基于三维模型多载体面片法向量的信息隐藏算法

欧跃发[1],邓 维[2],任 帅[3],刘圣霞[3]

(1.北部湾大学 机械与船舶海洋工程学院,广西 钦州 535011;2.桂林航天工业学院 计算机科学与工程学院,广西 桂林 541004;3.长安大学 信息工程学院,西安 710064)

摘 要:针对现存的单载体三维模型信息隐藏算法在容量性、鲁棒性和不可见性方面的不足,提出一种基于三维模型多载体面片法向量的信息隐藏算法。首先,将三维模型载体集分成m类,相应地将隐秘数据的二进制序列也分为m段,然后,获取三维模型特征点,求出模型质心到每个三角面片的距离,将三维模型的三角面片进行排序,再确定三维模型三角面片法向量和顶点与质心连线方向向量夹角的余弦值区间;其次,将原始隐秘数据通过Hilbert曲线置乱处理转换成相应的二进制编码序列B;最后,通过余弦值区间与隐秘数据的二进制编码序列之间的匹配度来完成隐秘数据的嵌入。仿真实验分析对比表明:本文算法具有较好的鲁棒性和不可见性,在含密载体传输的过程中可以有效抵抗普遍攻击。

关键词:信息隐藏;三维模型;多载体;载体分类;三角面片

中图分类号:TP309.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2025)08-2711-11

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240018

An information hiding algorithm based on the normal vector of multiple surface images in 3D models

OU Yue-fa[1],DENG Wei[2],REN Shuai[3],LIU Sheng-xia[3]

(1. *School of Mechanical and Marine Engineering*, *Beibu Gulf University*, *Qinzhou* 535011, *China*; 2. *School of Computer Science & Engineering*, *Guilin University of Aerospace Technology*, *Guilin* 541004, *China*; 3. *School of Information Engineering*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710064, *China*)

Abstract: To address the shortcomings of existing single carrier 3D model information hiding algorithms in terms of capacity, robustness, and invisibility, a information hiding algorithm based on 3D model multi carrier surface normal vectors is proposed. Firstly, divide the 3D model carrier set into m classes, correspondingly, the binary sequence of secret data is also divided into m segments, then, obtain the feature points of the 3D model, find the distance from the centroid of the model to each triangular patch and sort the triangular patches of the 3D model, determine the cosine value interval of the angle between the

收稿日期:2024-01-05.

基金项目:国家自然科学基金青年项目(61702050);北部湾大学引进高层次人才科研启动项目(2019KYQD03);2022年度广西职业教育教学改革研究项目(GXGZJG2022B006).

作者简介:欧跃发(1982-),男,高级工程师,硕士.研究方向:软件技术.E-mail:ouyuefa88@126.com

通信作者:邓维(1978-),男,高级工程师,硕士.研究方向:计算机应用.E-mail:460960790@qq.com

normal vector of the triangular surface of the 3D model and the direction vector of the connection between the vertex and the centroid, secondly, the original hidden data is transformed into the corresponding binary encoding sequence B through Hilbert curve scrambling processing, finally, the embedding of hidden data is achieved through the matching degree between the cosine value interval and the binary encoding sequence of the hidden data, through simulation experiment analysis and comparison, it can be concluded that this algorithm has good robustness and invisibility, and can effectively resist universal attacks during the transmission process of dense carriers.

Key words: information hiding; 3D models; multi carriers; carrier classification; triangular patch

0 引 言

21世纪以互联网为核心的网络技术和通信技术已经得到迅速发展和广泛应用,大量视频、音频、图像、立体模型等数字化信息可以在网络上进行传播共享,但一系列通信安全问题也随之出现,因此,人们对信息的安全通信也提出了更高的要求。目前以三维模型为载体的隐秘通信技术提供了海量符合实际应用的大数据场景[1]。文献[2]通过修改顶点位置以小失真隐藏信息;文献[3]根据索引的奇偶性,将顶点分为“嵌入集”和“预测集”,对每个顶点的多个最高有效位进行自适应预测,并在原始模型中标记,然后通过熵编码对用于数据提取和模型恢复的辅助信息进行压缩,最后使用两个集合之间的相关性来恢复由于数据嵌入而修改的顶点;文献[4]利用有序统计量提取和跟踪算法确定三维模型的特征顶点,结合特征顶点数的分布特征进行信息隐藏;文献[5]采用了一种基于网格相邻顶点之间最短距离的网格遍历方法,通过修改小数点后笛卡尔坐标顶点的小数点第4位和第5位来隐藏秘密数据;文献[6]基于均匀因子的混合预测方案具有内容依赖性,可以更好地利用网格冗余度产生较小的预测误差,从而获得较低的失真。在多层嵌入过程中,利用重叠分割和自适应嵌入可以实现大的嵌入容量。文献[7]利用不规则小波分析方法,通过量化小波系数向量的范数,将信息嵌入一个合适的分辨率级别,可以提供较高的数据嵌入率;文献[8]使用3D小波变换从给定的网格导出较低分辨率和较高分辨率的网格,评估从原始网格提取的特征与其平滑模型之间的差异。然后,使用这些差异的对数分布前4个矩来形成所提出的228维隐写分析特征集,为基于三维小波的水印算法的嵌入隐写分析提供了好的结果;文献[9]首先使用处理模型中具有边界值的顶点来构造边界体积,然后将每个顶点坐标值转换为顶点和最小边界点之间距离与边界体积的边长比率。通过使用具有嵌入阈值的空间编码方法将秘密信息嵌入加密顶点中。该方案具有较低的计算复杂度、较高的嵌入容量和可控的失真。文献[10]提出在加密域中完成信息隐藏操作,首先将顶点坐标的小数映射成整数来执行位流加密,再通过数据隐藏密钥,将隐秘数据嵌入最低有效位,该方案计算复杂度低。

上述信息隐藏算法用单个三维模型作为隐秘数据嵌入的载体完成隐秘传输,而文献[11]通过对经几何变换后的三维模型进行预处理得到多载体融合态,并在定点分区中嵌入秘密信息。本文在以上信息隐藏算法的基础上,提出用多个三维模型作为隐秘数据嵌入的载体,将三维模型载体集分成m类,相应地将隐秘数据的二进制序列也分为m段,获取三维模型特征点后,求出模型质心到每个三角面片的距离,将三维模型的三角面片进行排序,然后利用三维模型三角面片法向量和顶点与质心连线方向向量夹角的余弦值区间,与隐秘数据二进制序列进行匹配来嵌入隐秘数据。

