

基于轮廓绘制及填色的构造式信息隐藏算法

郦姝伊¹, 郭玳豆¹, 孔平², 乐燕芬¹, 秦川¹

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 上海健康医学院附属嘉定区中心医院, 上海 201318)

摘要: 基于元素映射的构造式信息隐藏算法存在因图案库泄露而导致的安全性问题, 鉴于此, 提出了一种新的通过含密轮廓绘制及颜色填充生成平铺图像的构造式信息隐藏算法。运用 B 样条曲线为多个图案轮廓建立标准结构化表示, 并创建收发双方共享的标准结构化表示库和颜色库, 根据秘密信息进行标准结构化表示选取、图案轮廓绘制及颜色填充操作, 获得含密图案。多个离散分布的含密图案共同构成一幅含密平铺图像。实验证明, 该算法对 JPEG 压缩、中值滤波、高斯滤波等常见图像攻击具有较强的鲁棒性, 且与类似算法相比, 能够抵抗更多种图像攻击。

关键词: 构造式信息隐藏; 结构化表示; B 样条曲线; 轮廓曲线; 平铺图像

中图分类号: TP 309

文献标志码: A

Constructive information hiding algorithm based on contour drawing and color filling

LI Shuyi¹, GUO Daidou¹, KONG Ping², LE Yanfen¹, QIN Chuan¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Jiading District Central Hospital Affiliated Shanghai University of Medicine and Health Sciences, Shanghai 201318, China)

Abstract: The constructive information hiding algorithm based on element mapping faces security concerns due to the pattern library leakage. Based on this issue, a novel constructive information hiding algorithm was proposed, which generated tiled images through covert contour drawing and color filling to enhance security. B-spline curves were utilized to establish standard structured representations for multiple pattern contours and shared standardized structured representation libraries and color libraries were created for both the sender and receiver. Selection of standardized structured representations,

收稿日期: 2023-03-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62172280); 上海市浦江人才计划项目 (2022PJD031); 上海市自然科学基金资助项目 (21ZR1444600); 上海市科委地方院校能力建设计划项目 (20060502300)

第一作者: 郦姝伊 (1997-), 女, 硕士研究生。研究方向: 构造式信息隐藏。E-mail: 203590776@st.usst.edu.cn

通信作者: 秦川 (1980-), 男, 教授。研究方向: 多媒体信息安全和 AI 安全等。E-mail: qin@usst.edu.cn

引文格式: 郦姝伊, 郭玳豆, 孔平, 等. 基于轮廓绘制及填色的构造式信息隐藏算法[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(3): 259-270. DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20230316004

Citation: LI Shuyi, GUO Daidou, KONG Ping, et al. Constructive information hiding algorithm based on contour drawing and color filling[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(3): 259-270.

pattern outline drawing, and color filling operations were performed based on secret information to obtain covert patterns. Multiple discretely distributed covert patterns collectively formed a covert tiled image. Our experiments demonstrated that this algorithm had strong robustness against common image attacks such as JPEG compression, median filtering, and Gaussian filtering. Furthermore, our algorithm can withstand more types of image attacks compared to similar algorithms.

Keywords: *constructive information hiding; structured representation; B-spline curve; contour curve; tiled image*

信息隐藏将秘密信息隐藏于公开载体中，使收发双方秘密通信时不被第三方察觉，是信息安全领域的一个重要组成部分。传统的信息隐藏技术通常通过修改已有载体实现信息隐藏，如以 LSB 算法^[1]和 JSteg 算法^[2]为代表的利用载体图像冗余隐藏信息的算法，又如湿纸码^[3]、F5 算法^[4]、ZZW 算法^[5]等编码隐写算法。然而，传统的信息隐藏算法往往会在载体中留下痕迹，导致它们易受到隐写分析技术的攻击和威胁。为从根本上抵抗隐写分析技术检测，有学者提出了无载体信息隐藏技术^[6]。与传统信息隐藏相比，该技术强调不修改载体，以秘密信息为驱动去选择或生成用于传输秘密信息的载体。按含密载体的获得方式可将其分为选择式和构造式两类，构造式信息隐藏由于其灵活性和更高的隐藏容量，逐渐被越来越多的研究者所关注。

Otori 等^[7]首先提出了一种基于像素纹理合成的构造式信息隐藏算法，该算法利用局部二值模式(LBP)建立纹理图像中的像素点与二进制序列的映射关系，随后根据此关系将秘密信息编码为彩色像素点，并绘制在空白画布上，从而构造出一幅含密纹理图像。但该算法隐藏容量较低，误码率较高。Wu 等^[8]提出了另一种基于纹理合成的构造式信息隐藏算法，通过建立纹理图像子块库，并根据与纹理块边缘区域的匹配程度实现秘密信息与纹理块的映射，有效提高了隐藏容量。Zhou 等^[9]通过在合成图像的外围填充不携带信息的冗余区域以提高安全性，并通过生成额外的候选块提高隐藏容量。基于以上研究，Qian 等^[10-13]提出了更多基于纹理合成或生成的信息隐藏算法，文献[10]建立候选纹理块的复杂度与秘密信息的映射关系，根据密钥绘制代表秘密信息的纹理块并根据纹理合成技术填充图像，此算法对 JPEG 压缩具有较强的鲁棒性；文献[11]通过建立二进制数据与图形库的映射规则，并为图形的旋

转和放缩操作编码，根据秘密信息从图形库中选择图形并进行相应变换操作绘制于空白画布中，经背景填充和模拟大理石纹理的形变操作构造出类似大理石纹理的含密纹理图像。文献[12]同样建立与数据相映射的形状库，并为其旋转和放缩变换编码，选择与秘密信息对应的形状并进行相应操作后，将它们散布于简易的图案轮廓内部构造含密图像。文献[13]首先在空白画布中绘制简单图形，再根据秘密信息改变形状的拐点位置，为图像填充颜色并进行模拟水影画的形变操作，构造出类似水影画的含密纹理图像。类似地，Xu 等^[14]直接将秘密信息绘制于空白画布上，在不含信息的空白部分填充背景图案，利用模拟大理石花纹的形变算法生成具有复杂纹理结构的纹理图像。司广文等^[15]采用空间金字塔算法提取纹理图像特征，并通过监督分类训练得到分类模型构造图像特征与数据的映射字典隐藏信息，利用形变函数生成纹理图像。但上述文献所提算法在生成内容上具有约束性，它们往往生成不具有语义信息的纹理图像，或直接利用图案库中的元素绘制图像，故当共享库被破解时，秘密信息将很容易通过图案匹配算法直接提取出来，对此类信息隐藏算法的安全性造成威胁。为解决这些问题，本文提出了一种基于轮廓绘制及填色的构造式信息隐藏算法，可以生成由有意义图案构成的含密平铺图像。

1 算法框架

本文提出一种基于轮廓绘制及填色的构造式信息隐藏算法，算法总框架如图 1 所示。此算法需事先建立标准结构化表示库和颜色库，并在收发双方之间共享存储。在信息隐藏阶段，发送方首先利用密钥确定待生成含密图案在图像中的位置，然后根据秘密信息结合共享库通过轮廓绘制

