

# 基于距离特征与体积积分不变量的 三维模型信息隐藏算法

任 帅<sup>1</sup> 苏东旭<sup>1</sup> 徐振超<sup>1</sup> 范傲雄<sup>1</sup> 张 弢<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 长安大学信息工程学院 西安 中国 710064

<sup>2</sup> 长安大学电子与控制工程学院 西安 中国 710064

**摘要** 为了提高三维模型信息隐藏算法的鲁棒性和嵌入容量,使得三维模型可以隐藏大容量的秘密信息,本文提出一种基于距离特征和体积积分不变量的三维模型信息隐藏算法。算法的主要思想是:首先使用距离特征这种三维模型全局变量,利用相似性公式对多个三维模型载体进行分类;其次使用体积积分不变量计算三维模型顶点的球体内外体积,对三维模型顶点进行分类;最后通过修改三维模型顶点的凹凸程度把秘密信息隐藏到三维模型中,发送给接受者进行提取。实验结果表明本文算法具有很好的鲁棒性和不可见性。

**关键词** 信息隐藏; 三维模型; 距离特征; 体积积分不变量

中图分类号 TP309.2(数据安全) TP301.6(算法理论) DOI号 10.19363/J.cnki.cn10-1380/tn.2020.09.08

## Three-dimensional model information hiding algorithm based on distance feature and volume integral invariant

REN Shuai<sup>1</sup> SU Dongxu<sup>1</sup> XU Zhenchao<sup>1</sup> FAN Aoxiong<sup>1</sup> ZHANG Tao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China

<sup>2</sup>School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China

**Abstract** In order to improve the robustness and embedding capacity of 3D model information hiding algorithm, and make 3D model can hide large-capacity secret information, a 3D model information hiding algorithm based on distance feature and volume integral invariant was proposed here. The main idea of the algorithm was as follow. Firstly, the global variable distance feature of 3D model and similarity formula were used to classify several 3D model carriers. Secondly, the volume integral invariants were used to calculate the volume inside and outside the sphere of the 3D model, and the 3D model vertices were classified. Finally, the secret information was hidden into the 3D model by modifying the degree of convexity of the vertices of 3D model, and was sent to the recipient for extraction. The experimental results show that the proposed algorithm has good robustness and invisibility.

**Key words** information hiding; 3D models; distance feature; volume integral invariant

## 0 引言

信息隐藏技术是信息安全研究的重要课题之一,现有的信息隐藏算法多为基于数字图像的信息隐藏算法,而对以三维模型为载体的信息隐藏技术研究较少。近年来随着计算机硬件和软件的快速发展,人们逐渐可以使用计算机操作和处理三维模型,使得三维模型在互联网上越来越多,必将是未来数据的

主要形式。因此,研究基于三维模型的信息隐藏技术很有必要,而且现在也取得了很大的成果,如文献[1]通过提取三维模型的骨架,获得对象的骨架点。以对象为中心获得最大内切球和最小内切球来完成信息隐藏;文献[2]通过在二维图像和深度图合成三维图像的基础上,提出了基于深度无合成误差模型的三维合成图像可逆信息隐藏方法;文献[3]通过设计等高线弓箭分割和帧化采样,应用小波域隐马尔科夫

通讯作者: 苏东旭, 硕士研究生, 913301491@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61702050); 中央高校“双一流”引导专项(No. 300104292405); 2019年研究生教育教学改革建设专项基础建设项目(No. 300103190640); 2020年度中央高校基本科研业务费资助项目(自然科学类)计划高新技术研究培育项目(No. 300102240208); 2020年研究生教育教学改革资助项目(No. 300103102417); 大学生创新创业训练计划项目资助(No. 201910710079)。

收稿日期: 2019-08-04; 修回日期: 2020-03-19; 定稿日期: 2020-07-30

模型(Hidden Markow Model, HMM)实现了小波系数零树结构的信息隐藏算法;文献[4]利用正交投影的纹理映射算法将贴图数据与三维 stl 数据矩阵相乘,在三维模型贴图与拓扑坐标空间中双重嵌入隐秘信息,增强了算法的鲁棒性;文献[5]通过计算嵌入顶点与其引用邻居的中心之间的距离估计表面复杂度,提出了一种有效的多边形模型信息隐藏算法;文献[6]提出了一种基于表面曲率和监督学习的三维三角网格模型水印算法,该算法具有较好的嵌入容量,不可感知性和鲁棒性;文献[7]通过直方图构造相邻顶点之间的几何相似性,利用相邻顶点间距离的差异来完成信息隐藏,该算法比现有算法更高的嵌入量,还可以保证模型的不失真;文献[8]提出了一种三维模型局部隐写算法,通过选取部分顶点来完成秘密信息的嵌入;文献[9]以三维模型的 OBJ 文件为载体,使用矢量隐写技术进行信息隐藏,在文章的最后给出了算法在不同的 OBJ 模型中的测试结果,算法具有很高的鲁棒性;文献[10]提出了一种将秘密信息嵌入到三维多边形网格中的高容量算法,该嵌入算法对旋转、缩放和平移攻击具有很好的鲁棒性;文献[11]将最新的信号处理技术应用于三维网格,为三维模型水印技术提供了很好的思路。

三维模型信息隐藏算法大部分是在三维网格中完成秘密信息隐写,可提取的特征值不是很多,算法的鲁棒性性能低。本文在上述研究的基础上提出了一种基于距离特征和体积积分不变量的三维模型信息隐藏算法。该算法的主要思想是:首先对三维模型使用距离特征这种全局变量,对三维模型载体进行分类,采用距离特征具有旋转不变、缩放不变等特性,而且对噪声、简化等攻击具有鲁棒性;其次使用体积积分不变量计算模型顶点内外的体积,对三维模型顶点进行标注,使用体积积分不变量对抵抗噪声或扰动有很好的鲁棒性;最后通过修改三维模型顶点的凹凸程度把秘密信息隐藏到三维模型中,发送给接受者进行提取。实验结果对比表明该算法具有很好的鲁棒性和不可见性。

## 1 本文信息隐藏算法

本文信息隐藏算法主要分为四个阶段:首先,使用距离特征对众多三维模型进行分类;其次使用体积积分不变量对三维模型顶点进行划分;最后通过修改三维模型顶点的凹凸程度把秘密信息隐藏到三维模型中,发送给接受者进行提取。

### 1.1 三维模型距离特征

三维模型的特征属性主要有形状、颜色和纹理

等,但颜色和纹理特征都是可变且易变的。因此在实际操作过程中,主要提取三维模型的形状特征。形状特征是三维模型的共有属性,其主要分为全局特征和局部特征。三维模型全局特征主要是对三维模型的整体形状进行研究;局部特征则定位于三维模型的局部形状,利用局部网格来获取三维模型的局部特征。