1 基于三维模型多载体面片法向量的信息隐藏算法设计

本文中信息隐藏算法的流程图如图1所示,其具体步骤分为模型预处理与隐秘数据嵌入两大模块。在进行预处理时,对三维模型进行规范化处理,以保证其在进行隐秘传输时的方向、位置与角度等相同;其次,针对复杂的拓扑结构和数量庞大的顶点、边和面片,对三维模型进行简化,来提高处理效率,降低计算复杂度;最后,对三维模型载体进行分类以便后续隐秘数据的嵌入。在进行

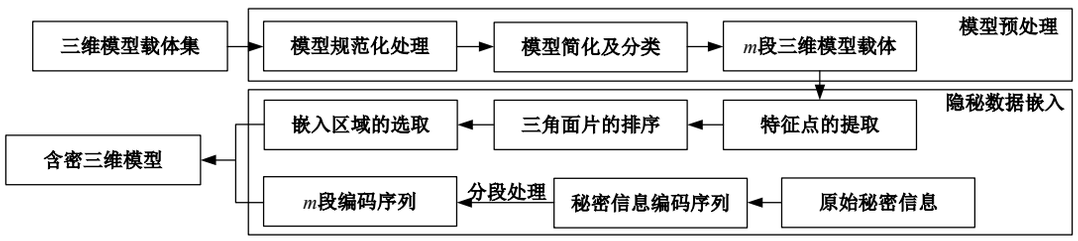


图 1　隐秘数据嵌入流程图

Fig.1 Flowchart of hidden data Embedding

隐秘数据嵌入时,首先选取可以进行隐秘信息嵌入的特征点;然后根据质心到三角面片的距离对三角面片进行排序;最后根据模型三角面片的法向量与模型质心到三角面片顶点连接线的方向向量之间的夹角余弦值选取嵌入信息的区域。同时,对原始秘密信息进行编码处理以进一步保障数据的安全性,然后对其分段处理后进行最终的信息嵌入。

1.1　模型预处理

1.1.1　三维模型规范化处理

未经过规范化处理的三维模型一般是以任意方向、任意位置、任意角度等形式存在的,要用三维模型进行隐秘传输,首先要将其在标准坐标系中进行标准化处理[12],本文进行三维模型标准化处理的具体步骤如下:

步骤 1　确定三维模型中的顶点 $V\{p_1,p_2,\cdots,p_l\}$,$p_i(x_i,y_i,z_i)$,用式(1)计算三维模型的质心 $a(x_a,y_a,z_a)$。

$$a=\begin{cases}x_a=\dfrac{1}{l}\sum\limits_{i=1}^{l}x_i\\ y_a=\dfrac{1}{l}\sum\limits_{i=1}^{l}y_i\\ z_a=\dfrac{1}{l}\sum\limits_{i=1}^{l}z_i\end{cases}\tag{1}$$

步骤 2　通过式(2)将三维模型的质心移动到坐标原点,使模型可以抵抗平移变换,且得到三维模型的中心点为 $a'=(x_a',y_a',z_a')$、顶点坐标为 $p_i'=(x_i',y_i',z_i')$。

$$p_i'=\begin{cases}x_i'=x_i-x_a\\ y_i'=y_i-y_a\\ z_i'=z_i-z_a\end{cases}\tag{2}$$

步骤 3　旋转三维模型,使其主分量轴与 Z 轴方向保持一致以抵抗旋转攻击,模型顶点协方差矩阵 C 的最大特征值的特征向量对应模型的主轴,用式(3)计算 C。

$$C=\begin{pmatrix}\sum\limits_{i=0}^{l}(x_i')^2 & \sum\limits_{i=0}^{l}x_i'y_i' & \sum\limits_{i=0}^{l}x_i'z_i'\\ \sum\limits_{i=0}^{l}x_i'y_i' & \sum\limits_{i=0}^{l}(y_i')^2 & \sum\limits_{i=0}^{l}y_i'z_i'\\ \sum\limits_{i=0}^{l}x_i'z_i' & \sum\limits_{i=0}^{l}y_i'z_i' & \sum\limits_{i=0}^{l}(z_i')^2\end{pmatrix}\tag{3}$$

步骤 4　用式(4)计算三维模型的中心点到其各个顶点之间距离的平均值 d_1,在模型遭受缩放攻击时,可以 d_1 为参考恢复原样来抵抗缩放攻击。

$$d_1=\frac{1}{l}\sum_{i=1}^{l}\sqrt{x_i'\times x_i'+y_i'\times y_i'+z_i'\times z_i'}\tag{4}$$

1.1.2　模型简化

由于三维模型复杂的拓扑结构和数量庞大的顶点、边和面片,使其存在一定的冗余数据,在对其进行编辑和处理的过程中计算量庞大,通常在适当的失真度和外观完整的情况下,需要在对其进行编辑和处理前进行简化操作,提高其处理效率,降低计算复杂度。本文算法为保证模型的外观完整、低失真度而设定一个简化后的模型边数阈值 B,通过折叠边和删除面实现三维模型多载体的简化操作,选择代价最小的边进行折叠,并删除其相邻的面片[13]。图 2 为边折叠过程示意。具体的模型简化步骤如下:

步骤 1　获取三维模型的点列表、边列表和面列表,然后用式(5)计算顶点的 DC 值,式(6)计算边的 DC 值,边的 DC 值是其两个顶点的 DC 值之和。

$$\mathrm{DC}(A)=\frac{D(A)}{N}\tag{5}$$

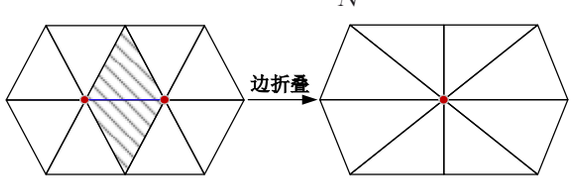


图 2　边折叠过程示意

Fig.2 Schematic of the side folding process

$$\mathrm{EDC}(e)=\mathrm{DC}(v_i)+\mathrm{DC}(v_j) \tag{6}$$

式中:$D(A)$为点A的重要性,即连接到A的节点数量;N为可能连接到A的最大节点数;v_i、v_j为边e的两个顶点。

步骤2 用式(7)计算每条边的归一化长度$\mathrm{NEL}(e)$,其中$L(e)$为边的长度,$\max(L(e))$为模型的最大边长。

$$\mathrm{NEL}(e)=\frac{L(e)}{\max\limits_{e\in E}(L(e))} \tag{7}$$

步骤3 定义边的代价为$V(e)$,用式(8)计算模型中所有边的代价,满足阈值B,依次选择代价最小的边进行折叠,同时删除其相邻的面片,实现模型的简化操作。

$$V(e)=\alpha\times\mathrm{EDC}(e)+\beta\times\mathrm{NEL}(e) \tag{8}$$

式中:α和$\beta\in[0,1]$,且$\alpha+\beta=1$,通过调整系数α和β可以实现不同的简化效果。

将全部n个三维模型通过以上步骤处理后,得到简化后的三维模型载体集$M'\{M_1',M_1',\cdots,M_n'\}$,利用简化模型进行信息隐藏,可以有效降低模型处理过程中的计算复杂度,减小其存储空间。

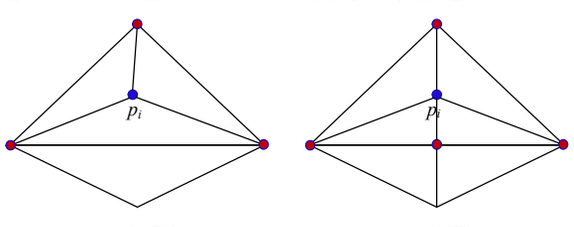
1.1.3 模型分类

本文利用三维模型顶点的价将n个三维模型$M'\{M_1',M_1',\cdots,M_n'\}$进行分类处理,将三维模型大规模顶点的邻点数目定义为三维模型顶点的价,图3为模型顶点p_i的价等于3和4的示意图。若一个三维模型顶点的个数为V,边的个数为E,面的个数为F,亏格数为g,根据其欧拉示性数公式即式(9),可利用式(10)求出三维模型顶点的平均价J。

$$\chi=F-E+V \tag{9}$$

$$J=6\left[1-\frac{(2-2g)}{V}\right] \tag{10}$$

式中:亏格数就是三维模型上存在的洞的数量,例如,球面、圆盘和环的亏格数都是0,欧拉示性数是由三维模型的拓扑结构决定的,它是一个可以特定地表示三维网格模型的数,与三维模型的各种属性都相关。



(a) 3价顶点 (b) 4价顶点

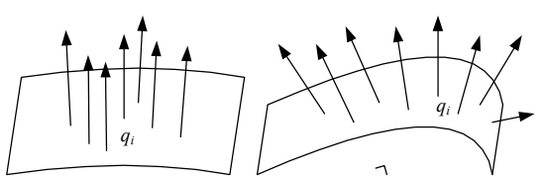
图3 顶点价的示意图

Fig.3 Schematic diagram of vertex degrees

一个三维模型中不同顶点的价可能相同也可能不同,而不同三维模型的顶点平均价可能相同也可能不同,本文算法依据n个三维模型的顶点平均价的异同,将其分为m组三维模型载体,每组中所含三维模型的顶点平均价都相同。

将三维模型进行规范化、简化、分类处理后,本文利用文献[14]中的方法计算三维模型中顶点法向量的变化程度来判断三维模型局部区域的平坦程度。选择局部区域平坦即鲁棒性较强的部位嵌入隐秘数据,图4为不同平坦程度区域的法向量分布图。首先获取三维模型中一点q的k近邻域内点的集合$\{q_1,q_2,\cdots,q_k\}$,三维模型顶点法向量的变换程度f_i,即顶点q_i的法向量与其k邻近域中点q_j的法向量夹角θ_{ij}的算术平均值,如式(11)所示:

$$f_i=\frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}\theta_{ij} \tag{11}$$



(a) f_i较小的情况 (b) f_i较大的情况

图4 不同平坦度区域的法向量分布

Fig.4 Normal vector distribution in different flatness regions

根据三维模型顶点f_i值的大小,可以判断三维模型局部区域的平坦程度,f_i越大表示该点的局部区域越不平坦,f_i越小表示该点的局部区域越平坦。依据本文算法中可接受的模型最大陡峭程度设定阈值δ,将$f_i<\delta$的顶点及其k近邻域点集作为特征点集,此类型的点集具有较强的鲁棒性。然后在点q_i及其k近邻域点集之外的区域再次遍历模型中剩余的点,判断其f_i值与阈值δ的大小关系,依次迭代,直到遍历完三维模型中所有的点,以此方法提取所有三维模型中的特征点。

选取了三维模型中的特征点后,本算法通过计算三维模型质心$a'=(x_a',y_a',z_a')$到模型中每个三角面片的距离d_ω,将三维模型中的三角面片按照d_ω值的大小排序。图5为点面元素分布示意图,在三维模型M_i'中的一个三角面片S_τ中选取一个顶点A,并将坐标原点a'投影在三角面片S_τ上,

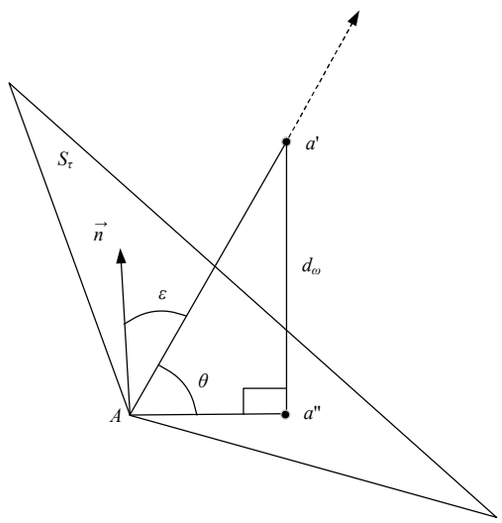


图 5　点面元素分布示意图

Fig.5 Schematic diagram of the distribution of point and surface elements

投影点记为 a'',则点 a' 与 a'' 的距离就是三维模型的质心到三角面片 S_τ 的距离 d_ω^τ。通过式(12)计算 d_ω^τ,其中 θ 为三维模型质心到三角面片顶点连接线的方向向量 $\overrightarrow{Aa'}$ 与 Aa'' 的夹角,$\vec{n}$ 为三角面片 S_τ 的法向量。

$$d_\omega^\tau=|a'A|\sin\theta=|a'A|\left|\cos\left(\frac{\pi}{2}-\theta\right)\right|=\left|\overrightarrow{a'A}\cdot\vec{n}\right|/|\vec{n}| \tag{12}$$

