# 基于金字塔技术的 STL 模型数字水印算法

崔汉国 [1] 刘健鑫 [2] 李正民 [1]

**摘 要** 为了确保 STL (Stereo lithography) 模型数据在网络传输过程中的安全、完整性, 根据 STL 模型自身的特点, 对模型进行了拓扑重建, 在主成分分析 (Primary component analysis, PCA) 预处理的基础上, 提出了基于金字塔技术建立 STL 模型数据空间索引算法, 对原始 STL 模型数据空间进行了划分和索引, 结合奇异值分解的相关原理, 提出了基于 B+ 树 K 近邻查询的 STL 模型数字水印嵌入与提取算法. 实验证明: 本文算法不可见性较好, 算法实现速度快, 在盲检测下能够抵抗旋转、平移、均匀缩放、顶点重排序、简化、噪声、剪切等攻击, 具有较好的鲁棒性.

**关键词** STL 模型, 数字水印, 金字塔技术, 奇异值分解, K 近邻查询

**引用格式** 崔汉国, 刘健鑫, 李正民. 基于金字塔技术的 STL 模型数字水印算法. 自动化学报, 2013, **39**(6): 852−860

**DOI** 10.3724/SP.J.1004.2013.00852

## STL Model Watermarking Algorithm Based on Pyramid Technique

CUI Han-Guo[1] LIU Jian-Xin[2] LI Zheng-Min[1]

**Abstract** To ensure the security and integrity of stereo lithography (STL) model during transmission on the network, according to its own characteristics, the topological reconstruction of the STL model was achieved. After the pretreatment of primary component analysis (PCA), the multidimensional index algorithm for STL model based on pyramid technique was proposed, and the data space that contains the STL model was subdivided and indexed. According to the singular value decomposition principle, an STL model watermarking embedding and extraction algorithm based on B+ tree K nearest-neighbor query was proposed. Experimental results showed that the presented algorithm is efficient and robust to many attacks such as rotation, translation, uniform scaling, vertices reordering, simplifying, noise and cropping under blind detection.

**Key words** STL model, watermarking algorithm, pyramid technique, singular value decomposition, K nearest-neighbor query

**Citation** Cui Han-Guo, Liu Jian-Xin, Li Zheng-Min. STL model watermarking algorithm based on pyramid techniques. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(6): 852−860

STL (Stereo lithography) 文件是一种在三维建模系统与其他应用系统之间进行信息传递的标准几何模型数据交换文件, 是广泛应用于快速成型、逆向工程、虚拟现实、科学计算可视化、计算机动画、图形真实感显示、有限元分析、数值模拟等领域的重要数据接口. 随着基于 Internet 驱动的产品协同设计新模式的出现和发展, 越来越多的 STL 文件需要通过网络进行传播, 以实现分布在全球不同地点的产品设计人员和其他相关人员通过网络进行产品的协同设计以及不同程度的产品数据交换和后处理等. 因此, 如何确保 STL 模型文件在网络传输过程中的安全性、完整性已成为目前急需解决的问题, 实现 STL 文件数据在网络制造环境下协同设计过程中的安全性保护、完整性检测、版权认证等具有重要的意义.

近年来, 起源于信息隐藏技术的数字水印技术作为一种实现信息的知识产权保护、确保信息在网络传输过程中的安全、完整性的有效手段, 已经逐渐成为研究的热点[1−9], 对三维模型数字水印的研究也日益增多. 为了提高水印算法的实现速度和不可见性, Bors[10] 提出从局部区域中选择一些对可见性影响不大的点来嵌入水印, 并使用了两种限制修改机制: 平行平面限制和包围椭球限制. 算法的不可见性较好, 但对大多数攻击不具备鲁棒性. 胡敏等[11] 针对三维三角网格模型提出了一种稳健的数字水印算法. 算法首先将三维三角网格模型进行仿射变换, 以获得模型的旋转不变性和缩放不变性, 然后将各顶点邻域内顶点位置的平均差值作为掩蔽因子确定水印嵌入的强度,使得嵌入的水印具有较好的不可见

收稿日期 2011-10-26 录用日期 2012-09-26
Manuscript received October 26, 2011; accepted September 26, 2012
湖北省自然科学基金 (2012FB06904) 资助
Supported by Hubei Province Natural Science Foundation of China (2012FB06904)
本文责任编委 戴琼海
Recommended by Associate Editor DAI Qiong-Hai
1. 海军工程大学动力工程学院 武汉 430033 2. 海军蚌埠士官学校机电系 蚌埠 233012
1. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033 2. Department of Electromechanical Engineering, Bengbu Naval Petty Officer Academy, BengBu 233012