全局特征针对三维模型的整体形状,主要的方法有:对三维模型表面点、距离、面、曲率信息进行统计,获取相应的形状直方图;对三维模型进行投影,将三维模型形状特征转化为二维图像的形状特征。本文采用距离特征这种全局变量对三维模型进行分类。

距离特征是三维模型的全局特征,它具有旋转不变、缩放不变、对称不变和平移不变等特性,并且对噪声、重采样和简化具有鲁棒性<sup>[12]</sup>。如 Robert 等人<sup>[13]</sup>提出形状分布算法,其主要思想是通过形状分布函数测量三维物体,论文中给出了 5 种特征函数,如图 1 表示五种特征函数的示意图:测量 3 个顶点构成的角度(A3)、测量顶点到中心的距离(D1)、测量任意 2 个顶点之间的距离(D2)、测量表面上三个随机点之间三角形区域的平方根(D3)、测量表面四个随机点之间四面体体积的立方根(D4)。

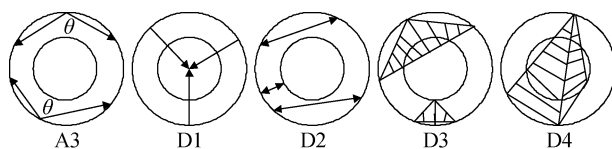


图 1 三维模型的五种特征函数  
Figure 1 Five characteristic functions of three-dimensional models

这五种形状函数具有简单性和不变性,特别是它们可以快速计算,而且对噪声、裂缝和多边形的插入或移除引起的小改变不敏感。此外,A3 形状函数不会随着三维模型大小变化而改变,而其他函数必须进行标准化才能进行比较,D2、D3 和 D4 形状函数可以很好地进行一维、二维和三维几何测量。因为 3D 模型中的刚性结构的显著变化影响其表面上的点之间的几何关系,因此本文算法采用任意 2 个顶点之间的距离(D2)来对模型进行分类。其算法步骤如下:

**步骤 1:** 遍历三维模型上面的多边形,并计算模型上所有三角网格的面积  $\Delta ABC$ ,如公式(1)所示,图 2 展示的是三维模型部分三角网格;

$$\Delta ABC = \sqrt{S \times (S - a) \times (S - b) \times (S - c)} \quad (1)$$

其中, $a$ 、 $b$ 、 $c$  为三角形的边长; $S = (a + b + c)/2$ 。

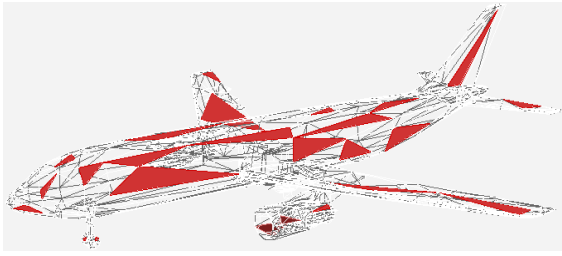


图 2 三维模型的部分三角网格

Figure 2 Partial triangular mesh of 3D model

**步骤 2:** 对于每个三角形, 计算其面积并将其与目前所访问的三角形的累积面积一起存储在一个数组中  $Arr$  中。

**步骤 3:** 通过生成一个介于 0 和总累积面积之间的随机数  $temp$ , 并在数组  $Arr$  中进行二叉树搜索, 选择一个与该三角形面积成正比的三角形。

**步骤 4:** 设该三角形的 3 个顶点分别是  $A$ 、 $B$ 、 $C$ , 并生成 2 个从 0 到 1 的随机数  $r_1$  和  $r_2$ , 利用式(2)计算在该三角形内部随机取到的点  $P$  的位置:

$$P = (1 - \sqrt{r_1})A + \sqrt{r_1}(1 - r_2)B + \sqrt{r_1}r_2C \quad (2)$$

其中,  $\sqrt{r_1}$  为从顶点  $A$  到对面边的百分比, 而  $r_2$  表示沿该边的百分比。

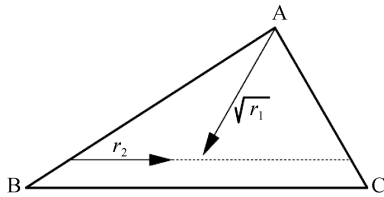


图 3 对三角形中的随机点进行采样

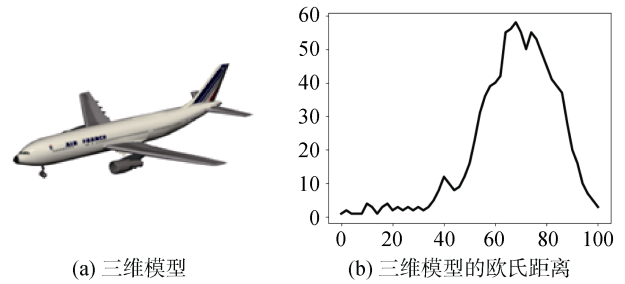
Figure 3 Sampling a random point in a triangle

本算法保证了最终采得的一系列点, 按照等面积原则均匀分布在三维模型的表面上。通过公式(3)计算随机采样到的任意两点间的欧氏距离, 即  $D2$  距离。

$$D2 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (3)$$

其中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  是三维模型的顶点坐标。

在建立形状直方图前, 为了保证三维模型在缩放后仍然保持一致的特征值, 必须对计算出的 2 个采样点间的距离做正规化处理, 也就是将每个距离除以算出的最大距离值, 再对正规化后的距离值做量化, 并统计在不同距离值发生的概率值, 建立直方图。图 4 表示三维模型及其  $D2$  形状直方图。其中, 横轴代表三维模型的特征距离, 纵轴代表此组距离区间发生的概率值。



(a) 三维模型

(b) 三维模型的欧氏距离

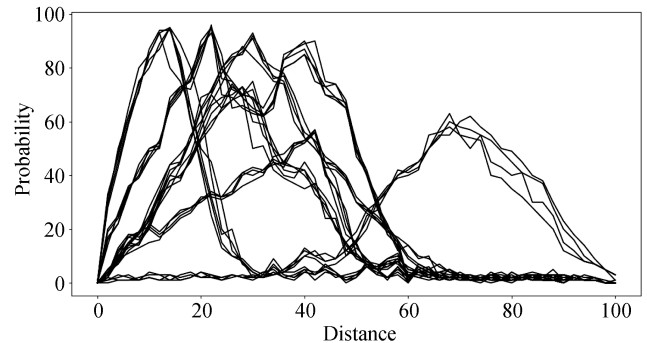
图 4 三维模型及其  $D2$  形状直方图Figure 4 3D model and its  $D2$  shape histogram