特别地,若坐标原点 a' 的投影点和三角面片的某个顶点重合,那么 a' 到三角面片的距离即 $a'=(x_a',y_a',z_a')$ 到三角面片中与 a' 的投影点重合的顶点 $F(x_F,y_F,z_F)$ 之间的距离,由式(13)求得。

$$d_\omega^\tau{}'=\sqrt{(x_F-x_a')^2+(y_F-y_a')^2+(z_F-z_a')^2} \tag{13}$$

考虑到三维模型中会存在模型质心到两个三角面片的距离 d_ω 相等的情况,因此,本算法通过计算三角面片顶点 A 与三维模型质心之间的距离 $a'A$ 的大小,确定当两个三角面片的 d_ω 距离相等时相应三角面片的排序结果。另外,若三维模型质心到某两个三角面片的距离 d_ω 与三维模型质心到三角面片的顶点 A 的距离 $a'A$ 都相等时,则计算这两个三角面片的面积,通过其面积大小确定两个三角面片的排序结果。

获取三维模型中的特征区域并完成三角面片的排序后,本算法通过修改三角面片的法向量 $\vec{n}$ 与三维模型质心到三角面片顶点连接线的方向向量 $\overrightarrow{Aa'}$ 之间的夹角 ε 的余弦值,完成隐秘数据的嵌入。

1.2　信息隐藏的流程与步骤

本文中隐秘数据嵌入的具体步骤如下:

步骤 1　模型规范化处理。首先,将 n 个三维模型进行规范化处理,使三维模型可以对几何攻击具备一定的抵抗力。

步骤 2　三维模型简化及分类。按照三维模型顶点平均价的异同,将顶点平均价相等的模型分为一类,共分成 m 组三维模型。

步骤 3　特征点的提取。计算三维模型顶点法向量的变换程度 f_i,选取 $f_i<\delta$ 的顶点及其 k 近邻域点集作为特征点集。

步骤 4　特征区域排序。将三维模型中选取的特征点集区域的三角面片根据三维模型质心 $a'=(x_a',y_a',z_a')$ 到三角面片之间的距离 d_ω 进行排序。

步骤 5　确定嵌入区域。选取模型三角面片的法向量与模型质心到三角面片顶点连接线的方向向量 $\overrightarrow{Aa'}$ 之间的夹角 ε 的余弦值 $\cos\varepsilon$,由 $\varepsilon\in(0^\circ,90^\circ)$ 且 $\cos\varepsilon\in(0,1)$,将 $\cos\varepsilon$ 分为 8 个区域,作为嵌入区域。

步骤 6　隐秘数据预处理。将原始隐秘数据通过 Hilbert 曲线置乱处理转换成相应的二进制编码序列 B。

步骤 7　制定嵌入规则。隐秘数据与载体信息的匹配规则如表 1 所示,本算法根据余弦值区间数将隐秘数据编码序列以 3 bit 为单位嵌入三维载体。

步骤 8　隐秘数据分段。将隐秘数据的编码序列按照三维模型的分类数进行相同数目的分段处理,每段编码序列的位数记为 $B_1,B_2,\cdots,B_m$,且满足 $B_1<B_2<\cdots<B_m$,考虑到以每 3 bit 为单位嵌入隐秘数据,因此,将每段隐秘数据的比特位数 B_j

表 1　隐秘数据嵌入规则

Table 1　Stealth data embedding rules

余弦值区间	隐秘数据序列	角度区间
(0, 0.125)	000	(90°, 89°)
(0.125, 0.25)	001	(89°, 75°)
(0.25, 0.375)	010	(75°, 68°)
(0.375, 0.5)	100	(68°, 60°)
(0.5, 0.625)	011	(60°, 51°)
(0.625, 0.75)	101	(51°, 41°)
(0.75, 0.875)	110	(41°, 29°)
(0.875, 1)	111	(29°, 0°)

固定为3的倍数。

步骤9 隐秘数据的嵌入。根据隐秘数据嵌入规则,在同类三维模型中嵌入同段隐秘数据,若隐秘数据编码序列与余弦值区间不匹配,则调整三角面片的顶点位置改变夹角ε来匹配并表示隐秘数据序列。

本文算法在同类型的三维载体中嵌入同一段隐秘数据,可以有效提高隐秘传输过程中的抗攻击性,每个特征区域嵌入3 bit隐秘数据,提高隐秘数据嵌入的容量性。

2 性能分析与实验对比

本文分别从容量性、鲁棒性和不可见性3个方面进行实验对比分析,对照实验为文献[15]中的算法(Distortion design for secure adaptive,DDSA)和文献[16]中的算法(Map and structure data,MSD),其中进行实验分析的环境为MatlabR2016a、Meshlab_v2021.07和PyCharm2020.1。本文所用三维模型载体集选自斯坦福大学三维模型库,图6为本算法列举的原始三维模型载体,图7为欲隐藏隐秘数据。

2.1 不可见性实验及实验对比

2.1.1 基于HVS特性的实验

HVS特性的衡量是通过人眼视觉判断含密三维模型外观上的改变或整体拓扑的形变而完成验证过程,本文通过微调三角面片的顶点,修改面片法向量和模型质心到三角面片顶点连线方向向量的夹角余弦值而嵌入隐秘数据,具有较好的隐秘效果,且能够满足HVS特性。



