

一种自适应彩色数字图像盲隐藏方法

刘建东

(北京石油化工学院信息工程学院, 北京 102617)

摘要 提出了一种将 24 位真彩色图像隐藏于另一幅 24 位真彩色图像的新方法。该方法采用硬 c 均值聚类及多分辨率彩色量化技术, 实现了彩色图像的自适应盲隐藏。它具有隐藏信息量大、恢复图像的误差小及使用方便的特点, 对常见的图像处理与攻击具有一定的抵抗能力。另外, 通过超混沌的置乱技术, 使隐藏到载体图像中的数据有非常好的伪随机特征, 具有很高的安全性。该方法在 PC 机上实验, 得到较好的实验结果。

关键词 彩色图像 信息隐藏 硬 c 均值聚类 超混沌 彩色量化

中图分类号: TP391 TP309 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2006)10-1395-05

An Adaptive Color Digital Image Blind Hiding Algorithm

LIU Jian-dong

(Department of Information Engineering, Beijing Institute of Petro-chemical Technology, Beijing 102617)

Abstract In the past, most image hiding techniques were applied only to gray scale images. Now, many valuable images are color images. Thus, it has become important to be able to hide color images. In this paper, an adaptive color digital image blind hiding algorithm is presented. A color scale secret image can be hidden in one color carrier image with the schemes. To increase the quantity of the embedded data, the hard c -means cluster and color quantization technology based on discriminative palettes can be used in the algorithm. In particular, in order to further enhance the security and robustness of the hidden image, the scrambling technology based on hyperchaotic mapping can be used as pre-process of color image information hiding. The coupled map lattices mapping is used to generate hyperchaotic sequences, and the secret image is encrypted by changed image pixels value and image pixels position. The initial parameters of hyperchaotic mapping can act as the private keys. The experimental results are satisfactory.

Keywords color image, information hiding, hard c -means cluster, hyperchaos, color quantization

1 引言

信息隐藏技术就是将信息隐藏于数字化媒体之中, 来实现隐藏传输、存储和身份识别等功能。目前大多数数据隐藏技术都和图像有关, 而且多数隐藏技术仅仅适用于灰度图像, 彩色图像由于其数据量大, 在网络传输中, 将其隐藏常较困难。由于许多有价值的图像是彩色图像, 因而把图像隐藏技术应用于彩色图像当中是非常重要的^[1]。

提出了一种将 24 位真彩色图像隐藏于另一幅

24 位真彩色图像的新方法。为了叙述方便, 称被保护的图像为秘密图像, 作为载体的图像称为载体图像, 而嵌入秘密图像后的载体图像称为混合图像。在已有的数字图像自适应隐藏技术中, 普遍采用融合技术将一幅图像隐藏到另一幅图像中^[2], 这种融合算法在恢复秘密图像时, 需要将原始的载体图像和隐藏信息后的混合图像进行比较, 才能通过计算恢复秘密图像, 这就给解密秘密图像带来不便。本文依据人类视觉系统特性, 利用载体图像每个像素 R, G, B 分量的重要位平面 (最左面的 4, 5, 3 位) 对载体图像局部特征进行硬 c 均值聚类 (聚类类别数

基金项目: 北京市优秀人才培养专项经费资助 (20042D0500508)

收稿日期: 2005-03-03; 改回日期: 2005-09-21

第一作者简介: 刘建东 (1966 ~), 男, 副教授。1995 年于天津大学获理论电工专业硕士学位。主要研究领域是混沌理论及其应用、多媒体信息加密与信息隐藏等。E-mail: liujiandong@bipt.edu.cn

为 3),由聚类结果决定每个像素的信息隐藏深度,并对秘密图像应用多分辨率调色板进行彩色量化,再把量化得到的秘密图像的索引信息经超混沌置乱处理后,自适应地嵌入到载体图像的不重要位中,提取秘密信息时不需要载体图像。该方法从灰度图像隐藏扩展到了彩色图像隐藏,很好地保护了载体图像和秘密图像的质量及秘密图像的安全。