及颜色填充构造出多个含密彩色图案, 最后将图案绘制在所选位置上即生成了一幅含密平铺图像, 同时密钥以隐蔽的方式传输至接收方。在信息提取阶段, 接收方根据密钥从平铺图像中获取含密图案, 再结合共享库及相关操作逐一提取含密图案中的秘密信息, 将它们拼接起来即提取出含密图像中隐藏的所有信息。

2 图案轮廓的标准结构化表示

本文提出一种为图案轮廓构建标准结构化表示的方法, 以一组能够重构图案轮廓的标准化后的点集代表图案轮廓, 主要实现以下目的: 首先, 使图案轮廓独立于栅格图像, 实现在不同分辨率下对轮廓的处理; 其次, 以一组点集代替原始栅格图像, 可有效降低收发双方共享库的存储

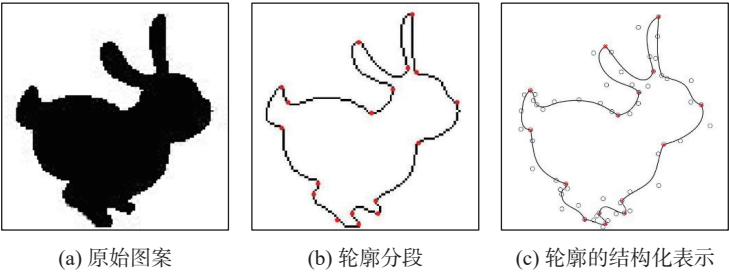


图2 结构化表示的构建过程

Fig.2 Process of building a structured representation

首先对图像进行轮廓跟踪^[16]获取图案的轮廓像素, 再利用 Harris 特征点检测算法提取轮廓角点, 将这些角点作为图案轮廓的主要视觉感知特征为轮廓像素分段, 并建立轮廓的最小外接圆^[17]。若存在位于外接圆上的角点, 则将此角点作为整体轮廓的起始点, 否则取外接圆上的任一轮廓点作为整体轮廓的起始点, 并以此为轮廓分段。以轮廓起始点为首将图案轮廓段重新排序, 排序后的轮廓记为 $L = \{L_i | i = 1, \dots, l\}$, 其中, l 为图案轮廓的总段数, L_i 表示第 i 个轮廓段的所有像素。图 2(a) 中图案的轮廓像素及分段结果如图 2(b) 所示, 其中红色圆点为轮廓段端点。对任意轮廓段 L_i , 利用 3 次 B 样条曲线拟合并记录拟合曲线的 $n_i + 1$ 个控制点 $c_{i,j}^o(c_{x_{i,j}}^o, c_{y_{i,j}}^o)(i = 1, \dots, l; j = 0, \dots, n_i)$, 故此轮廓段可由点集矩阵 $C_i^o = [c_{i,0}^o, c_{i,1}^o, \dots, c_{i,n_i}^o]^T$ 表示。对所有的轮廓段均进行此操作即可获得整体轮廓的结构化表示 $C^o = \{C_i^o | i = 1, \dots, l\}$ 。图案轮廓的结构化表示点集如图 2(c) 中的黑色圆圈所示, 黑色轮廓即为

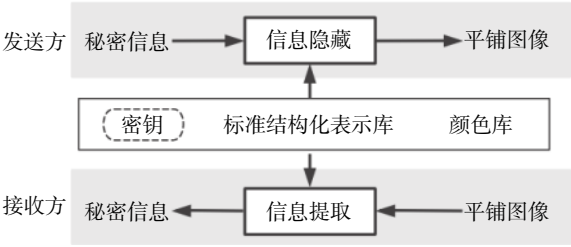


图1 本文算法框架

Fig.1 Framework of the proposed algorithm

容量; 最后, 在本算法中可通过对数据点的置乱加密操作提高信息隐藏算法的安全性。将标准结构化表示的构造具体分为两步, 即获取图案轮廓的结构化表示和对结构化表示进行标准化处理。

2.1 图案轮廓的结构化表示

对栅格图像中的图案通过轮廓提取、轮廓分段和逐段重构进行结构化表示, 构建过程如图 2 所示, 图 2(a) 为所选取的原始图案。

由结构化表示重构的图案轮廓, 红色圆点为分段点。

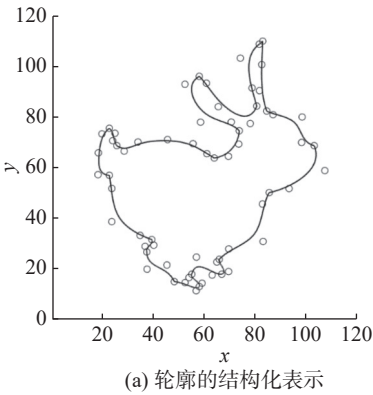
2.2 构建标准结构化表示

对结构化表示 C^o 进行标准化以便于尺度归一化和角度的自适应调整。由于 B 样条曲线具有凸包性, 且图案轮廓的结构化表示由 B 样条曲线的控制点组成, 故绘制的图案轮廓应包含在由其结构化表示点集所组成的封闭多边形内。同时, 由于 B 样条曲线具有仿射不变性, 对样条曲线的仿射变换可以通过对其控制点构建仿射像得到, 因此, 对结构化表示点集的标准化操作即为对图案轮廓的标准化操作。

对结构化表示 C^o , 首先计算该点集在直角坐标系下的最小外接圆, 并以最小外接圆圆心为原点, 以原点到轮廓起始点 $c_{1,0}^o$ 的向量为极轴构建极坐标系。 C^o 中的点 $c_{i,j}^o(i = 1, \dots, l; j = 0, \dots, n_i)$ 在极坐标系中的位置由极坐标 $(\rho_{i,j}^o, \theta_{i,j}^o)$ 表示, 并以轮廓起始点极径 $\rho_{1,0}^o$ 将各点极径 $\rho_{i,j}^o$ 归一化为 $\rho_{i,j}$ 。同时, 为消除对轮廓起始点判别的干扰, 预设参数阈值

$\delta \in (0, 1)$, 使标准化后除轮廓起始点外的点的极径均不大于 $1 - \delta$, 如式 (1) 所示, 故有标准结构化表示 $C = [C_1, C_2, \dots, C_l]$, 由式 (2) 获得 C_i 内各点坐标 $c_{i,j}(c_{x_{i,j}}, c_{y_{i,j}})(i = 1, 2, \dots, l; j = 1, 2, \dots, n_i)$ 。

$$\rho_{i,j} = \begin{cases} \frac{\rho_{i,j}^0}{\rho_{1,0}^0}, & \rho_{1,0}^0 - \frac{\rho_{i,j}^0}{\rho_{1,0}^0} \leq \delta \\ \frac{\rho_{i,j}^0}{\rho_{1,0}^0} - \delta, & \rho_{1,0}^0 - \frac{\rho_{i,j}^0}{\rho_{1,0}^0} > \delta \end{cases} \quad (1)$$



结构化表示的标准化过程如图 3 所示, 图 3(a) 为图案轮廓的结构化表示点集及重构的图案轮廓, 标准化后的表示如图 3(b) 中黑色圆圈所示, 由其绘制的图案轮廓位于单位圆内, 起始点位于极轴上且极径为 1。