图7 欲隐藏隐秘数据

Fig.7 To hide confidential data

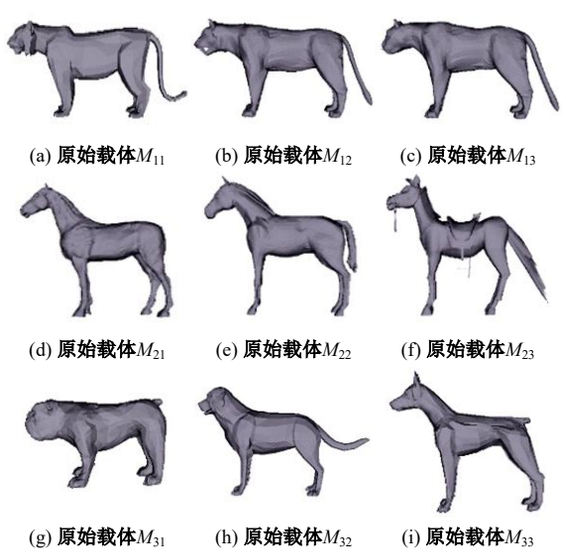
本文将图6中的原始三维模型载体与图8的含密三维模型载体进行人眼视觉对比判断,可以看出含密三维模型与原始三维模型并无差异,因此,本文算法能够满足HVS人眼视觉特性要求。

2.1.2 基于SNR的实验

SNR是通过判断三维模型在嵌入隐秘数据之后模型的失真度来衡量算法不可见性的一种方式,由式(14)计算可得。本文算法在嵌入隐秘数据时,只以10°左右的夹角变化来调整三角面片的顶点,因此,对三维模型的改变程度非常微小。在进行SNR实验分析时,通过对比本文算法与DDSA算法和MSD算法嵌入隐秘数据后SNR的大小来进行结果分析,图9为算法信噪比变化情况。

$$\mathrm{SNR}=\frac{\sum_{i=1}^{V}(x_i^2+y_i^2+z_i^2)}{\sum_{i=1}^{V}(x_i'-x_i)^2+(y_i'-y_i)^2+(z_i'-z_i)^2} \tag{14}$$

式中:V为嵌入载体的顶点总数;x_i、y_i、z_i为原始嵌



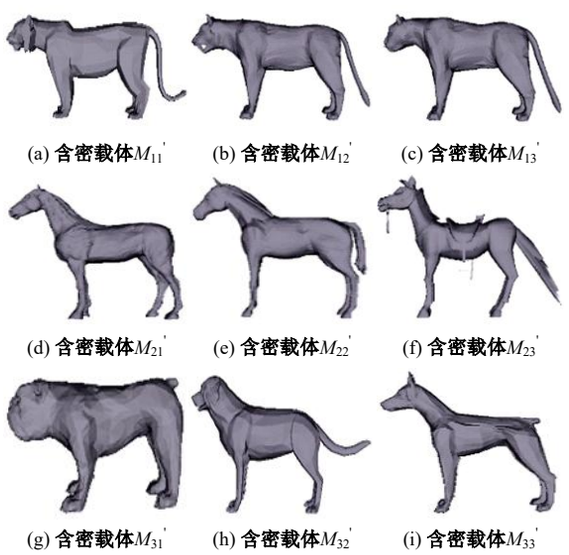
(a) 原始载体M_{11} (b) 原始载体M_{12} (c) 原始载体M_{13}

(d) 原始载体M_{21} (e) 原始载体M_{22} (f) 原始载体M_{23}

(g) 原始载体M_{31} (h) 原始载体M_{32} (i) 原始载体M_{33}

图6 原始三维模型载体

Fig.6 Original 3D models carrier



(a) 含密载体M_{11}' (b) 含密载体M_{12}' (c) 含密载体M_{13}'

(d) 含密载体M_{21}' (e) 含密载体M_{22}' (f) 含密载体M_{23}'

(g) 含密载体M_{31}' (h) 含密载体M_{32}' (i) 含密载体M_{33}'

图8 含密三维模型

Fig.8 3D models containing classified information

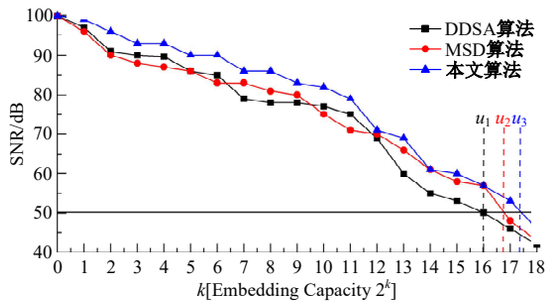


图 9　算法 SNR 对比分析

Fig.9 Comparative analysis of SNR for algorithms

入载体的顶点坐标值；x_i'、y_i'、z_i'为含密载体模型的顶点坐标值。

本文算法选取三维模型特征区域三角面片的属性特征嵌入隐秘数据，当 SNR 大于等于 50 dB 时，含密三维模型的失真程度能够保持在可接受的范围。据图 9 可以得出，当 SNR 小于等于 50 dB 时，本文算法的 SNR 平均值为 83.188 dB，DDSA 算法和 MSD 算法 SNR 平均值分别为 77.688 dB 和 79.063 dB，本文算法的 SNR 平均值比 DDSA 算法和 MSD 算法分别高 6.61% 和 4.96%。图 9 中 u_1、u_2、u_3 3 条线分别表示本文算法与 DDSA 算法和 MSD 算法在 SNR 等于 50 dB 时相应的隐秘数据嵌入指数，可以看出本文算法的嵌入指数 k=17.4，而 DDSA 算法的嵌入指数 k=16，MSD 算法的嵌入指数 k=16.7，因此，本文算法的嵌入容量大于 DDSA 算法和 MSD 算法。

2.2　鲁棒性实验及实验对比

在本文算法鲁棒性实验的分析过程中，分别从算法对不同程度的剪切、简化、旋转、非均匀压缩和噪声攻击的鲁棒性方面进行实验分析，并将本文算法的实验结果与 DDSA 算法和 MSD 算法进行对照，本文算法实验选取遭受攻击后的含密载体中所提取的隐秘数据与原始隐秘数据的相关系数（Correlation coefficient，Corr）作为本文鲁棒性能的衡量指标，如式（15）所示：

$$\mathrm{Corr}=\frac{\sum_{n=1}^{B}(B_n'-\bar{B}')(B_n-\bar{B})}{\sqrt{\sum_{n=1}^{B}(B_n'-\bar{B}')^2\cdot\sum_{n=1}^{B}(B_n-\bar{B})^2}} \tag{15}$$

式中：$\bar{B}_n$ 和 $\bar{B}_n'$ 分别为嵌入的隐秘数据序列 B_n 和提取出的隐秘数据序列 B_n' 的平均值；B 为模型中的含密总数。

