

一种零分辨率 3D 网格模型的信息隐藏算法



任 帅¹ 王 萌¹ 范傲雄¹ 高 泽¹ 徐 解¹ Shahzad KHURRAM¹
张 弢²

1 长安大学信息工程学院 西安 710064

2 长安大学电子与控制工程学院 西安 710064

(shuairan@chd.edu.cn)

摘 要 针对目前 3D 网格模型信息隐藏算法抗分析性弱的问题,提出一种零分辨率的信息隐藏算法。首先,利用改进半边折叠网格简化算法对网格模型进行多分辨率分析,将 3 个分辨率层表示为 High-layer, Mid-layer, Low-layer;其次,在 High-layer 进行同心球面分割,提取特征向量,在 Mid-layer 计算顶点突出度,确定嵌入信息的特征点;再次,通过将特征向量中特征值的最高位与 Chebyshev 置乱的加密信息建立联系以形成关联信息;最后,利用分段映射函数将关联信息嵌入到特征点球面坐标 r 值的 DCT 变换交流系数中。算法将高分辨率层的特征向量与置乱信息所构建的关联信息隐藏于能量小于 15% 中分辨率层的鲁棒特征点的仿射变换不变量中,有利于算法的不可见性、鲁棒性和抗分析性。采用一阶拉普拉斯平滑的隐写分析方法检测不到点、面特征的明显变化,表明所提算法的抗分析性好。

关键词: 零分辨率信息隐藏;半边折叠网格简化;同心球面分割;DCT 变换;抗分析性

中图法分类号 TP309.2;TP306.1

Zero-high-resolution Information Hiding Algorithm for 3D Mesh Model

REN Shuai¹, WANG Meng¹, FAN Ao-xiong¹, GAO Ze¹, XU Jie¹, Shahzad KHURRAM¹ and ZHANG Tao²

1 School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China

2 School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract Aiming at weak anti-analysis of current information hiding algorithm for 3D mesh model, a zero-high-resolution information hiding algorithm was proposed. Firstly, multi-resolution analysis based on the improved half-fold mesh simplification algorithm is manipulated on mesh model to decompose it into High-layer, Mid-layer, Low-layer. Secondly, the feature vectors are extracted by concentric sphere segmentation in High-layer, and the feature points embedded in information are determined by calculating vertex saliency in Mid-layer. Thirdly, the highest bit of the eigenvalue is obtained circularly from the feature vector and then correlated with the encrypted information scrambled by Chebyshev to form the associated information. Finally, the associated information is embedded into the DCT transform AC coefficient of the feature point spherical coordinate r value using the piecewise mapping function. The algorithm hides the associated information constructed by feature vector of High-layer and scrambled information into the affine transform invariant of robust feature points in Mid-layer with less than 15% energy, which is beneficial to the invisibility, robustness and anti-analysis of algorithm. The obvious changes of point and surface features are undetected by the first-order Laplacian smoothing steganalysis method, which means that the proposed algorithm is of good anti-analysis ability.

Keywords Zero-high-resolution information hiding, Half-folded mesh simplification, Concentric spherical segmentation, DCT transform, Anti-analysis ability

1 引言

信息隐藏^[1]是借助多媒体载体数据传输信息,以适应人类视觉感官并在第三方产生怀疑时能抵御外界攻击破坏从而达到信息安全通信的一种技术。传统主流载体有图片、视频、

音频、文本。近年由于 VR、3D 打印、3D 扫描技术研究的狂热兴起,含丰富视觉细节信息的三维模型^[2]吸引了信息隐藏学者的高度关注,成为了信息隐藏领域可供选择的一种新型载体。文献[3]利用梅森旋转演算法生成伪随机序列,扰乱 PCA 处理后排序所得的顶点隐写序列,通过平移 PCA 两条

到稿日期:2019-08-04 返修日期:2019-11-21 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(61702050);中央高校“双一流”引导专项(300104292405);2019 年研究生教育教学改革建设专项基础建设项目(300103190640);大学生创新创业训练计划项目(201910710079,201810710052,201810710060,201810710215,201810710224)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61702050), “Double Top-Class” Guidance Project for the Central Universities (300104292405), Special Infrastructure Project for the Reform and Construction of Postgraduate Education in 2019 (300103190640) and Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students (201910710079, 201810710052, 201810710060, 201810710215, 201810710224).

通信作者:王萌(1162954135@qq.com)

主轴进行多层隐写嵌入信息。该算法修改模型主要成分,影响了模型视觉效果;多层隐写虽增加了容量性,即加剧恶化了不可见性。同时,该算法主要为空间域操作,其鲁棒性仍有待提升。文献[4]使用集成成像系统将三维模型转换为微单元图像,对其 RGB 分量进行 DWT 分解,将秘密图像的 RGB 分量对应嵌入载体低频子带。该算法实际是基于数字图像的信息隐藏^[5],修改能量大的区域会导致模型高失真性。文献[6]先后采用等高线分割和帧数据采样实现对姿态矫正的三维模型帧化采样处理,将新顶点的 3 个坐标轴值视为 3 个广义灰度图,并进行 3 级小波分解,选取低频 LL3 作为隐藏区域。由于 3 级小波分解 LL3 占有能量与一级小波分解 LL1 相差甚小,对 LL3 修改后,图像局部特征变化明显,也就是三维模型局部顶点变化明显,容易引起外界攻击。文献[7]通过对三维模型水平映射的外部轮廓进行解析与修改,实现信息嵌入。该算法复杂度低,抵御几何仿射变化、简化等攻击的鲁棒性弱。文献[8]结合边折叠网格简化、局部高度与 MeanShift 聚类将顶点按能量划分归类,依据能量权重原则隐藏秘密信息。不同的简化率使得不可见性具有不确定性。文献[9]根据最大内切球、最大外接球以及球面坐标经纬度对模型立体分区,将秘密信息等分为总分区,每个分区嵌入一份信息,具体嵌入是通过修改离散方向量变化较大点的 DWT 系数实现。由于分区顶点数不同,而该算法在每个分区都嵌入等量信息,因此模型在顶点数少的分区位置会发生凸起或凹陷状况。综上所述。文献[3-4,6-9]的算法存在不可见差或鲁棒性弱的问题,算法性能不均衡,非正常的模型外观容易吸引不法分子的注意,他们可以对扭曲变化严重的顶点进行隐写分析,信息破解率不言而喻。抗分析性弱是上述算法的共有问题。