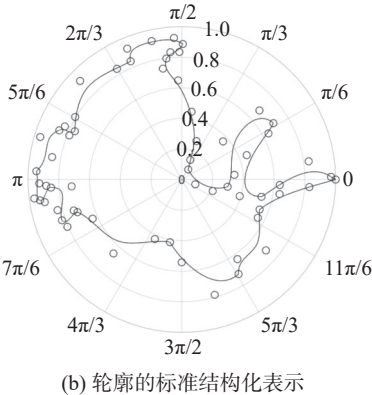


图 3 标准结构化表示的构建

Fig.3 Construction of a standardized and structured representation

3 秘密信息隐藏

发送方在生成平铺图像的过程中隐藏秘密信息, 首先通过密钥确定待生成图像中含密图案的数量及位置, 然后根据秘密信息生成含密彩色图案并绘制在空白画布的所选位置处, 最后在图像的空白区域中随机绘制一些标准结构化表示库中的图案或形状, 即完成了含密平铺图像的构造,

信息隐藏过程如图 4 所示。

平铺图像中的各含密图案由秘密信息分步驱动构造而成, 即图案构造的每步均由秘密信息参与, 各含密图案有轮廓选取、轮廓调整和颜色填充 3 步构造, 因此将秘密信息序列记为 $B = [B_{\text{shape}}, B_{\text{contour}}, B_{\text{color}}]$, 其中: 信息序列 B_{shape} 用于选取图案轮廓对应的标准结构化表示; B_{contour} 用于调整生成图案的轮廓; B_{color} 用于选取图案的填充颜色。

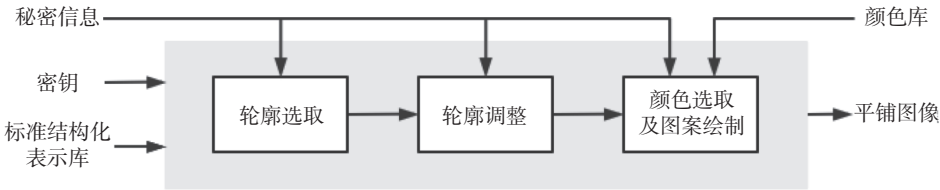


图 4 信息隐藏过程

Fig.4 Process of information hiding

3.1 轮廓选取

发送方将根据信息序列 B_{shape} 从标准结构化表示库中选取标准结构化表示用于生成含密图案轮廓, 因此需为标准结构化表示库中的各元素与信息序列 B_{shape} 可能出现的每一种形式构建一一对应的关系。

对含有 2^{q_1} 个标准结构化表示的标准结构化表示库, 为其中的每一个元素分配一个十进制索

引, 即索引 $1 \sim 2^{q_1}$, 因此, 每个元素可对应一个 q_1 bit 的二进制序列。故对于含有 q_1 bit 二进制数的信息序列 B_{shape} , 其对应标准结构化表示库中的元素索引为 $(B_{\text{shape}})_{10} + 1$, 其中 $(\cdot)_{10}$ 为二进制序列的十进制形式。由此可根据信息序列 B_{shape} 选取待绘制图案的标准结构化表示, 并隐藏 q_1 bit 信息。

3.2 轮廓调整

标准结构化表示是一组可以用于表示并重构

图案轮廓的点集, 改变其中部分点的位置或对其进行整体仿射变换, 可导致图案轮廓的局部微调或整体形变。故可利用序列 B_{contour} 移动标准结构化表示中的点, 对图案轮廓局部进行调整或整体形变, 将用于局部调整的信息序列记为 B^s , 整体放缩和旋转的信息序列记为 B^o 和 B^θ , 故有 $B_{\text{contour}} = [B^s, B^o, B^\theta]$ 。为使局部调整后的图案满足人眼不可感知性, 需选取标准结构化表示中移动后对视觉感知影响较小的点作为用于隐藏信息的候选点, 故不同图案轮廓中隐藏 B_{contour} 的二进制信息数 q_2 不同。由于对小曲率曲线进行微调易引起人眼察觉, 且角点位置的改变可能导致轮廓结构的改变, 因此, 用于隐藏秘密信息的候选点的选取需满足不可感知约束, 即候选点与其前后两控制点不应在同一条直线上, 且候选点不可为轮廓的分段点。同时, 为减小含密候选点之间的相互干扰, 同一条 3 次 B 样条曲线上不应存在两个连续的候选点, 且两候选点之间的距离应不小于 0.06, 由此获得图案轮廓的所有候选点。

根据信息序列 B^s 逐一修改候选点的位置, 各候选点隐藏 1 bit 信息, 当隐藏二进制信息 1 时, 将候选点沿其前后两控制点连线的法线方向移动一段距离, 当隐藏二进制信息为 0 时, 则候选点位置保持不变。为使微调后的轮廓具有不可感知性, 故候选点应向保持曲线凹凸性的方向移动, 且各候选点的移动距离自适应选取。为便于描述, 本节将 C 中第 i 段轮廓的候选点 $c_{i,j}(i=1, \dots, l; j=0, \dots, n_i)$ 简写为 c_j , 其前后控制点 $c_{i,j-1}$ 和 $c_{i,j+1}$ 分别简写为 c_{j-1} 和 c_{j+1} 。规定各候选点 c_j 的移动距离为 $r_j = \alpha \times (E(c_{j-1}, c_j) + E(c_{j+1}, c_j))$, 其中: $E(\cdot)$ 为欧式距离的计算函数; α 为影响局部形变程度的预设参数。设候选点 c_j 前后控制点连线的方向向量为 u_j , 则此连线的法向量可由 $(-u_{y_j}, u_{x_j})$ 表示, 其中 u_{x_j} 和 u_{y_j} 分别为向量 u_j 在 x 轴和 y 轴上的分量。点 v_j 沿其前后控制点连线的法线方向移动距离 r_j 后获得两个移动后坐标 $c_A(x_a, y_a)$ 和 $c_B(x_b, y_b)$, 如式 (3) 所示。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{x_j} \\ c_{y_j} \end{bmatrix} + r_j \frac{1}{\sqrt{u_{x_j}^2 + u_{y_j}^2}} \begin{bmatrix} -u_{y_j} \\ u_{x_j} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{x_j} \\ c_{y_j} \end{bmatrix} - r_j \frac{1}{\sqrt{u_{x_j}^2 + u_{y_j}^2}} \begin{bmatrix} -u_{y_j} \\ u_{x_j} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

由于 B 样条曲线具有变分减小性, 故可通过计算候选点与其前后控制点连线的曲率来判断曲

线的凹凸性。候选点 $c_j(c_{x_j}, c_{y_j})$ 处的曲率 K_{c_j} 可由式 (4) 获得, 其中 u_{j-1} 和 u_{j+1} 为候选点 c_j 前后两控制点 $c_{j-1}(c_{x_{j-1}}, c_{y_{j-1}})$ 和 $c_{j+1}(c_{x_{j+1}}, c_{y_{j+1}})$ 在候选点处切线的方向向量, 可由式 (5) 通过求解候选点两侧的斜率近似取得。

$$K_{c_j} = \frac{2(u_{j-1} \times u_{j+1})}{|u_{j-1} + u_{j+1}|^2} \quad (4)$$

$$\begin{cases} u_{j-1} \approx \begin{bmatrix} c_{x_j} - c_{x_{j-1}} \\ c_{y_j} - c_{y_{j-1}} \end{bmatrix} \\ u_{j+1} \approx \begin{bmatrix} c_{x_{j+1}} - c_{x_j} \\ c_{y_{j+1}} - c_{y_j} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