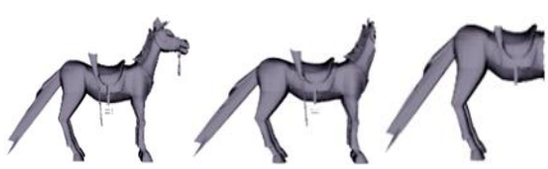
2.2.1　剪切攻击实验分析

剪切攻击是通过将三维模型的几何拓扑结构进行剪切破坏，来攻击三维模型载密传输过程的一种攻击方式，若含密三维模型的特征区域遭受剪切破坏，那么隐秘数据的完整性也会被破坏，图 10 为含密三维模型遭受不同程度剪切攻击后的效果。本文算法以多个三维模型作为隐秘数据的嵌入载体，将多个三维模型分类后，在同类载体中嵌入相同的隐秘数据，若有载体遭受剪切破坏，仍然可以从其余同类载体中获取完整的隐秘数据，此方法可以保证算法抵抗剪切攻击的鲁棒性。

在图 10 中，当含密载体遭受 30% 的剪切攻击时，本文算法的 Corr 为 0.693，而含密载体遭受 60% 的剪切攻击时，Corr 等于 0.431，其所提取的隐秘图像将无法识别隐秘信息。

图 11 为本文算法与对比算法 DDSA 算法和 MSD 算法遭受不同程度的剪切攻击时，所提取的隐秘数据与原始隐秘数据的相关系数 Corr 的对比情况。

在图 11 中，剪切率小于 20% 时，本文算法的 Corr 平均值为 0.884，DDSA 算法和 MSD 算法的 Corr 平均值分别为 0.723 和 0.788，因此，在剪切率低于 20% 的情况下，本文算法的 Corr 平均值比 DDSA 算法和 MSD 算法提高了 18.21% 和 10.86%。当含密载体剪切率为 20% 时，本文算法的 Corr 为 0.763，与对比算法的 Corr 差值达到了最大，最大差值为 0.285。图 11 中 f_1、f_2、f_3 表示 Corr 为 0.5 时算法可以抵抗的最大剪切率，本文



(a) **原始含密模型**　(b) **剪切**30%　(c) **剪切**60%

图 10　三维模型剪切攻击

Fig.10 3D models clipping attack

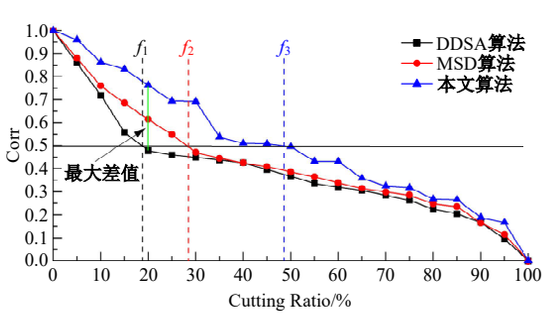


图 11　剪切攻击实验结果对比

Fig.11 Comparison of experimental results of clipping attack

算法的最大剪切率为48.8%,DDSA算法和MSD算法的最大剪切率分别为19%和28.8%。

2.2.2 简化攻击实验分析

简化攻击是通过减少三维模型的顶点数和三角面片数来实现的,遭受简化后的三维模型的基本形状和拓扑结构不会发生大的变化,仍然可以保留原始模型的基本外观,图12为含密三维模型进行不同程度简化操作后的效果。本文将欲隐藏的隐秘数据嵌入三维模型时,选取了三维模型的特征区域进行隐秘数据的隐藏,当三维模型遭受简化攻击时,仍然可以提取到特征区域的数据信息,从而得到相应的隐秘数据。图13为本文算法与DDSA算法和MSD算法在遭受不同程度简化攻击时所提取的隐秘数据与原始隐秘数据的相关系数Corr值的对比情况。

如图12所示,当含密三维载体被简化40%时,本文算法的Corr等于0.88,而当含密载体遭受80%的简化攻击时,本文算法的Corr为0.496,无法提取到有效识别的隐秘图像。从图13中可以看出,当含密载体的简化率小于60%时,3种算法的Corr均大于0.5,且本文算法的Corr平均值为0.895,DDSA算法和MSD算法的Corr平均值分别为0.799和0.867,则在含密载体简化率小于60%的情况下,本文算法的Corr平均值比DDSA算法和MSD算法分别高10.73%和3.13%。图13中虚线g_1、g_2、g_3表示Corr等于0.5时3种算法可以抵抗的最大简化率,本文算法最大简化率为79.8%,DDSA算法和MSD算法的最大简化率为64%和69.9%,本文算法的最大简化率比DDSA算法和MSD算法分别高19.8%和12.41%。



(a) 原始含密模型 (b) 简化40% (c) 简化80%

图12 三维模型简化攻击

Fig.12 3D models simplification attack

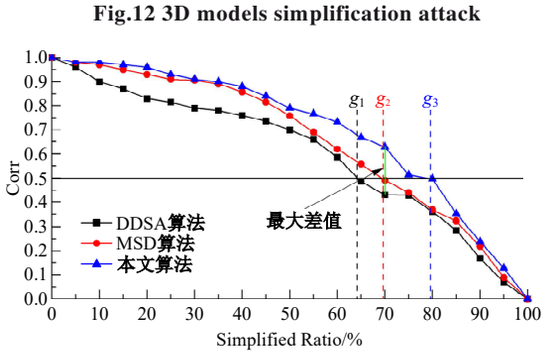


图13 简化攻击实验结果对比

Fig.13 Comparison of simplified attack experimental results

2.2.3 旋转攻击实验分析

旋转攻击通常会改变三维模型在三维空间中的位置信息,而三维模型的基本形状和拓扑结构不会改变,为抵抗此类攻击,需要将模型进行矫正预处理,图14为含密三维模型遭受不同角度旋转攻击后的效果及对应旋转角度所提取的隐秘图像。图15为本文算法与DDSA算法和MSD算法在遭受不同角度的旋转攻击时,提取的隐秘数据与原始隐秘数据Corr值的对比情况。

从图15中可以得出,将含密载体旋转30°时,本文算法的Corr为0.65,提取的隐秘图像可以有效识别,将含密载体旋转45°时,Corr等于0.49,无法识别隐秘图像。在图15中,将含密载体旋转15°时,本文算法的Corr为0.86,而DDSA算法和MSD算法的Corr分别为0.76和0.55,此时,本文算法与对比算法的Corr差值最大。从图15中的h_1、h_2、h_3可以看出,本文算法可以抵抗的最大旋转角度为44°,而DDSA算法和MSD算法的最大旋转角度分别为22.6°和41.8°。