针对这一问题,本文结合 3D 网格模型简化算法和多分辨率分层理论,提出一种零高分辨率的 3D 网格模型信息隐藏算法。该算法首先在利用网格简化进行多分辨率分析后的高分辨率层中实施同心球面分割,以提取模型特征向量;再利用改进突出函数计算中分辨率层的特征点;然后生成模型特征向量与 Chebyshev 置乱信息的关联信息;最终将关联信息嵌入到特征点。用 matlab,python 编程,通过 3Ds Max 测试,本文所提算法被证明具有很好的不可见性、鲁棒性和抗分析性。

2 零高分辨率的 3D 网格模型信息隐藏算法

本文提出的信息隐藏算法主要分为 4 个阶段。1)利用半边折叠网格简化算法将三维模型顶点分成低、中、高三层分辨率,并进行球面坐标转化。2)选择高分辨率层顶点,利用同心球面分割构造模型鲁棒特征向量,通过突出函数计算中分辨率层顶点的突出度确定特征点,对其球面坐标 r 值的一维 DCT 变换值进行归一化处理,以确定信息隐藏区域。3)将 Chebyshev 混沌置乱的二值秘密图像与特征向量建立关联,得到关联信息。4)利用分段映射函数微调 DCT 变换系数,实现关联信息的嵌入。信息提取是对含密三维模型执行信息嵌入前的原模型预处理和信息嵌入时的逆操作过程。

2.1 三维模型的多分辨率表示

三维模型多分辨率分析技术^[10]指在满足 HVS 特性下,减少表达模型数据量,使大数据量三维模型能快速实现可视化和传输。网格模型简化^[11]指在保持模型轮廓清晰的前提

下,删除一些点或面片以简化网格。网格模型简化可看成一种三维模型的多分辨率表示。

半边折叠网格简化^[12]原理如图 1 所示。将图 1(a)中 v 点移至 u 点,删除共用 uv 边的两个面 uva, uvb 得简化网格图 1(b)。半边指 uv 和 vu 两条有向边,“有向”源于 uv 和 vu 折叠代价数值之间的差异。

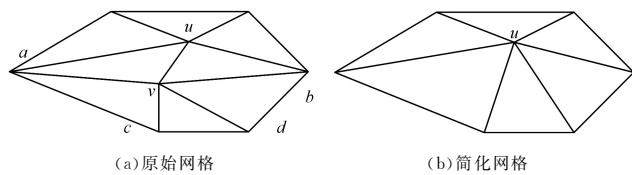


图 1 半边折叠网格简化

Fig. 1 Half-folded mesh simplification

相比广为运用的 Hoppe 学者的经典简化^[14],文献[13]提出的半边折叠代价计算(如式(1))引入了删除点的度以及折叠边长度的影响,使代价值更为准确。计算三维模型的所有半边折叠代价,按照删除半边折叠代价值最小原则简化模型。

$$\text{cost}(u, v) = \max_{f \in T_u} \{ \min_{n \in T_{uv}} \sin^2 \frac{\alpha}{2} \} \times D \times \|u - v\| \quad (1)$$

其中, T_u 是与删除点 v 相关的三角面片集合,如图 1(a)中的 uva, uvb, vac, vcd, vdb ; T_{uv} 是折叠边所在三角面片集合,如图 1(a)中的 uva, uvb ; α 是面 f 与面 n 间的夹角; D 是已删除顶点 v 的度; $\|u - v\|$ 是半折叠边的长度。度越大,表示所控制的网格模型信息越多;半折叠边的长度越长,说明其在模型中的重要程度就越高。

本文利用文献[13]中的半边折叠网格简化对三维模型进行三层分辨率表示。以斯坦福大学 3D 模型库中的 Happy Buddha 为例,具体步骤如下。

步骤 1 根据式(1)计算三维模型所有半边的折叠代价,按折叠代价最小原则删除小于原模型总顶点数 15% 的顶点,得到高分辨率层,记为 High-layer,如图 2(b)所示。

步骤 2 对删除掉的 15% 顶点组成的三维模型重复进行步骤 1,删除约小于原始模型总顶点数 5% 的顶点,得到中分辨率层,记为 Mid-layer,如图 2(c)所示。删除掉的小于原始模型总顶点数 5% 顶点组成的三维模型是低分辨率层,记为 Low-layer,如图 2(d)所示。



(a)原模型 (b)High-layer (c)Mid-layer (d)Low-layer

图 2 Happy Buddha 模型的 3 层分辨率表示

Fig. 2 Three-layer resolution representation of Happy Buddha model

步骤 1 和步骤 2 是对三维模型做两次网格简化,将顶点分成 3 类,分别是 High-layer, Mid-layer, Low-layer。值得注意的是,简化删除顶点数是根据网格模型点面分布特性多次实验观察择优设置的,须满足 Low-layer 为模型轮廓信息、

High-layer 与原模型差异甚小这两个条件。显然,High-layer, Mid-layer, Low-layer 可视为模型的 3 层能量划分,其中, High-layer 能量最大,有助于算法鲁棒性的设计;Mid-layer 和 Low-layer 能量小,为信息嵌入的不可见性提供有利区域。表 1 列出 3 层分辨率顶点数分布情况。

表 1 Happy Buddha 模型的 3 层分辨率顶点分布
Table 1 Three-level resolution vertex distribution of Happy Buddha model