候选点 c_j 移动后的点 c_A 和 c_B 的曲率分别记为 K_{c_A} 和 K_{c_B} , 当隐藏二进制信息 1 时, 选择保持曲线凹凸性或使曲率减小的移动点作为信息隐藏后的点, 用 c_j^s 表示, 候选点 c_j 移动后的点 c_A 和 c_B 的曲率可经相同方法获得, 分别记为 K_{c_A} 和 K_{c_B} 。设待隐藏二进制信息为 b_j , 则信息隐藏后的点 c_j^s 为

$$c_j^s = \begin{cases} c_j, & b_j = 0 \\ \varepsilon(K_{c_j} K_{c_A}) c_A + \varepsilon(K_{c_j} K_{c_B}) c_B, & b_j = 1 \wedge \eta = -1 \\ \varepsilon(|K_{c_B}| - |K_{c_A}|) c_A + \varepsilon(|K_{c_A}| - |K_{c_B}|) c_B, & b_j = 1 \wedge \eta \neq -1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\varepsilon(\cdot)$ 为单位阶跃函数; $|\cdot|$ 为绝对值函数; $\eta = \text{sgn}(K_{c_j} K_{c_A}) \cdot \text{sgn}(K_{c_j} K_{c_B})$ 表示移动控制点前后曲线凹凸性的变化。

对标准结构化表示中 C 的候选点均进行信息隐藏操作, 用含密点 c_j^s 代替原候选点 c_j , 含密标准结构化表示记为 C^s 。将 C^s 作为 3 次 B 样条曲线的控制点绘制含密图案轮廓, B 样条曲线可写为 $L(t) = (L_x(t), L_y(t))$, 其中, t 为连续的非递减参数索引序列, 曲线绘制函数为

$$L^{[B]}(t) = \sum_{j=0}^{n_i} c_j^s N_{j,k}(t) \quad (7)$$

式中, $N_{j,k}(t)(j=1, \dots, n_i)$ 为 k 次 B 样条的基函数。 $N_{j,k}$ 的递归公式为

$$\begin{cases} N_{j,1}(t) = \begin{cases} 1, & t_j \leq t \leq t_{j+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{j,k}(t) = \frac{(t - t_j) N_{j,k-1}(t)}{t_{j+k-1} - t_j} + \frac{(t_{j+k} - t) N_{j+1,k-1}(t)}{t_{j+k} - t_{j+1}}, k = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (8)$$

图5展示了隐藏单位序列后的结果,图5(a)为由标准结构化表示绘制的图案轮廓,其中黑色圆圈为标准结构化表示点集,红色标记为候选点,在各候选点中隐藏单位二进制信息后如图5(b)中的圆圈所示,红色轮廓为含密图案轮廓,可见信息隐藏后图案轮廓连续且平滑,对视觉感知影响较小。

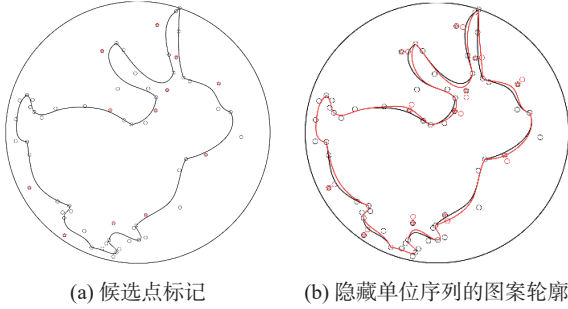


图5 标准结构化表示的局部调整

Fig.5 Local adjustment of a standardized structured representation

分别根据二进制序列 B^{ρ} 和 B^{θ} 调整轮廓的大小和旋转角度。 C^s 中的任意点 c_j^s 的极坐标为 (ρ_j^s, θ_j^s) ,经 B^{ρ} 和 B^{θ} 的驱动后其坐标变为 $(\rho_j'^s, \theta_j'^s)$,变换过程如式(9)所示。

$$\begin{bmatrix} \rho_{i,j}'^s \\ \theta_{i,j}'^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{i,j}^s (1 + (B^{\rho})_{10} \Delta \rho) \\ \theta_{i,j}^s + (B^{\theta})_{10} \Delta \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $\Delta \rho$ 和 $\Delta \theta$ 分别为放缩及旋转单位尺度。预设通过放缩变换隐藏 q_2^{ρ} bit信息,且放缩变换后的标准结构化表示的极角范围 $\rho_j'^s \in [1, \rho_{\max}]$,则单位放缩尺度 $\Delta d = \frac{\rho_{\max} - 1}{2^{q_2^{\rho}}}$;预设通过旋转变换隐藏 q_2^{θ}

bit信息,且旋转后结构化表示的极角范围为 $\theta_j'^s \in [0, 2\pi)$,则单位旋转尺度 $\Delta \theta = \frac{2\pi}{2^{q_2^{\theta}}}$ 。对 C^s 中的所有点均进行相同的放缩及旋转操作,利用结构化表示 C'^s 绘制出含密图案轮廓。

3.3 颜色选取及图案绘制

本算法中,收发双方具有相同的颜色库,其中共含有 2^{q_3} 种颜色,为每种颜色分配一个 $1 \sim 2^{q_3}$ 内的唯一索引,故每个索引可对应一个 q_3 bit的二进制序列,即在该颜色库中各颜色可用于隐藏 q_3 bit信息。因此,可通过颜色特征隐藏 q_3 bit信息,即 B_{color} 内应包含 q_3 bit二进制数,其对应的颜色索引为 $(B_{\text{color}})_{10} + 1$ 。

发送方将含有秘密信息的结构化表示 C'^s 绘制为图案轮廓,根据信息序列 B_{color} 从颜色库中选取索引 $(B_{\text{color}})_{10} + 1$ 对应的颜色并进行填充,即完成了含密彩色图案的构造。

4 秘密信息提取

本算法中秘密信息的提取采用非盲检测,即接收方拥有与发送方相同的标准结构化表示库。首先,根据标准结构化表示库重构各图案轮廓生成轮廓模板;然后,根据密钥定位含密图案,以分步提取的方式解析图案生成步骤,通过对图案进行颜色映射、轮廓匹配和轮廓对比操作,逐步提取由颜色和轮廓所隐藏的秘密信息;最后,将从各图案中提取的秘密信息拼接起来,即完成图像信息提取,信息提取过程如图6所示。

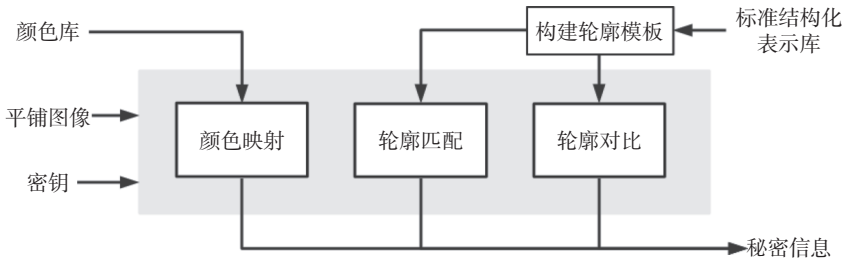


图6 信息提取过程

Fig.6 Process of information extraction

对接收到的平铺图像,接收方根据密钥获取各含密图案位置,并分割提取含密图案,通过图案颜色与颜色库的相似度对比获得信息序列 B_{color} 。利用模板匹配算法将含密图案的轮廓与图案轮廓模板相匹配,根据含密图案对应的标准结构化表示索引获得信息序列 B_{shape} 。为提取信息序