性, 但该算法水印的嵌入强度不能太大. 为了提高水印算法针对某一类或某几类攻击的鲁棒性, 廖学良等[12] 提出了三维模型的仿射变换不变量—重心交点距离比 (Rate of barycenter and crosspoint, RBC), 并基于该不变量提出了一种在三维模型中嵌入水印的空域方法—MICT (Mark, index, and content) 方法. 算法能够抵抗仿射变换、顶点重排以及一定程度的噪声攻击等常见的三维模型水印攻击, 但水印的嵌入容量有限. 王新宇等[13] 为解决目前三维网格模型空域公有数字水印算法抵抗噪声攻击的鲁棒性较弱的问题, 提出了一种新的基于矢量长度的三维网格模型空域公有数字水印算法. 但算法的时间复杂度与三维网格模型顶点数成线性关系, 时间复杂度较高. Quan 等[14] 根据三维网格模型的特征点及其邻接点构造维诺图, 将三维模型的顶点分成不同的部分来嵌入水印. 算法具有较好的鲁棒性, 但水印的嵌入强度不能太大, 对于平移、缩放等几何攻击不具有鲁棒性. Jin 等[15] 利用 Nielson 范数来嵌入水印, 并使用了 K-平均聚类法对 Nielson 范数进行聚类, 通过修改 Nielson 范数嵌入水印. 算法在条件数、平滑、噪声等攻击下的误比特率均低于 10 %, 但对于网格简化、剪切等攻击鲁棒性较差. Cho 等[16] 通过修改顶点法向量的分布来嵌入水印, 但由于法向量的求取精度不高, 导致算法最终的误差较大. Lee 等[17] 提出通过将三维模型多次映射到两个约束集中并修改约束集顶点位置嵌入水印, 可以抵抗网格连通性攻击. 为了提高网格模型水印强度的自适应能力, Corsini 等[18] 提出对于三维网格模型来说, 在光源、光照、纹理材质等条件相同的情况下, 几何数据波动剧烈处比平滑处更适于嵌入高强度的水印. Cheng 等[19] 以网格中邻接多边形之间的夹角区分平滑区域和粗糙区域, 选择粗糙区域作为水印的重点嵌入区, 然而方法仅给出了偏主观的肉眼观测结果, 缺乏客观评价结果. 文献 [20−21] 对基于直接频谱分析的谱水印算法进行了深入研究, 这类盲谱水印算法的鲁棒性不会受到非盲水印算法所需的对齐和重采样过程的影响, 但与非盲谱水印算法相比, 嵌入容量较小. 可以看出, 目前国内外不可见性较好的水印算法其鲁棒性往往较差, 而且水印的嵌入强度不能太大; 鲁棒性较好且满足嵌入强度要求的算法其时间复杂度往往较高, 无法满足网络环境下信息传播的实时性要求. 虽然 STL 文件数据格式简洁、可读性强, 已经成为了快速原型制造系统事实上的数据交换标准, 在 CAD 应用中也成为一种重要的数据交换手段, 但是由于 STL 文件本身存在数据冗余现象严重、不具备拓扑结构等缺陷, 目前直接针对该类模型文件的数字水印算法还少有学者研究.

本文根据 STL 模型自身的特点, 对模型进行拓扑重建, 在主成分分析 (Primary component analysis, PCA) 预处理的基础上, 提出基于金字塔技术建立 STL 模型数据空间索引算法, 对原始 STL 模型数据空间进行分割和索引, 并建立 B+ 树, 以实现模型离散点的快速查询和搜索, 并结合奇异值分解相关原理, 提出基于 B+ 树 K 近邻查询的 STL 模型数字水印嵌入与提取算法, 以实现在满足水印不可见性和鲁棒性要求的同时, 提高算法的效率.

## 1 水印嵌入

### 1.1 STL 模型拓扑重建

STL 文件是一种用构成实体表面的三角面片的几何信息来表达实体表面的数据文件. 其中, 一个三角面片的几何信息包含三角面片所在平面的外法矢和按右手螺旋规则排列的三个顶点的坐标. 由于文件是由一系列三角形面片无序排列组合而成, 文件中顶点坐标信息会在多个三角面片中重复记录, 其数据冗余现象严重, 由此造成了 STL 文件在搜索、查询、修改等方面的效率低下.

为了在嵌入与提取水印信息时实现对文件顶点信息的快速搜索、查询和修改, 必须对 STL 格式模型进行拓扑信息的重建. STL 格式模型的拓扑重建主要包含两个方面的工作: 1) 重复顶点的合并; 2) 冗余边的合并. 本文中的拓扑重建工作主要是指查找合并重复顶点并重建相邻顶点的信息. 对模型建立层次环状数据结构[22], 查找合并重复顶点并重建相邻顶点信息, 具体步骤如下:

1) 利用快速分类算法对三角形面片顶点坐标进行排序.

2) 将重复顶点合并为一个顶点, 并将顶点坐标存入新的模型顶点坐标表中.

3) 建立三角面片顶点索引表, 存储组成各三角形面片的顶点在新的模型顶点坐标表中的索引, 索引值为顶点在新的模型顶点坐标表中的编号.

4) 找出与新的模型顶点坐标表中的每个顶点相邻的顶点, 建立顶点邻接边表, 索引值为顶点在新的模型顶点坐标表中的编号.

### 1.2 基于金字塔技术的 STL 模型空间索引的建立

#### 1.2.1 STL 模型预处理

在实现了 STL 模型的拓扑重建的基础上, 为了在模型受到平移、缩放、旋转等几何攻击之后仍然能够提取到水印信息, 实现 STL 模型的几何不变性, 在嵌入水印信息前, 对模型进行 PCA 轴向预处理[23].