2 载体图像的硬 c 均值聚类

人眼对图像平滑区的噪声较敏感,而对较复杂的纹理区的噪声不敏感。因此,有必要依据载体图像位置特征,自适应地对隐藏深度进行调节。通过聚类分析,把载体图像像素按其邻域内复杂程度的不同划分成若干个子集,使复杂程度相似的像素尽可能归为一类。同一聚类类别中的像素,有相同的信息嵌入深度,复杂程度越高的聚类类别,其信息嵌入深度越大。

图像的每一个位平面对图像能量的贡献是不同的,载体图像每个像素的 R 、 G 、 B 分量最左面的 4, 5, 3 位集中了图像的大部分能量,称其为图像的重要位,除此之外,称为图像的不重要位。图像的重要位用于信息嵌入深度的判据,而不重要位用于嵌入秘密信息。这样,在信息提取时就可以直接利用混合图像求出秘密信息的潜入深度,而不需要载体图像,从而实现了秘密信息的盲提取。

给定载体图像 X ,将其像素 R 、 G 、 B 分量的不重要位(右边的 4, 3, 5 位)置零,得到图像 X' 。设 $N(i, j)$ 为图像 X' 像素 (i, j) 周围的 3×3 邻域。亮度 y 与 R 、 G 、 B 彩色分量的关系是

$$y_{i,j} = 0.587G + 0.299R + 0.114B$$

为了对图像的局部特征进行聚类,先计算出图像 X' 像素的亮度值 $y_{i,j}$,并依据人类视觉系统特性,考察如下几个特征:

(1) 梯度敏感值,用于衡量图像在所有方向变化的敏感度

$$G = \frac{1}{8} \sum_{k=1}^1 \sum_{t=1}^1 |y_{i+k,j+t} - y_{i,j}| \quad (k \text{ 和 } t \text{ 不同时为零})$$

(2) 方均根敏感值,决定子图 $N(i, j)$ 的纹理

$$T = \left[\frac{1}{9} \sum_{k=1}^1 \sum_{t=1}^1 [y_{i+k,j+t} - B]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

(B 为子图 $N(i, j)$ 的亮度均值)

(3) 熵敏感值,用于对子图的不确定性进行

度量

$$E = - \sum_{N(i,j)} p_{ij} \cdot \log p_{ij}$$

其中, y_{ij} 表示像素 (i, j) 的亮度值, p_{ij} 定义如下

$$p_{ij} = y_{ij} / \sum_{N(i,j)} y_{ij}$$

这样每个像素点就对应了 3 个值,由它们构成

了一个加权模式向量

$$x_k = (G, \alpha T, \beta E)$$

将图像 X' 的所有像素点看作是 3 维空间中的一个元素,对其进行硬 c 均值聚类分析就是要产生 X' 的 c 划分,得到 c 个子图像 X'_1, X'_2, \dots, X'_c 。用隶属函数 $\mu_{ik} = \mu_{x_i}(x_k)$ 表示 x_k 与 $X'_i (1 \leq i \leq c)$ 的隶属关系,则硬 c 划分中 μ_{ik} 为 X'_i 的特征函数,显然有 $\mu_{ik} \in \{0, 1\}$ 。由 c 个特征函数值构成的矩阵 $U = [\mu_{ik}]$ 称为划分矩阵。硬 c 均值聚类算法如下:

初始化:给定聚类类别数 $c = 3$,设定迭代停止阈值 ε ,把图像 X' 的所有像素点对应的加权模式向量 x_k 以方均根敏感值 T 为关键字由小到大进行排序,将排序结果等分成 3 组,求其平均值作为初始聚类原型模式 $P^{(0)}$,并设置迭代计数器 $b = 0$ 。

