基于局部高度与Mean Shift的三维模型信息隐藏算法

任 帅[1] 赵祥模[1] 张 弢[2] 石方夏[3] 慕德俊[4]
(长安大学信息工程学院 西安 710064)[1] (长安大学电子与控制工程学院 西安 710064)[2]
(西藏民族大学信息工程学院 咸阳 712082)[3] (西北工业大学自动化学院 西安 710072)[4]

摘 要 针对基于载体的秘密通信的需求,提出利用模型点Mean Shift聚类分析的三维模型载体信息隐藏算法。该算法将局部高度引入到模型点显著性衡量中,用以描述顶点的能量和结构特性,并用Mean Shift聚类分析法将各个顶点按照局部高度值分为能量特性不同的3类。以3类顶点为载体,采用隐藏信息与载体能量特性匹配的方式,通过修改3类顶点的结构特性指标,实现不同信息的嵌入。实验结果显示,该算法各项性能均衡,尤其具有较好的抗分析性和感知篡改性,且嵌入容量较大。

关键词 信息隐藏,三维模型载体预处理,载体能量特性,Mean Shift
中图法分类号 TN918,TP309.2 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.03.040

Information Hiding Scheme for 3D Models Based on Local Height and Mean Shift Clustering Analysis

REN Shuai[1] ZHAO Xiang-mo[1] ZHANG Tao[2] SHI Fang-xia[3] MU De-jun[4]
(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)[1]
(School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)[2]
(School of Information Engineering, Xizang Minzu University, Xianyang 712082, China)[3]
(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)[4]

Abstract To satisfy the requirement of confidential communication, an information hiding scheme based on Mean Shift clustering analysis was proposed for 3D models. Local height is introduced into this scheme to measure the significance, which can be considered as one of the energy characteristics of vertex. Based on this, Mean Shift is used to analyze the vertex into three categories with different energy characteristics. Different information can be hidden into different kinds of vertex by modifying structure characteristic parameters. And the energy characteristics of information and its carrier should be matched as much as possible. Experimental results show that this scheme is of good performance. Especially the anti-analysis ability and the sensitivity to tamper are much better than others and the capacity is also improved greatly.

Keywords Information hiding, Carrier preprocessing of 3D mesh, Energy characteristics of carrier, Mean Shift

1 引言

秘密信息安全通信是关系到国家安全的重要课题,也是近年来国内外信息安全领域的研究热点。目前,实现安全通信的方式主要有3种:安全信道、加密技术和基于载体的信息隐藏技术。其中,基于载体的信息隐藏技术的通信具有明显的优势。以往的研究中,信息隐藏载体多用文本和数字图像,对三维模型载体的信息隐藏技术阐述较少。ACM信息隐藏和多媒体安全会议(ACM IH&MMSec'14 Workshop)的主要研究内容涉及到了包含三维模型在内的非常规载体的信息隐藏技术。2013年IEEE图像处理国际会议(IEEE ICIP 2013)的主要研究内容也涉及到了3D等媒体的信息隐藏算法、媒体特征提取和分析等,这两类研究内容均与载体的选取和预处理有关。中国计算机网络与信息安全学术会议(CCNIS2014)和中国可信计算与信息安全学术会议(CTCIS2015)中关于信息隐藏算法的研究内容也主要集中在

到稿日期:2015-11-29 返修日期:2016-04-24 本文受国家自然科学基金资助项目(61402052,61303041),陕西省自然科学基础研究计划项目(2014JM2-6105),中国博士后科学基金资助项目(2015M572510),陕西省博士后科学基金资助项目,西藏自治区自然科学基金项目(2015ZR-14-20),长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(310832151092),国家级大学生创新创业训练计划项目(201510710044)资助。
任 帅(1982—),男,博士,副教授,硕士生导师,CCF会员,主要研究方向为信息隐藏技术、信息安全与风险评估,E-mail:maxwellren@qq.com;赵祥模(1966—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为分布式计算机网络;张 弢(1984—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为信息隐藏技术;石方夏(1972—),男,硕士,副教授,主要研究方向为信息系统管理;慕德俊(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为网络与信息安全。

