

基于质心的数字图像置乱度衡量准则

冯新岗 周 詮

(西安空间无线电技术研究所国家级重点实验室 西安 710000)

摘要: 从数字图像是密度呈任意分布物体的新视角出发, 提出了一种新颖的数字图像置乱程度衡量准则, 该准则依据质心与形心间的距离来衡量置乱程度。与已有的置乱度准则相比, 其突出的优点是仅用置乱后图像本身的信息而不用其它信息来衡量置乱程度。仿真结果说明了该准则的优越性。

关键词: 数字图像; 置乱程度; 质心; 形心

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)11-2684-04

A Novel Scrambling Degree Rule of Digital Image Based on Center of Mass

Feng Xin-gang Zhou Quan

(National Key Laboratory, Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: Based on a new viewpoint that digital image is considered as mass with non-uniform densities, a novel scrambling degree rule is presented that can be used to measure the scrambling degree by the distance between the center of mass and the center of figure. Compared with other rules, this rule has the distinguished advantage that it can measure the scrambling degree of any scrambled image using only the information of image. Experimental results show that its performance is superior to other rules.

Key words: Digital image; Scrambling degree; Center of mass; Center of figure

1 引言

置乱技术就是将原来有意义和存在一定顺序的数据通过一定的手段将其变得充分混乱从而失去原有的意义。置乱技术必须可逆, 即可以根据置乱后的数据恢复原始数据。数字图像在置乱之后, 概括起来可以起到6个方面的作用^[1]: (1) 加密; (2) 增强不可感知性; (3) 提高信息隐藏容量; (4) 增强抗攻击能力; (5) 防止成组或突发错误; (6) 类似于扩频的能量扩散作用。从这6个作用可以看出, 在信息隐藏技术研究中, 图像置乱技术不仅是大幅图像隐藏的基础性工作, 而且也是图像隐蔽通信研究中的基础性工作。目前, 已有的数字图像置乱方法大致有以下几种: 几何变换(Arnold变换是几何变换的一种)、幻方、Hilbert 曲线、生命游戏、IFS 模型、Gray 码变换、广义Gray 变换、混沌置乱变换等。根据像素及像素值的变化情况, 不同的图像置乱方法可以分为: (1) 仅像素几何位置变换的图像置乱, 如Arnold置乱; (2) 仅图像灰度值变换的图像置乱, 如Gray码变换; (3) 像素几何位置及灰度值均发生变换的图像置乱, 如混沌置乱变换。在信息隐藏中对置乱方法主要有两个要求: (1) 运算量小; (2) 置乱度大。所用的置乱方法不同, 置乱效果就可能存在差异。因

此, 各种置乱算法置乱效果的衡量就成了一项非常紧迫的课题。

作者查阅了大量中文、外文相关文献, 发现衡量图像置乱效果最早的是文献[1]: “图像置乱程度研究”; 此后有关置乱程度衡量准则的是文献 [2-8]。文献[1,2]从空域距离的角度出发, 认为: 在做置乱变换时, 原图像的像素位置移动的越远, 其置乱程度越大; 因此, 提出了用各像素点移动的距离来定义置乱程度, 给出了3种度量公式。文献[3]根据数字图像的纹理特征给出了置乱度计算公式。文献[4]提出了基于SNR的置乱度衡量准则, 需要将图像分成若干最佳块, 对每一个块求其SNR, 最后以所有块SNR的平均值作为置乱程度。文献[5]所提衡量准则是在文献[1]所提准则基础上加了一个修正参数而成。文献[6]是根据相关性来考虑的, 认为图像置乱程度的大小与置乱后图像的相关性有关, 相关性越小说明置乱程度越高, 反之越低, 其分别从置乱后图像水平、垂直、主对角、次对角4个方向相邻像素灰度差平方来衡量图像置乱程度。文献[7]是在频域衡量置乱程度。文献[8]提出了根据不动点比、信息熵、灰度平均变化值及自相关度衡量置乱程度方法。

在仔细分析数字图像置乱前后物理特性的基础上, 本文认为应将数字图像看作是密度呈任意分布的物体, 结合物理学中物体密度、质心概念, 本文提出了一种新的置乱度衡量

准则——基于质心的置乱度衡量准则。同时仔细分析了文献 [1] 的置乱度标准, 可以发现其所得置乱度数值不仅很小, 难以比较, 更严重的缺点是只能针对属于仅像素几何位置的置乱变换, 如 Arnold 变换等, 而不能衡量采用仅灰度值的置乱变换, 如 Gray 码、混沌置乱后的图像。而本文所提的置乱度衡量标准可以适用任何一种形式的置乱方法所置乱后的图像。