#### 1.2.2 基于金字塔技术的 STL 模型空间索引的建立

金字塔技术是一种针对高维空间范围查询而设计的高效索引结构, 采用特殊的空间划分技术, 利用转换函数将高维点向量转换为一维数值表示, 并利用 B+ 树建立索引[24−25]. 在实现了 STL 模型的拓扑重建和模型的坐标转换的基础上, 本文基于金字塔高维索引技术对 STL 模型数据空间进行划分并建立索引. 首先建立三维模型数据空间的最小包围盒, 对包围盒进行八叉树结构分割, 并以包围盒中数据点的数目控制分割的深度, 然后将每个叶节点包围盒划分成六个金字塔 (如图 1 (a)), 即以叶节点包围盒的中心为共享顶点, 以叶节点包围盒的二维表面为基底的金字塔, 进一步将每个金字塔划分成平行于金字塔基底的数据叶 (如图 1 (b)).

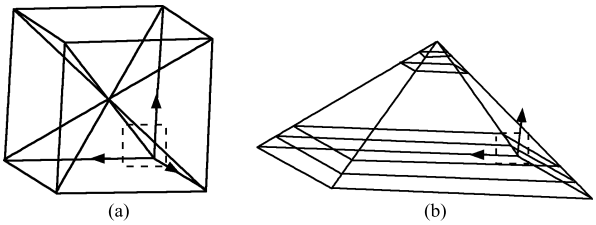



图 1 数据空间的金字塔划分

Fig. 1 Subdivision on data space with pyramid techniques

在对数据空间的叶节点包围盒划分金字塔的基础上, 构建三维数据点到一维金字塔值的一一映射, 将三维数据转换成一维索引值. 设模型数据空间中任一点 $v(v_0, v_1, v_2)$ 所在的金字塔编号为 $p_i$ $(i = 0, 1, 2, \cdots, 5)$, 则

$$\begin{cases} j, & v_j < 0.5 \\ j+3, & v_j \geq 0.5 \end{cases} \tag{1}$$

其中, $j = (h|0 \leq h, k < 3, h \neq k, |0.5 - v_h| \geq |0.5 - v_k|)$.

设金字塔 $p_i$ 中任一点 $v$ 的高度为 $h_v$, 则

$$h_v = |0.5 - v_{jMOD3}| \tag{2}$$

利用转换函数将模型数据空间中点 $v$ 的高度值转换为一维数值表示的金字塔值, 设金字塔值为 $p_v$, 则

$$p_v = i + h_v \tag{3}$$

将金字塔值 $p_v$ 作为索引值, 以索引值为关键字建立一维有序索引结构 (B+ 树), 索引结构 (B+ 树) 中的叶节点中既存储了一维索引值又存储了三维数据点原始坐标值, 索引结构 (B+ 树) 中的其他节点中只存储一维索引值.

本文采用八叉树编码规则顺序记录数据空间的结构, 并选取离叶节点包围盒中心最近的点作为初始值, 当原始初始点由于噪声等原因无法提取时, 所提取的最近点仍然是离叶节点包围盒中心最近的点, 与原始初始点的偏差不大, 将 K 近邻的计算限制在一个较小的范围, 进一步减小了偏差.

### 1.3 模值矩阵的建立和水印信息的嵌入

#### 1.3.1 基于 B+ 树 K 近邻查询的模值矩阵的建立

在基于金字塔高维索引技术对 STL 模型建立空间索引的基础上, 选取模型顶点到质心距离这一全局几何特征作为嵌入基元, 按照八叉树编码规则顺序选取离叶节点包围盒中心最近的点作为初始值, 求取所选取顶点的 K 近邻的所有顶点与质心的距离值作平均值统计, 根据嵌入水印信息的长度将平均值序列分成若干组, 每组数据将构建一个 $m \times n$ 维的模值矩阵 $M$, 进行水印的嵌入, 以减小由于修改数据点对周围数据的影响.

在高维向量空间中实施 K 近邻查询, 影响检索效率提高的一个重要因素是高维向量距离计算的代价相当大. 如何找到满足查询条件的最小范围是解决 K 近邻查询的关键. 在基于金字塔技术对 STL 模型建立空间索引的基础上, 在范围查询时, 本文充分利用金字塔空间中相近的点在 B+ 树中更有可能在同一个 B+ 树的数据叶上的特点, 通过查询顶点 $v$ 在 B+ 树的前 $\lceil K/2 \rceil$ 个顶点和后 $\lceil K/2 \rceil$ 个顶点, 计算这两个顶点的欧氏距离 $d$, 获得查询初始范围, 即查询初始范围为 $[v_0 - d/2, v_0 + d/2]$, $[v_1 - d/2, v_1 + d/2]$, $[v_2 - d/2, v_2 + d/2]$. 在模型数据空间中, 查询初始范围中的点数必定大于或者等于 $K$, 在这个范围内可以找到点 $v$ 的 K 近邻. 此查询操作减少了 I/O 操作的数量, 并大幅减少了需要排除的区域的范围, 有效提高了查询的效率.

#### 1.3.2 基于奇异值分解的水印信息的嵌入

本文以 100 个服从高斯分布 N $(0, 1)$ 的随机实数作为水印, 基于奇异值分解相关原理, 首先建立三维模型数据空间的最小包围盒, 对包围盒进行八叉树结构分割, 然后基于金字塔技术建立 STL 模型空间索引, 基于 B+ 树 K 近邻查询建立模值矩阵, 然后将水印信息嵌入到由模值矩阵 $M$ 生成的奇异值序列中, 得到含水印的顶点模值矩阵, 然后修改相应顶点的几何坐标数据, 最后将模型顶点坐标转换成三维笛卡尔直角坐标值, 得到含水印信息的三维 STL 模型. 将水印信息嵌入三维 STL 模型的具体步骤如下:

1) 根据第 1.1 节重建 STL 模型的拓扑结构.