(1) 计算或更新划分矩阵 $U^{(b)}$:

$$\mu_{ik}^{(b)} = \begin{cases} 1 & d_{ik}^{(b)} = \min_{1 \leq r \leq c} \{d_{rk}^{(b)}\} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中, $d_{ik}^{(b)}$ 为 x_k 与第 i 类的聚类原型 $p_i^{(b)}$ 之间的距离。

(2) 更新聚类原型模式矩阵 $P^{(b+1)}$:

$$p_i^{(b+1)} = \frac{\sum_{k=1}^n \mu_{ik}^{(b+1)} x_k}{\sum_{k=1}^n \mu_{ik}^{(b+1)}} \quad i = 1, 2, \dots, c$$

(3) 如果 $\|P^{(b)} - P^{(b+1)}\| < \varepsilon$,则算法停止并输出划分矩阵 U 和聚类原型 P ,否则,令 $b = b + 1$,转向步骤 1。

对图像 Baboon (120×120) 和 Lena (120×120) 分别进行了硬 c 均值聚类,取加权模式向量的加权值 $\alpha = 1, \beta = 10$,迭代停止阈值 $\varepsilon = 0.05$ 。聚类结果见表 1 和表 2。特征敏感值越大,表明该类子图像越能容忍视觉上的误差。从表 1 和表 2 得知,信息隐藏能力最强的为 V_3 类,次之为 V_2 类,最弱的为 V_1 类。利用划分矩阵 U ,对原始图像进行划分,得到相应的分类图(图版 I 图 1),在 V_1 类分类图的每个像素中嵌入 8bit 秘密信息,在 V_2 类分类图的每个像素中嵌入 10bit 秘密信息,在 V_3 类分类图的每个像素

表 1 图像 Lena 聚类原型模式

Tab.1 Clustering prototype for Lena image

聚类类别	梯度敏感值	熵敏感值	方均根敏感值
V_1	4.047 2	1.306 89	4.187 6
V_2	17.803 7	3.367 16	17.917 0
V_3	42.912 1	4.488 53	41.643 1

表 2 图像 Baboon 聚类原型模式

Tab.2 Clustering prototype for Baboon image

聚类类别	梯度敏感值	熵敏感值	方均根敏感值
V_1	6.017 4	1.209 7	7.084 8
V_2	17.898 1	2.983 8	17.453 29
V_3	36.825 36	3.889 5	29.931 93

中嵌入 12bit 秘密信息,实验得知,120 × 120 的 Baboon 图像比同样大小的 Lena 图像可以多嵌入 11 621bit 的秘密信息,可见载体图像越复杂,其允许隐藏信息的容量越大。

3 秘密图像的彩色量化

3.1 多分辨率调色板设计

用调色板对秘密图像进行彩色量化,进而减少秘密图像的数据量。首先建立一个不依赖于秘密图像及载体图像的通用的多分辨率调色板。多分辨率调色板生成过程如下:

(1) 24 位真彩色图像的像素包含 R、G、B 3 个分量,取 3 个分量的代表值为

$$\text{Value } R[i] = (256/16)i + 8 \quad 0 \leq i < 16;$$

$$\text{Value } G[i] = (256/16)i + 8 \quad 0 \leq i < 16;$$

$$\text{Value } B[i] = (256/16)i + 8 \quad 0 \leq i < 16$$

(2) 使用 R、G、B 的代表值产生 4 096 个组合,并将颜色代表值根据它们在彩色空间中的欧几里德距离进行排序。这样调色板中相邻颜色在感官上是接近的,依序编号,作为调色板上 4 096 个颜色向量的索引值(12 个 bit 位),记作 $CP[i]$, $0 \leq i < 4 096$ 。这就生成了一个 4 096 色的调色板,由于能分辨出 4 096 种颜色,故称之为高分辨率调色板。