非常规载体的分析和预处理上。而随着三维技术的不断发展，三维模型也必将成为一种重要的通信载体。本文以按域划分[1]的载体预处理技术为研究起点，首先分析了一些典型的空间域方法，如几何或拓扑特性类的算法可以直接置换载体的几何信息[2-3]来隐藏数据这是三维模型载体信息隐藏最原始、最直接的方法，具有直接隐藏性和大容量性；为改进此类算法的鲁棒性，引入仿射不变量是有效的措施，如利用具有连续解析性的仿射不变量优化需要置换的顶点或将稳态锚点通过三角垂心编码解析为聚类元素从而嵌入隐秘信息等[3-4]。此外，基于主元分析的算法也有助于改善空域算法的鲁棒性，例如可根据主元分析(Primary Component Analysis，PCA)来确定模型的关键位置作为鲁棒区域，并用网格分割法改进鲁棒性和不可见性[5-8]。这类算法也为本文从载体结构特性进行解析和预处理提供了理论依据。改进型的空域算法利用包括坐标、面片数、顶点数等信息在内的几何信息作为统计特征，提升了鲁棒性或容量性，如文献[9]可直接修改特征点模长以隐藏秘密信息，文献[10]所利用的特征匹配方法也可用于载体预处理并具有快速收敛和高准确性的特点，文献[11]中的三维灰度直方图有助于提取载体信息间的相对熵，对本文所需的能量属性分区呈现具有理论支撑性。而三维模型预处理的变换域方法大多利用频谱分析将模型信息参数化，对参数进行少量修改后以隐藏信息，其中基于小波变换的算法可以对规则和非规则网格模型进行小波域参量修改以嵌入较多信息[12]。理论上，变换域算法比空间域算法鲁棒性强，但由于三维模型顶点的天然无序性和不规则性，对其进行频谱分析的难度大，因此目前变换域算法的实用性较低[13-14]。

总结基于域的算法的优缺点，本文在上述同行研究成果的基础上，从载体特性解析角度出发，对载体进行预处理，提出一种新的基于三维模型载体结构和能量特性的预处理方法，在隐藏信息的同时最大程度地满足载体的原始特性。该算法选取模型各顶点的局部高度作为载体结构特性的一个指标，并按照 Mean Shift 聚类分析法对该指标群各个对象进行划分，划分结论即为载体能量特性指标。此外，算法中用于隐藏秘密信息的替换对象可根据所隐藏信息量进行动态扩展。

2 基于模型点 MS(Mean Shift)聚类分析的三维模型信息隐藏算法

2.1 算法原理

“局部高度”[15]是南京大学林金杰等学者提出的一种三维模型的显著性度量方式，本算法首先得出三维网格模型载体顶点的局部高度，将其作为载体能量和结构特性显著性的原始标识；然后引入 Mean Shift 算法[16]这种非参数化的概率密度估计方法对载体表面的局部高度分布进行聚类分析，按照局部高度值的大小得出载体的特征点。这种划分规则所呈现的重要区域和非重要区域符合人类视觉系统(HVS)特性。这与信息隐藏技术中隐藏区域能量和视觉特性吻合。本算法利用特征点和其它顶点的不同特性，分别将其作为隐藏鲁棒信息、秘密信息和脆弱性标识的具体对象。

2.2 算法描述

2.2.1 基于载体能量结构特性的预处理

Step1 读取三维模型的.off 文件，获取其几何信息(包括其面片、顶点数量和各个顶点的坐标值)。

Step2 对三维模型进行局部高度的特征描述，即测量三维模型顶点的凸起程度。设顶点 v 的 R-邻居点集合为 $N_R(v)$，缩写为 N_R，则顶点 v 的局部高度由式(1)计算得出，其中 C 为 N_R 中顶点所关联面片的面积和。$h(v,v')$ 为曲面上 v 点与 v' 之间的相对高度，$S(x)$ 为符号函数，$x>0$ 时，$S(x)$ 为 1，否则为 0。

$$N_R(v)=\frac{8}{C^2}\left\{\frac{\sum\limits_{v'\in N_R} h(v,v')\cdot S[h(v,v')]}{\sum\limits_{v'\in N_R} S[h(v,v')]}+\frac{\sum\limits_{v'\in N_R} h(v,v')\cdot S[-h(v,v')]}{\sum\limits_{v'\in N_R} S[-h(v,v')]}\right\} \tag{1}$$