2.2.4 非均匀压缩攻击实验分析

非均匀压缩攻击是将三维模型进行不规则的压缩操作,会在整体模型中不均匀量化地减少模



(a) 原始含密模型 (b) 旋转30° (c) 旋转45°

图14 三维模型旋转攻击

Fig.14 3D models rotational attack

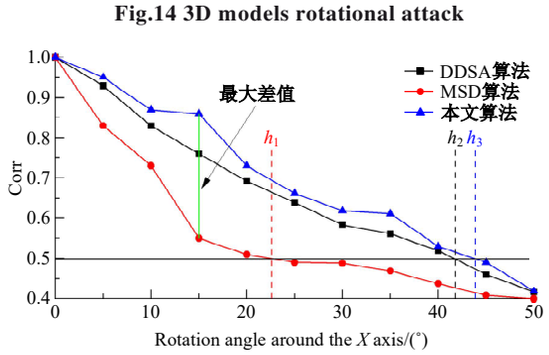


图15 旋转攻击实验结果对比

Fig.15 Comparison of experimental results of rotational attack

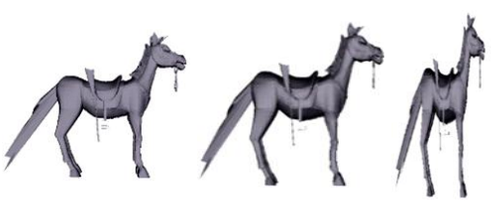
型的顶点数,改变模型的拓扑数据,从而影响含密三维模型的隐秘传输,图 16 为三维模型遭受不同程度非均匀压缩的效果。本文算法将多载体三维模型分类并提取模型的特征区域来隐藏隐秘数据,若有载体遭受非均匀压缩,则可从其余同类载体中获取隐秘数据,且将隐秘数据隐藏于载体的特征区域,也可在模型受到非均匀压缩时,更大程度地提高隐秘数据的安全性。图 17 为本文算法与 DDSA 算法和 MSD 算法遭受不同程度的非均匀压缩时,所提取的隐秘数据与原始隐秘数据的 Corr 分布情况。

在图 16 中,当含密载体非均匀压缩 30% 时,本文算法相应的 Corr 为 0.83,而将含密载体非均匀压缩 70% 时,相应的 Corr 为 0.431。图 17 中,在非均匀压缩率小于 50% 的情况下,3 种算法的 Corr 均大于 0.5,此时,本文的 Corr 平均值为 0.849,DDSA 算法和 MSD 算法的 Corr 平均值分别为 0.761 和 0.786,则本文算法的 Corr 平均值比 DDSA 算法和 MSD 算法分别高 10.37% 和 7.42%。图 17 中 i_1、i_2、i_3 与 Corr 等于 0.5 的直线相交,表示 3 种算法分别可以抵抗的最大非均匀压缩率,本文算法最大非均匀压缩率为 59%,DDSA 算法和 MSD 算法分别为 55.8% 和 56.1%。

2.2.5　噪声攻击实验分析

噪声攻击是一种在含密三维模型进行隐秘传输的过程中添加噪声扰动来改变三维模型顶点数据信息的攻击方式,遭受噪声攻击后的三维模型在几何结构和基本形状上不会发生大的改变。图 18 为含密载体遭受不同程度噪声攻击后的效果。本文将多个分类处理后的三维模型载体作为嵌入载体,并将同段隐秘数据的编码序列嵌入同类三维模型中,若有三维模型遭受噪声攻击被破坏时,仍然可以提取到完整的隐秘数据编码序列。图 19 为本文算法与 DDSA 算法和 MSD 算法遭受不同程度的噪声攻击时,提取的隐秘数据与原始隐秘数据的 Corr 对比情况。

在图 18 中,含密载体遭受 0.4% 的噪声攻击后,本文算法相应的 Corr 为 0.798,且提取的隐秘图像可以有效识别,而为含密载体添加 0.7% 的噪声攻击时,对应的 Corr 为 0.439,提取的隐秘图像取法识别。图 19 中,在添加噪声率小于 0.5% 时,3 种算法的 Corr 均高于 0.5,在这种情况下,本文算法的 Corr 平均值为 0.888,DDSA 算法和 MSD 算法的 Corr 平均值分别为 0.803 和 0.811,本文算法的 Corr 平均值比 DDSA 算法和 MSD 算法分别提高了 9.57% 和 8.67%。图 19 中 j_1、j_2、j_3 表示 Corr 等于 0.5 时 3 种算法的加噪率,本文算法的加噪率为 0.65%,DDSA 算法和 MSD 算法的加噪率分别为 0.55% 和 0.62%,则本文算法的最大加噪率比 DDSA 算法和 MSD 算法分别高 15.38% 和 4.62%。