(3) 在已生成的 4 096 色调色板中,只扫描满足下列条件的颜色向量,并将其索引值相应地缩小 4 倍,则得到能分辨 1 024 种颜色的调色板,其索引值包含 10 个 bit 位。

$$CP[i] \text{ Mod } 4 = 0, \quad 0 \leq i < 4 096$$

(4) 同理,在已生成的 4 096 色的调色板中,只扫描满足下列条件的颜色向量,并将其索引值相应地缩小 16 倍,则得到能分辨 256 种颜色的调色板,其索引值包含 8 个 bit 位。

$$CP[i] \text{ Mod } 16 = 0, \quad 0 \leq i < 4 096$$

3.2 彩色量化

(1) 令秘密图像的大小为 $M \times N$,读取秘密图像每个像素的 3 个颜色分量值 (x_i, y_i, z_i) ,其中, $0 \leq i < M \times N$,并计算其在彩色空间中的欧几里德距离,利用折半查找算法,在调色板中查找欧几里德距离最接近的颜色向量。

(2) 求秘密图像像素的 3 个颜色分量值 (x_i, y_i, z_i) 与已找到的颜色向量在调色板中相邻的 256 组 R、G、B 值的距离,按照下列规则确定调色板上与 (x_i, y_i, z_i) 最接近的那组 R、G、B 颜色向量,其对应的索引值就是秘密图像像素 (x_i, y_i, z_i) 的彩色量化结果。

$$\text{Min}(x_i - R_j)^2 + (y_i - G_j)^2 + (z_i - B_j)^2, \\ 0 \leq i < M \times N, 0 \leq j < 256$$

隐藏秘密图像时,根据图像 X' 像素 (i, j) 周围的 3×3 邻域的复杂程度,完成调色板分辨率的自动选取。

4 超混沌映射加密技术

为了提高信息隐藏的安全性,秘密图像的索引信息嵌入到载体图像的过程中进行了加密处理。依据现代密码学的观点^[3],进行加密操作的基本原则是扩散和混乱,将数据内容的替换与空间位置的随机换位相结合,是提高系统抗攻击能力的关键。用超混沌映射实现信息加密,首先利用基于超混沌映射生成的二进制伪随机序列流与待嵌入的秘密图像的索引信息相异或,然后再利用基于超混沌映射生成的无碰撞伪随机序列,把异或结果随机地分散在整个载体图像中。

4.1 耦合映像格子模型

耦合映像格子(CML)是时空混沌研究中的一个典型例子^[4]。考虑如下的 CML 映射

$$y_{n+1}(1) = (1 - \varepsilon)f(y_n(1)) + \varepsilon f(y_n(2))$$

$$y_{n+1}(i) = (1 - \varepsilon)f(y_n(i)) + \varepsilon f(y_n(i+1))$$

$i = 2, \dots, L (n = 0, 1, 2, \dots), -1 \leq y_n \leq 1 (n = 0, 1, 2, \dots)$ 式中, L 为格子大小, n 表示演化时间, ε 为耦合系数,边界条件满足 $y_n(L+1) = y_n(1)$,映射子函数选用 1 维混沌系统 Logistic:

$$f(y) = 1 - ay^2$$

此时, CML 为 L 维动力系统。取空间维数 $L=2$, 耦合系数 $\varepsilon=0.99$ 。当 $a=1.94568$ 时, 该系统是超混沌的。

4.2 二进制伪随机序列流生成

设定密钥 (y_0, y_1) , y_0, y_1 为 CML 映射的初始值。由密钥 (y_0, y_1) 经 CML 映射, 生成实数值超混沌序列 $\{y_i | y_i \in [-1, 1], i=0, 1, \dots\}$, 然后判定 y_i 的大小, 当 $y_i > 0$ 时取 1, 否则取 0, 进而生成二进制伪随机序列流 $\{b_i | b_i \in \{0, 1\}, i=0, 1, \dots\}$ 。

