]. [2008-06-10]. <http://www.cs.rutgers.edu/dataman/papers/aps-globecomm.pdf>.
- [6] NICULESCU D, NATH B. DV based positioning in Ad Hoc networks [J]. Journal of Telecommunication Systems, 2003, 22(1/4): 267-280.
- [7] CAO MING, ANDERSON B D O, MORSE A S. Sensor network localization with imprecise distances [J]. System and control letters, 2006, 55(5): 887-893.
- [8] MAO GUOQIANG, BARS F, ANDERSON B D O. Wireless sensor network localization techniques [J]. Computer networks, 2007, 51(1): 2529-2553.
- [9] 陈维克, 李文峰, 首珩, 等. 基于RSSI的无线传感器网络加权质心定位算法 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2006, 30(2): 265-268.

(上接第476页)

表2 部分置乱次数与置乱度

系数	置乱次数		
	$T = 15$	$T = 36$	$T = 92$
$\lambda = 0.5$	1.054 571 2	1.055 053	1.030 641
$\lambda = 0.65$	1.044 408 0	1.044 112	1.028 393
$\lambda = 0.76318$	1.038 242 0	1.037 363	1.028 130

对比图1中第15次和36次置乱后的图像,两幅图像都不存在有纹理,但第15次置乱后的图像在局部分块细节上效果分布更均匀更乱,因此该算法与主观视觉评价结果相一致。说明了本文提出的定义1最佳置乱度和定义2的系数取值的计算方法能准确反应图像的最佳置乱程度。

4 结语

本文提出了一种Arnold变换最佳置乱度的计算方法,该方法结合了人类主观视觉效果,充分考虑置乱后图像的像素值的局部分块均匀分布和细分到像素点的均匀分布,使用加权系数 λ ,并给出了 λ 取值的定义和计算方法,使置乱后图像的特征更像均匀分布的白噪声,为客观评价图像的最佳置乱

效果及设计水印图像的置乱方案提供了一种新的解决思路。

参考文献:

- [1] 张军, 王能超, 施保昌. 基于混沌映射和遗传算法的公开数字水印技术 [J]. 模式识别与人工智能, 2002, 15(1): 42-47.
- [2] 邹玮刚, 刘辉. 基于三维Arnold逆变换的数字图像置乱技术及其周期性 [J]. 江西理工大学学报, 2007, 28(6): 36-38.
- [3] 谭月辉, 梁欣, 张俊萍, 等. 基于Arnold变换和采样理论的置乱技术研究 [J]. 信息安全, 2006, 22(12): 74-76.
- [4] 黄兴, 张敏瑞. 图像置乱程度的研究 [J]. 武汉大学学报, 2008, 33(5): 465-468.
- [5] 杨义先, 钮心忻. 数字水印理论与技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [6] 张小华, 刘芳, 焦李成. 一种基于混沌序列的图像加密技术 [J]. 中国图像图形学报, 2003, 8(4): 374-378.
- [7] 柏森, 曹长修. 图像置乱程度研究 [C]// 信息隐藏全国学术研讨会 (CIHW2000/2001) 论文集. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001: 75-81.
- [8] 商艳红, 李南, 邹建成. Fibonacci变换及其在数字图像水印中的应用 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(z2): 148-151, 155.
- [9] 李志伟, 陈燕梅, 张胜元. 基于SNR的数字图像置乱程度评价方法 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2006, 45(4): 484-487.