Step3 对各个顶点的局部高度值进行第一次 Mean shift 聚类，如式(2)所示，其中 $S_h(x)$ 是中心位于 x、体积为 $h^d c_d$、半径为 h 的超球面，包含 n_x 个数据顶点。对于给定的阈值 t，若 $|M_h(x)|<t$，则 x 收敛于局部极大值或局部极小值。将顶点分为局部极大值点(Local Maximum Vertex，LmaxV)、局部极小值点(Local Minimum Vertex，LminV)和普通点(General vertex，GV)。如图 1 所示，点 1，2，3，4 为局部极大值点，点 5，6，7 为局部极小值点。根据 HVS 原则，局部极大值点和局部极小值点即特征点(Feature Vertice，FV)。

$$M_h(x)\equiv\frac{1}{n_x}\sum_{x_i\in S_h(x)}[x_i-x]=\frac{1}{n_x}\sum_{x_i\in S_h(x)}x_i-x \tag{2}$$

Step4 对除特征点之外的顶点进行第二次 Mean Shift 聚类分析，将其分为亚特征点(Sub-feature Vertice，SV)和背景点(Background Vertice，BV)，根据信息隐藏载体能量分析理论，FV，SV 和 BV 这 3 类顶点的能量依次降低，可分别命名为鲁棒点、亚鲁棒点和脆弱点。

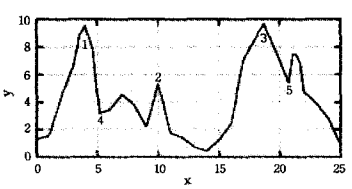


图 1 模型表面极大值、极小值点示意图

2.2.2 隐藏算法步骤

Step1 按照 2.2.1 节对载体进行预处理，得出鲁棒点、亚鲁棒点和脆弱点。

Step2 将鲁棒点、亚鲁棒点和脆弱点这 3 类点的坐标值的小数部分二进制化：如某顶点 3 个坐标值 x,y,z 小数点后数值转化为二进制并依次排列，为满足不可见性，需使得隐藏信息尽可能平均地分布到顶点的 3 个坐标，如图 2 所示，选顶点(−12.968000，32.489999，−934.132345)隐藏 12 比特信息，每个坐标隐藏 4 比特信息，以 1，0，1 作为遍历起始比特，依次将信息交替隐藏到 3 个坐标值小数点后的二进制数里，则每个坐标的二进制字符串都用到了前 4 位；形成的 48 位的二进制数列记作：$B=\{b_{x1},b_{x2},\cdots,b_{x16},b_{y1},\cdots,b_{y16},\cdots,b_{z1},\cdots,b_{z16}\}\in\{0,1\}$。

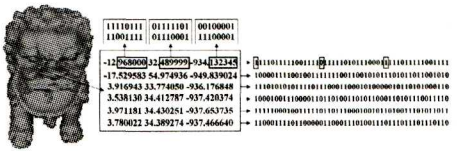


图 2　MS 算法的信息隐藏区域具体化规则

Step3　根据欲隐藏的总信息比特数和模型顶点总数确定二进制序列中用于隐藏的比特位数。

Step4　欲隐藏信息的混沌置乱采用 Logistic 映射，定义为 $g_{k+1}=\mu g_k(1-g_k)$，$g_k\in(0,1)$。确定 Logistic 映射的参数 μ 以及初始值 g_k。则设欲嵌入信息按照参数 g_k 所置乱后的比特序列为 $B_{IN}^g=(b_1^g,b_2^g,\cdots,b_{n-1}^g,b_n^g)\in\{00,01,10,11\}$。通过对载体模型进行 RAID4 行遍历获得 B_{IN}^g。

Step5　应用遗传算法进行最优调整。B_{IN}^g 与 B 序列对应位相同的个数用 F 表示，优化 g_k 使 F 尽量大，优化模型为 $F(i)=\mathrm{Max}F(g_k)=\mathrm{Max}\sum(b_n\overline{\oplus}g_n)$，其中运算符“$\overline{\oplus}$”表示二者相同为 1，不同为 0，用遗传算法优化求解，得出最优解 i。

Step6　将 i 代入 B_{IN}^g 得最优嵌入比特 $B_{IN}^i=b_1^i,b_2^i,\cdots,b_{n-1}^i,b_n^i\in\{00,01,10,11\}$，嵌入信息后载体的解析值为：$b_n'=b_n+(g_n\oplus b_n)$。