4.3 无碰撞伪随机置换序列

利用超混沌映射的非线性及其轨道点的遍历性来生成无碰撞伪随机置换序列, 实现秘密图像索引信息的伪随机嵌入。首先用耦合映像格子映射和种子密钥产生一对伪随机序列, 虽然超混沌序列有非常好的遍历特性, 但由于计算机精度的限制, 一个索引值在序列中有可能出现多次, 称这种情况为碰撞, 如果一个碰撞发生, 则可能在载体图像的一个像素位置上嵌入多个秘密信息。为了防止这种情况发生, 用一个集合 B 来记录所有已经使用过的载体索引值, 当再次出现同样的索引值时, 则放弃这个索引值, 再选择下一个元素, 这样, 就生成了无碰撞的 2 维伪随机置换序列。该序列随机特性好, 由初值(密钥)驱动, 对初值极其敏感。

5 信息隐藏的实现

用一幅彩色图像去隐藏另一幅彩色图像时, 应追求的目标是^[5,6]:

(1) 在不影响载体图像视觉质量的前提下, 尽可能增大载体图像的信息隐藏容量;

(2) 尽可能减小秘密图像的数据量并使其图像质量的改变达到最小;

(3) 鲁棒性要好, 使拦截者的攻击难度最大化。

通过对载体图像的硬 c 均值聚类分析, 来增大载体图像的信息隐藏容量; 通过多分辨率的彩色量化, 来减小秘密图像的数据量, 并尽可能减小对图像质量的改变; 通过基于超混沌映射的加密技术对秘密图像进行保护, 使信息隐藏更安全。其具体实现过程描述如下:

(1) 选定载体图像 X , 将其 R, G, B 分量右边的 4, 3, 5 位置零得到图像 X' , 对图像 X' 进行硬 c 均值聚类分析, 生成划分矩阵 U 。根据像素所属的聚类类别, 确定信息嵌入位。

当聚类类别为 V_1 时, 载体图像像素的秘密信息嵌入位是:

G 字节	X	X	X	X	X	X	D5	D2
R 字节	X	X	X	X	X	D7	D4	D1
B 字节	X	X	X	X	X	D6	D3	D0

当聚类类别为 V_2 时, 载体图像像素的秘密信息嵌入位是:

G 字节	X	X	X	X	X	X	D5	D2
R 字节	X	X	X	X	D9	D7	D4	D1
B 字节	X	X	X	X	D8	D6	D3	D0

当聚类类别为 V_3 时, 载体图像像素的秘密信息嵌入位是:

G 字节	X	X	X	X	X	D8	D5	D2
R 字节	X	X	X	X	D10	D7	D4	D1
B 字节	X	X	X	D11	D9	D6	D3	D0

这里, 要嵌入的信息是秘密图像的索引值, 在 3 种不同的情况中, 载体图像像素的信息嵌入量分别为 8、10、12 个比特。

(2) 生成多分辨率调色板, 对秘密图像进行彩色量化, 其量化精度由聚类分析生成的划分矩阵 U 决定。这里应注意的是, 在数字索引图像中, 调色板并不要求有任何的排序, 而在这里, 却要对调色板中的颜色向量按其欧几里德距离进行排序, 其目的是减小在调色板中查找秘密图像像素的 R, G, B 分量的最接近值的搜索范围, 使生成 10bit、12bit 的索引值与生成 8bit 的索引值有相同的量化速度。

(3) 依据集合 $\{(0, 0), (0, 1), \dots, (M-1, N-1)\}$ 与 2 维无碰撞伪随机置换序列 $\{P(i, j), i=0, 1, \dots, M-1, j=0, 1, \dots, N-1\}$ 之间的一一对应关系, 将秘密图像的第 (i, j) 个像素的索引值嵌入到索引为 $P(i, j)$ 的载体图像像素中, 嵌入方式已在步骤 1 中给定。在进行嵌入操作前, 先要将待嵌入 bit 与二进制伪随机序列流 $\{b_i | b_i \in \{0, 1\}, i=0, 1, \dots\}$ 的一个 bit 位相异或。其目的是对嵌入信息进行加密处理, 增强隐藏信息的安全性, 另一个重要目的是使隐藏在载体中的数据具有良好的随机性, 使其在统计特性上尽量接近载体图像测量噪声的自然随机性态。