2) 根据第 1.2.1 节对 STL 模型进行预处理.

3) 根据第 1.2.2 节建立 STL 模型数据空间的最小包围盒, 并对包围盒进行八叉树分割, 建立 STL 模型空间索引.

4) 根据第 1.3.1 节建立模型空间顶点的模值矩阵 $M$.

5) 对模型顶点的模值矩阵 $M$ 进行奇异值分解 (Singular value decomposition, SVD), 即 $M = USV^{\mathrm{T}}$, 得到两个正交矩阵 $U$、$V$ 及一个对角矩阵 $S$, 其中, 奇异值矩阵 $S = \mathrm{diag}\{\sigma_1, \sigma_2, \cdots, \sigma_n\}$ ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \cdots \geq \sigma_n$) 是非负对角阵.

6) 为了避免水印嵌入后, STL 模型的外观严重失真, 选取除最大奇异值 $\sigma_1$ 以外的 $N-1$ 个奇异值作为水印载体, $\sigma_1$ 可作为提取水印时检测 STL 模型有无遭受各向一致缩放的标志位. 将水印叠加到奇异值矩阵 $S$ 的左上角上, 产生新的矩阵 $S_w$, 即 $S_w = S + \alpha W$, 其中, 常数 $\alpha > 0$ 是水印强度因子, 调节水印的叠加强度, $\alpha$ 越大, 水印鲁棒性越好, 但是 STL 模型的失真越明显, 水印的透明性越差. 因此, 必须选择一个合适的 $\alpha$ 值, 本文 $\alpha$ 取经验值 0.05.

7) 对 $S_w$ 进行奇异值分解, 即 $S_w = U_w S'_w V_w^{\mathrm{T}}$, 得到两个正交矩阵 $U_w$ 和 $V_w$ 及新的对角矩阵 $S'_w$.

8) 计算得到含水印信息的新的模值矩阵 $M_w = US'_wV^{\mathrm{T}}$.

9) 根据新的模值矩阵 $M_w$ 修改相应节点内顶点的几何坐标数据.

10) 将模型顶点的球面坐标转换成三维笛卡尔直角坐标值, 并将模型调整回初始方向, 得到嵌入水印后的三维 STL 模型.

本文将水印信息稳健地嵌入到三维 STL 模型的各处, 水印信息不易被抹去, 进一步提高了水印的抗攻击能力.

## 2　水印提取

### 2.1　水印重定位与重采样

尽管少量顶点位置的改变对模型重心位置和主方向的影响不大, 但是大量顶点位置的改变将会对模型重心位置与主方向产生较大的影响, 再加上如模型简化、噪声、剪切等攻击的发生, 经过预处理后, 仍然有可能出现同步出错的情况, 从而导致水印信息提取失败. 为了在水印提取前, 实现原始模型与水印模型的同步以及模型的重采样, 本文基于总体最小二乘法的思想及其匹配点的筛选规则[26], 重定位的同时确定原始未嵌入水印的 STL 模型与待检测的水印模型之间的匹配点, 即重采样.

在实际操作过程中, 由于 STL 模型遭受了攻击 (如剪切攻击), 真正的对应点可能不存在, 通过匹配得到的可能不是真正的对应点, 所以设置了一个阈值, 当原始 STL 模型上的点和求得的对应点的误差超过这个阈值时, 可以认为该顶点没有对应的匹配点. 本文阈值定为 0.05.

### 2.2　水印提取算法

在重定位和重采样的基础上, 首先重建水印模型的拓扑结构, 在 PCA 主成分分析预处理的基础上, 基于金字塔技术建立 STL 模型的数据空间索引, 对模型数据空间进行划分和索引, 并建立 B+ 树, 选取模型顶点到质心距离这一全局几何特征作为嵌入基元, 求取所选取顶点的 K 近邻的所有顶点与质心的距离值作平均值统计, 然后根据嵌入水印信息的长度将平均值序列分成若干组, 每组数据将构建一个 $m \times n$ 维的模值矩阵 $M$. 水印提取时无需原始 STL 模型数据的参与, 只需要密钥, 原始模型生成的奇异值序列 $S$、水印嵌入强度 $\alpha$. 本文从含水印模型提取水印信息的具体步骤如下:

1) 根据第 1.1 节重建 STL 模型的拓扑结构.

2) 根据第 1.2.1 节对 STL 模型进行预处理, 根据第 2.1 节对 STL 模型进行水印重定位与重采样.

3) 根据第 1.2.2 节建立 STL 模型数据空间最小包围盒, 并对包围盒进行八叉树分割, 建立 STL 模型空间索引.

4) 根据第 1.3.1 节建立模型空间顶点的模值矩阵 $M'$.

5) 对水印模型的模值矩阵 $M'$ 进行奇异值分解, 得到一组呈单调递减排列的奇异值序列 $S'$, $S' = \mathrm{diag}\{\sigma'_1, \sigma'_2, \cdots, \sigma'_n\}$ ($\sigma'_1 \geq \sigma'_2 \geq \cdots \geq \sigma'_n$).

