





第19卷第6期（总第218期）

2014年6月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

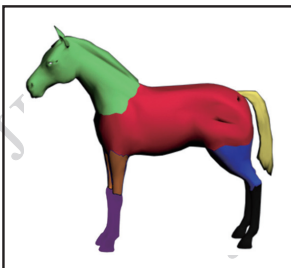
国内定价 50.00元



帧内复制粘贴视频伪造的盲检测(第825页)



基于流形学习的人体动作识别(第914页)



层次结构导向下的动画角色模型分割与标记(第955页)

综述

虹膜图像质量评价综述

李星光, 孙哲南, 谭铁牛

0813

图像处理和编码

帧内复制粘贴视频伪造的盲检测

杜振龙, 焦丽鑫, 李晓丽, 郭延文, 杨小健

0825

破损区域分块划分的图像修复

翟东海, 鱼江, 段维夏, 肖杰

0835

分布式视频编码中相关噪声分布的非参数估计

胡晓飞, 朱秀昌

0843

分数阶原始对偶去噪模型及其数值算法

田丹, 薛定宇, 杨雅婕

0852

结合感知特征和自然场景统计的无参考图像质量评价

贾惠珍, 孙权森, 王同罕

0859

图像置乱度评估的层次分析法

曹光辉, 胡凯, 张兴

0868

图像分析和识别

结合目标预测位置的压缩跟踪

罗会兰, 钟宝康, 孔繁胜

0875

标牌粘连字符自适应定位分割重建识别

洪涛, 梁伟建, 卢玉凤

0886

结合色度和纹理不变性的运动阴影检测

殷保才, 刘羽, 汪增福

0896

仿射不变的自适应局部线性嵌入

顾播宇, 孙俊喜, 李洪祚, 刘广文, 曹永刚

0906

基于流形学习的人体动作识别

王鑫, 沃波海, 管秋, 陈胜勇

0914

图像理解和计算机视觉

基于压缩感知理论的3维人脸快速重建

周大可, 吴子扬, 杨欣

0924

压缩感知跟踪中的特征选择与目标模型更新

石武祯, 宁纪锋, 颜永丰

0932

高动态场景的图像融合优化和实时应用

范逵, 周晓波

0940

计算机图形学

真实图像转换的水墨图像绘制模拟

陈添丁, 金炜炜, 陈英旦, 吴涤

0946

层次结构导向下的动画角色模型分割与标记

李琳, 陶涛, 刘晓平

0955

遥感图像处理

静止卫星图像热带气旋云系自动识别

耿晓庆, 李紫薇, 杨晓峰

0964

非下采样Contourlet域融合和参数化内核图割的SAR图像无监督水灾变化检测

李青松, 覃锡忠, 贾振红, 杨杰, 胡英杰

0971

地理信息技术

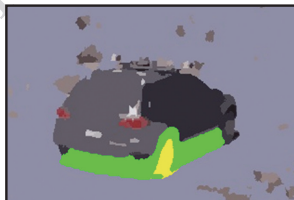
描述定性方向关系的复合表达模型

王中辉, 杨艳春

0979

CONTENTS

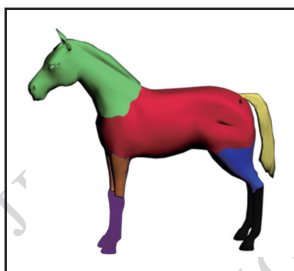
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Intraframe copy-paste forgery video blind detection based on dense SIFT flow(P825)



Human action recognition based on manifold learning(P914)



Animation character model segmentation and labeling approach under the guidance of hierarchical structures(P955)

Review

- Overview of iris image quality-assessment
Li Xingguang, Sun Zhenan, Tan Tieniu 0813

Image Processing and Coding

- Intraframe copy-paste forgery video blind detection based on dense SIFT flow
Du Zhenlong, Jiao Lixin, Li Xiaoli, Guo Yanwen, Yang Xiaojian 0825
- Image inpainting algorithm based on partition block of damaged region
Zhai Donghai, Yu Jiang, Duan Weixia, Xiao Jie 0835
- Non-parametric estimation for correlation noise distribution in distributed video coding
Hu Xiaofei, Zhu Xiuchang 0843
- Fractional-order primal-dual model and numerical algorithm for denoising
Tian Dan, Xue Dingyu, Yang Yajie 0852
- Blind image quality assessment based on perceptual features and natural scene statistics
Jia Huizhen, Sun Quansen, Wang Tonghan 0859
- Image scrambling degree evaluation based on analytic hierarchy process
Cao Guanghui, Hu Kai, Zhang Xing 0868