本文使用的三维模型载体是从网上找取的交通类载体模型, 并分别计算了每种三维模型的  $D2$  形状直方图。图 5 是网上的交通模型, 图 6 是计算出模型的  $D2$  形状直方图。



图 5 交通工具三维模型

Figure 5 Three-dimensional model of vehicle




























图 6  $D2$  形状直方图Figure 6  $D2$  shape histogram

得到每个三维的距离特征之后, 通过计算特征向量之间的距离来衡量三维模型的相似性并进行分类。使用公式(4)来计算两个特征向量的距离。

$$d_{L_1}(X_i, Y_i) = \sum_{i=1}^N |X_i - Y_i| \quad (4)$$

其中  $X_i$ 、 $Y_i$  是两个模型的特征向量,  $L_1$  为距离,  $N$  为特征向量分量的个数。当计算出的  $d$  值趋近于 0 时, 表明两个三维模型越相似。表 1 是通过计算距离特征, 对三维模型积木进行分类后的结果。

表 1 三维模型分类  
Table 1 3D model classification

模型	最匹配的模型( $d$ 值)			
	 0.060	 0.062	 0.068	
	 0.045	 0.051	 0.062	 0.042
	 0.042	 0.053	 0.058	 0.061
	 0.021	 0.032	 0.045	
	 0.021	 0.045	 0.011	 0.012
	 0.031	 0.045	 0.042	

对三维模型完成分类之后, 同一类三维模型隐藏相同的秘密信息。使用多个载体进行信息隐藏提高了信息隐藏的容量和不可见性, 对同一类的三维模型隐藏相同的秘密信息, 提高了算法的鲁棒性。

## 1.2 体积积分不变量

Manay 等<sup>[14]</sup>2004 年第一次提出积分不变量的概念, 其通过在给定小的邻域上求积分得到, 证明了在二维情况下积分不变量与曲率的内在关系以及对含有噪声数据处理的鲁棒性, 并且可以为每一个顶点提供多尺度分析。随后, Pottmann 等人<sup>[15]</sup>于 2009 年将积分不变量的概念推广到三维空间, 证明了积分不变量对特征点有较强的识别能力, 且可以从邻域球获取更多的信息。同时, 相对于微分不变量, 体积积分不变量对抵抗噪声或扰动有更好的鲁棒性。例如, 李群辉等<sup>[16]</sup>利用积分不变量来计算三维模型的断裂面; 边哲等<sup>[17]</sup>利用三维模型体积积分不变量来进行浅浮雕表面细节的恢复算法。

目前, 体积积分不变量的计算方法主要分为如下两种: 基于八叉树数据结构计算法和快速傅里叶变换计算法(Fast Fourier Transformation, FFT)。本文中我们采用快速傅里叶变换计算法, 计算方法为: 在三维曲面  $\varphi$  上, 将一点  $p$  的积分不变量定义为公式(5)所示:

$$V_r(p) = \int_{B_r(p)} l_D(x) dx \quad (5)$$

其中,  $B_r(p)$  为以  $p$  为球心半径为  $r$  的球体, 半径  $r$  的选取是通过遍历该点与周围相邻顶点的距离, 得到最小值的一半来进行计算。函数  $l_D(x)$  定义为: 当点  $x$  在曲面外侧(或法矢方向)时,  $l_D(x)=1$ ; 当  $x$  在曲面  $\varphi$  内侧(或法矢反方向)时,  $l_D(x)=0$ 。

该积分不变量的几何意义为: 球  $B_r(p)$  在曲面的外侧部分的体积, 也称为体积积分不变量, 如图 7 所示。由图 7 可知, 当  $V_r(p) = 2\pi r^3/3$  时,  $p$  在半径  $r$  邻域内为平面顶点, 并可以得出,  $V_r(p)$  的值反应点  $p$  邻域曲面的凹凸程度, 与  $r$  的大小呈正比, 且  $B_r(p)$  内部的噪声点对  $V_r(p)$  的大小没有影响。

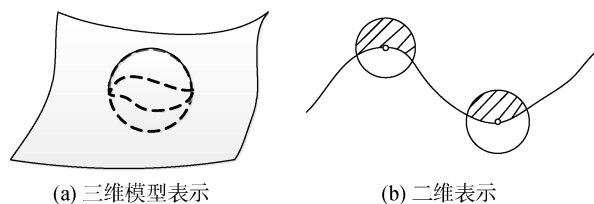


图 7 三维模型体积积分不变量  
Figure 7 3D model volume integral invariant

计算出模型顶点的体积积分不变量后, 利用表 2 表示的阈值分割方法对载体表面的顶点进行聚类把顶点分为特征点 (Feature Vertice, FV)、亚特征点 (Sub-feature Vertice, SV) 和背景点 (Background Vertice, BV) 这三类特征点。根据信息隐藏能量分析理论, 这 3 类顶点的能量依次降低, 把其分别命名为鲁棒点、亚鲁棒点和背景点。

表 2 顶点分类公式

Table 2 Vertex classification formula

特征点	凹凸分类	阈值分割
鲁棒点(FV)	凸鲁棒点	$V_r(p) - 2\pi r^3 / 3 > \varepsilon_1$
	凹鲁棒点	$V_r(p) - 2\pi r^3 / 3 < \varepsilon_3$
亚鲁棒点(SV)	凸亚鲁棒点	$\varepsilon_2 < V_r(p) - 2\pi r^3 / 3 < \varepsilon_1$
	凹亚鲁棒点	$\varepsilon_3 < V_r(p) - 2\pi r^3 / 3 < \varepsilon_4$
背景点(BV)	凸背景点	$V_r(p) - 2\pi r^3 / 3 < \varepsilon_2$
	凹背景点	$V_r(p) - 2\pi r^3 / 3 > \varepsilon_4$

实验结果分析得出使用阈值  $\varepsilon_1 = \frac{1}{3} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3$ ,  $\varepsilon_2 = \frac{1}{8} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3$ ,  $\varepsilon_3 = -\frac{1}{3} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3$ ,  $\varepsilon_4 = -\frac{1}{8} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3$  进行分类, 可以保证鲁棒点、亚鲁棒点和背景点这三类顶点的数量均衡, 使得算法的鲁棒性增加。