模型	原模型 顶点数	High-layer 顶点数>85%	Mid-layer 顶点数>10%	Low-layer 顶点数>5%
Happy Buddha	61 512	52 901	6 767	1 844

2.2 零高分辨率信息隐藏的提出

受 2.1 节三维模型多分辨率分析技术的启发,由于高分辨率包含了模型外部轮廓和重要内部细节信息,其所含能量占比接近 100%,用肉眼几乎观察不到外观与原模型的任何差异,因此本文提出零高分辨率信息隐藏。此“零”非传统在低分辨率或中分辨率隐藏信息实现的“零”,其被赋予两层含义:1)不修改任何信息,宏观控制算法的不可见性从根本上削弱了攻击者的隐写分析注意力;2)构造模型鲁棒特征用于关联秘密信息,相当于对秘密信息复杂加密,以加大算法复杂度,增强抗分析性,同时提升信息提取成功率。“零”是一个算法的整体基调,在此基础上,考虑信息嵌入的不可见性,选取能量小于原模型 15%的中分辨率层顶点作为隐藏位置;考虑鲁棒性,细化隐藏位置到鲁棒特征点的仿射变换不变量,且运用小波变换、离散余弦变换等频域变换增强该性能;考虑信息通信的安全性,防盗窃者截获,在秘密信息嵌入前进行高难度置乱加密。本文零高分辨率算法的总体隐藏流程如图 3 所示。

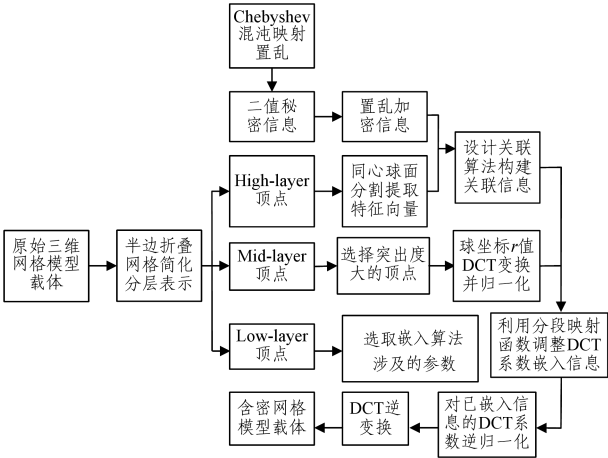


图 3 算法总体信息隐藏流程

Fig. 3 Flowchart of general information hiding algorithm

2.3 信息隐藏算法的步骤

步骤 1 读取 2.1 节处理后的三维模型 T ,按式(2)计算 T 的质心 v_g ,将原点移动到质心 v_g ,得到新顶点 v_i' :

$$v_g = (v_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, v_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, v_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i)$$
 (2)

$$v_i' = (x_i', y_i', z_i') = \begin{cases} x_i - v_x \\ y_i - v_y \\ z_i - v_z \end{cases}$$
 (3)

其中, $v_i = (x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, \dots, N, N$ 表示三维模型 T 的顶点总数。

步骤 2 根据图 4 所示关系将三维模型 T 顶点所在笛卡尔坐标按式(4)转换为球面坐标 $s_i = (r_i, \theta_i, \varphi_i)$ 。

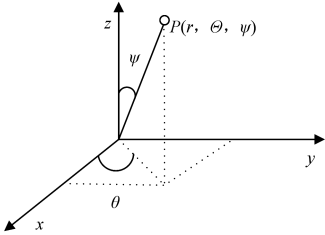


图 4 (x, y, z) 与 (r, θ, φ) 的转换关系

Fig. 4 Conversion relationship of (x, y, z) and (r, θ, φ)

$$s_i = (r_i, \theta_i, \varphi_i) = \begin{cases} \sqrt{x_i'^2 + y_i'^2 + z_i'^2}, & r_i \in [0, +\infty) \\ \arctan(\frac{y_i'}{x_i'}), & \theta_i \in [0, 2\pi] \\ \arccos(\frac{z_i'}{r_i}), & \varphi_i \in [0, \pi] \end{cases}$$
 (4)

步骤 3 构造模型 T 的鲁棒特征向量。1)同心球的确定。计算 High-layer 最远点到球心的距离 R ,设 R 为同心球最大半径,将 R 等分为 M 份, M 个均分点到球心的距离作为 M 个半径,确定 M 个同心球。2)同心球面分割提取特征向量。以同心球球面为界,限将三维模型分割成 M 个区域,记为 $\{\Omega_i | i = 1, 2, 3, \dots, M\}$ 。在 M 个分区 Ω_i 中,找到距离球心最远的顶点 $v_f (f = 1, 2, 3, \dots, M)$,将 v_f 顶点坐标 $r_f (f = 1, 2, \dots, M)$ 组合为模型特征向量,记为 $\text{Car}_{\text{fea}} = (r_1, r_2, \dots, r_M)$ 。

步骤 4 确定特征点。通过改进突出函数^[15]式(5)计算 Mid-layer 顶点突出度 $O(v)$ (突出度的物理意义为点到网格所有其他点的距离之和),降序排列并选择前 k 个顶点作为特征点,满足 $k > S^2$,其中 S^2 是秘密信息的二值表达总位数。

$$O(v) = \frac{1}{A(\text{Mid-layer})} \sum_{v_i \in \text{Mid-layer}} d(v, v_i)^2 A(v_i)$$
 (5)

且 $A(\text{Mid-layer}) = \sum_{v_i \in \text{Mid-layer}} A(v_i)$ 。其中, $d(v, v_i)$ 是 v 与 v_i 之间的欧氏距离, $A(v_i)$ 是点 v_i 一环邻域的面积, $A(\text{Mid-layer})$ 是 Mid-layer 顶点一环邻域的面积和。由于模型差异,突出顶点的分布不尽相同, $A(v_i)$ 与 $A(\text{Mid-layer})$ 在式(5)中的含义为顶点权重系数,目的是减小顶点突出度的计算误差。