2 基于质心的置乱度准则

由于置乱度算法是将图像像素几何位置重新排列, 理想状态就是和均匀噪声一样, 即相同灰度值的像素在 $M \times N$ 图像上均匀分布, 等价于所有灰度值的像素在 $M \times N$ 图像上均匀分布。因此, 本文认为置乱度衡量准则问题就转化为如何衡量数字图像所有像素灰度分布均匀问题。在物理学中衡量一个物体是否均匀一个恰当的量就是密度。当整个物体的密度是常数时, 则称此物体是均匀的, 而密度为常数的物体, 其质心与形心重合。因此, 本文认为应当将图像看成是物体密度呈任意分布的物体, 置乱后的图像就是将原来的“物体”的密度重新排列了。“密度分布均匀”的图像是一种比较特殊的图像, 整幅图像灰度值一样就是, 如白纸或黑板; 或者是以图像形心为中心, 对称分布也是“密度均匀分布”的图像。根据上述认识, 本文提出一种新的置乱度衡量准则——基于质心的置乱度衡量准则, 该准则既不需要原始图像的信息, 也不参考其频域信息, 而只从置乱后图像本身出发来衡量其置乱度。

一个简单的示意图如图 1。图 1(a) 中瓶子中的水及墨汁可以看作是一幅图片, 经搅和后变成了图 1(b), 搅和可以认为是一种置乱变换, 不断地“变换”, 最后成图 1(c), 达到完全均匀。从图 1(a) 到图 1(c) 就是经“置乱”达到的, 而杯中的混合体密度则是从不均匀到最后的均匀、质心与形心完全重合的过程。因此完全有理由认为质心与形心之间的距离是衡量均匀程度一个比较好的量。

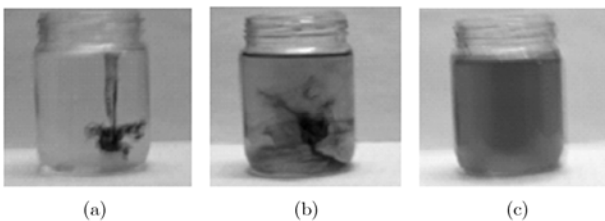


图 1

因此, 本文认为若把数字图像看成是一个物体, 灰度值就是其一点处的密度, 根据基本的物理学知识, 其质心很容易求出来。设图像为 Q , 其大小为 $M \times N$, 令其密度函数为 $\rho(x, y)$, 则 Q 的质心 $C(C_x, C_y)$ 如下 (R 是积分区域, 即图

像 $M \times N$):

$$\begin{cases} C_x = \frac{\iint_R x\rho(x, y) dx dy}{\iint_R \rho(x, y) dx dy} \\ C_y = \frac{\iint_R y\rho(x, y) dx dy}{\iint_R \rho(x, y) dx dy} \end{cases} \quad (1)$$

由于数字图像是离散的, 因此质心公式就变为

$$\begin{cases} C_x = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x\rho(x, y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \rho(x, y)} \\ C_y = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N y\rho(x, y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \rho(x, y)} \end{cases} \quad (2)$$

因为 $M \times N$ 大小的图像的形心为 $G = (G_x, G_y) = (M/2, N/2)$ 。因此, 本文给出的数字图像置乱度为

$$S_0 = 10 \log_{10} [1 + d] \quad (3)$$

其中 $d = \sqrt{(C_x - G_x)^2 + (C_y - G_y)^2}$ 。仔细分析式(3)可知, 其质心与形心最大距离为 $d_{\max} = \sqrt{\left(\frac{M}{2} - 1\right)^2 + \left(\frac{N}{2} - 1\right)^2}$, 因而 d 的取值范围为 $d \in [0, d_{\max}]$, 置乱度 S_0 的取值范围为 $S_0 \in [0, 10 \log_{10}(1 + d_{\max})]$ 。由于式(3)只能衡量不同置乱算法对于同一大小图像的置乱效果好坏, 而不能衡量不同大小的图像, 为此, 下面给出可对不同大小的数字图像置乱度进行衡量的公式:

$$S = 10 \log_{10} \left[\frac{1 + d_{\max}}{1 + d} \right] \quad (4)$$

其中 $S \in [0, 10 \log_{10}(1 + d_{\max})]$, 置乱度 S 是一个无量纲的数。由此, 本文提出的置乱度衡量准则为: 一幅置乱后的图像应用式(4), 所得结果 S 越大, 其置乱效果越好。