Image Analysis and Recognition

- Object tracking algorithm by combining the predicted target position with compressive tracking
Luo Huilan, Zhong Baokang, Kong Fansheng 0875
- Merged characters segmentation reconstruction and recognition of labels based on adaptive location
Hong Tao, Liang Weijian, Lu Yufeng 0886
- Moving shadow detection by combining chromaticity and texture invariance
Yin Baocai, Liu Yu, Wang Zengfu 0896
- Affine invariant adaptive locally linear embedding
Gu Boyu, Sun Junxi, Li Hongzuo, Liu Guangwen, Cao Yonggang 0906
- Human action recognition based on manifold learning
Wang Xin, Wo Bohai, Guan Qiu, Chen Shengyong 0914

Image Understanding and Computer Vision

- Fast 3D face reconstruction based on compressed sensing
Zhou Dake, Wu Ziyang, Yang Xin 0924
- Feature selection and target model updating in compressive tracking
Shi Wuzhen, Ning Jifeng, Yan Yongfeng 0932
- The optimization of image fusion and real-time application for HDR scenarios
Fan Kui, Zhou Xiaobo 0940

Computer Graphics

- Rendering simulation of real-image converting into chinese ink painting
Chen Tianding, Jin Weiwei, Chen Yingdan, Wu Di 0946
- Animation character model segmentation and labeling approach under the guidance of hierarchical structures
Li Lin, Tao Tao, Liu Xiaoping 0955

Remote Sensing Image Processing

- Tropical cyclone auto-recognition from stationary satellite imagery
Geng Xiaoqing, Li Ziwei, Yang Xiaofeng 0964
- Unsupervised detection of flood changes with SAR images combining nonsubsampling Contourlet domain fusion and parametric kernel graph cuts
Li Qingsong, Qin Xizhong, Jia Zhenghong, Yang Jie, Hu Raphael 0971

Geoinformatics

- Compound model for describing direction relations qualitatively
Wang Zhonghui, Yang Yanchun 0979

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)06-0868-07

论文引用格式: Cao G H, Hu K, Zhang X. Image scrambling degree evaluation based on analytic hierarchy process[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(6): 868-874. [曹光辉, 胡凯, 张兴. 图像置乱度评估的层次分析法[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(6): 868-874.] [DOI: 10.11834/jig.20140607]

图像置乱度评估的层次分析法

曹光辉^{1,2}, 胡凯², 张兴¹

1. 辽宁工业大学电子与信息工程学院, 锦州 121001; 2. 北京航空航天大学计算机学院, 北京 100191

摘要: **目的** 针对目前置乱度评估算法对同一图像置乱算法的评价结果存在多变性, 对多个置乱算法不能同时评估的问题, 提出基于层次分析法的图像置乱评估算法。**方法** 首先, 计算置乱矩阵元素分布的均匀性和随机性程度, 获得置乱像素位置分布的属性值, 保证了同一置乱算法置乱度的恒定性。然后应用层次分析法, 实现置乱度 2 维属性的整合和多个置乱算法的同时评估。**结果** 实验结果表明, 该算法得到的置乱度只与置乱算法本身和置乱迭代次数相关, 和置乱对象无关, 结果具有稳定性和有效性, 同时算法可给出任意数目置乱算法的置乱度排序。**结论** 本文算法实现了客观、公平、高效的图像置乱度评估, 不仅有利于信息隐藏领域设计者方便快速选择合适的置乱算法, 同时也为置乱算法的开发提供了有力的反馈工具。

关键词: 图像置乱评估; 层次分析法; 置乱矩阵; 理想均匀分布

Image scrambling degree evaluation based on analytic hierarchy process

Cao Guanghui^{1,2}, Hu Kai², Zhang Xing¹

1. Electronic & Information Engineering College, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China;

2. School of Computer Science and Technology, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: **Objective** At present, the algorithm of image scrambling degree evaluation has two problems. One is the instability of the evaluation result for the same scrambling algorithm, the other is the impossibility to evaluate many scrambling algorithms at the same time. In order to solve these two problems, a new evaluation algorithm for image scrambling is proposed based on analytic hierarchy process. **Method** At first, uniformity and randomness of scrambling matrix element distribution is calculated, thus, attribution values of scrambling pixels position distribution are acquired and the stability of the scrambling degree is guaranteed. Then, by applying analytic hierarchy process, the integration of two-dimensional attribution of scrambling degree and evaluation at the same time for many scrambling algorithms are implemented. **Result** Experiment results show that the scrambling degree of a scrambling algorithm is stable and valid, it only relates with the algorithm itself and the number of iterations of the scrambling, and has nothing to do with the scrambling object. Meanwhile, the sorting of scrambling degrees for any number of scrambling algorithms is also established. **Conclusion** The proposed algorithm is objective, fair and efficiency, it not only favors fast choosing suitable scrambling algorithm for the designer in information hiding field, but also provides powerful feedback tool for the development of scrambling algorithm.