步骤 5 确定隐藏区域。根据式(6)对 k 个特征点坐标 r 值进行一维 DCT 变换,得到 k 个 DCT 系数。由于直流系数携带能量大,为避免失真,选择后 $k-1$ 个系数(记 $\text{DCT}_f = (f_1, f_2, \dots, f_{k-1})$)作为信息嵌入区域。

$$F(u) = c(u) \sum_{i=0}^{k-1} f(i) \cos[\frac{(i+0.5)\pi}{k} u]$$
 (6)

且 $c(u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{L}}, & u=0 \\ \sqrt{\frac{2}{L}}, & u \neq 0 \end{cases}$ 。其中, $f(i)$ 是 i 顶点坐标 r 值, $F(u)$ 是 DCT 变换系数。

步骤 6 归一化处理。将 $\text{DCT}_f = (f_1, f_2, \dots, f_{k-1})$ 中的负数转为绝对值,并记录负数的位置,得到 $\text{DCT}_f' = (f_1', f_2', \dots, f_{k-1}')$ 。按式(7)将上式归一化到 $[0, 1]$ 区间,得到归

一化后的 DCT 系数 $DCT_f'' = (f_1'', f_2'', \dots, f_{k-1}'')$ 。

$$f_k'' = \frac{f_k' - f_{DCT}^{\min'}}{f_{DCT}^{\max'} - f_{DCT}^{\min'}} \quad (7)$$

其中, $f_{DCT}^{\min'}$ 是 DCT_f' 最小值, $f_{DCT}^{\max'}$ 是 DCT_f' 最大值。

步骤 7 置乱秘密信息。按式(8)对二值秘密图像 Sec_{img} 执行 n 阶 Chebyshev 置乱^[16], 确定阶数 n 和初始值 x_0 , 得到混沌序列 x_a ($a=3, 4, 5, \dots$), 且 $x_a \in [-1, 1]$ 。将 x_a 按负数为 0、正数为 1 的规则转换为二值序列 E_a , 对 E_a 与 Sec_{img} 进行式(9)操作, 得置乱信息 Sec_{enc} 。

$$x_{a+1} = \cos(n \arccos(x_a)) \quad (8)$$

$$Sec_{enc} = E_a \oplus Sec_{img} \quad (9)$$

其中, 混沌状态满足 $n > 2$, 迭代次数根据 Sec_{img} 的大小确定。

步骤 8 建立关联信息。将特征向量 Car_{fea} 中的特征值转换为二进制形式后, 按顺序取最高位, 并按照表 2 规则与置乱信息 Sec_{enc} 按位建立关联, 得到关联位。将关联位串行排列, 形成关联信息 Sec_{rel} 。若 Sec_{enc} 位数多于特征值个数 M , 须循环取特征值, 直至对 Sec_{enc} 所有位都建立了关联。

表 2 秘密信息 Sec_{enc} 与特征向量 Car_{fea} 建立关联

Table 2 Establishment of association between secret information

Sec_{enc} and feature vectors Car_{fea}		
Car_{fea} 特征值最高位	Sec_{enc} 位	关联位
1	1	1+1=10, 取 0
	0	1+0=1
1	1	0+1=1
	0	0+0=0

步骤 9 信息嵌入。映射函数 $Y = X^b$ 在 $0 \leq X \leq 1$ 时, 固定 b 值, 有 $0 \leq Y \leq 1$, 如图 5 所示, 并有变化量 $0 \leq |Y - X| \leq 1$ 。针对本文有映射函数式(10), 观察图 5 曲线变化情况。为减小修改量 $|DCT_f''' - DCT_f''|$, 可构造分段映射函数: 1) 令 $b = b'$, 当 Sec_{rel} 位为 0 时, 设 $b' = 1 + t\Delta b$, 当 Sec_{rel} 位为 1 时, 设 $b' = 1 - t\Delta b$; 2) 按表 3 规则, 将不同步长 Δb 作用于 DCT_f'' 不同区间得到式(11)、式(12)所示的分段映射函数。嵌入方式: t 初始值为 0, 不断加 1 迭代 t , 使得 DCT_f''' 满足式(13), 修改 DCT_f'' 为 DCT_f''' , 完成信息嵌入。式(13)的设计由分段映射函数的设计决定, 映射参数 b 越大, 对应映射值 DCT_f''' 越小。

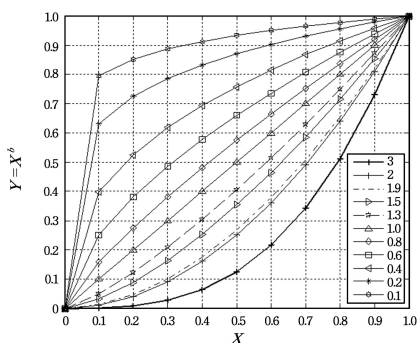


图 5 映射函数 $Y = X^b$

Fig. 5 Mapping function $Y = X^b$

$$DCT_f''' = DCT_f''^b \quad (10)$$

$$DCT_f''' = \begin{cases} DCT_f''^{1+0.002t}, & DCT_f'' \in [0, 0.4) \\ DCT_f''^{1+0.0015t}, & DCT_f'' \in [0.4, 0.8) \\ DCT_f''^{1+0.001t}, & DCT_f'' \in [0.8, 1] \end{cases} \quad (11)$$

$$DCT_f''' = \begin{cases} DCT_f''^{1-0.001t}, & DCT_f'' \in [0, 0.6) \\ DCT_f''^{1-0.0015t}, & DCT_f'' \in [0.6, 0.9) \\ DCT_f''^{1-0.001t}, & DCT_f'' \in [0.9, 1] \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} DCT_f''' > DCT_f''^{ave}, & Sec_{rel} \text{ 位} = 1 \\ DCT_f''' < DCT_f''^{ave}, & Sec_{rel} \text{ 位} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中, $DCT_f''^{ave}$ 是 DCT_f'' 的均值, 将均值设置为 Sec_{rel} 位嵌入 0, 1 的分界限, 其可确保 DCT_f''' 在一个可控范围内。