列 B_{contour} ,接收方为图案轮廓建立最小外接圆,以圆心为原点,直角坐标系下的 x 轴方向为极轴,建立极坐标系。记最小外接圆上的轮廓点为 $c_{1,0}^s$,极坐标为 $(\rho_{1,0}^s, \theta_{1,0}^s)$,由式(10)提取信息 B^{ρ} 和 B^{θ} 。式中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整, $(\cdot)_2$ 表示十进制的二进制转换。

$$\begin{cases} B^p = \left(\left[\frac{\rho_{1,0}^s - 1}{\Delta\rho} + \frac{1}{2} \right]_2 \right) \\ B^{\theta} = \left(\left[\frac{\theta_{1,0}^s}{\Delta\theta} + \frac{1}{2} \right]_2 \right) \end{cases} \quad (10)$$

将含密轮廓像素整体旋转 $-\theta_{1,0}^s$ 后进行归一化操作, 提取通过移动候选点隐藏的信息 B^s , 提取过程如图7所示。图7(a)为含密图案轮廓, 利用Harris特征点检测算法提取轮廓角点, 获得含密图案的轮廓段 $L^s = [L_1^s, L_2^s, \dots, L_l^s]$, 如图7(b)所示。记由标准结构化表示 C 重构的图案轮廓段为 $L^c = [L_1^c, L_2^c, \dots, L_l^c]$, 由于从栅格图像中提取的含密轮廓是连续曲线离散化的结果, 与原始的连续轮廓存在一定的位置偏差, 故结合普氏分析^[18]及轮廓角点, 将含密段 L_i^s 与其对应的原始段 L_i^c 进行

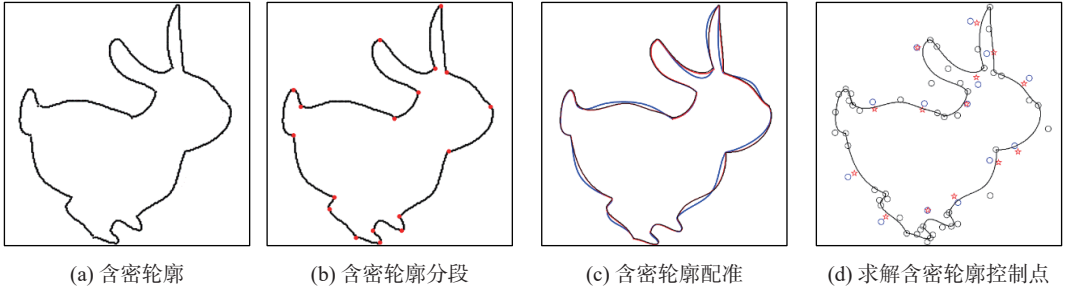


图7 从候选点中提取秘密信息的过程

Fig.7 Process of extracting secret information from candidate points

$$\min_C \|NC^g - P\|^2 \Rightarrow C^g = (N^T N)^{-1} N^T P = N^\dagger P \quad (11)$$

式中: N 为采样点对应的基函数; $\dagger$ 表示矩阵的伪逆运算。

将求解出的控制点集矩阵 C^g 中的候选点 $c_{i,j}^g (i=1, \dots, l; j=0, \dots, n_i)$ 与标准结构化表示 C 中的候选点 $c_{i,j} (i=1, \dots, l; j=0, \dots, n_i)$ 进行距离比对, 提取出秘密信息 $b_{i,j} (i=1, \dots, l; j=0, \dots, n_i)$, 计算公式如式(12)所示。

$$b_{i,j} = \begin{cases} 1, & E(c_{i,j}, c_{i,j}^g) - \frac{r_{i,j}}{2} > 0 \\ 0, & E(c_{i,j}, c_{i,j}^g) - \frac{r_{i,j}}{2} \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $E(\cdot)$ 为欧式距离的计算公式; $r_{i,j} = \alpha(E(c_{i,j-1}, c_{i,j}) + E(c_{i,j+1}, c_{i,j}))$ 为候选点的移动距离。

提取结果如图7(d)所示, 黑色和蓝色圆圈共同构成标准结构化表示点集, 其中蓝色圆圈为候选点, 红色星型为求解出的含密候选点。当红色星型与蓝色圆圈位置近乎重叠时, 即隐藏二进制信息“0”, 当红色星型与蓝色圆圈距离较远时, 即隐藏二进制信息“1”, 故本例中隐藏的信息序

配准。配准结果如图7(c)所示, 其中: 黑色曲线为含密轮廓 $\{L_i^s\} (i=1, 2, \dots, l)$; 蓝色曲线为原始轮廓 $\{L_i^c\} (i=1, 2, \dots, l)$; 红色曲线为配准后的轮廓 $\{L_i'^s\} (i=1, 2, \dots, l)$ 。最后, 对轮廓段 $L_i^s (i=1, 2, \dots, l)$ 内的离散点进行弦长参数化后均匀采样, 获得一组采样点集 P 。取各采样点与轮廓段 L_i^c 内最近点的参数作为该采样点的对应参数, 由此获得与该采样点对应的基函数, 并利用基于迭代最近点的B样条曲线拟合方法^[19]根据采样点及其对应基函数求解出含密轮廓段的控制点集矩阵 C^g 。求解B样条曲线的控制点, 即找到一组控制点使生成的B样条曲线与原曲线的逼近误差最小化, 可以将此过程看作一个最小二乘问题, 最小二乘的解可由式(11)表示。

列为 $[1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1]$ 。

将含密图案经轮廓局部微调及整体形变所隐藏的信息拼接即获得 $B_{\text{contour}} = [B^s, B^p, B^{\theta}]$ 。将分步提取的信息序列拼接起来即获得含密图案中隐藏的全部信息 $B = [B_{\text{shape}}, B_{\text{contour}}, B_{\text{color}}]$ 。提取含密平铺图像中的所有含密图案所隐藏的信息, 即完成了对平铺图像的秘密信息提取操作。

5 实验结果与分析

5.1 实验环境

本实验在 Windows 10 操作系统下使用仿真软件 Matlab 2020a 完成, 颜色库中颜色取自优设网站, 标准结构化表示库由从网站 pngtree 中选取的图像构建, 实验所用秘密信息为随机生成的二进制数据, 位置选择密钥为随机产生的数据。