3 仿真与讨论

本文采用 384×384 大小的 Lena 灰度图(图 2 (a))和 256×256 大小的 Vase 灰度图(图 2 (b))作为测试图片, 对其分别用 Arnold 变换(式 5)^[9]和亚仿射变换(式 6)做置乱变换, 并与文献[1]所给出的置乱度衡量公式(式 7)进行计算比较:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \bmod N \quad (5)$$

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} N+1 \\ 0 \end{pmatrix}, & (x < y; x, y \in \{1, 2, \dots, N\}) \\ \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, & (x \geq y; x, y \in \{1, 2, \dots, N\}) \end{cases} \\ S_T(A) = \frac{1}{(M \times N)^{3/2}} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{(i - t_{row}(i, j))^2 + (j - t_{col}(i, j))^2} \end{cases} \quad (6)$$

$$(7)$$



(a) Lena 标准灰度图 (b) Vase 灰度图

图 2

仿真结果如图 2、图 3、图 4。通过实际计算发现，图 2 (a)图的 Arnold 变换周期为 96。

图 3 中 CArnoldLena、CYALena、CArnoldVase、CYAVase 曲线分别表示 Lena 图像和 Vase 图像用 Arnold 变换、亚仿射变换置乱后，应用式(4)所得置乱度结果。

图 4 中 CArnoldLena、CYALena、CArnoldVase、CYAVase 曲线分别表示 Lena 图像和 Vase 图像用 Arnold 变换、亚仿射变换置乱后，应用式(7)所得置乱度结果。

从图 4 可以看到，Arnold 置乱变换采用式(7)计算置乱度时，两幅测试图像置乱度所得结果绝大多数都集中在 $S = 0.521$ 附近，变化比较小；同样，亚仿射置乱变换采用式(7)计算置乱度时，两幅测试图像置乱度所得结果绝大多数都集中在 $S = 0.3333$ 附近，变化也比较小，均很难判断出置乱变换不同次数的效果衡量。且用式(7)衡量置乱度时，采用同一种置乱变换对不同的图像置乱时，所得置乱度结果在某些置乱次数时是相同的，无法衡量不同图像使用同一置乱变换的置乱效果。

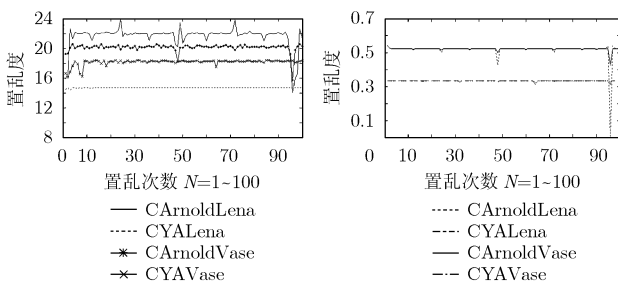


图 3 测试图应用式(4)所得置乱程度曲线

图 4 测试图应用式(7)所得置乱程度曲线

图 5(a)是 Lena 灰度图采用本准则所得置乱后图像的质心、形心图，图 5(b)是 Vase 灰度图采用本准则所得置乱后图像的质心、形心图，其中“*”、“+”分别表示 Arnold 置乱变换、亚仿射置乱后的图像，应用式(2)所求的质心，横纵坐标分别表示图像水平、垂直像素几何位置。