Step7　按照 RAID4 行遍历顺序，在特征点坐标的二进制数内隐藏哈希值 H^R、校验参数及置乱参数 y 和 μ 等鲁棒信息，背景点坐标的二进制数内隐藏哈希值 H^F 作为脆弱性标识，亚特征点坐标的二进制数内嵌入欲隐藏信息。

Step8　将隐藏信息后的坐标值化为十进制。

3　性能测试与分析

本文选择图 3(a)为秘密信息(128×128 的灰度图像)，图 3(b)为经过置乱等预处理方法后的秘密信息。选取图 3(c)—图 3(e)所示的三维模型 Chinese dragon，Hand-olivier 和 Ramesses 作为载体。实验环境为 VC++，OpenGL 和 Matlab。

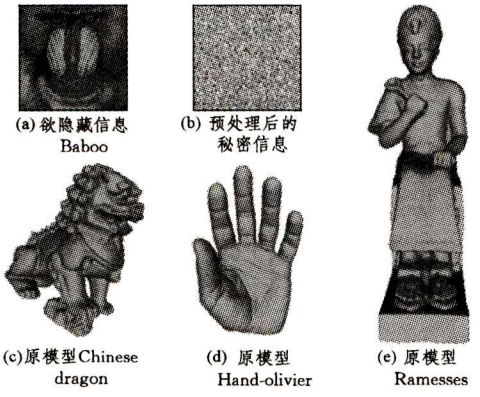


图 3　欲隐藏信息及载体模型

载体的容量越大，不可见性越好。本文的不可见性、容量性以及计算复杂度均是以嵌入量 2^k bit 为参照量的。以 Chinese Dragon 为例，该模型共含有 131956 个顶点，按照文章中给出的示范方法(见图 2)，取各个顶点 3 个坐标值十进制数的小数点后的 6 位数转化为二进制，形成的序列为 131956×48 bits，即最大可容纳性约为 $2^{22.59}$ bits。以文中选定的局部高度为聚类参数对顶点进行鲁棒性的划分，所得到的鲁棒点大约为 27340 个，即用于隐藏鲁棒信息的最大容量约为 27340×48=2^{20} bits，而亚鲁棒点约有 59017 个，即用于隐藏主体信息的最大容量约为 59017×48=2^{21} bits，背景点约有 98699 个，即用于隐藏脆弱性信息的最大容量性约为 98699×48=2^{22} bits。同理计算，Hand-olivier 和 Ramesses 的最大容量分别约为 2^{18} bits 和 2^{20} bits。

3.1　不可见性及容量性实验

3.1.1　HVS 特性

算法的 3 类顶点的 HVS 重要性依次降低，同时其能量特性依次降低。算法利用能量最低的脆弱点隐藏脆弱性标识，利用能量居中但数量最大的亚鲁棒点隐藏秘密信息，从而基本保证了算法的不可见性。算法的具体隐藏区域为顶点坐标小数点的二进制序列，嵌入信息后对顶点坐标改动较小，且算法利用置乱优化算法对秘密信息进行置乱，并获得置乱后的秘密信息和载体信息的最大一致性，使得嵌入信息后对载体的改动较小，从而保证了算法的不可见性。图 4 为隐藏信息后的载体模型，原模型和隐藏信息后的模型均有细节部位放大图，可以看出本算法的不可见性非常理想，利用 Metro 软件可视化表达后改变微弱，难以观察，满足人类视觉的不可感知性。

图 4　不可见性实验图

3.1.2　Hausdorff 距离

利用 Hausdorff 距离将不可见性指标量化。用 Metro 工具软件分别对载体模型 Chinese dragon，Hand-olivier 和 Ramesses 隐藏秘密信息 Baboon 后的 Hausdorff 距离[17]进行计算，当嵌入量等于 $2^{17.087}$ bit 时的 Hausdorff 距离分别为

0.000466、0.002952 和 0.000371。

文献[12,18]分别代表了近年来具有代表性的基于三维模型的变换域和空间域算法，故将其作为对比组。图 5 示出了 MS 算法与文献[12,18]的基于 Hausdorff 距离的不可见性实验对比，图中横坐标为嵌入量 2^k，纵坐标为 Hausdorff 距离，当嵌入量指数 $k<12$ 时，文献[12,18]算法的 Hausdorff 距离小于 MS 算法；而当 $k\geqslant 12$ 时，MS 算法的 Hausdorff 距离则明显小于文献[12,18]的。由此证明本算法在嵌入量较大时，不可见性较好，同时也说明 MS 算法嵌入量相对大。