下图 8 表示是对三维模型的顶点进行标注的结果, 其中蓝色为鲁棒点, 红色为亚鲁棒点, 黑色为背景点。本文的算法标记三维模型的亚鲁棒点(包含凹凸点)为  $V_{sub}$ , 作为信息隐藏算法的隐藏区域。

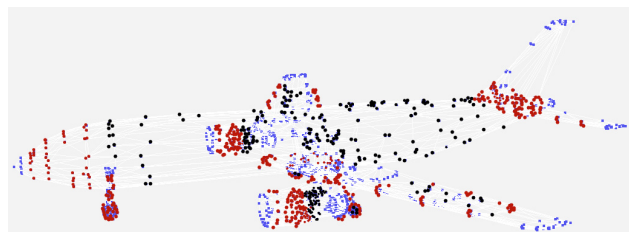


图 8 对三维模型顶点进行标记

Figure 8 Mark 3D model vertices

### 1.3 基于体积积分不变量的三维模型信息隐藏算法

在得到三维模型的亚鲁棒点  $V_{sub}$  后, 本文的三维模型信息隐藏算法是通过将三维模型顶点坐标值数字进行修改, 改变三维模型顶点的凹凸程度的来表示秘密信息。将得到的取值结果按照表 3 固定阈值来进行区间约束转换为 0/1 数据, 来实现秘密信息

的隐藏。算法 0/1 信息表达是利用公式(6)  $\alpha$  的值来进行确定。

$$\alpha = \frac{V_r(p)}{V_l} \quad (6)$$

其中  $V_r(p)$  是体积积分不变量,  $V_l$  是顶点的球形体积。

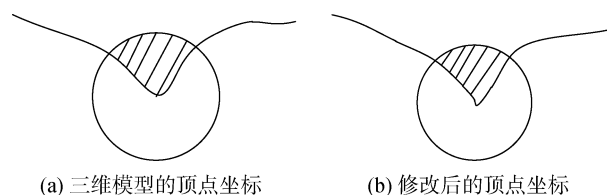
表 3 信息转换规则

Table 3 Information conversion rules

区间阈值	信息转换呈现
$[n/\gamma, (n+\beta)/\gamma]$	0
$[(n+\beta)/\gamma, (n+2\beta)/\gamma]$	1

(注:  $n=1, 2, \dots, \gamma, \beta$  表示步长。)

在设定完之后按照表 3 的信息规则表达, 将欲隐藏的秘密信息二进制序列与原有信息进行比较, 如有不同直接将顶点的坐标值进行修改, 即按照表 3 修改为符合 0 或 1 的区间中。例如当  $\gamma = 100$ ,  $\beta = 1$  时, 图 9(a) 中顶点的凸起程度计算得到的  $\alpha$  值为 27.2/100, 如果要存储二进制数字 0 的话, 则修改顶点为图 9(b) 中的形式得到  $\alpha$  值为 28.6/100。图 10(a) 中顶点的  $\alpha$  值为 20.3/100, 如果要存储二进制 1 的话, 则把顶点修改为图 10(b) 中  $\alpha$  值 21.4/100。

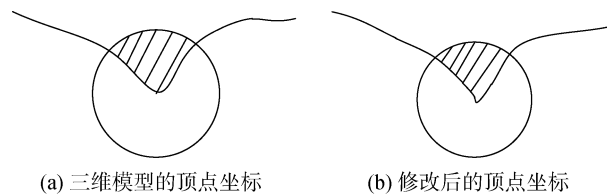


(a) 三维模型的顶点坐标

(b) 修改后的顶点坐标

图 9 三维模型的顶点坐标修改

Figure 9 Vertex coordinate modification of 3D models



(a) 三维模型的顶点坐标

(b) 修改后的顶点坐标

图 10 三维模型的顶点坐标修改

Figure 10 Vertex coordinate modification of 3D models

该算法是对三维的顶点坐标进行修改, 因此该方法具有对秘密信息具有快速存储和读取的性能。

### 1.4 信息隐藏的详细嵌入步骤

基于距离特征与体积积分不变量的信息隐藏算法 (Distance Feature Integral Invariant, DF-II) 分为以下 7 个步骤, 算法流程图如下图 11 所示:



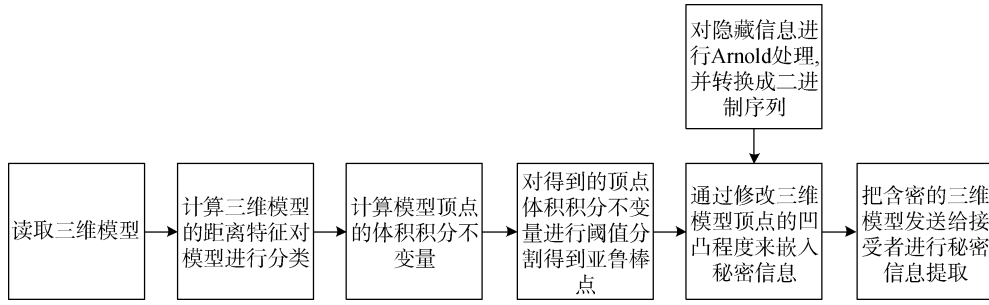


图 11 算法流程图

Figure 11 Algorithm flowchart

**步骤 1:** 按照公式(7)将秘密信息的图像 Lena(大小为  $M \times M$ ) 进行 Arnold 置乱变化, 其中  $x, y \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ ,  $k \in [1, M)$ , 对置乱后的图像处理并得到二进制数据序列为  $C_{re}$ 。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ k & k+1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \pmod{M} \quad (7)$$

**步骤 2:** 分别读取三维模型  $M_1, M_2, \dots, M_m$  的.obj 文件, 获取三维模型各顶点的坐标为  $V_i = (x_i, y_i, z_i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, k-1$ , 利用公式(1)计算出各个三维模型三角网格的面积, 然后存储在数组  $Arr$  中。

**步骤 3:** 按照 1.1 节中的公式(2)计算出三角形内部随机的三维数据点  $P$ , 然后计算出每个三维模型的欧式距离  $D2$  并建立直方图。利用相似性公式对三维模型进行分类。在三维模型选取时, 对模型进行预处理, 保证每一类三维模型都可以有三个以上, 模型在传输过程中即使遭到攻击也有其他模型可以提取出秘密信息, 提高算法的鲁棒性。本文的相似性公式使用  $d=0.07$  的阈值对三维模型进行分类, 以保证每个载体群有三个或者四个三维模型, 目的是提高算法的鲁棒性。