6) 比较两个奇异值序列中的最大奇异值, 计算模型各向一致缩放倍数 $\mu$: $\mu = \sigma'_1/\sigma_1$, 当 $|\mu - 1| > 0.01$ 时, 可认为待测模型经历了各向一致缩放, 按 $\mu$ 值对 $S'$ 中除 $\sigma_1$ 以外的奇异值进行校正.

7) 与原始奇异值序列 $S$ 进行比较, 按下式提取水印:

$$W'_i = \frac{1}{Q}\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma_1} - 1\right), \quad 2 \leq i \leq 100 \tag{4}$$

8) 在实际的应用中, 提取的水印值可能会与嵌入的水印值不完全相同, 所以, 在大多数情况下, 关注的是判定水印信息是否存在和能否有效提取, 这就需要给出一个判决标准, 即阈值. 本文采用提取误比特率和相关系数作为衡量标准, 当误比特率大于阈值或相关系数小于阈值时, 判定为待检测模型不含有水印或水印提取无效, 当误比特率小于阈值或相关系数大于阈值时, 判定含有水印和水印提取有效. 比较现有文献和对比实验数据库的数据, 本文误比特率的阈值定为 0.5, 相关系数的阈值定为 0.6.

## 3 仿真实验

### 3.1 查询时间对比实验

本文对顶点数据量从 3.2 万到 37 万的多个模型进行了查询时间实验, K 近邻查询结果集大小 $K$ = 10, 模值矩阵 $M$ 的大小为 64 × 64. 将本文算法与 CU-Tree[27], BM-Chord[28] 算法进行比较 (如图 2 所示), 可以看出, 随着数据量的增加, 本文的检索性能比 CU-Tree 和 BM-Chord 算法的查询时间平均减少了 58 %. 可以看出, 利用本文索引可以使需要搜索的范围缩小, 减少距离计算, 并且随着数据量的增加, 这种差距越来越明显.

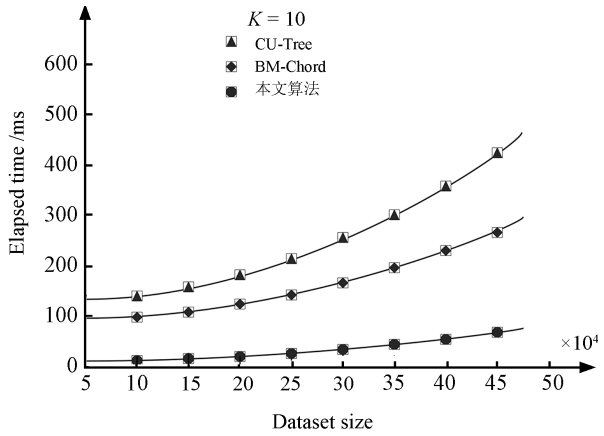
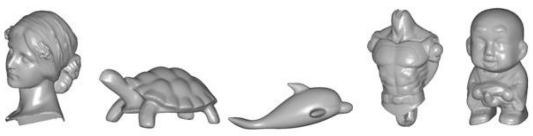



图 2 数据量对查询时间的影响

Fig. 2 Influence of data set size on elapsed time

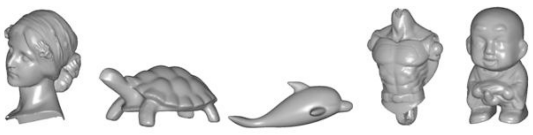
### 3.2 攻击实验

本文在人体头部等 STL 模型上进行了攻击实验, 原始 STL 模型图像如图 3 (a) 所示. 本文对加入水印后的人体头部、乌龟、海豚、人体半身、小孩的 STL 模型进行简化、加随机噪声、剪切、平移以及它们的联合操作等攻击, 以检验本文算法的鲁棒性.



(a) 原始模型

(a) Original models



(b) 含水印模型

(b) Watermarked models

图 3 原始模型和含水印模型

Fig. 3 Original and watermarked models

1) 局部失真对比实验. 本文采用峰值信噪比 (Peak signal to noise ratio, PSNR) 衡量嵌入水印后的三维模型图像的质量. 嵌入水印后的模型图像如图 3 (b) 所示, 比较图 3 (a) 和图 3 (b) 可以看出, 嵌入水印前后的三维模型图像不存在较大视觉差异, 且计算得到的含水印模型图像的 PSNR 值在 30 dB 与 50 dB 之间浮动, 表明增加水印嵌入容量后, 图像依然保持了较好的质量, 本文水印算法满足水印的不可见性条件. 本文将水印信息嵌入所选取顶点的 K 近邻的顶点中, 相当于对模型的顶点坐标在相当小的一个空间范围内作轻微扰动, 不会改变模型的外观, 实现了水印的不可见性.

2) 重定位对比实验. 在提取水印时, 分别进行了在重定位处理之后提取含水印模型中水印信息的实验和无重定位处理直接提取含水印模型中水印信息的实验. 部分实验结果如表 1 所示, 表 1 中 $e$ 表示将图 3 (a) 中模型与图 3 (b) 中模型进行重定位处理后, 两个模型顶点的平均误差. 可以看出, 重定位的平均误差在 0.03 mm 到 0.05 mm 之间浮动, 可以满足提取水印的精度要求, 而在不进行重定位处理直接提取水印的实验中, 得到的误比特率变化较大, 在遭受了几何攻击之后, 得到的误比特率上升较快, 表明算法抵抗几何攻击的鲁棒性较差, 重定位处理增强了算法抵抗几何攻击的能力.