Key words: image scrambling evaluation; analytic hierarchy process; scrambling matrix; ideal uniformity distribution

收稿日期: 2013-12-11; 修回日期: 2014-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(61073013); 辽宁工业大学科研基金项目(X201316); 辽宁省博士科研启动基金项目(20121045)

第一作者简介: 曹光辉(1974—), 男, 讲师, 2014 年于北京航空航天大学获计算机应用专业博士学位, 主要研究方向为混沌图像加密、图像置乱评估等。E-mail: caoguanghuineu@163.com

0 引言

图像置乱算法最早由 Bourbakis 等人^[1]于 1992 年提出,其思想源于扫描语言的规范和发展,致力于 2 维数字图像的加密。随着网络 and 多媒体技术的发展,图像置乱算法不仅在加密领域取得巨大进展^[2-3],而且在信息隐藏领域也得到广泛应用^[4-5],并发展成为该领域极其重要的组成部分。为了更好地满足该领域对图像置乱算法的需要,以及更好地指导置乱算法的设计,对众多置乱算法进行客观、公平、高效评估和选择成为目前重要的研究内容之一。

2001 年,柏森和曹长修在中国第三届信息隐藏学术研讨会上首次提出和阐述图像置乱程度评估这一研究课题^[6]。此后,众多大学和研究机构开始着手这一富有挑战性课题。目前,图像置乱度评估可分为:基于置乱分布均匀性度量、基于置乱分布随机性度量、以及基于置乱分布均匀性和随机性混合度量。基于置乱分布均匀性度量认为理想图像置乱,置乱像素分布具有均匀性。并依据置乱像素在均匀性方面接近均匀分布的程度,计算置乱算法的置乱度。依据度量置乱像素分布均匀性程度的原理,该类方法有:基于信号处理中的 Walsh 变换^[7],物理学中的密度^[8]、图论中的偶图^[9]、统计学中的卡方分布^[10]、以及灰度级出现频数法^[11]等。基于置乱分布随机性度量认为图像置乱主要与像素相互位置关系的改变有关,并依据这一思想,提出采用像素位置一阶邻域欧氏距离范数的图像置乱度评价方法^[12]。考虑到置乱算法的置乱度包含置乱分布均匀性和随机性两个属性,基于混合均匀性和随机性的图像置乱评估方法被提出。目前,典型的算法有基于信息熵方法^[13]和基于灰度差与信息熵的方法^[14]。前者依据信息熵度量置乱分布均匀性;依据每个分块互为相邻像素差值的平均值度量置乱随机性,然后局部随机性作为分块信息熵的加权系数实现图像置乱度混合度量。后者首先计算每个像素的八邻域像素差,然后通过整个图像像素差的均值和方差反映随机性,并通过信息熵反映整体均匀性。

尽管面向信息隐藏需求的图像置乱评估算法已经取得很好的发展,但仍存在下列问题:

1) 在计算置乱度的属性值时,以像素值分布为度量对象,由于受到不同位置相同像素值以及样本图像像素值初始分布不同的影响,置乱度计算结果

有多变性;

2) 现有的混合置乱度评价方法,置乱分布均匀性和随机性维度整合方法没能充分体现出均匀性和随机性的平等地位;

3) 目前所有置乱评估算法,只能实现对一个置乱算法进行评估。

针对上述问题,提出以像素位置为度量对象,基于层次分析法(AHP)^[15]图像置乱评估算法。该方法的主要思想是:图像置乱算法的本质是改变像素位置,像素值本身并不发生变化。因此,置乱像素位置的分布状况能够反映置乱算法的置乱能力,也就是说度量置乱像素位置均匀性和随机性的状况可以得到置乱算法的置乱度。而像素位置变化信息能够完全在置乱矩阵中体现,因此,可以把置乱矩阵元素的均匀性和随机性属性值作为像素位置的属性信息,进而保证置乱算法的属性信息具有唯一性。在此基础上,借助层次分析法,实现了均匀性和随机性这两个属性的平等地位,并实现了多个置乱算法同时评估。