**步骤 4:** 利用公式(5)计算三维模型顶点的体积积分不变量, 按照表 2 里面的公式对三维模型的顶点进行分类, 得出三维模型的鲁棒点、亚鲁棒点和特征点, 本文取亚鲁棒点  $V_{sub}$  (包含凹凸顶点)作为秘密信息的隐藏区域。

**步骤 5:** 对三维模型的顶点标注完成之后, 按照每个载体群亚鲁棒点的数量进行排序为  $Q_1, Q_2, \dots, Q_j$ , 并根据亚鲁棒点数量的不同对秘密信息分成从小到大不同的小段为  $C_1, C_2, \dots, C_j$ , 使得秘密信息与载体相匹配。然后把顶点的体积积分不变量与数据序列进行比较, 按照表 3 中列出的信息隐藏算法。本文算法中取  $\gamma=100$ ,  $\beta=1$  来进行秘密信息的表示,

对不能满足要求的顶点进行修改。

**步骤 6:** 在隐藏过程中, 同一类的三维模型隐藏同样的秘密信息, 目的是为了加强信息隐藏的鲁棒性。

**步骤 7:** 所有模型隐藏完毕后得到含有秘密信息的三维模型  $M_1^*, M_2^*, \dots, M_n^*$ , 然后发送给接受者。

## 1.5 信息提取步骤

秘密信息的提取主要分为以下 4 个步骤:

**步骤 1:** 对三维模型采用重定位, 使三维模型恢复到开始的样子。

**步骤 2:** 计算三维模型积木的特征距离后, 使用相似性公式对三维模型进行分类。

**步骤 3:** 采用体积积分不变量对积木模型的顶点进行分类, 选出顶点的亚鲁棒点。

**步骤 4:** 读取亚鲁棒点的数值, 按照区间来判断所表示的 0 和 1, 同时同一类的三维模型隐藏的秘密信息相同, 可以进行秘密信息校验, 把多段秘密信息拼接、校验得到最终的比特序列  $C_e$ , 即秘密信息。

## 2 实验与结果分析

对本文算法进行仿真实验, 实验环境为 Matlab2014、3dMax2012。本文隐藏图像为 Lena 二值图像, 如图 12(a)所示, 含有秘密信息的三维模型, 如图 12(b)所示。

### 2.1 不可见性

#### 2.1.1 不可见性分析

本文信息隐藏算法的隐藏区域是通过计算三维模型顶点的体积积分不变量选取亚鲁棒点作为算法的隐藏区域。对亚鲁棒顶点的进行修改, 算法的不可见性好, 而且秘密信息被隐藏到多个三维模型上面, 使得每个模型中都有秘密信息的存在, 降低了载体的隐藏密度, 提高了算法的不可见性。



图 12 秘密图像及含密载体  
Figure 12 Secret image and dense carrier

### 2.1.2 不可见性实验

#### (1) Hausdorff 距离

Hausdorff 距离<sup>[18]</sup>可以用来度量两个点集间的匹配程度, Hausdorff 距离越小, 表示两个点集的匹配程度越高。图 13 为算法基于 Hausdorff 距离的不可见性实验对比图, 其中横坐标为嵌入量单位是 bit, 纵坐标为 Hausdorff 距离。本文的算法对比选取与本文研究内容相关的基于多载体的三维模型信息隐藏算法和特征点标注的三维模型信息隐藏算法, 分别是文献[19]提出的基于多融合态的低密度三维模型信息隐藏算法(Multi-fused State, MS)和文献[20]特征点标注与聚类的三维模型信息隐藏算法(Labeling Clustering, LC)。本文实验使用的交通类载体模型共含有 389125 个顶点, 通过修改三维模型顶点的凹凸程度来嵌入秘密信息, 每一位嵌入一个二进制数, 即容量约为  $389125=2^{19}$  bit, 采用本文算法的体积积

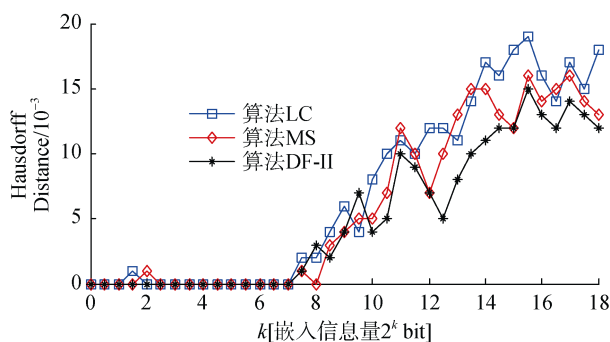


图 13 不可见性/容量性实验(Hausdorff Distance-k)  
Figure 13 Experiment of invisibility/capacity (Hausdorff Distance-k)

分不变量对顶点进行划分, 得到亚鲁棒点的个数为 207491 个, 即用于隐藏秘密信息的容量约为  $207491=2^{18}$  bit。因此, 算法的嵌入容量分为两方面: 从有效隐藏区域度量, 算法容量为  $207491/207491=1$  bpv; 从三维模型载体整体度量, 算法的容量性  $207491/389125 \approx 0.533$  bpv。由图 13 可知, 本文算法的 Hausdorff 距离在  $k=8$  之后, 除了部分数据点高于或者等于算法 LC 和 MS, 其余数据点始终低于算法 MS 和算法 LC, 表明本文算法相比算法 MS 和 LC, 不可见性较好。

#### (2) 骨架相识度匹配

骨架相似度  $E^n$  是使用能量方程的方法来进行衡量两个三维模型的相似程度。  $E^n$  越大, 表明三维模型越相似, 算法对模型的修改程度越小。图 14 为基于骨架相似度  $E^n$  的不可见性实验对比图。可知, 本文算法的骨架相似度匹配曲线位置除了部分坐标值相同, 其它始终高于算法 MS 和算法 LC, 表明本文算法相比其他两个算法不可见性较好。

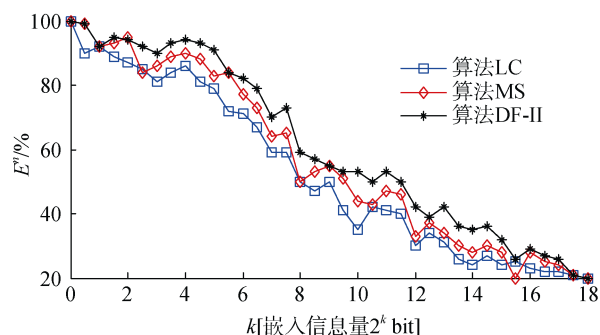


图 14 不可见性/容量性实验( $E^n-k$ )  
Figure 14 Experiment of invisibility/capacity ( $E^n-k$ )