表 3 由不同 Δb 构造分段映射函数

Table 3 Constructing piece wise mapping functions from different Δb

Sec_{rel} 位	Δb	DCT_f'''
0	0.0020	$[0, 0.4)$
	0.0010	$(0.8, 1]$
	0.0010	$(0.8, 1]$
1	0.0010	$[0, 0.6)$
	0.0015	$[0.6, 0.9)$
	0.0020	$[0.9, 1]$
	0.0020	$[0.9, 1]$

步骤 10 将 Chebyshev 置乱参数 n, x_0 和归一化后的 DCT 系数均值 $DCT_f''^{ave}$ 依次隐藏到 Low-layer 顶点坐标 r 值的最低有效位 (Least Significant Bit, LSB) 中。

步骤 11 对 $DCT_f''' = (f_1''', f_2''', \dots, f_{k-1}''')$ 按式(14)逆归一化, 根据步骤 6 中记录的负数位置将绝对值转换为负数, 得到嵌入信息后的 DCT 系数, 对其进行 DCT 逆变换得到修改后的顶点。

$$\hat{f}_k = f_k''' \times (f_{DCT}^{\max'''} - f_{DCT}^{\min'''}) + f_{DCT}^{\min'''} \quad (14)$$

其中, $\hat{f}_k$ 是逆归一化后的 DCT 系数, $f_{DCT}^{\min'''}$ 是 DCT_f''' 的最小值, $f_{DCT}^{\max'''}$ 是 DCT_f''' 的最大值。

步骤 12 按式(15)将 Mid-layer 顶点 $s_i' = (r_i', \theta_i', \varphi_i')$ 从球坐标系转换回笛卡尔坐标系。同理, 对没有变化的 High-layer 顶点和极少变化的 Low-layer 顶点也进行上述转换, 得到含密三维模型 T_{sec} 。

$$\begin{cases} x_i'' = r_i' \cos \theta_i' \sin \varphi_i' \\ y_i'' = r_i' \sin \theta_i' \sin \varphi_i' \\ z_i'' = r_i' \cos \varphi_i' \end{cases} \quad (15)$$

2.4 信息提取步骤

本文所提算法在秘密信息提取时无需原模型, 是盲信息隐藏算法。因此, 信息提取与信息嵌入过程类似, 主要步骤如下。

步骤 1 对含密三维模型 T_{sec} 执行信息嵌入的前 6 个步骤, 得到特征向量 $Car'_{fea} = (r_1', r_2', \dots, r_M')$ 和归一化后的 DCT 系数 DCT_{sec} 。

步骤 2 在 Low-layer 顶点坐标 r 值的 LSB 中依次提取出 Chebyshev 置乱参数 n, x_0 以及信息隐藏时期归一化后的 DCT 系数均值 DCT_{sec}^{ave} 。

步骤 3 利用 DCT_{sec} 与 DCT_{sec}^{ave} , 根据式(16)提取关联信息 Sec'_{rel} 。

$$Sec'_{rel} \text{ 位} = \begin{cases} 1, & DCT_{sec} > DCT_{sec}^{ave} \\ 0, & DCT_{sec} < DCT_{sec}^{ave} \end{cases} \quad (16)$$

步骤 4 结合 Car'_{fea} 与 Sec'_{rel} 按照表 4 规则确定置乱信息 Sec'_{enc} 。

表 4 结合 Car'_{ten} 与 Sec'_{rel} 确定 Sec'_{enc}

Table 4 Determining Sec'_{enc} by Car'_{ten} and Sec'_{rel}

Sec'_{rel} 位	Δb	DCT_f''
1	1	1-1=0
	0	1-0=1
0	1	0-1=1
	0	0-0=0

步骤 5 利用参数 n, x_0 对 Sec'_{enc} 进行逆 Chebyshev 置乱变换,得到秘密信息 Sec'_{img} 。

3 理论性能分析与仿真实验测试

在 MatlabR2013a, Pycharm2015, Autodesk 3Ds Max 2012 环境中进行实验,采用斯坦福大学 3D 模型库中的 bunny, horse, dragon 作为载体,如图 6 所示。图 7 为秘密信息及其预处理图像,利用本文算法将秘密信息嵌入载体模型得到的含密载体模型如图 8 所示。图 8 采用图 7(b)的置乱参数。

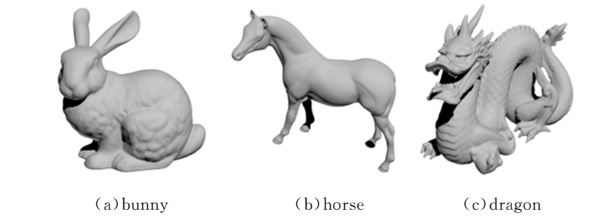


图 6 载体模型图示
Fig. 6 Carrier model diagram

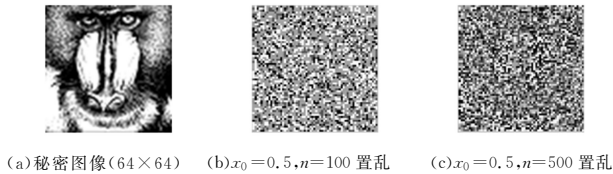


图 7 秘密信息及其预处理图示
Fig. 7 Secret information and preprocessing diagram

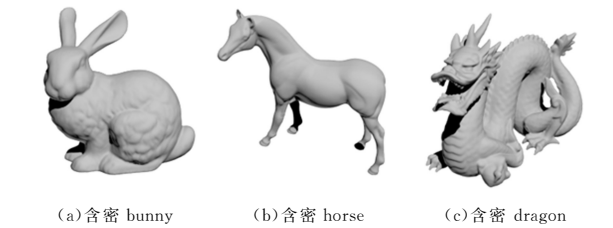


图 8 算法作用后的含密载体图示
Fig. 8 Cryptographic carriers diagram after algorithmic function