5.2 实验结果展示及算法复杂度分析

为检验此算法的可行性, 实验选取图8(a)~(d)所示的4个图案, 它们的标准结构化表示如图8(e)~(h)所示, 可通过轮廓形状隐藏2 bit信

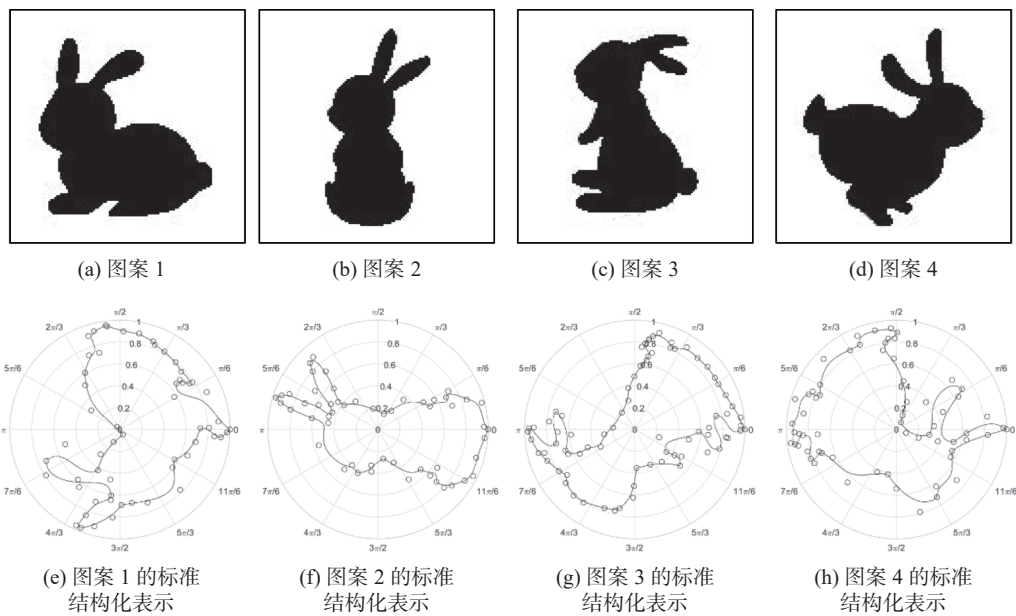


图 8 原始图案及其对应标准结构化表示

Fig.8 Original patterns and their corresponding standardized and structured representation

息。选取 $[175, 215, 230]$, $[116, 143, 154]$, $[66, 80, 83]$ 和 $[90, 170, 200]$ 这 4 种颜色构建颜色库, 可通过颜色隐藏 2 bit 信息, 平铺图像背景用颜色 $[255, 255, 255]$ 填充。对标准结构化表示的形变操作选择 4 种放缩倍数 $[1, 1.25, 1.5, 1.75]$ 和 8 个旋转角度 $[0, \frac{1}{4}\pi, \frac{1}{2}\pi, \frac{3}{4}\pi, \pi, \frac{5}{4}\pi, \frac{3}{2}\pi, \frac{7}{4}\pi]$, 故各图案可通过整体形变隐藏 5 bit 信息, 同时候选点移动距离

的预设参数设置为 $\alpha = 0.08$, 生成图像大小为 800×800 像素。

图 9 展示了含密平铺图像的生成及秘密信息的提取过程。图 9(a) 展示了空白画布中由密钥选取的含密图案摆放位置, 根据秘密信息经轮廓选取、轮廓调整、颜色选取并填充后的结果如图 9(b) 所示。为提高生成平铺图像的质量及其中含密图案的隐秘性, 将随机选取标准结构化表示库中的

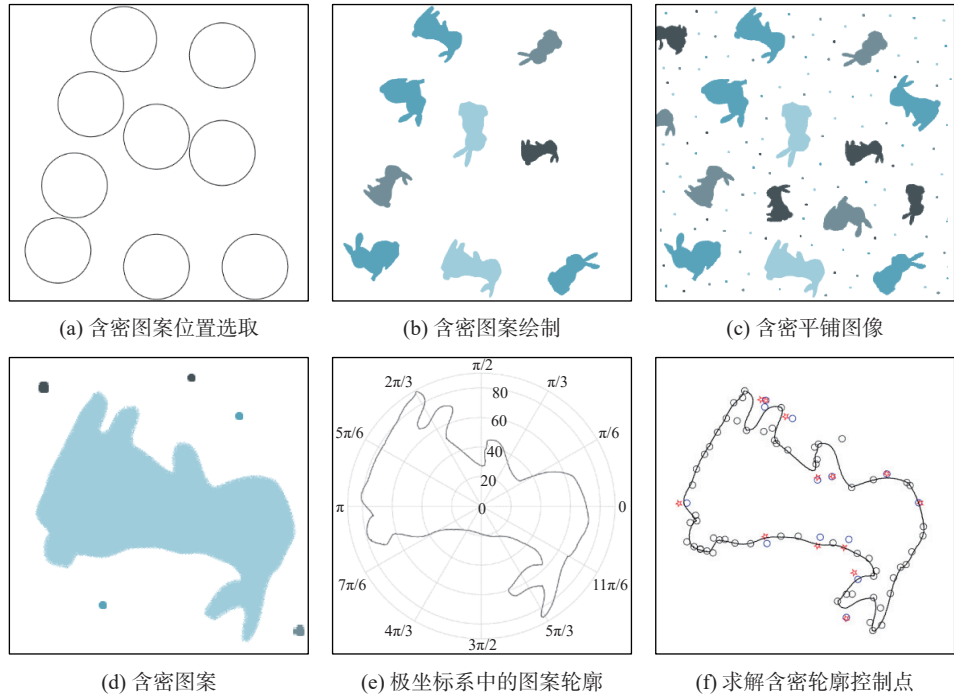


图 9 平铺图像生成及秘密信息提取过程

Fig.9 Process of generating a tiled image and extracting secret information

形状并进行随机形变后绘制在画布的空白位置中, 再绘制与含密图案互不重叠的离散点美化图像, 即完成了含密平铺图像的构造。图 9(c) 中含 9 个含密图案, 共隐藏 166 bit 信息。

在信息提取过程中, 接收方以密钥的定位坐标为中心分割出所有含密图案。如图 9(d) 所示, 对某含密图案, 接收方通过颜色映射和轮廓匹配提取信息 $B_{\text{shape}} = [1, 0]$ 和 $B_{\text{color}} = [1, 1]$, 然后如图 9(e) 构建极坐标系, 提取由放缩及旋转所隐藏的信息 $B^{\theta} = [1, 1]$ 和 $B^{\phi} = [1, 0, 0]$, 最后求解出含密图案轮廓的候选点, 如图 9(f) 中红色星号所示。将其与标

准结构化表示的候选点(图中由蓝色圆圈表示)进行比较, 获得 $B^s = [1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0]$ 。故此图案所隐藏的秘密信息为 $[1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1]$ 。经实验验证, 此算法可完全准确地提取出含密平铺图像中隐藏的秘密信息。

本算法可通过对标准结构化表示库及颜色库进行扩展, 生成更多样式的平铺图像, 以增多生成图像样式, 提高含密图像的隐秘性。实验选取 8 种花朵图案构建新的结构化表示库, 生成的含密平铺图像如图 10 所示。图 10(a) ~ (c) 的信息隐藏容量分别为 143, 167, 192 bit。