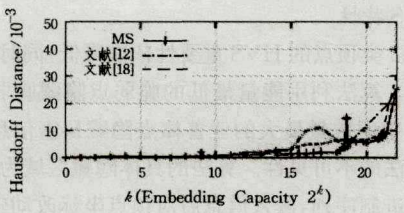
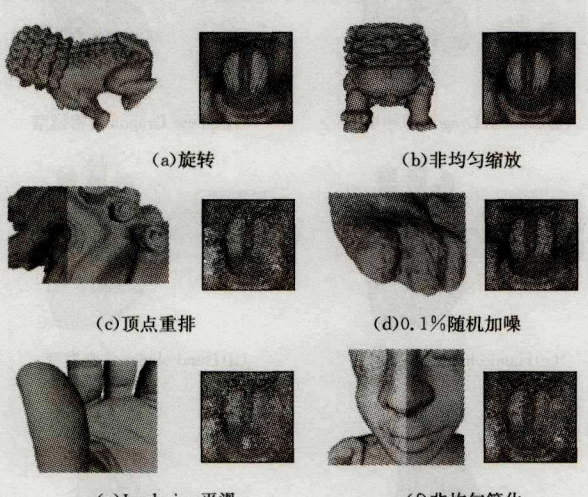


图 5 不可见性/容量性实验(Hausdorff Distance-k)

3.2 鲁棒性实验

算法将鲁棒参数隐藏于鲁棒点，将哈希值作为篡改判别标识和数据恢复的依据，并将秘密信息嵌入亚鲁棒点，保证了算法的鲁棒性。因为算法只与顶点的局部高度有关，与其绝对高度和顶点间拓扑关系无关，所以可抵抗常见攻击、轻微的噪声攻击、针对拓扑结构的攻击。实验对含密模型进行了多种类型攻击测试。如图 6 所示，可以看出基于本文算法的含秘模型在受到攻击后提取出的信息具有良好的视觉效果。



(a)旋转 (b)非均匀缩放

(c)顶点重排 (d)0.1%随机加噪

(e)Laplacian 平滑 (f)非均匀简化

图 6 常见攻击及信息提取

对含密模型进行其它类型攻击的仿真实验如图 6 所示，鲁棒性的数学指标包括：

1)提取信息比特序列的 BER(Bit Error Rate)；

2)提取信息比特序列$\{s_n'\}$和原始信息序列$\{s_n\}$的相关系数，由式(3)表示，其中$\bar{s}'$和$\bar{s}$分别表示$\{s_n'\}$和$\{s_n\}$的平均值。r_i 是原始模型的 EMIS 半径，而 r_i'是含密模型的 EMIS 半径，N 是三维模型欧氏内切球总数。

$$Corr=\frac{\sum_{n=1}^{N-1}(s_n'-\bar{s}')(s_n-\bar{s})}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N-1}(s_n'-\bar{s}')^2\cdot\sum_{n=1}^{N-1}(s_n-\bar{s})^2}} \tag{3}$$

表 1 鲁棒性实验 BER 和 Corr 平均值

模拟攻击方式	Chinese dragon		Hand-olivier		Ramesses	
	BER	Corr	BER	Corr	BER	Corr
旋转	23.01	93.34	33.09	98.39	19.98	96.00
非均匀缩放	25.83	95.73	36.39	92.06	15.54	90.36
顶点重排	22.34	97.90	21.33	94.13	14.68	91.01
0.1% 随机加噪	25.08	95.03	26.67	90.33	20.54	92.01
Laplacian 平滑	11.81	96.31	14.62	88.43	12.36	93.07
非均匀简化	5.98	100.00	39.56	95.04	20.50	100.00

由图 6 可知在受到旋转、非均匀缩放攻击时，提取信息具有很好的完整性，而对顶点重排序、0.1%以下的随机加噪、平滑以及非均匀简化的鲁棒性能依旧可以满足信息识别，实验结果的平均值如表 1 所列，即分别对模型 Chinese dragon，Hand-olivier 和 Ramesses 计算出的 BER 和 Corr 平均值。