1 基础元素及相关定义

除特殊标注外,本文所有矩阵大小都是 m 行 n 列。

定义 1 遍历矩阵 R 。矩阵 R 中的元素都在集合 $\{1, 2, \dots, m \times n\}$ 中,如果 $R(i, j) = R(i', j')$, 必有 $i = i', j = j', i \in [1, m], j \in [1, n]$ 。

定义 2 主遍历矩阵 A 。

$$A = (a_{i,j})_{m \times n}, i \in [1, m], \\ j \in [1, n], a_{i,j} = (i-1) \times n + j$$

定义 3 置乱矩阵。置乱算法对主遍历矩阵作用密钥指定次数得到的矩阵。

定义 4 行(列)值矩阵。行(列)值矩阵的元素,表示图像(或遍历矩阵)被置乱后,当前位置的像素(元素)来源于置乱前该像素(或元素)所在的行(或列)值。

定义 5 行值(列值)频数。 A 为主遍历矩阵, B 为置乱矩阵, C 为把矩阵 B 分解得到的行值矩阵, D 为把矩阵 B 分解得到的列值矩阵。 $f_X(v)$ (X 代表矩阵 C 或 D) 表示矩阵 X 中元素值为 v 的元素的个数, $\|X\|$ 表示矩阵 X 中所有元素数目,则称 $f_X(v)$ 与 $\|X\|$ 的比值为矩阵 X 中元素值 v 出现的频数 $p_X(v) = f_X(v) / (m \times n)$, $v = 1, \dots, m$ (或 $v = 1, \dots, n$)。

定义6 理想均匀分布。在矩阵 X 中任取和其相同形状的子区域 E , 如果 E 中任取元素值 v 出现的频数 $p(v)$ 与它在 X 中出现的频数相同, 即 $f_E(v)/\|E\| = f_X(v)/(m \times n)$, 则称矩阵 X 中元素分布是理想均匀分布。

2 算法概述

图像置乱度评估层次分析法的整体实现过程为: 首先, 生成和指定图像大小相同的主遍历矩阵; 接着, 应用欲评估的图像置乱算法置乱主遍历矩阵, 生成置乱矩阵; 然后, 通过置乱位置均匀性和随机性度量算法得到置乱算法的均匀性和随机性指标; 最后, 通过层次分析法完成多置乱算法置乱度评估。从图1可见, 整个算法核心部分包括置乱位置均匀性度量、置乱位置随机性度量, 以及对这两个属性进行整合并实现多置乱算法评估的层次分析法。

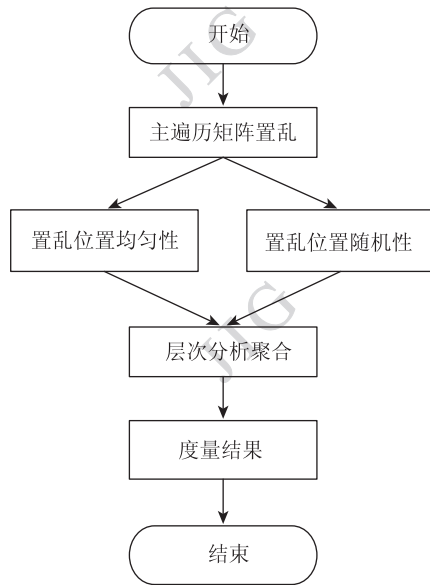


图1 基于层次分析法的图像置乱评估框图

Fig. 1 Block diagram of image scrambling evaluation based on analytic hierarchy process

3 置乱位置分布属性度量

置乱(像素)位置分布属性度量包括均匀性和随机性度量, 方法是采用与图像具有相同大小的置乱矩阵作为基础数据源, 依据置乱位置理想均匀分布和置乱位置相关性的思想度量置乱矩阵元素分布均匀性和随机性的程度, 进而得到置乱算法属性值。

3.1 置乱位置均匀性度量

置乱位置分布的均匀性度量算法如下:

1) 用置乱算法置乱主遍历矩阵 A , 得到置乱矩阵 $B = (b_{i,j})_{m \times n}$ 。

2) 把置乱矩阵 B 分解成行值矩阵 C 和列值矩阵 D , 分解方法是: 把 C 矩阵中对应于 B 矩阵中元素值为 b 的位置用 i 赋值; 把 D 矩阵中对应于 B 矩阵中元素值为 b 的位置用 j 赋值。变量 i, j 计算公式为

$$\begin{cases} i = \text{Int}\left(\frac{b}{n}\right) + 1 \\ j = b - \text{Int}\left(\frac{b}{n}\right) \times n \end{cases} \quad (1)$$