(a) **原始含密模型**　(b) **压缩**30%　(c) **压缩**70%

图 16　三维模型非均匀压缩攻击

Fig.16 Non-uniform compression attack on 3D models

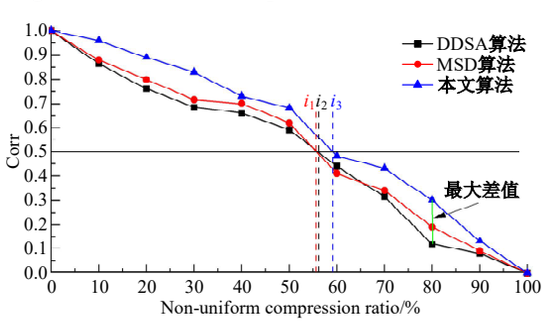


图 17　非均匀压缩攻击实验结果对比

Fig.17 Comparison of experimental results of non-uniform compression attack



(a) **原始含密模型**　(b) **加噪**0.4%　(c) **压噪**0.7%

图 18　三维模型噪声攻击

Fig.18 3D models noise attack

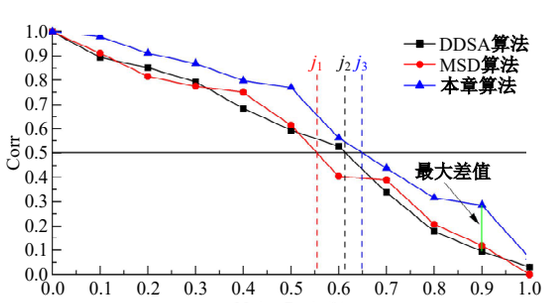


图 19　噪声攻击实验结果对比

Fig.19 Comparison of noise attack experimental results

2.2.6 组合攻击

在实际的隐秘传输过程中,考虑到同一传输信道内对含密载体的攻击类型往往不止存在某一类攻击,因此,针对多个含密载体在完成隐秘传输的过程中可能遭受不同程度的组合攻击,本文进行了含密载体遭受不同类型或不同数目的组合攻击实验,本组实验选取的攻击类型包括①剪切攻击20%、②简化攻击30%、③非均匀压缩攻击10%、④噪声攻击0.3%、⑤旋转攻击30°,本组实验采用Corr指标衡量含密载体遭受不同组合攻击后提取隐秘数据的效果,实验结果如表2所示。

由表2组合攻击的实验结果可以看出,本文算法在遭受以上各种不同程度的组合攻击时,其Corr始终保持在0.5以上,即可以提取出隐秘数据的有效数据信息。本文算法的组合攻击实验充分考虑了隐秘传输过程中含密载体可能遭受的各种攻击程度以及攻击组合,进一步验证了本文算法有较好的鲁棒性。

表2 组合攻击实验结果

Table 2 Combinatorial attack experimental results

含密载体						Corr
M_{11}'	M_{12}'	M_{21}'	M_{22}'	M_{31}'	M_{32}'	
②③	——	⑤	——	④	——	0.696
——	③	——	②	——	①	0.723
——	③	——	②	——	⑤①	0.669
⑤	——	③	——	——	①	0.551
——	②	①	——	④	——	0.732
——	④	——	⑤②	①	——	0.685
⑤	——	④①	——	——	③	0.518
——	③	——	①	②	——	0.682
②	——	——	③	——	⑤	0.633
——	①②	——	③	——	④	0.589
①④	——	⑤	——	③	——	0.629
③	④	——	②	——	——	0.736
——	——	⑤	——	①	②	0.688
④	——	②	——	①	——	0.693

3 结束语

本文提出将多个三维模型作为隐秘数据嵌入载体的信息隐藏算法,首先根据三维模型的顶点平均价将多个三维模型进行分类处理,再根据三维模型的分类结果相应地将隐秘数据进行分段处理,然后提取三维模型的特征区域,通过修改三维模型中三角面片的法向量和质心与三角面片顶点连线的方向向量夹角的余弦值来嵌入隐秘数据。实验分析结果表明:本文算法具有较高的容量性、较好的鲁棒性和不可见性,在隐秘传输的过程中,对三维模型的大多数攻击类型都具有较强的抵抗力。

参考文献:

[1] 张小梅. 三维网格模型数字水印的相关理论及关键技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学信息工程学院, 2007.
Zhang Xiao-mei. Research on relevant theories and key technologies of digital watermarking for 3d mesh models[D]. Wuhan: School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, 2007.

[2] Zein O M E, Bakrawy L M E, Ghali N I. A non-blind robust watermarking approach for 3D mesh models[J]. Journal of Theoretical & Applied Information Technology, 2016, 83(3): 353-359.

[3] Lyu W L, Cheng L, Yin Z. High-capacity reversible data hiding in encrypted 3D mesh models based on multi-MSB prediction[J]. Signal Processing, 2022, 201: 108686.

[4] Wang X, Zhan Y. A zero-watermarking scheme for three-dimensional mesh models based on multi-features[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(19): 27001-27028.

[5] Farrag S, Alexan W. Secure 3D data hiding technique based on a mesh traversal algorithm[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(39): 29289-29303.

[6] Zhang Q, Song X, Wen T, et al. Reversible data hiding for 3D mesh models with hybrid prediction and multilayer strategy[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(21): 29713-29729.

[7] Zaid A O, Hachani M, Puech W, et al. Wavelet-based high-capacity watermarking of 3-D irregular meshes[J]. Multimedia Tools and Applications, 2015, 74(15): 5897-5915.

[8] Li Z, Bors A G. Steganalysis of meshes based on 3D wavelet multiresolution analysis[J]. Information Sciences, 2020, 522: 164-179.

[9] Tsai Y Y. Separable reversible data hiding for encrypted three-dimensional models based on spatial subdivision and space encoding[J]. IEEE Transactions on Multimedia, Piscataway, 2021, 23: 2286-2296.

[10] Jiang R, Zhou H, Zhang W, et al. Reversible data

hiding in encrypted three-dimensional mesh models [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2018, 20(1): 55-67.

[11] 任帅, 雷雪梅, 淡卓异, 等. 一种基于三维模型顶点分区的多载体信息隐藏算法[J]. 北京邮电大学学报, 2023, 46(1): 109-114.
Ren Shuai, Lei Xue-mei, Dan Zhuo-yi, et al. A multi-carrier information hiding algorithm based on vertex partitioning of 3d models[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023, 46(1): 109-114.

[12] Liu G , Wang Q , Wu L , et al. Zero-watermarking method for resisting rotation attacks in 3D models[J]. Neurocomputing, 2021, 421: 39-50.

[13] Yan T, Xin F, Qiang C. 3D model simplification algorithm based on degree centrality[C]//2nd IEEE International Conference on Broadband Network & Multimedia Technology, Beijing, China, 2009: 179-182.

[14] 陶海跻, 达飞鹏. 一种基于法向量的点云自动配准方法[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 184-189.
Tao Hai-ji, Da Fei-peng. An automatic point cloud registration method based on normal vectors[J]. Chinese Lasers, 2013, 40(8): 184-189.

[15] Zhou H, Chen K, Zhang W, et al. Distortion design for secure adaptive 3-d mesh steganography[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2019, 21(6): 1384-1398.

[16] 任帅, 王震, 苏东旭, 等. 基于三维模型贴图与结构数据的信息隐藏算法[J]. 通信学报, 2019, 40(5): 211-222.
Ren Shuai, Wang Zhen, Su Dong-xu, et al. Information hiding algorithm based on texture mapping and structural data of 3d models[J]. Journal of Communications, 2019, 40(5): 211-222.