## 2.2 鲁棒性

### 2.2.1 鲁棒性分析

鲁棒性可以反应信息的修改程度。本文算法的鲁棒性体现在首先是把秘密信息嵌入到三维模型的亚鲁棒点中; 其次是使用多载体, 在每个载体群中隐藏相同的秘密信息提高算法的鲁棒性。另外, 三维模型通过重定位后本身可以抵抗旋转、平移、等比例缩放等攻击, 对该类攻击有更好的鲁棒性。

### 2.2.2 鲁棒性实验

实验对含密三维模型进行旋转、均匀缩放、非均匀缩放、平移、顶点重排、网格简化和面片剪切等仿真实验。图 15 表示的是从含密三维模型中提取出 Lena 图像的结果, 从提取的结果可以看出, Lena 图像的形状和纹理还可以有效识别, 表明本文算法

可以抵抗以上攻击。(为了更好的展示三维模型的攻击效果, 图中只是一个模型的攻击结果, 而图片则是从众多三维模型中提取出)

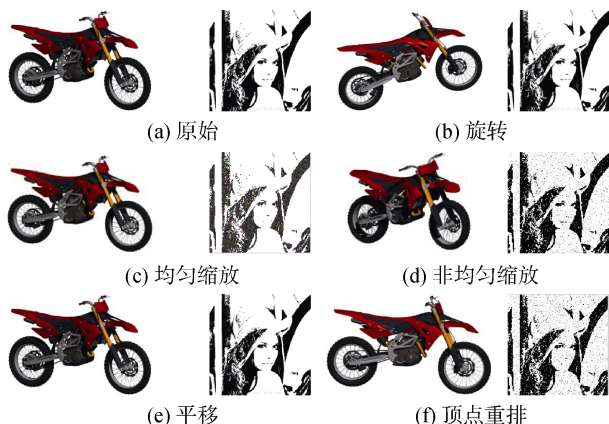


图 15 常见的攻击信息提取

Figure 15 Common attack information extraction

本文的鲁棒性采用公式(8)正确信息的比特数比率(Bit Correct Ration, BCR)来衡量。

$$BCR = \frac{\text{正确的秘密信息比特数}}{\text{秘密信息总比特数}} \quad (8)$$

BCR 是正确的秘密信息比特与秘密信息总比特之比, 因此 BCR 越高, 则算法的鲁棒性越强, 否则, 算法的鲁棒性越低。本实验计算含密三维模型在遭受随机加噪、重网格化、非均匀压缩、网格简化和面片剪切后的 BCR。算法的鲁棒性实验是本文算法 DF-II 与文献[19](算法 MS)和文献[20](算法 LC)进行对比。

图 16 给出本文算法和算法 MS、LC 在遭受非均匀压缩后的 BCR 对比实验图, 横坐标为非均匀压缩率, 即三维模型顶点坐标到中心点距离的压缩(缩短)程度, 实验采用的非均匀压缩是指攻击的顶点到中心点的距离非成比例地缩短。从折线图可以看出, 本文算法的总体曲线高于其他两个算法, 并且秘密信息提取率超过 65%, 说明算法具有较强的鲁棒性。

对算法进行加噪攻击, 将含密三维模型的每一个顶点坐标叠加一个噪声向量, 向量长度为最大尺度的 0.05%, 对比结果如图 17 所示。其中横坐标表示经过加噪的顶点占总顶点的百分比, 从图中可以看出模型在遭受 30%至 70%区间的噪声攻击时, 本文算法的 BCR 明显高于其它两个算法且 BCR 的平均值高于 60%, 表明本文算法对抵抗加噪攻击有很好的鲁棒性。

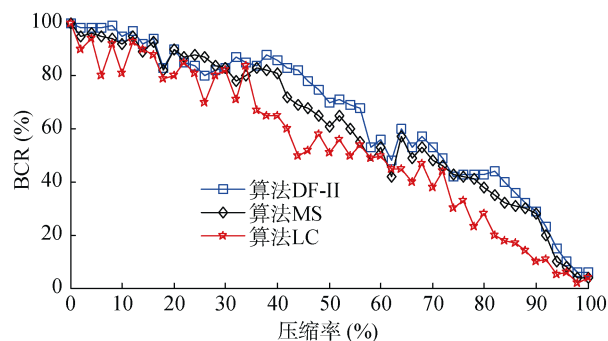


图 16 三维模型非均匀压缩鲁棒性实验对比(BCR)

Figure 16 3D model non-uniform compression robustness experiment comparison (BCR)

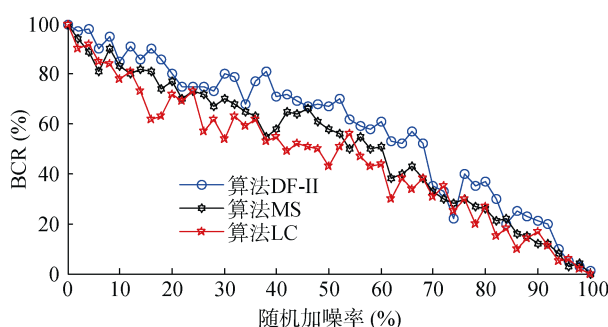


图 17 三维模型随机加噪鲁棒性实验对比(BCR)

Figure 17 Three-dimensional model random noise enhancement robustness experiment comparison (BCR)

图 18 表示对含密模型进行参数是采样率为  $128 \times 128$  的重网格化攻击的结果, 横坐标表示经过重网格化的网格占总网格的百分比。从图中可以看出本文算法的 BCR 曲线总体大于其他两个算法, 说明本文算法可以更好的抵抗重网格化攻击。

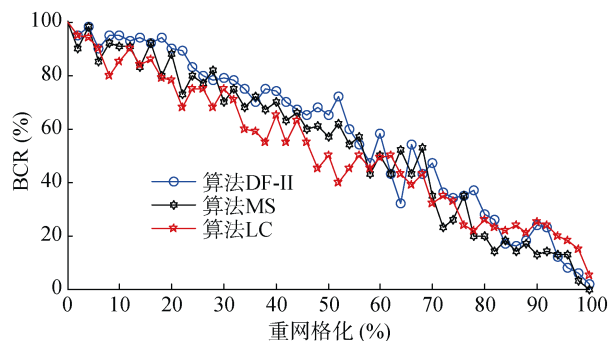


图 18 三维模型重网格化实验对比(BCR)

Figure 18 3D model re-grid experiment comparison (BCR)