提取秘密图像时, 首先采用与图像隐藏所采用的相同算法, 生成载体图像划分矩阵 U 、多分辨率调色

板、伪随机置换序列及二进制伪随机序列流,然后将秘密信息嵌入过程进行逆向运算,即可获得秘密图像。

该隐藏算法中,信息嵌入位不再是一个固定的值,载体图像的纹理复杂程度不同的区域,隐藏深度是不同的,这样就可以在视觉允许的范围内,更充分地利用载体图像的信息冗余,使载体图像的信息隐藏能力得到充分发挥。攻击者也很难知道隐藏者究竟利用了哪些低比特位进行信息隐藏。通过对秘密图像的多分辨率彩色量化,即减少了数据量,又保证了恢复图像的质量。该算法采用密码驱动机制,CML映射对初值极为敏感,实验结果显示,如果采用双精度数据类型计算,初始值的差异为 $\Delta y_i = 10^{-15}$ 时产生的序列的相关性仍接近 0,可以达到密码学的要求。此时,密钥空间的大小为 $\#(K) = 2 \times 10^{2 \times 14} \approx 2^{99}$,达到 94bit,保证了图像隐藏的安全性。秘密图像像素随机地分散在整个载体图像中,秘密图像可以和载体图像大小相等,也可以小于载体图像。

6 实验结果

为了验证本文所述方法,在 PC 机上进行模拟实验。图版 I 图 2 是对彩色图像进行隐藏与提取的例子,由图版 I 图 2 可见,隐藏有信息的图像(混合图像)与未隐藏信息的图像很难分辨出差异,提取出的秘密图像也有较好的主观质量,且图版 I 图 2(e)质量比图版 I 图 2(f)的质量明显要好。

选择复杂程度不同的 4 幅图像 Baboon, Sailboat, Lena 及 Airplane 作为载体图像进行实验,这 4 幅图像的纹理复杂程度依次降低。表 3 给出用本文方法对这 4 幅不同的载体图像隐藏 Lena 彩色图像的实验结果。由表中实验数据可知,载体图像的复杂程度越高,则恢复图像的质量越好。实验结果还表明,依据梯度敏感值、方均根敏感值及熵敏感值 3 个指标,通过聚类分析得到的图像复杂程度的度量结果与人的视觉系统得到的结果是一致的。

表 3 实验相关数据表

Tab. 3 Date list for experiment of image hiding

载体图像 (120 × 120)	嵌入数据量 (bits)	恢复图像平均 峰值信噪比	恢复图像 均方根误差
Baboon	143 436	32.53	6.02
Sailboat	135 104	31.52	6.77
Lena	131 824	31.39	6.86
Airplane	131 862	31.23	6.99

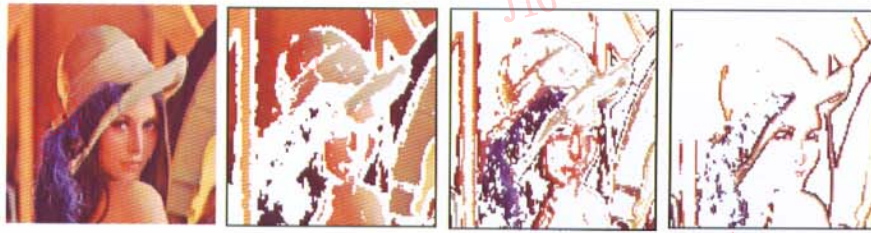
图版 I 图 3 为隐藏算法鲁棒性实验,其中上排左起分别是增加污点、破损攻击、增加高斯噪声污染(零均值,方差为 10)、高频信息丢失(由 8bit 下降为 6bit)及高频信息严重损伤(R、G、B 各分量的最不重要 2bit 位用随机值替换)后的混合图像。下排分别为从上排相应的混和图像中提取出的秘密图像。实验结果表明,隐藏算法对增加污点和破损攻击有较强的抵抗能力,对轻度的高斯噪声污染也有一定的抵抗能力,另外,混合图像的高频成分严重受损后,仍能恢复出主要信息。