在三维模型的信息隐藏鲁棒性研究中，随机加噪和非均匀简化攻击最为困难，图 7 和图 8 给出了随机加噪与 BER 以及 Corr 的关系，图 9 和图 10 给出了非均匀简化攻击强度与 BER 以及 Corr 的关系，结果表明算法有较强的鲁棒性。

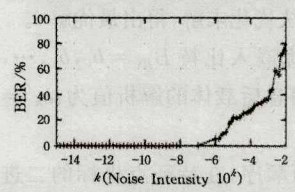


图 7 随机加噪鲁棒性实验(BER)

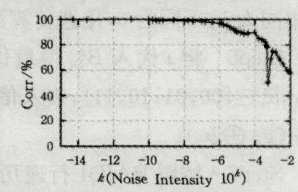


图 8 随机加噪鲁棒性实验(Corr)

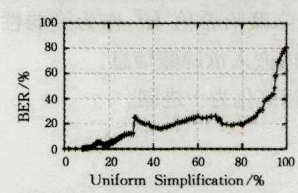


图 9 非均匀简化攻击鲁棒性实验(BER)

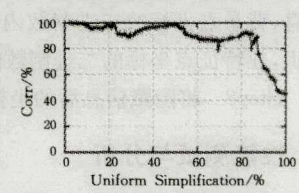


图 10 非均匀简化攻击鲁棒性实验(Corr)

基于 MS 的算法与文献[12,18]中的算法进行随机噪声、均匀重网格化以及非均匀简化攻击的鲁棒性比较，结果如图 11—图 13 所示，MS 算法的 BER 数值明显低于对比算法，说明其具有较强的鲁棒性。

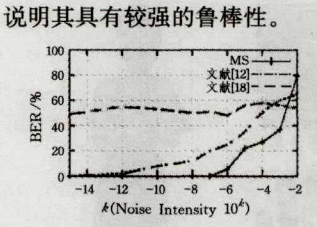


图 11 随机噪声鲁棒性对比

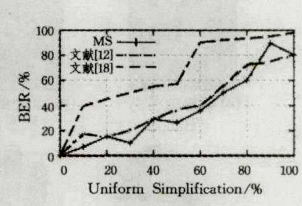


图 12 均匀重网格化鲁棒性对比

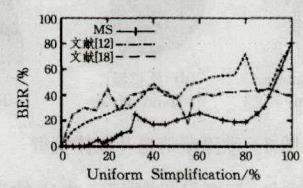


图 13 非均匀简化攻击鲁棒性对比

3.3 复杂度实验

图 14 示出了计算时间与嵌入量的关系，对于模型 Ramesses，当嵌入量指数 $k\leqslant 20.74$ 时计算时间 $t\leqslant 33.45$s；对

于模型 Hand-olivier，当嵌入量指数 $k \leqslant 17$ 时计算时间 $t \leqslant 34.68$s；对于模型 Chinese dragon，当嵌入量指数 $k \leqslant 21.07$ 时计算时间 $t \leqslant 35.45$s。说明算法在对各模型嵌入较大量的信息时，计算时间小于 40s，计算时间较少；且随着模型顶点数增加，计算时间会有所增加，但增加量在正常范围内。

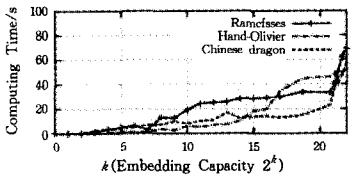


图 14　时间复杂度实验

结束语　综上所述，本算法将利用局部高度算法和 Mean Shift 聚类分析获得的模型点分为特征点、亚特征点和背景点这 3 类，并利用 3 类顶点的不同空间和能量特性，将其分别作为不同性质的待隐藏信息的载体，既满足 HVS 特性，又符合信息隐藏区域能量分布特性，故同时保证了算法的不可见性和鲁棒性。其中，算法利用亚特征点作为秘密信息隐藏载体，隐藏容量较大。除此外，算法利用哈希值对载体做映射，而哈希值本身具有良好的抗分析性和感知篡改性，且可以判断篡改位置和篡改程度。实验结果表明算法对常见攻击具有良好的鲁棒性，且相对同类算法运算复杂度较低，容量较大，适用于对容量性要求较高的应用环境。

参 考 文 献

[1] PAN Z G, SUN S S, LI L. An Overview of 3D Model Watermarking [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(8): 1103-1110. (in Chinese)
潘志庚，孙树森，李黎. 三维模型数字水印综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2006，18(8)：1103-1110.