3) 分块置乱均匀度。在行值矩阵 C 中, 随机选取 k 块大小为 E 的子区域; 在列值矩阵 D 中取和矩阵 C 中同样大小、同样位置、同样数量的子区域。依据式(2), 计算每一分块的置乱均匀度。

$$\begin{cases} \text{row}(i) = 1 - 1/2 \sum_v |f_{E_i}(v)/\|E_i\| - f_C(v)/(m \times n)| \\ \text{col}(i) = 1 - 1/2 \sum_v |f_{E_i}(v)/\|E_i\| - f_D(v)/(m \times n)| \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\text{row}(i)$ 代表行值矩阵第 E_i 块置乱均匀度, $\text{col}(i)$ 代表列值矩阵第 E_i 块置乱均匀度, $i \in [1, k]$ 。

4) 整体置乱均匀性。计算随机选择的 k 块子区域置乱均匀度平均值

$$\text{deg}^u = \frac{1}{2k} \sum_{i=1}^k (\text{row}(i) + \text{col}(i)) \quad (3)$$

这样得到的数值 deg^u 是置乱位置均匀分布性能指标。该算法与文献[11]的主要区别在于, 文献[11]对置乱图像的像素值进行频数统计, 而本文算法借助置乱矩阵元素实现对像素位置分布进行频数统计。

3.2 置乱位置随机性度量

与置乱位置分布均匀性度量一样, 借助对置乱矩阵元素分布的随机性度量以获取置乱像素位置随机性指标。考虑到随机性和相关性的关系, 通过计算置乱矩阵八邻域元素的相关性间接得到置乱矩阵元素分布的随机性。

置乱位置随机性度量算法如下:

1) 用置乱算法置乱主遍历矩阵 A , 得到置乱矩阵 $B = (b_{i,j})_{m \times n}$;

2) 把置乱矩阵 B 分解成行值矩阵 C 和列值矩阵 D ;

3) 分别在行值和列值矩阵中计算元素8邻域距离

$$\begin{cases} dr(i,j) = \sum_{s,t} |c_{i,j} - c_{s,t}| \\ dc(i,j) = \sum_{s,t} |d_{i,j} - d_{s,t}| \end{cases} \quad (4)$$

$$i \in [2, m-1], j \in [2, n-1]$$

$$s = \{i-1, i, i+1\}, t = \{j-1, j, j+1\}$$

式中, dr 、 dc 分别为行矩阵和列矩阵中位置 (i, j) 处元素的8邻域距离和;

4) 计算置乱随机性, 即

$$deg^r = \sum_{i=2}^{m-1} \sum_{j=2}^{n-1} (dr(i,j) + dc(i,j)) / ((m-2) \times (n-2) \times (m+n-2)) \quad (5)$$

deg^r 为置乱位置随机性指标, 数值越大, 相关性越弱, 置乱随机性越好。类似思想见文献[12]。

4 基于 AHP 的图像置乱度评估和选择

第3节实现了置乱像素位置分布属性度量, 也就是获得了置乱算法置乱均匀性和随机性属性值, 其结果具有唯一性。在获取置乱算法置乱分布均匀性和随机性的条件下, 通过加权平均就可以实现单一图像置乱算法的置乱度评估, 这也是目前置乱度评估的发展状况。为了实现对多置乱算法同时评估, 给出基于层次分析法的图像置乱度评估。

层次分析法, 由美国运筹学家托马斯·塞蒂在1977年国际数学建模会议^[15]上正式提出, 是一套复杂递阶层次结构的评价系统。当进行多目标、多准则以及多领域专家决策时, AHP 能够用来解决各种量化和非量化、理性与非理性的决策问题。当把多个置乱算法作为多目标时, 层次分析法能够实现多置乱算法同时评估。基于此, 本文设计了基于 AHP 的图像置乱评估和选择算法:

1) 建立图像置乱评估算法的递阶层次结构。置乱评估系统的递阶层次结构由目标层、准则层以及方案层组成。其中, 目标层包含多置乱算法的置乱度评估结果; 准则层包括置乱均匀性和随机性属性; 方案层由待评估的若干图像置乱算法组成。如图2所示。

2) 构造置乱度判断矩阵。

(1) 对于准则层, 当置乱算法用于信息隐藏领域时, 置乱位置分布的均匀性和随机性具有同等重要的地位, 因此, 准则层的属性权重比为(均匀性: 随机性) = (1:1)。