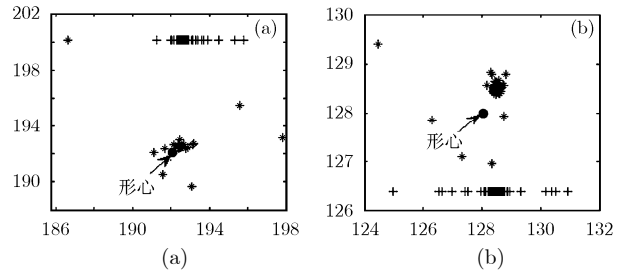


图 5 测试图置乱 $N = 1, 2, 3, \dots, 100$ 的质心、形心位置

从图 3 可明显看出，用本文提出的准则得到的结果变化要丰富的多，而用式(7)所得置乱程度则几乎是一条水平直线，两者相比，本文提出的准则更适宜于表达置乱程度。两者均能揭示置乱变换的周期，用式(7)计算的结果为零时，就可得出周期，而用本文提出的准则，则是与原图置乱度相同，则得出周期。Lena 图像、Vase 图像分别使用 Arnold 置乱变换、亚仿射置乱变换置乱 $N = 1, 2, 3, \dots, 100$ 次时，分别采用式(4)、式(7)所得的最大置乱度及对应次数如表 1 所示，置乱图像结果如图 6 所示：

由表 1 可知，将 Arnold 置乱变换和亚仿射置乱变换分别对 Lena 图像置乱 $N = 22, 23, 24, 25, 26$ 、 $N = 18, 19, 20, 21, 22, 23$ 和 Vase 图像置乱 $N = 37, 38, \dots, 42$ 、 $N = 20, 21, \dots, 25$ 的置乱结果及其频谱如图 7、图 8、图 9、图 10 所示。由图 7、图 8、图 9、图 10 很容易得出，Arnold 置乱变换比亚仿射置乱变换的置乱效果要好，这一结论也证明了基于质心的

表 1 测试图像最大置乱度结果

| | Lena 图像 | | Vase 图像 | |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Arnold 置乱 | 亚仿射置乱 | Arnold 置乱 | 亚仿射置乱 |
| 本文所提置乱度 | S1 = (23.926, 24) | S2 = (14.748, 20) | S5 = (20.599, 39) | S6 = (18.394, 22) |
| 文献[1]置乱度 | S3 = (0.5411, 1) | S4 = (0.3333, 1) | S7 = (0.5411, 1) | S8 = (0.3333, 1) |