[2] WANG X Y, ZHAN Y Z. A Watermarking Scheme for Three-Dimensional Models by Constructing Vertex Distribution Characteristics [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(2): 272-279. (in Chinese)
王新宇，詹永照. 构造顶点分布特征的三维模型数字水印算法[J]. 计算机辅助设计和图形学学报，2014，26(2)：272-279.

[3] LUO M, BORS A G, MEMBER S. Surface-Preserving Robust Watermarking of 3-D Shapes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(10): 2813-2826.

[4] DU L, CAO X C, ZHANG M H, et al. Blind Robust Watermarking Mechanism Based on Maxima Curvature of 3D Motion Data [C]// Proceedings of the 14th International Conference on Information Hiding. New York: Springer-Verlag, 2013: 110-124.

[5] YAO Z Q, PAN R J, LI F H, et al. A mesh partitioning approach for 3D mesh oblivious watermarking [J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 19(4): 651-655.

[6] CAI S, SHEN X K. Octree-based robust watermarking for 3D model [J]. Journal of Multimedia, 2011, 6(1): 83-90.

[7] THOMAS T M, VARGHESE J, THOMAS S. An improvement to vertex decimation: finding referencing neighbors for low distortion in 3D steganography [C]// IEEE International Conference on International Confe-rence on Control Communication and Computing (ICCC2013). IEEE, 2013: 259-264.

[8] XU T, LUO Z L, CHEN Z F, et al. A Semi-fragile Watermarking Scheme for 3D Mesh Modes Based on Partitioned DCT [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2014, 53(2): 38-43. (in Chinese)
徐涛，罗中良，陈志芳，等. 一种基于分块 DCT 变换的三位网格模型半脆弱水印算法[J]. 中山大学学报，2014，53(2)：38-43.

[9] ZHANG J M, ZHOU X M, WANG X Y, et al. Transform domain-watermarking scheme df 3D models based on local feature points [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(4): 613-621. (in Chinese)
张建明，周小梅，王新宇，等. 局部特征点的 3 维模型变换域水印算法[J]. 中国图象图形学报，2014，19(4)：613-621.

[10] ZHANG J, HE H, ZHAN X S, et al. Three dimensional face reconstruction via feature adaptation and Laplace deformation [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(9): 1349-1359. (in Chinese)
张剑，何骅，詹小四，等. 结合特征匹配与拉普拉斯形变的 3 维人脸重建[J]. 中国图象图形学报，2014，19(9)：1349-1359.

[11] LIU J, JIN W D. Three-dimensional adaptive minimum error thresholding segmentation algorithm [J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(11): 1416-1424. (in Chinese)
刘金，金炜东. 3 维自适应最小误差阈值分割法 [J]. 中国图象图形学报，2013，18(11)：1416-1424.

[12] HACHANI M, OULED A Z, BAHROUN S. Wavelet based watermarking on 3D irregular meshes[C]// 19th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). New Jersey: IEEE Press, 2012: 2177-2180.

[13] JAIPURIA S J. Watermarking for Depth Map Based 3D images using wavelet transform[C]// 2014 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP). IEEE, 2014: 181-185.

[14] ZHANG T, MU D J, REN S, et al. Information hiding scheme for 3D models based on skeleton and inscribed sphere analysis [J]. Journal of Xidian University, 2014, 41(2): 224-230. (in Chinese)
张驳，慕德俊，任帅，等. 利用内切球解析的三维模型信息隐藏算法[J]. 西安电子科技大学学报，2014，41(2)：224-230.

[15] LIN J J, ZHU D H, YANG Y B. Three-dimensional model study on local height [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(10): 1841-1849. (in Chinese)
林金杰，朱代辉，杨育彬. 3 维模型局部高度[J]. 中国图象图形学报，2011，16(10)：1841-1849.

[16] COMANICIU D, MEER P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619.

[17] XILIN Y, 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.

[18] DU L, CAO X C, ZHANG M H, et al. Blind Robust Watermarking Mechanism Based on Maxima Curvature of 3D Motion Data [C]// Proceedings of the 14th International Conference on Information Hiding. 2013: 110-124.