7 结论

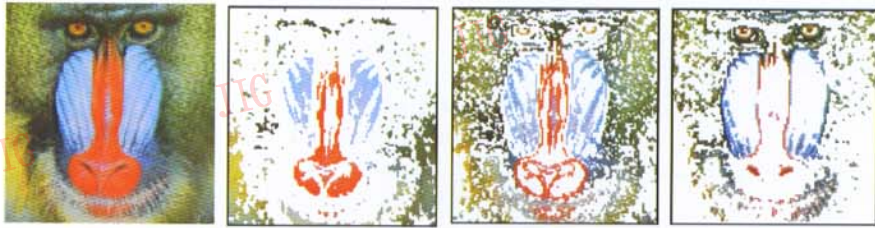
本文给出了一种新的空域彩色图像隐藏方法,通过硬 c 均值聚类分析对图像进行划分,从而优化了隐藏深度,使载体图像的隐藏容量进一步增大,提高了混合图像对常见图像处理与攻击的抵抗能力。利用多分辨率调色板对秘密图像进行彩色量化,把秘密图像的 24 位像素值转换为索引值,转换精度由划分矩阵 U 自动确定。超混沌映射是具有高度复杂性的非线性映射,具有极端初值敏感性及固有的内在随机性,因而采用基于超混沌映射的空间置乱技术,使隐藏图像具有很高的安全性。由于采用盲隐藏技术,因此提取秘密信息时,不需要载体图像,为实际应用带来很大方便。实验结果证明,本文方法是可行的,隐藏和恢复图像都得到较好的效果。

参考文献 (References)

- Li Min-hui, Hu Yu-chen. Both color and gray scale secret images hiding in a color image [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2002, 16(6): 697 ~ 713.
- ZHANG Gui-cang, WANG Rang-ding, et al. Digital image information hiding technology based on iterative blending [J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(5): 563 ~ 568. [张贵仓, 王让定等. 基于迭代混合的数字图像隐藏技术[J]. 计算机学报, 2003, 26(5): 563 ~ 568.]
- Bruce Schneier. Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source code in C[M]. John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- Kaneko K. Overview of coupled map lattices [J]. Chaos, 1992, 2(3): 279 ~ 282.
- Maniccam S S, Bourbakis N. Lossless compression and information hiding in images [J]. Pattern Recognition, 2004, 37(3): 475 ~ 486.
- Chang Chin-chen, Lin Min-hui. A fast and secure image hiding scheme based on LSB substitution [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2002, 16(4): 399 ~ 416.

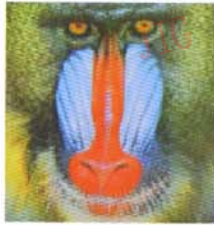


(a) Lena原始图像及其 V_1, V_2, V_3 聚类图



(b) Baboon原始图像及其 V_1, V_2, V_3 聚类图

图1 彩色图像聚类实验结果
Fig.1 Clustering result for color image



(a) 载体图像



(b) 自适应嵌入信息后的混合图像



(c) 按固定嵌入深度嵌入信息后的混合图像(R分量取低3位,G分量取低2位,B分量取低3位)



(d) 原秘密图像



(e) 从(b)中提取出的秘密图像



(f) 从(c)中提取出的秘密图像

图2 图像隐藏实验结果

Fig.2 The experimental results of image hiding



图3 隐藏算法鲁棒性实验结果

Fig.3 The experimental results for robustness of hiding algorithm