3.1 不可见性分析

零高分辨率信息隐藏算法未修改模型能量占比 85% 以上的任何几何信息与拓扑特征,在宏观层面把控算法有良好的不可见性。该算法修改能量占比 10% 左右的 Mid-layer 顶点 DCT 高频系数嵌入信息,具体嵌入时采用分段映射函数进行幅度小于 0 到 1 的微调,使嵌入信息顶点改动量较小,增强算法的不可见性。

3.2 不可见性测试

(1)信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)^[17]。SNR 的物理意义是信号与有效噪声的比例,是衡量信号失真程度的典型数学指标。SNR 越大,则有效噪声越小,不可见性越好。

本测试采用图 6(c)dragon 模型和图 7(b)置乱信息模拟信号与噪声,并利用式(17)测试含密模型与原始模型的失真度。

$$SNR=10\log_{10}\frac{\sum_{i=1}^N[(x_i-v_x)^2+(y_i-v_y)^2+(z_i-v_z)^2]}{\sum_{i=1}^{N_{m+1}}[(x_i''-x_i)^2+(y_i''-y_i)^2+(z_i''-z_i)^2]}$$
(17)

其中, N_{m+1} 是 dragon 模型 Mid-layer 和 Low-layer 的顶点总数(dragon 模型有 104 855 个顶点,多分辨率分布 High-layer 占 90 176 个, Mid-layer 占 12 582 个, Low-layer 占 2 097 个),其余参数在 2.3 小节中已释义。

从三维模型载体类型(网格或点云)选取、载体和秘密信息预处理方式、隐藏区域及嵌入算法设计等方面考量,将基于球型分割的文献[9](记为 SS)和基于边折叠简化的文献[8](记为 EFS)与本文算法(记为 ZHR)进行对比,对照结果如图 9 所示。可见,在嵌入量指数 $13 < k < 20$ 时,本文算法的 SNR 值在 55~60 之间波动,始终高于对比算法,表明本文算法适用于相对大容量的信息隐藏,弥补了容量性与不可见性相矛盾的缺陷。

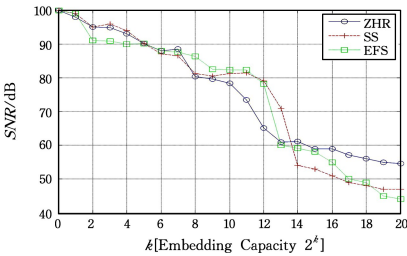


图 9 SNR 对比衡量不可见性
Fig. 9 Measurement of invisibility by SNR comparison

(2)Hausdorff 距离^[18]。从两个点集最大不匹配度反向衡量算法的不可见性。利用式(18)计算 dragon 原模型与含密 dragon 间的 Hausdorff 距离,在不同嵌入量下,本文算法与 SS 算法和 EFS 算法的比较如图 10 所示。

$$H(A,B)=\max\{h(A,B),h(B,A)\}$$
(18)

$$\text{且 } h(A,B)=\max_{a\in A}\{\min_{b\in B}\{d(a,b)\}\}.$$

其中, $h(A,B)$ 是 A 集合中点 a 到距离此点最近的 B 集合中点 b 之间的最大距离, $h(B,A)$ 同理。 A 为原 dragon 模型点集合, B 为含密 dragon 点集合。

由图 10 可知,当 $k=16$,即嵌入量为 65 536 bits 时,对应 Hausdorff 距离值仅有 0.004 67,同样得到算法容量大且不可见性好的结论。在嵌入量指数 $k\in[12,24]$ 时,除去 $k=17$ 的数据噪点,本文算法的 Hausdorff 距离值都要小于对比算法,表明本文算法的不可见性好于对比算法。

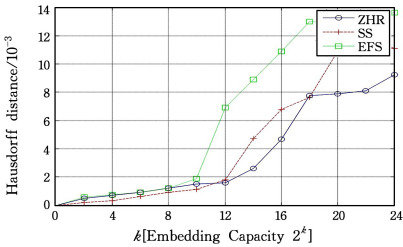


图 10 Hausdorff 距离对比衡量不可见性
Fig. 10 Measurement of invisibility by comparing Hausdorff distances

3.3 鲁棒性分析

秘密信息具体嵌入位置为中分辨率层突出度大的顶点球面坐标 r 值的 DCT 系数。顶点突出度大,表明该点的尖锐程度高,变化剧烈,属于模型的重要信息,且嵌入信息鲁棒性优越。球面坐标 r 值是仿射变换不变量,能够抵抗几何仿射攻击,将其变化到 DCT 频域进行信息的嵌入,可使鲁棒性增强。此外,High-layer 的能量大,在此区域提取到的特征本质上就具有鲁棒性,同心球面分割方式构造的特征向量能完全抗旋转。

3.4 鲁棒性测试

在图 6(b)所示 horse 模型中利用本文算法嵌入图 7(c)所示置乱信息,对生成的含密 horse 模型额外施加旋转、平移、等比例缩放、面片剪切、网格涡轮式平滑、顶点蓝白绘制、多边形挤出、扭曲攻击,从攻击破坏的含密 horse 模型中提取出秘密信息,如图 11 所示。从可视化结果可以看出,本文算法对于几何仿射变换的鲁棒性表现尤为突出,信息可清晰辨识;对于面片剪切、多边形挤出攻击导致缺少部分信息的鲁棒性表现一般,但比改变拓扑结构的扭曲攻击以及增加顶点颜色信息的顶点绘制攻击强,信息基本都可以辨识。