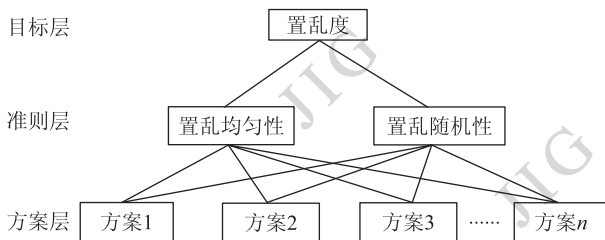


图2 置乱评估系统层次结构

Fig. 2 Hierarchy structure of scrambling evaluation system

(2) 对于方案层, 由于各个方案相对于准则层的各个属性值已由第3节算法求出, 故不再需要判断矩阵。

3) 单准则下的排序。对于准则层, 由于只有两个属性, 故判断矩阵是二阶, 具有一致性。但上文给出的准则层的属性权重比是它所从属的目标层置乱度的非一致化排序向量。对于方案层, 各个置乱方案相对于准则层的属性值已由置乱位置均匀性和随机性度量算法求得, 但它们也是非一致化排序向量。而层次综合需要一致化排序向量, 设非一致化排序向量为 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$, 则一致化公式为

$$b_i = \omega_i / \sum_{j=1}^n \omega_j, i = 1, \dots, n \quad (6)$$

由此形成的一致化向量为 $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 。该一致化向量是各个层次元素单准则下的排序向量。

4) 层次总排序。准则层包含均匀性 C_1 和随机性 C_2 两个元素, 设其相对于目标层的权数分别为 c_1, c_2 。方案层包含 n 个方案, 记为 $D_1, D_2, \dots, D_n$, 它们对于上一层因素 $C_j (j=1, 2)$ 的单准则排序权值分别为 $b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{nj}$ (如 D_k 和 C_j 无联系时, $b_{kj} = 0$), 则方案层对目标层合成权值矢量 $d = [d_1, d_2, \dots, d_n]^T$, 计算公式为

$$d_k = \sum_{j=1}^2 b_{kj} \times c_j, k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

即 $d = B \times C$ 其中 $B = (b_{ij})_{n \times 2}$, $C = (c_1, c_2)$ 。这样得到的权值向量 d 就是 n 个置乱方案依置乱度的合成排序矢量。每个分量 d_i 代表第 i 个方案在这一组置乱算法中所具有的一致化置乱度。

5 仿真实验和结果分析

为了验证本文设计的图像置乱评估方案的有效

性,对基于 Arnold 变换图像置乱^[16]、基于 Standard 映射图像置乱^[17]、基于混沌排序图像置乱^[2]、混沌加权抽样排序图像置乱^[18]这 4 种置乱方法进行置乱度评估。

依据第 4 节理论,4 种置乱方案的评估算法如下:

1)建立递阶层次结构。当图 2 中的方案层由基于 Arnold 变换、基于 Standard 映射置乱、混沌排序置乱和混沌加权抽样排序置乱这 4 种图像置乱方

案构成时,适用于这 4 种置乱方案评估系统的递阶层次结构被建立。

2)单层次排序向量:

(1)对于准则层,依据属性权重比,对应的一致化排序向量为(0.5,0.5)。

(2)对于方案层,由置乱位置的均匀性和随机性度量算法得到的各置乱方案置乱均匀性和随机性以及对应的一致化排序向量各分量值(*sv*)见表 1、表 2。

表 1 各方案置乱均匀性和对应排序向量
Table 1 Uniformity and sorting vector

置乱方案	算法迭代 2 次		算法迭代 20 次		算法迭代 28 次	
	均匀度	<i>sv</i>	均匀度	<i>sv</i>	均匀度	<i>sv</i>
Arnold	0.365 2	0.207 3	0.822 3	0.331 7	0.830 1	0.330 7
Standard	0.129 1	0.073 3	0.386 9	0.156 1	0.413 9	0.164 9
文献[2]	0.631 4	0.358 5	0.634 2	0.255 9	0.632 2	0.251 8
文献[18]	0.635 6	0.360 9	0.635 3	0.256 3	0.634 1	0.252 6

表 2 各方案置乱随机性和对应排序向量
Table 2 Randomness and sorting vector

置乱方案	置乱迭代 2 次		置乱迭代 20 次		置乱迭代 28 次	
	随机量	<i>sv</i>	随机性	<i>sv</i>	随机性	<i>sv</i>
Arnold	0.029 3	0.041 3	0.399 9	0.341 3	0.360 4	0.306 0
Standard	0.009 9	0.013 9	0.102 7	0.087 7	0.148 8	0.126 3
文献[2]	0.337 0	0.474 6	0.334 7	0.285 7	0.334 5	0.284 0
文献[18]	0.333 9	0.470 2	0.334 3	0.285 3	0.334 1	0.283 7