注：表中括弧内数据，前一个表示置乱度，后一个表示对应的置乱次数

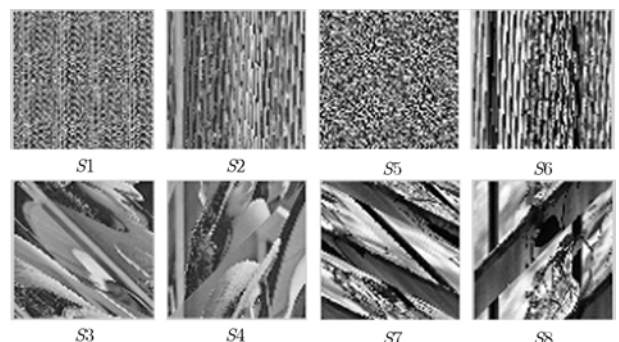


图 6 表 1 各个最大置乱度对应的置乱图像

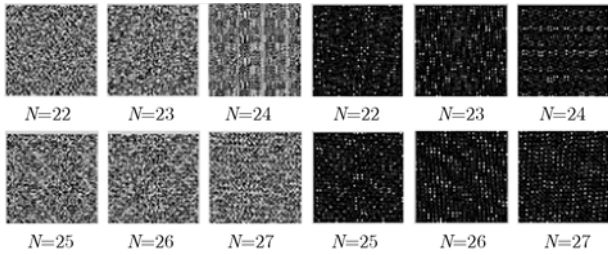


图 7 Lena 图像 Arnold 变换次数为 $N = 22, 23, \dots, 27$ 及其频谱示意图

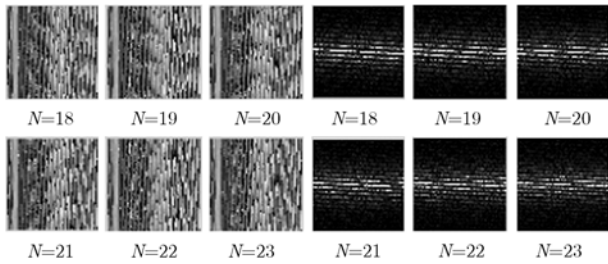


图 8 Lena 图像亚仿射变换次数为 $N = 18, 19, \dots, 23$ 及其频谱示意图

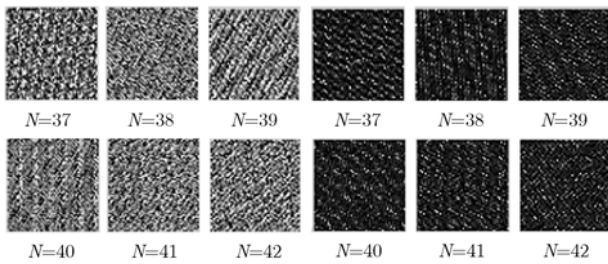


图 9 Vase 图像 Arnold 变换次数为 $N = 37, 38, \dots, 42$ 及其频谱示意图

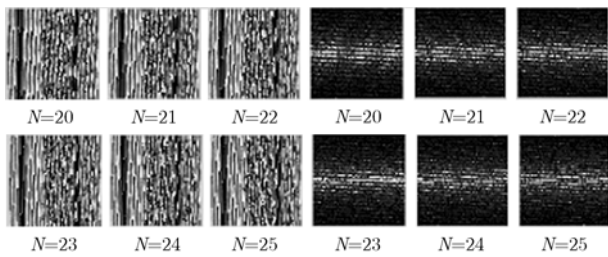


图 10 Vase 图像亚仿射变换次数为 $N = 20, 21, \dots, 25$ 及其频谱示意图

置乱度衡量准则是可以用刻画置乱变换的置乱好坏的, 因为 Arnold 变换所得置乱度比亚仿射变换所得置乱度要大、质心更靠近于形心, 这一点在图 5 中也得到反映。

因此, 根据本文提出的置乱度衡量准则, 本文认为 Arnold 置乱变换和亚仿射置乱变换对于两幅测试图像的置乱后的效果优劣次序为表 2 所示:

表 2 应用式(4)所得置乱效果表

| | Lena 图像 | Vase 图像 |
|-----------|---------|---------|
| Arnold 置乱 | 最好 | 次好 |
| 亚仿射置乱 | 次差 | 最差 |

4 结论

本文根据物理学中密度、质心概念出发, 结合数字图像本身的特点及图像置乱的物理过程, 提出了基于质心的置乱度衡量准则, 并以采用 Arnold 变换及亚仿射变换进行图像置乱为例进行了仿真。从图 6、图 7、图 8、图 9 中仿真结果可以看出: 采用本文提出的准则衡量, 可以得到 Arnold 变换比亚仿射置乱变换置乱效果更优; 还可以看出: 图像被置乱的越“乱”, 其能量分布也就越分散。

总结本文, 可以得出如下几点结论: (1)“数字图像可看作是密度呈任意分布的物体”是合理的; (2)在(1)的基础上提出的数字图像置乱度衡量准则是可行的; (3)用本文提出的置乱度衡量准则可以评价不同置乱算法的置乱性能优劣; (4)用该准则可以指导任一置乱算法在置乱多少次能达到较优的置乱效果。

参考文献

- [1] 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, 9: 75-81.
- [2] 柏森, 胡中豫等. 通信信息隐匿技术[M]. 国防工业出版社, 2005, 7: 96-107.
- [3] Bai Sen, Liao Xiao-feng, and Chen Jin-yu, *et al.*. Research on image scrambling degree evaluation method[C]. The Third Information Systems and Signal Processing, Chongqing, China, 2005: 74-79.
- [4] 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, 2006, 45(4): 484-487.
- [5] 商艳红, 郑铮, 王志巍. 数字图像置乱技术及置乱度分析[J]. 唐山师范学院学报, 2006, 28(2): 80-82.
- [6] 卢振泰, 黎罗罗. 一种新的衡量图像置乱程度的方法[J]. 中山大学学报, 2005, 6(增刊): 126-129.
- [7] 俞能海. 数字媒体信息隐藏理论与方法研究. [博士论文], 中国科技大学, 2004.
- [8] 徐江峰, 杨有. 加密图像置乱性能分析[J]. 计算机科学, 2006, 33(3): 110-113.
- [9] 齐东旭, 邹建成, 韩效宥. 一类新的置乱变换及其在图像信息隐藏中的应用[J]. 中国科学(E辑), 2000, 30(5): 440-447.

冯新岗: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为卫星数据传输与处理技术、图像信息隐藏。
 周 途: 男, 1965 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为卫星数据(图像)处理与传输技术、航天器通信技术。