对算法进行网格简化后的实验结果如图 19 所示, 横坐标表示简化的顶点数占原模型总顶点数的百分比。从图中可以得出本文的 BCR 平均值高出其他两个算法 10% 以上, 得益于本文对模型顶点进行了分类和同一类载体隐藏相同秘密信息, 使得算法可以较好的抵抗该类攻击。

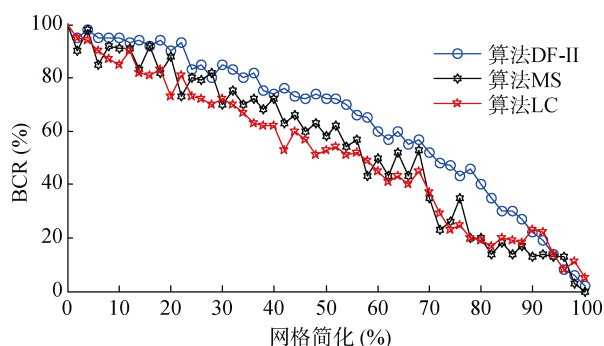


图 19 三维模型网格简化实验对比(BCR)

Figure 19 3D Model Grid Simplified Experiment Comparison (BCR)

图 20 表示在 Autodesk 3Ds Max2012 实验平台中对三维模型进行面片剪切攻击后得出的对比图, 其中横坐标表示裁剪的面片数占原模型面片数的百分比。可以看出模型的面片剪切数达 40% 时, 本算法的 BCR 值仍高于 75%, 归因于使用顶点划分和载体分类技术, 剪切率高时仍有很高的秘密信息提取率。

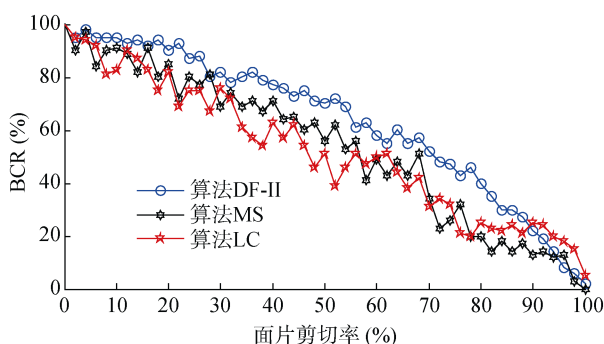


图 20 三维模型面片剪切鲁棒性实验对比(BCR)

Figure 20 Three-dimensional model patch shear robustness experiment comparison (BCR)

综上所述, 根据图 16~图 20 的实验数据, 计算出每种攻击方式在 0 到 100% 的 BCR 数据平均值, 填充到表 4 中。从表 4 可知, 本算法遭受非均匀压缩、随机加噪、重网格化、网格简化和面片剪切攻击后的平均 BCR 高于其他两个方法, 说明该算法抵抗这些攻击有较强的鲁棒性。

表 4 模型遭受攻击后的平均 BCR 值

Table 4 Average BCR value after the model was attacked

攻击方式	攻击参数	本文算法 DF-II	算法 MS	算法 LC
非均匀压缩	缩短距离(0%~100%)	67.59	64.39	50.47
随机加噪	0.05%叠加(0%~100%)	62.23	58.01	51.17
重网格化	重网格率(0%~100%)	60.23	57.72	48.23
网格简化	网格简化(0%~100%)	79.29	68.24	62.28
面片剪切	按面剪切(0%~100%)	72.11	60.23	55.48

总之, 从图 16 到图 20 的鲁棒性对比实验和表 4 中可以看出, 算法 DF-II 好于算法 MS 和算法 LC, 而算法 MS 又优于算法 LC, 这得益于本文信息隐藏算法对算法的不断优化和改进。算法 LC 是对单个三维模型顶点进行标注和聚类, 而算法 DF-II 和算法 MS 则是使用多个载体来进行信息隐藏, 在多载体中嵌入多份秘密信息, 增加秘密信息的备份, 接收者在提取秘密信息时可以进行校验, 所以鲁棒性好于算法 LC。算法 MS 以三维模型的中心点作为融合点构造多融合态, 且前期需要对三维模型进行预处理, 算法的复杂度高, 而算法 DF-II 使用了对噪声、选择和简化等攻击有很好鲁棒性的距离特征和体积积分不变量来进行载体分类和顶点标注, 所以鲁棒性又好于算法 MS。

## 2.3 抗分析性实验

### 2.3.1 抗分析能力分析

本文算法的抗分析性能力体现在首先采用多载体进行信息隐藏, 同时使用体积积分不变量, 通过阈值分割选取亚鲁棒点作为算法的隐藏区域, 降低了秘密信息的隐藏密度; 其次使用恰当的  $\gamma$  和  $\beta$  值, 通过改变顶点的凹凸程度来嵌入秘密信息, 所以算法的抗分析性能好。

### 2.3.2 抗分析性实验

选用图 5 交通工具三维模型中的一个模型, 对原模型和含密模型采用一阶拉普拉斯平滑的隐写分析方法进行测试, 统计原模型、含密模型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(0,0,0)距离差值。由于本文算法中, 秘密信息隐藏在三维模型的亚鲁棒点中, 而非所有顶点, 所以总体秘密信息的嵌入率最大是  $207491/389125 \approx 53.3\%$ , 因此图 21 给出了嵌入率为 15%、25%、35%、45% 时的实验对比图。