图 10 更多样式的平铺图像展示

Fig.10 Tiled image display in more styles

由于本算法中使用的标准结构化表示库和颜色库均属于预生成, 故主要分析本算法中信息隐藏及提取算法的复杂度。信息隐藏算法主要包括含密图案位置选取、标准结构化表示的选择及调整、图案颜色的选择及填充 3 部分操作。其中, 含密图案位置选取操作需满足各位置间互不重叠, 故各新选位置均需与已选位置逐一进行距离比较, 因此, 选取 m 个位置的计算复杂度是 $O(m^2)$ 。标准结构化表示的选择及调整操作仅通过秘密信息找到与之对应的标准结构化表示, 再对其中的点集进行位置移动, 故其复杂度为 $O(1)$; 图案颜色的选取及填充操作根据秘密信息选取对应颜色编号并填充图案, 其时间复杂度为 $O(1)$ 。综上所述, 本算法的复杂度为 $O(m^2) + O(m \times (1+1))$, 因此, 信息隐藏算法的总体时间复杂度为 $O(n^2)$, n 为控制点数。

信息提取算法主要包括含密图案位置选取、图案颜色匹配、图案轮廓匹配和轮廓对比 4 部分操作。含密图案位置选取操作与信息隐藏算法相同, 计算复杂度为 $O(m^2)$ 。图案颜色匹配操作将含密图案颜色与颜色库中的颜色逐一比较, 时间复杂度为 $O(N)$, N 为颜色库中颜色总数。图案轮廓

匹配操作采用模板匹配算法, 计算模板图像与子图像中各像素间的归一化相关性, 时间复杂度为 $O(M \times M_{\text{sub}})$, M 为模板图像像素数, M_{sub} 为子图像像素数。轮廓对比操作中, 先利用普氏分析对图案轮廓进行配准, 其复杂度为 $O(p^3)$, p 为轮廓素点数; 再通过迭代拟合求解含密候选点坐标, 其时间复杂度为 $O(q \times n^2)$, q 为迭代次数。综上, 从 m 个含密图案中提取秘密信息的总体时间复杂度为 $O(m^2) + O(m \times (N + M \times M_{\text{sub}} + p^3 + q \times n^2))$, 故信息提取算法的时间复杂度为 $O(n^4)$ 。

同时, 在信息隐藏及提取算法中, 均通过建立四维数组对标准结构化表示中的元素进行存储、标记及运算, 其空间复杂度为 $O(n^4)$ 。

5.3 鲁棒性分析与比较

实验选取了一些常见的图像攻击方法对 20 张大小为 1000×1000 像素、隐藏容量为 $100 \sim 200$ bit 的含密平铺图像模拟攻击, 具体的攻击类型及参数选取如表 1 所示, 并通过信息提取的误比特率 $\mathcal{P}_{\text{BER}}$ 来评估算法鲁棒性, 误比特率为

$$\mathcal{P}_{\text{BER}} = \frac{D}{L} \times 100\% \quad (13)$$

式中: D 为提取的错误二进制信息数; L 为秘密信

表 1 图像攻击方法及参数
Tab.1 Image attack methods and parameters

图像攻击方法	具体参数
JPEG压缩	质量因子: 30, 50, 90
放缩变换	放缩比例: 0.6, 0.8, 1.2
均值滤波	窗口大小: 3×3, 5×5, 7×7
中值滤波	窗口大小: 3×3, 5×5, 7×7
高斯滤波	窗口大小: 3×3, 5×5, 7×7

息的全部长度。

图 11 展示了含密平铺图像受到不同攻击后的结果图像。其中：图 11(a) 为未经攻击的隐藏有 176 bit 信息的含密平铺图像；图 11(b)~(f) 分别为对其进行 JPEG 压缩(质量因子是 50)、放缩变换(比例是 0.8)、均值滤波(窗口大小是 5×5)、中值滤波(窗口大小是 5×5)和高斯滤波(窗口大小是 5×5)攻击后的图像。

实验结果如表 2 所示，本算法对选取参数的 JPEG 压缩和中值滤波、高斯滤波均具有较好的鲁棒性，提取信息的误比特率为 0。由于均值滤波将图案的边缘像素用窗口内的像素均值代替，故当滤波器窗口选取较大时，将造成轮廓边缘模糊，影响信息提取过程中对图案轮廓的准确提取，进而影响秘密信息的提取准确率。由于图案轮廓边缘的绘制及秘密信息的提取均利用连续的 B 样条

参数曲线完成，在生成栅格图像时，图案轮廓的离散化将导致图案轮廓曲线与原始连续函数曲线之间存在误差，而对图像的缩放将导致图像的分辨率降低，从而扩大由连续曲线离散化带来的误差。因此，较小的缩放比较将影响含密候选点的准确计算，进而导致秘密信息难以准确提取。

为进一步检验本算法较以往无载体信息隐藏算法于常见图像攻击鲁棒性能的提升，将本算法与基于图像映射的选择式信息隐藏算法^[20-21]与本算法类似的基于图像生成的构造式信息隐藏算法^[12,15]进行比较，结果如表 2 所示。其中，符号“—”表示对比文献中未包含此实验结果。本算法对 JPEG 压缩较其他算法具有更好的鲁棒性，实验表明：本算法生成图像经质量因子为 30 的 JPEG 压缩后，其含密图案的轮廓依旧可以被准确地检测提取，进而可以准确地提取出秘密信息；而文献 [20] 的算法和文献 [21] 的算法均利用频域信息为图像编码构建其与二值数据的映射，故当图像受到质量因子较大的 JPEG 压缩时，将对含密图像的 DC 系数产生影响，进而影响信息提取准确率；对于利用图像空域进行信息隐藏的算法^[12,15]，它们分别采用尺寸较小的形状特征及图像 SIFT 特征进行信息隐藏，故当 JPEG 压缩较为严重时，将对图像中的细节特征造成破坏，进而影响算法的特征检测准确性，导致秘密信息提取有误。同时，相

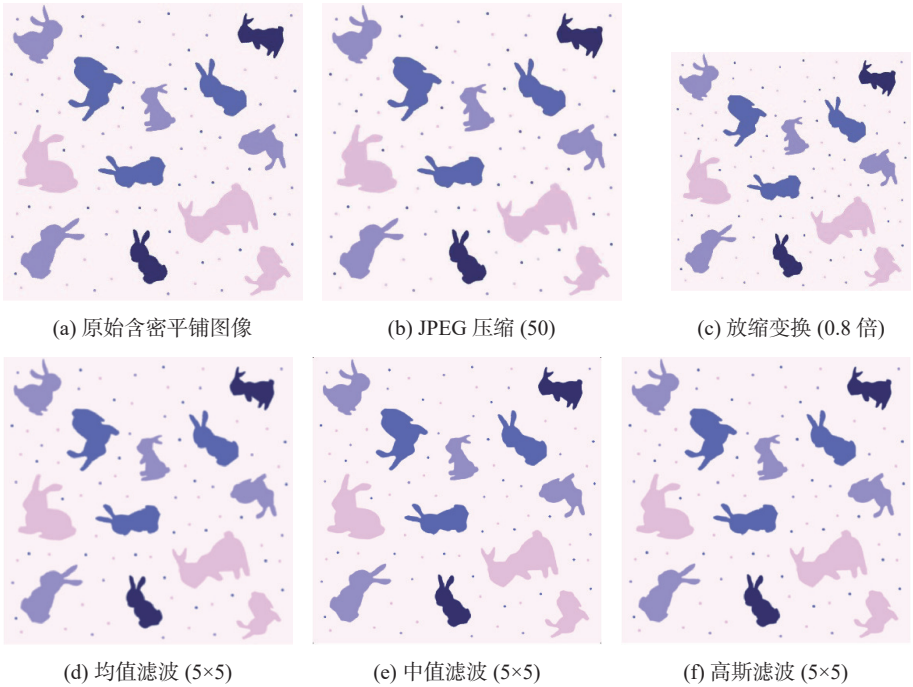


图 11 不同攻击下的含密平铺图像

Fig.11 Attacked versions of stego tiled images

表 2 本文算法对常见图像攻击的鲁棒性能评估

Tab.2 Robustness evaluation of the proposed algorithm against common image attacks