3) 简化攻击实验. 采取文献 [29] 的简化算法对含水印模型进行简化攻击, 简化率即剩余的顶点数占原模型总顶点数百分比. 图 4 给出了遭受简化率分别为 95 %、90 %、80 %、65 % 攻击的人体头部模型和简化率分别为 95 %、80 %、65 %、50 % 攻击的乌龟模型. 部分实验结果如表 1 所示. 可以看出, 当简化率为 50 % 时, 本算法得到的误比特率仍小于 0.2, 相关系数大于 0.9, 即本算法仍能将水印正确提取出来, 与文献 [16] 相比, 随着简化率的提高本文算法具有更低的误比特率和更高的相关系数, 表明本算法对剪切攻击具有很好的鲁棒性.

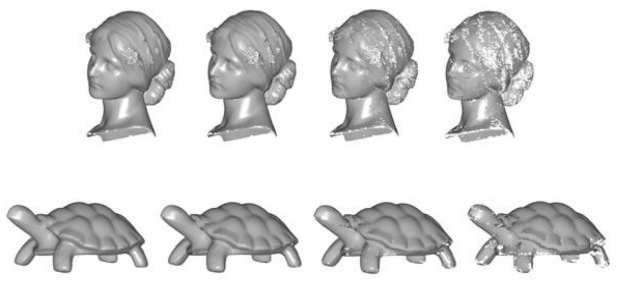


图 4 简化攻击实验

Fig. 4 Simplifying attack experiment

表 1　攻击实验的相关值

Table 1　Correlative value of attack experiment

| 攻击类型 | $e$ (mm) | 本文算法 | | 文献 [16] 算法 |
|---|---|---|---|---|
| | | 含重定位算法<br>误比特率与相关系数 | 不含重定位算法<br>误比特率与相关系数 | 误比特率与相关系数 |
| 简化攻击 (95 %) | 0.036 | 0, 0.99 | 0, 0.99 | 0, 0.99 |
| 简化攻击 (80 %) | 0.032 | 0.04, 0.97 | 0.04, 0.97 | 0.05, 0.97 |
| 简化攻击 (65 %) | 0.041 | 0.09, 0.93 | 0.09, 0.93 | 0.11, 0.92 |
| 简化攻击 (50 %) | 0.037 | 0.18, 0.90 | 0.18, 0.90 | 0.21, 0.87 |
| 噪声攻击 (0.4 %) | 0.034 | 0.03, 0.98 | 0.03, 0.98 | 0.03, 0.98 |
| 噪声攻击 (0.7 %) | 0.031 | 0.05, 0.94 | 0.05, 0.94 | 0.05, 0.93 |
| 噪声攻击 (1.0 %) | 0.042 | 0.08, 0.92 | 0.08, 0.92 | 0.10, 0.90 |
| 噪声攻击 (1.5 %) | 0.046 | 0.14, 0.87 | 0.14, 0.87 | 0.17, 0.83 |
| 剪切攻击 (10 %) | 0.032 | 0.01, 0.98 | 0.01, 0.98 | 0.01, 0.98 |
| 剪切攻击 (20 %) | 0.035 | 0.01, 0.97 | 0.01, 0.97 | 0.02, 0.96 |
| 剪切攻击 (35 %) | 0.033 | 0.02, 0.95 | 0.02, 0.95 | 0.04, 0.92 |
| 剪切攻击 (50 %) | 0.036 | 0.05, 0.91 | 0.05, 0.91 | 0.07, 0.87 |
| 联合攻击 (95 %, 0.4 %, 10 %) | 0.037 | 0.05, 0.98 | 0.05, 0.98 | 0.06, 0.98 |
| 联合攻击 (80 %, 0.7 %, 20 %) | 0.041 | 0.07, 0.93 | 0.07, 0.93 | 0.09, 0.92 |
| 联合攻击 (65 %, 1.0 %, 35 %) | 0.043 | 0.11, 0.90 | 0.11, 0.90 | 0.14, 0.88 |
| 联合攻击 (50 %, 1.5 %, 50 %) | 0.047 | 0.14, 0.84 | 0.14, 0.84 | 0.26, 0.80 |
| 平移攻击 (15, 35) | 0.031 | 0, 0.99 | 0.21, 0.87 | 0.01, 0.99 |
| 平移攻击 (45, 75) | 0.037 | 0.01, 0.99 | 0.26, 0.73 | 0.01, 0.98 |
| 平移攻击 (65, 35) | 0.035 | 0.02, 0.98 | 0.29, 0.69 | 0.03, 0.96 |
| 平移攻击 (75, 45) | 0.037 | 0.01, 0.97 | 0.24, 0.75 | 0.02, 0.95 |
| 缩放攻击 0.5 | 0.036 | 0.02, 0.98 | 0.31, 0.69 | 0.02, 0.98 |
| 缩放攻击 0.75 | 0.033 | 0.01, 0.98 | 0.23, 0.76 | 0.02, 0.97 |
| 缩放攻击 1.5 | 0.035 | 0.02, 0.96 | 0.32, 0.67 | 0.03, 0.94 |
| 缩放攻击 2.5 | 0.038 | 0.02, 0.97 | 0.31, 0.69 | 0.04, 0.95 |
| 旋转攻击 (35°) | 0.033 | 0.02, 0.98 | 0.26, 0.74 | 0.02, 0.98 |
| 旋转攻击 (75°) | 0.037 | 0.03, 0.95 | 0.37, 0.62 | 0.05, 0.92 |
| 旋转攻击 (115°) | 0.034 | 0.03, 0.95 | 0.32, 0.67 | 0.06, 0.92 |
| 旋转攻击 (160°) | 0.038 | 0.02, 0.93 | 0.38, 0.61 | 0.03, 0.89 |
| 联合攻击 (15, 35), 0.5, 35° | 0.033 | 0.04, 0.98 | 0.21, 0.78 | 0.04, 0.98 |
| 联合攻击 (45, 75), 0.75, 75° | 0.037 | 0.07, 0.94 | 0.37, 0.62 | 0.09, 0.92 |
| 联合攻击 (65, 35), 1.5, 115° | 0.037 | 0.09, 0.93 | 0.34, 0.65 | 0.13, 0.89 |
| 联合攻击 (75, 45), 2.5, 160° | 0.041 | 0.06, 0.92 | 0.42, 0.58 | 0.08, 0.86 |