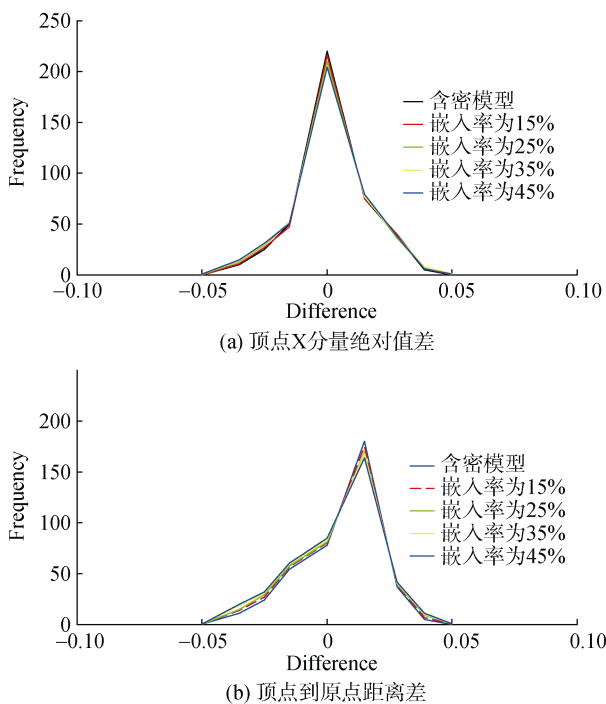


图 21 特征统计的隐写分析实验结果

Figure 21 Steganalysis experimental results of feature statistics

从图 21 可以看出在嵌入率分别为 15%、25%、35%、45% 的含密模型与原模型的特征曲线基本重合, 表明本算法的抗分析能力较强。

### 3 结语

本文利用距离特征和体积积分不变量, 对三维模型进行信息隐藏。本文的贡献在于利用距离特征对多个载体模型进行分类和使用体积积分不变量把三维模型顶点划分为鲁棒点、亚鲁棒点和背景点, 通过修改顶点的凹凸程度把秘密信息嵌入到亚鲁棒点中。同时, 算法还对不可见性和鲁棒性进行分析, 并且对算法进行加噪、重网格化、非均匀压缩等仿真实验。实验结果对比表明, 本文算法的 BCR 平均值高于算法 MS 和 LC, 具有很强的鲁棒性, 达到了信息隐藏的要求。

### 参考文献

- [1] Zhang T, Mu D, Ren S. An Algorithm Based on Skeleton Extraction and Inscribed Sphere Analysis for 3D Model Information Hiding[J]. *International Journal of Advancements in Computing Technology*, 2012, 4(1): 453-462.
- [2] Ou B, Shi X L. Reversible Data Hiding for Three-dimensional Image Based on Depth No-synthesis-error Model[J]. *Netinfo Security*, 2018(5): 24-31.
- [3] Qi K, Zhang D F, Xie D Q. Steganography for 3D Model Based on Frame Transform and HMM Model in Wavelet Domain[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2010, 22(8): 1406-1411.
- [4] Ren S, Wang Z, Su D X, et al. Information Hiding Algorithm Based on Mapping and Structure Data of 3D Model[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(5): 211-222.
- [5] Tsai Y, Huang W, Peng B. An Efficient and Distortion-controllable Information Hiding Algorithm for 3D Polygonal Models with Adaptation[J]. *International Journal of Network Security*, 2015, 17(1): 79-84.
- [6] Motwani R, Motwani M, Harris F. An Intelligent Learning Approach for Information Hiding in 3D Multimedia[C]. *2010 Second International Conference on Future Networks*, 2010: 447-451.
- [7] Huang Y H, Tsai Y Y. A Reversible Data Hiding Scheme for 3D Polygonal Models Based on Histogram Shifting with High Embedding Capacity[J]. *3D Research*, 2015, 6(2): 20.
- [8] Jiao R. A partial steganography algorithm for 3D triangle mesh[C]. *2017 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. 2017: 361-365.
- [9] Mados B, Balaz A, Adam N, et al. Information Hiding into OBJ Format File Using Vector Steganography Techniques[C]. *2018 IEEE 12th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*, 2018: 91-96.
- [10] Maret Y, Ebrahimi T. Data hiding on 3D polygonal meshes[C]. *ACM Multimedia and Security Workshop*, 2004: 68-74.
- [11] Alfaced P R, Macq B. From 3D Mesh Data Hiding to 3D Shape Blind and Robust Watermarking: A Survey[M]. *Transactions on Data Hiding and Multimedia Security II*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, : 91-115.
- [12] Zhang R, Fang Z D, Li A M, et al. Study on 3D Model Retrieval Based on Distance and Curvature Feature[J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(2): 269-271.
- [13] Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, et al. Shape Distributions[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2002, 21(4): 807-832.
- [14] Manay S, Hong B W, Yezzi A J, et al. Integral Invariant Signatures[M]. *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg:

Springer Berlin Heidelberg, 2004: 87-99.

- [15] Pottmann H, Wallner J, Huang Q X, et al. Integral Invariants for Robust Geometry Processing[J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2009, 26(1): 37-60.
- [16] Li Q, Zhou M Q, Geng G H. Fracture Surface Matching Algorithm Based on Integral Invariants[J]. *Computer Engineering*, 2012, 38(3): 156-158.  
(李群辉, 周明全, 耿国华. 基于积分不变量的断裂面匹配算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(3): 156-158.)
- [17] Bian Z, Zhai Z Y. Feature Recovery for Bas-relief Based on Integral Invariant[J]. *China Sciencepaper*, 2013, 8(1): 35-40. (边哲, 翟自勇. 基于积分不变量的浅浮雕特征恢复算法[J]. 中国科技论文, 2013, 8(1): 35-40.)
- [18] Yi X L, Camps O I. Line-based Recognition Using a Multidimensional Hausdorff Distance[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(9): 901-916.
- [19] Ren S, Xu Z C, Wang Z, et al. Low-density 3D Model Information Hiding Algorithm Based on Multiple Fusion States[J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, 39(4): 1100-1105.  
(任帅, 徐振超, 王震, 等. 基于多融合态的低密度三维模型信息隐藏算法[J]. 计算机应用, 2019, 39(4): 1100-1105.)
- [20] Ren S, Zhang T, Xu Z C, et al. Information Hiding Algorithm for 3D Models Based on Feature Point Labeling and Clustering[J]. *Journal of Computer Applications*, 2018, 38(4): 1017-1022.  
(任帅, 张弢, 徐振超, 等. 特征点标注与聚类的三维模型信息隐藏算法[J]. 计算机应用, 2018, 38(4): 1017-1022.)



**任帅** 于 2010 年在西北工业大学计算机科学与技术专业获得博士学位。现任长安大学副教授。研究领域为信息安全。研究兴趣包括：多载体信息隐藏技术、三维模型信息隐藏技术。Email: shuairan@chd.edu.cn



**苏东旭** 于 2017 年在长安大学网络工程专业获得学士学位。现在长安大学网络与信息安全专业攻读硕士学位。研究兴趣包括：三维模型信息隐藏技术。Email: 913301491@qq.com



**徐振超** 于 2016 年在山西大学软件工程专业获得学士学位。现在长安大学软件工程专业攻读硕士学位。研究兴趣包括：多载体信息隐藏技术。Email: 810430539@qq.com



**范傲雄** 于 2018 年在西安邮电大学网络工程专业获得学士学位。现在长安大学计算机技术专业攻读硕士学位。研究兴趣包括：多载体信息隐藏技术、三维模型建模。Email: fanaoxiong@chd.edu.cn



**张弢** 于 2012 年在西北工业大学控制科学与工程专业获得博士学位。现任长安大学副教授。研究领域为信息安全。研究兴趣包括：多载体信息隐藏技术、三维模型信息隐藏技术。Email: zt904@foxmail.com