3)层次综合。在步骤 2)中给出了单准则层次下,各层次元素相对于所属准则的排序向量。这里,利用合成排序式(7),计算 4 种置乱方案对于置乱度准则的排序向量,结果如下:

(1)算法迭代 2 次

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.207\ 3 & 0.041\ 3 \\ 0.073\ 3 & 0.013\ 9 \\ 0.358\ 5 & 0.474\ 6 \\ 0.360\ 9 & 0.470\ 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.124\ 3 \\ 0.043\ 6 \\ 0.416\ 5 \\ 0.415\ 5 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix}$$

(*a*₁)代表 Arnold 置乱度,(*a*₂)代表 Standard 置乱度,(*a*₃)代表混沌排序图像置乱度,(*a*₄)代表加权抽样排序图像置乱度(下同)。

(2)算法迭代 20 次

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.331\ 7 & 0.341\ 3 \\ 0.156\ 1 & 0.087\ 7 \\ 0.255\ 9 & 0.285\ 7 \\ 0.256\ 3 & 0.285\ 3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.336\ 5 \\ 0.121\ 9 \\ 0.270\ 8 \\ 0.270\ 8 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix}$$

(3)算法迭代 28 次

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.330\ 7 & 0.306\ 0 \\ 0.164\ 9 & 0.126\ 3 \\ 0.251\ 8 & 0.284\ 0 \\ 0.252\ 6 & 0.283\ 7 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.318\ 4 \\ 0.145\ 6 \\ 0.267\ 9 \\ 0.268\ 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix}$$

从上述计算结果可见,本文设计的基于层次分析法的图像置乱度评估方案,通过对置乱矩阵属性的度量,实现了置乱度评估结果的唯一性,并能够很好地实现若干置乱算法的同时比较。进一步观察实验结果可以得出,置乱算法的置乱程度不仅和算法本身相关还和算法置乱次数密切相关。

6 和传统置乱度比较

为了对传统以像素值为测试对象的图像置乱评估算法和本文以置乱位置为测试对象的置乱度评估方法加以比较,下面以文献[11]为例进行阐述。图3给出实验使用的样本图像,对应该样本图像的实验结果如表3所示。

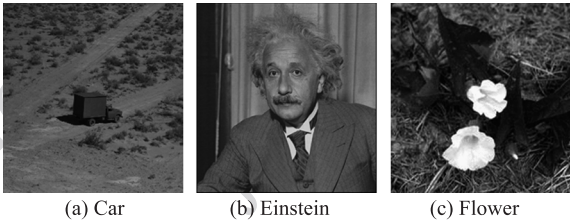


图3 测试样本图像
Fig.3 Sample test images

表3给出了文献[11]对两个相近置乱算法置乱度的计算结果。从获得的实验数据可见,在相同置乱次数下,同一置乱算法,使用不同图像作为数据源,得到的置乱度不同;不同置乱算法之间的置乱度比较结果,具有不稳定性。本文同样对以像素值为测试对象的很多算法,如基于 Walsh 变换图像置乱度评价、基于信息熵图像置乱程度评价等进行了实验,同样得到同一置乱算法置乱度不唯一、不同置乱

表3 两种置乱方法置乱度

Table 3 Scrambling degree of two scrambling algorithms					
测试 图像 图 3	置乱 算法	置乱度评估结果			
		置乱 2 次	置乱 20 次	置乱 30 次	置乱 50 次
(a)	文献[2]	0.729 6	0.723 2	0.720 7	0.721 8
	文献[18]	0.718 1	0.718 4	0.705 6	0.723 5
(b)	文献[2]	0.666 4	0.674 1	0.668 4	0.667 1
	文献[18]	0.663 4	0.659 7	0.670 5	0.674 1
(c)	文献[2]	0.700 4	0.702 1	0.719 3	0.703 2
	文献[18]	0.700 9	0.710 7	0.711 4	0.708 4

算法置乱度比较结果不稳定的结论。分析原因,这些不足主要是不同位置相同像素值的影响以及图像像素值初始分布状态不同引起的。另外,该实例进一步证明了提出的基于置乱位置评估图像置乱算法的必要性和正确性。

7 结 论

提出了面向信息隐藏领域大量图像置乱方案的公平、客观、高效评估算法。通过以置乱矩阵为基础数据源,度量置乱位置分布的均匀性和随机性,不仅避免了不同位置相同像素值对置乱度评估结果的影响,还避免了图像像素值初始分布状态不同对评估结果的影响,保证了置乱度评价结果具有唯一性。通过应用 AHP,实现了多置乱方案条件下置乱度的评估和排序。该算法的设计不仅有利于决策人员依据实际需要,选择合适的置乱算法,而且能够为置乱算法的设计提供反馈。此外,实验发现置乱度不仅和算法本身相关,还与置乱次数紧密相关。

参考文献 (References)

[1] Bourbakis N, Alexopoulos C. Picture data encryption using scan patterns[J]. Pattern Recognition, 1992, 25(6): 567-581.