4) 噪声攻击实验. 对水印模型的顶点坐标加入均匀的随机噪声, 噪声的幅度定义为噪声向量的长度与点云模型顶点到模型质心距离的比值, 它体现了噪声的强弱. 图 5 给出了遭受噪声幅度分别为 0.1 %、0.2 %、0.3 %、0.4 %、0.5 % 攻击的人体半身模型和噪声幅度分别为 0.1 %、0.2 %、0.3 %、0.4 % 攻击的乌龟模型. 部分实验结果如表 1 所示. 可以看出, 本文算法在噪声幅度为 1.5 % 时得到的误比

特率小于 0.2, 相关系数大于 0.8, 与文献 [16] 相比, 随着噪声幅度的提高本文算法具有更低的误比特率和更高的相关系数, 说明了算法具有较强的抗噪声攻击能力.

5) 剪切攻击实验. 裁剪率即为裁剪的顶点数占原模型总顶点数百分比. 本文选取模型顶点到质心距离这一全局几何特征作为嵌入基元, 基于奇异值分解方法, 将水印信息稳健地嵌入到三维点云模型的各处, 提高了水印的抗攻击能力. 图 6 给出了遭受剪切率分别为 10 %、20 %、35 %、55 % 攻击的人体头部模型和剪切率分别为 10 %、20 %、35 %、50 % 攻击的人体半身模型. 部分实验结果如表 1 所示. 可以看出, 当剪切率为 50 % 时, 本算法得到的误比特率仍小于 0.1, 相关系数大于 0.9, 与文献 [16] 相比, 随着剪切率的提高具有更低的误比特率和更高的相关系数, 说明该算法具有较强的抗剪切攻击能力.

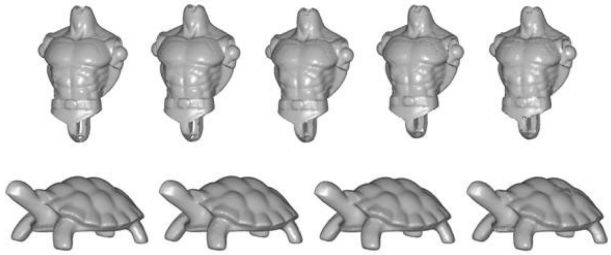


图 5 噪声攻击实验

Fig. 5 Noise attack experiment

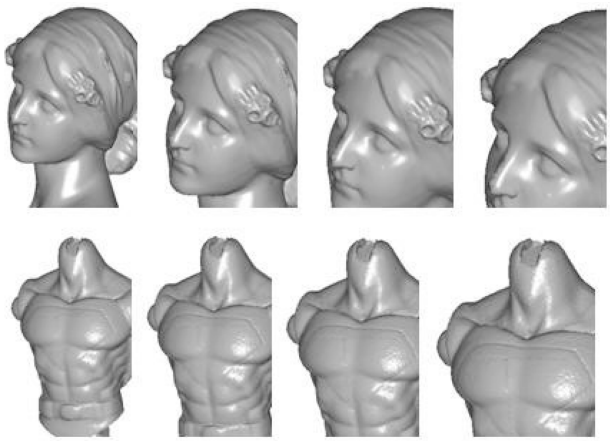


图 6 剪切攻击实验

Fig. 6 Cropping attack experiment

6) 联合攻击实验. 对三维 STL 模型进行简化攻击、剪切攻击和噪声攻击的联合攻击, 平移攻击、缩放攻击和旋转攻击的联合攻击, 对算法进行了 4 种情况的实验. 图 7 给出了遭受旋转角度为 72°、缩放比例为 0.4、简化率为 80 % 联合攻击的原始人体半身模型、旋转角度为 135°、缩放比例为 0.15、简化率为 80 % 联合攻击的小孩模型和旋转角度为 60°、缩放比例为 0.35、简化率为 80 % 联合攻击的人体头部模型. 部分实验结果如表 1 所示. 可以看出, 在经受联合攻击后, 当简化率达到 50 %, 噪声幅度为 1.5 %, 剪切率为 50 % 时的误比特率依然小于所设阈值, 相关系数大于所设阈值, 当平移 (75, 45), 缩放比例为 2.5, 旋转角度为 160° 时的误比特率依然小于所设阈值, 相关系数大于所设阈值, 与文献 [16] 相比本文算法具有更低的误比特率和更高的相关系数, 表明该算法对联合攻击具有相当程度的鲁棒性.