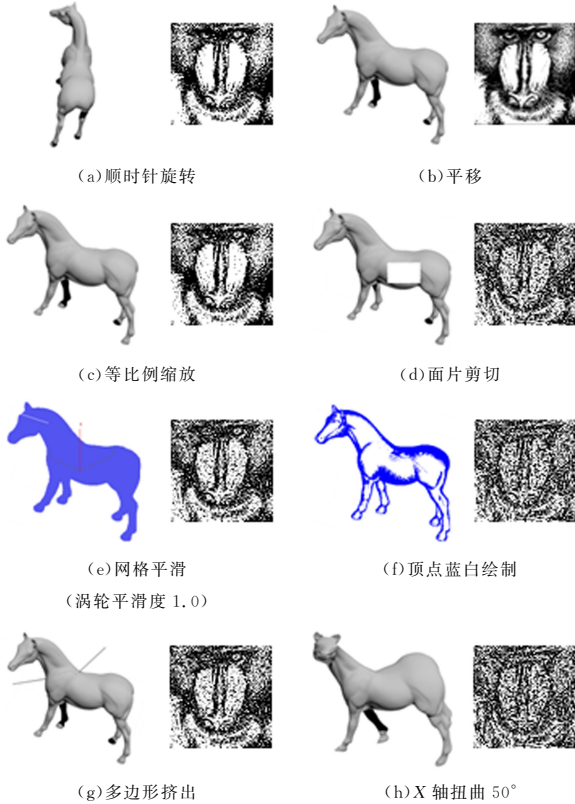


图 11 攻击测试与信息提取可视化结果(电子版为彩色)

Fig. 11 Visualization results of attack test and information extraction

以上鲁棒性判断的依据是 HVS 特性,不具有说服力。后续实验用数学指标 BCR 和 $\text{Corr}^{[19]}$ 对鲁棒性进行客观判断。BCR 表示提取信息的正确比特率,其计算如式(19)所示。 Corr 表示提取信息 T_n' 与原始信息 T_n 之间的相关系数,其计算如式(20)所示。

$$\text{BCR} = \frac{\Gamma}{\Lambda} \quad (19)$$

$$\text{Corr} = \frac{\sum_{n=1}^N (T_n' - \bar{T}') (T_n - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (T_n' - \bar{T}')^2 \cdot \sum_{n=1}^N (T_n - \bar{T})^2}} \quad (20)$$

其中, Γ 为提取信息的正确比特数, Λ 为嵌入信息的总比特数, $\bar{T}$ 为原始信息平均值, $\bar{T}'$ 为提取信息平均值, N 的含义与式(19)中的 Λ 一致。

对三维模型破坏力度大的多边形挤出攻击进行测试,将本文算法在不同挤出概率下得到的 BCR 与对比算法(沿用不见性的对比文献)进行比较,如图 12 所示。可以看出,当挤出率在 $[30\%, 85\%]$ 区间时,本文算法的 BCR 值均大于对比算法,且 BCR 值在 30% 到 60% 之间,变化基本趋于稳定,在 $[60\%, 85\%]$ 间也只是缓慢降低。这表明相比对比算法,本文算法抗多边形攻击的鲁棒性强,且具有稳定的抗攻击能力。

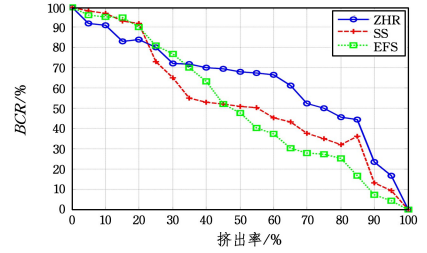


图 12 多边形挤出攻击的对比测试

Fig. 12 Contrast test of polygon extrusion attacks

利用 Corr 测试顶点绘制攻击的对比结果如图 13 所示。在绘制力度小于 25% 时, EFS 算法的 Corr 值高于本文算法;可当力度提升至 25% 以上时,除去 SS 算法中 75% 位置的数据噪点,本文算法的 Corr 值高于两对比算法,表明本文算法可抵抗高力度的顶点绘制攻击。

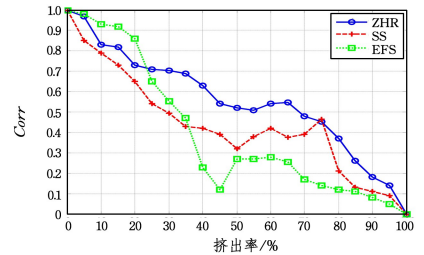


图 13 顶点绘制攻击的对比测试

Fig. 13 Contrast test of vertex drawing attack

3.5 抗分析性分析

零高分辨率信息隐藏,潜义为信息隐藏区域极为隐蔽,可以从本质上避免人们隐写分析。Chebyshev 置乱以及关联算法的使用使得秘密信息杂乱无章,无规律可循,即使攻击者提取出秘密信息,也难以通过分析恢复正确的信息。本文提出的算法通过两次半边折叠网格简化、同心球面分割提取特征向量、改进突出函数计算突出度、DCT 变换、归一化处理、分段映射函数修改系数,增加算法的复杂度,提升抗隐写分析力。

3.6 抗分析性测试

采用一阶拉普拉斯平滑的隐写分析方法^[20]对图 6(a)所示的 bunny 和图 8(a)所示的含密 bunny 进行测试,统计 bunny、含密 bunny 与其对应拉普拉斯平滑模型的特征差异:顶点笛卡尔坐标系 X 分量绝对值差、顶点到原点距离差值、面法线夹角差、二面角差。测试结果如图 14 所示,含密 bunny 与原 bunny 的特征变化曲线差异小到基本重合,表明本文算法抵抗拉普拉斯的隐写分析能力卓越。