[2] Ye G D. Scrambling encryption algorithm of pixel bit based on chaos map[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(5): 347-354.

[3] Wang X Y, Teng L, Qin X. A novel color image encryption algorithm based on chaos[J]. Signal Processing, 2012, 92(2): 1101-1108.

[4] Lin K T. Information hiding based on binary encoding methods and pixel scrambling techniques[J]. Applied Optics, 2012, 49(2): 220-228.

[5] Rahman S M M, Hossain M A, Moufta H, et al. Chaos-cryptography based privacy preservation technique for video surveillance[J]. Multimedia Systems, 2012, 18(2): 145-155.

[6] Bai S, Cao C X. Research of image scrambling degree[C] // Workshop of 3rd China Information Hiding. Xi'an, China: Xidian University Press, 2001, 9: 75-81. [柏森, 曹长修. 图像置乱程度研究[C] // 全国第三届信息隐藏全国学术研讨会. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001, 9: 75-81.]

[7] Bai S, Liao X F, Chen J Y, et al. Research on image scrambling degree evaluation method[C] // Proceedings of Information Systems and Signal Processing. Changchun, China: SPIE, 2005, 6041: 60410E(1-5).

[8] Feng X G, Zhou Q. A novel scrambling degree rule of digital image based on center of mass[J]. Journal of Electronics & Infor-

- mation Technology, 2008, 30(11): 2684-2687. [冯新岗, 周诤. 基于质心的数字图像置乱度衡量准则[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(11): 2684-2687.]
- [9] Fu A Y, Zeng Q W, Xu Z H, et al. Binary image scrambling evaluation method based on the mean square deviation and the bipartite graph [C] // International Symposium on Computer, Communication, Control and Automation. Tainan, Taiwan, China: IEEE Computer Society, 2010, 1: 237-239.
- [10] Li Z W, Yang X Y. A new measure of image scrambling degree based on statistical hypothesis testing [C]//Proceedings of the 3rd International Congress on Image and Signal Processing. Yantai, China: IEEE Computer Society, 2010, 5: 2409-2413.
- [11] He C X, Tian S H. Digital image scrambling degree evaluation method based on frequency of gray levels[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(2): 220-228. [贺楚雄, 田绍槐. 基于灰度级出现频数的数字图像置乱程度衡量方法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(2): 220-228].
- [12] Liu J S, Zhu C Y, Wang Y M, et al. Image scrambling effect evaluation method based on position correlation[J]. Computer Engineering, 2010, 36(24): 208-210. [刘家胜, 朱灿焰, 汪一鸣, 等. 基于位置相关性的图像置乱效果评价方法[J]. 计算机工程, 2010, 36(24): 208-210.]
- [13] Zhang H X, Lv H, Weng X J. Image scrambling degree valuation method based on information entropy[J]. Journal of Circuits and Systems, 2007, 12(6): 95-98. [张华熊, 吕辉, 翁向军. 基于信息熵的图像置乱程度评价方法[J]. 电路与系统学报, 2007, 12(6): 95-98.]
- [14] Li X J. A new measure of image scrambling degree based on grey level difference and information entropy [C]//Proceedings of International Conference on Computational Intelligence and Security. Suzhou, China: IEEE Computer Society, 2008, 1: 350-354.
- [15] Thomas L S. A scaling method for priorities in hierarchical structures[J]. Journal of Mathematical Psychology, 1977, 15(3): 234-281.
- [16] Ding W, Qi D X. Digital image transformation and information hiding and disguising technology[J]. Chinese Journal of Computers, 1998, 21(9): 838-843. [丁玮, 齐东旭. 数字图像变换及信息隐藏与伪装技术[J]. 计算机学报, 1998, 21(9): 838-843.]
- [17] Lian S, Sun J, Wang Z. A block cipher based on a suitable use of chaotic standard map[J]. Chaos Solitons & Fractals, 2005, 26: 117-129.
- [18] Cao G H, Hu K. Image scrambling algorithm based on chaotic weighted sampling theory and sorting transformation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(1): 67-72. [曹光辉, 胡凯. 基于混沌序列加权抽样和排序变换的图像置乱[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(1): 67-72.]