攻击类型 (参数)	参数值	$P_{BER} / \%$				
		本文算法	文献[20]	文献[21]	文献[12]	文献[15]
JPEG压缩 (质量因子)	30	0	2.08	2.3	5.7	17
	50	0	0	0	0	12.5
	90	0	0	0	0	4.8
图像缩放 (比例)	0.6	44.51	0	0	—	—
	0.8	27.34	0	0	—	—
	1.2	0	0	0	—	—
均值滤波 (窗口大小)	3 × 3	0	0	0	—	—
	5 × 5	0	0	—	—	—
	7 × 7	7.27	0	—	—	—
中值滤波 (窗口大小)	3 × 3	0	0	0	—	—
	5 × 5	0	0.86	—	—	—
	7 × 7	0	1.72	—	—	—
高斯滤波 (窗口大小)	3 × 3	0	0	0	—	—
	5 × 5	0	0	—	—	—
	7 × 7	0	0	—	—	—

比于后两种图像构造式信息隐藏算法, 本文算法可抵抗更多类型的图像攻击。

6 结 论

本文提出了一种基于轮廓绘制及填色的构造式信息隐藏算法。通过构建图案轮廓的标准结构化表示库, 经轮廓选取、轮廓调整及颜色填充并绘制的重复操作, 构造出一幅含有秘密信息的平铺图像。不同于已有的基于元素映射的构造式信息隐藏算法, 本算法通过构建标准结构化表示库在有效降低收发双方共享信息存储容量的同时, 可对表示库进行质量加密提高算法安全性, 且由于可利用结构化表示绘制有意义图案, 故生成图像具有较类似算法更好的视觉效果。同时, 经实验表明, 此算法生成的平铺图像对 JPEG 压缩及图像滤波具有一定的鲁棒性, 且相比于类似构造式信息隐藏算法, 本文算法可抵抗更多类型的图像攻击。

同时, 由于 B 样条曲线可满足大部分曲线绘制需求, 因此, 本文利用轮廓曲线进行信息隐藏的方法亦可应用于更多场景中。例如: 可通过对复杂图像边缘曲线的调整, 实现在复杂图像中的

信息隐藏; 还可利用 B 样条曲线的三维曲面绘制功能, 在三维模型或空间设计等场景中进行应用。针对现有的基于深度学习的构造式信息隐藏算法计算复杂度高、同一种算法仅能生成同一类型图像的问题, 可在 B 样条绘制曲线的基础上进行深度学习, 从而在一定程度上降低计算复杂度, 并对生成图像的内容起到引导作用, 提高生成图像的多样性和交互性。

参考文献:

[1] WANG H Q, WANG S Z. Cyber warfare: steganography vs. steganalysis[J]. [Communications of the ACM](#), 2004, 47(10): 76–82.

[2] FRIDRICH J, GOLJAN M. Practical steganalysis of digital images: state of the art[C]//Proceedings of SPIE 4675, Security and Watermarking of Multimedia Contents IV. San Jose: SPIE, 2002, 4675: 1–13.

[3] FRIDRICH J, GOLJAN M, LISONEK P, et al. Writing on wet paper[J]. [IEEE Transactions on Signal Processing](#), 2005, 53(10): 3923–3935.

[4] WESTFELD A. F5—a steganographic algorithm: high capacity despite better steganalysis[C]//4th International Workshop on Information Hiding. Pittsburgh: Springer, 2001: 289–302.

[5] ZHANG W M, ZHANG X P, WANG S Z. Maximizing steganographic embedding efficiency by combining Hamming codes and wet paper codes[C]//10th International Workshop on Information Hiding. Sana Barbara: Springer, 2008: 60–71.

[6] ZHOU Z L, SUN H Y, HARIT R, et al. Coverless image steganography without embedding[C]//First International Conference on Cloud Computing and Security. Nanjing: Springer, 2015: 123–132.

[7] OTORI H, KURIYAMA S. Texture synthesis for mobile data communications[J]. [IEEE Computer Graphics and Applications](#), 2009, 29(6): 74–81.

[8] WU K C, WANG C M. Steganography using reversible texture synthesis[J]. [IEEE Transactions on Image Processing](#), 2015, 24(1): 130–139.

[9] ZHOU H, CHEN K J, ZHANG W M, et al. Targeted attack and security enhancement on texture synthesis based steganography[J]. [Journal of Visual Communication and Image Representation](#), 2018, 54: 100–107.

[10] QIAN Z X, ZHOU H, ZHANG W M, et al. Robust steganography using texture synthesis[C]//Proceeding of the Twelfth International Conference on Intelligent

Information Hiding and Multimedia Signal Processing on Advances in Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. Kaohsiung, China: Springer, 2017: 25–33.

[11] 潘琳, 钱振兴, 张新鹏. 基于构造纹理图像的数字隐写 [J]. 应用科学学报, 2016, 34(5): 625–632.

[12] QIAN Z X, PAN L, HUANG N N, et al. Constructive steganography by tangles[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2018, 12(8): 3911–3925.

[13] QIAN Z X, HUANG N N, LI S, et al. Constructive steganography using texture synthesis[J]. IETE Technical Review, 2018, 35(S1): 14–22.

[14] XU J Y, MAO X Y, JIN X G, et al. Hidden message in a deformation-based texture[J]. The Visual Computer, 2015, 31(12): 1653–1669.

[15] 司广文, 秦川, 姚恒, 等. 基于纹理特征分类与合成的鲁棒无载体信息隐藏 [J]. 应用科学学报, 2020, 38(3): 441–454.

[16] 陈兆学, 张奎. 一种基于像素标记的二值图像区域围线追踪方法 [J]. 上海理工大学学报, 2019, 41(3): 289–292.

[17] PENG Y W, LAN H, YUE M L, et al. Multipurpose watermarking for vector map protection and authentication[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(6): 7239–7259.

[18] KENDALL D G. A survey of the statistical theory of shape[J]. Statistical Science, 1989, 4(2): 87–99.

[19] 肖轶军, 丁明跃, 彭嘉雄. 基于迭代最近点的 B 样条曲线拟合方法研究 [J]. 中国图象图形学报: A 辑, 2000, 5(7): 585–588.

[20] ZHANG X, PENG F, LONG M. Robust coverless image steganography based on DCT and LDA topic classification[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2018, 20(12): 3223–3238.

[21] ZOU L M, LI J, WAN W B, et al. Robust coverless image steganography based on neglected coverless image dataset construction[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2023, 25: 5552–5564.

(编辑: 丁红艺)