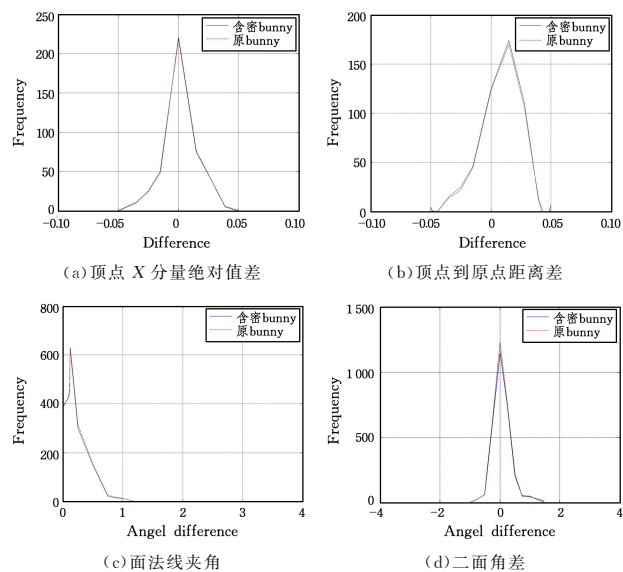


图 14 特征统计的隐写分析实验结果

Fig. 14 Experimental results of feature statistical steganalysis

结束语 本文针对三维网格模型,提出一种零高分辨率信息隐藏算法。零高分辨率将隐匿区域缩小到不足模型15%的顶点中,保证了算法的不可见性,可最大程度地避免人们隐写分析。信息隐匿的具体位置设计为突出度大的顶点的仿射变换不变量的DCT系数,其嵌入信息的鲁棒性强。对秘密信息进行混沌置乱,去除相关性,最终隐藏的实际是关联信息,增强了算法的抗分析性。第3节实验测试表明,本文所提算法的各项性能均衡,且能有效抵御一阶拉普拉斯平滑的隐写分析检测。在实际应用中,抵抗隐写分析可加快隐蔽通信速度,提升通信成功率,故本文算法具有一定实用意义。

参 考 文 献

[1] HABBOULI O, MEGHERBI D B. A secure, self-recovery, and high capacity blind digital image information hiding and authentication scheme using DCT moments[C]// 2017 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST). IEEE, 2017: 1-5.

[2] YE J Q, EDWARD S, CLIVE R. Use of a 3D model to improve the performance of laser-based railway track inspection[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(3): 337-355.

[3] JIAO R, WANG Y M. Partial Steganography Algorithm of Triangular Mesh Model Introduced by Mason Rotation Algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40 (12): 228-232.

[4] LIU Y Q. Three-dimensional data encryption and information hiding based on integrated imaging [D]. Xi'an: Xidian University, 2016.

[5] REN S, HE Y, LIU Y N, et al. A zero-low frequency information hiding algorithm based on scale-invariant local features [J/OL]. [2018-12-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1196.TP.20180811.1337.090.html>.

[6] GENG K, ZHANG D F, XIE D Q. 3D Model Information Hiding Based on Framed Sampling and Wavelet HMM[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22 (8): 1406-1411.

[7] REN S, SHI F X, ZHANG T. Information hiding algorithm

based on 3D model contour analysis[J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(3): 642-646.

[8] REN S, ZHANG T, XU Z C, et al. Three-dimensional model information hiding algorithm for feature point labeling and clustering[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38 (4): 1017-1022.

[9] REN S, ZHANG T, YANG T, et al. Information hiding algorithm based on spherical segmentation of 3D model[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(9): 2576-2580.

[10] ENZBERG S V, AL-HAMADI A. A Multiresolution Approach to Model-Based 3-D Surface Quality Inspection[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 12(4): 1498-1507.

[11] SUN J, DING Y, HUANG Z, et al. Laplacian Deformation Algorithm Based on Mesh Model Simplification[C]// 2018 IEEE 3rd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC). IEEE, 2018: 209-213.

[12] YANG H, ZHOU F, LIN G, et al. Animated mesh simplification based on motion features in visual sensor networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2019, 15(1): 1-13.

[13] ZHANG Y, WANG J D, ZHAO R B, et al. Segmentation and Reconstruction Algorithm of Triangular Mesh Model Based on Half-Edge Folding[J]. Journal of Yichun University, 2014, 36(6): 12-16, 31.

[14] HOPPE H, DEROSE T, DUCHAMP T, et al. Mesh optimization[C]// Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques. 1993.

[15] REN G F. Three-dimensional mesh blind watermarking algorithm for feature point regions [D]. Jinan: Shandong University, 2009.

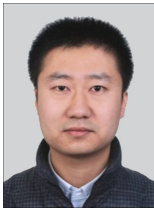
[16] HAN B, LI J. Medical Image Watermarking in Sub-block Three-dimensional Discrete Cosine Transform Domain[J]. International Journal Bioautomation, 2016, 20(1): 69-78.

[17] BETTA G, CAPRIGLIONE D, CORVINO M, et al. Sensitivity analysis of influence quantities on signal-to-noise ratio in face-based recognition systems[C]// Proc of IEEE International Instrumentation & Measurement Technology Conference. IEEE, 2017.

[18] CARLSON N A, PORTER J R. On the cardinality of Hausdorff-spaces and H-closed spaces[J]. Topology & Its Applications, 2017, 160(1): 137-142.

[19] LIU J, YANG Y, MA D, et al. A Watermarking Method for 3D Models Based on Feature Vertex Localization[J]. IEEE Access, 2018, 6: 56122-56134.

[20] YANG Y, IVRISSIMTZIS I. Mesh Discriminative Features for 3D Steganalysis[J]. Proc of ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, 2014, 10(3): 1-13.



REN Shuai, born in 1982, Ph.D, associate professor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include information hiding, information security risk assessment, information hiding theory and model.



WANG Meng, born in 1996, master, is a member of China Computer Federation. Her main research interests include information hiding technology and so on.