图 7 联合攻击实验

Fig. 7 Joint attack experiment

实验结果表明: 该算法不可见性较好, 算法实现速度快, 在盲检测下能够抵抗旋转、平移、均匀缩放、顶点重排序、简化、噪声、剪切等攻击, 具有较好的鲁棒性.

## 4 小结

为了确保 STL 模型数据在网络传输过程中的安全、完整性, 根据 STL 模型自身的特点, 对模型进行了拓扑重建, 在 PCA 主成分分析预处理的基础上, 提出了基于金字塔技术建立 STL 模型数据空间索引算法, 对原始 STL 模型数据空间进行了分割和索引, 对原始 STL 模型数据空间进行了分割和索引, 并建立 B+ 树, 实现了模型离散点的快速查询和搜索. 基于奇异值分解原理, 提出了基于 B+ 树 K 近邻查询的 STL 模型数字水印嵌入与提取算法, 选取模型顶点到质心距离这一全局几何特征作为嵌入基元, 求取所选取顶点的 K 近邻的所有顶点与质心的距离值作平均值统计, 减小了由于修改数据点对周围数据的影响, 实现了在满足水印不可见性和鲁棒性要求的同时提高算法的速度. 实验证明: 本文算法不可见性较好, 算法实现速度快, 在盲检测下能够抵抗旋转、平移、均匀缩放、顶点重排序、简化、噪声、剪切等攻击, 具有较好的鲁棒性. 本文算法思想为实现 STL 模型在网络制造环境下协同设计和传输过程中的安全性保护、完整性检测、版权认证等提供了新的方法.

## References


1 Zhao Chun-Hui, Liu Wei. Block compressive sensing based image semi-fragile zero-watermarking algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(4): 609−617
(赵春晖, 刘巍. 基于分块压缩感知的图像半脆弱零水印算法. 自动化学报, 2012, **38**(4): 609−617)

2 Zhang Wei-Wei, Zhang Ru, Liu Jian-Yi, Niu Xin-Xin, Yang Yi-Xian. Robust video watermarking algorithm for H.264/AVC based on texture feature. *Journal on Communications*, 2012, **33**(3): 82−89
(张维纬, 张茹, 刘建毅, 钮心忻, 杨义先. 基于纹理特征的 H.264/AVC 顽健视频水印算法. 通信学报, 2012, **33**(3): 82−89)

3 Wang Jun-Xiang, Ni Jiang-Qun, Pan Jin-Wei. A high performance reversible watermarking scheme baselineskip based on histogram shifting. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(1): 88−96
(王俊祥, 倪江群, 潘金伟. 一种基于直方图平移的高性能可逆水印算法. 自动化学报, 2012, **38**(1): 88−96)

4 Li Xu-Dong. JPEG-compression-attack resistant image quantization watermarking algorithm in DWT domain. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, **23**(2): 342−348
(李旭东. 抗 JPEG 压缩攻击的 DWT 域图像量化水印算法. 光电子. 激光, 2012, **23**(2): 342−348)

5 Zhu Bing-Lian, Liang Hui, Yang Ji-Xiang. A text document digital watermarking algorithm based on fuzzy clustering theory. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, **23**(2): 349−353
(朱冰莲, 梁辉, 杨吉祥. 一种基于模糊聚类理论的文本水印算法. 光电子. 激光, 2012, **23**(2): 349−353)

6 Chen Fan, He Hong-Jie, Wang Hong-Xia. Variable-payload self-recovery watermarking scheme for digital image authentication. *Chinese Journal of Computers*, 2012, **35**(1): 154−162
(陈帆, 和红杰, 王宏霞. 用于图像认证的变容量恢复水印算法. 计算机学报, 2012, **35**(1): 154−162)

7 Cui Xin-Chun, He Jie, Qin Xiao-Lin. A multiple audio watermarking for database based on blind source separation. *Acta Electronica Sinica*, 2012, **40**(1): 78−83
(崔新春, 贺洁, 秦小麟. 基于盲源分离的多重音频数据库水印算法. 电子学报, 2012, **40**(1): 78−83)

8 Jiang Chuan-Xian, Chen Xiao-Wei, Li Zhi. Robust text watermarking based on significant components. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **36**(9): 1250−1256
(姜传贤, 陈孝威, 李智. 基于文本重要内容的鲁棒水印算法. 自动化学报, 2010, **36**(9): 1250−1256)

9 Deng Cheng, Li Jie, Gao Xin-Bo. Geometric attacks resistant image watermarking in affine covariant regions. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(2): 221−228
(邓成, 李洁, 高新波. 基于仿射协变区域的抗几何攻击图像水印算法. 自动化学报, 2010, **36**(2): 221−228)

10 Bors A G. Watermarking mesh-based representations of 3-D objects using local moments. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(3): 687−701

11 Hu Min, Xie Ying, Xu Liang-Feng, Xue Feng. A geometry property based adaptive watermarking scheme for 3D models. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2008, **20**(3): 390−394, 402
(胡敏, 谢颖, 许良凤, 薛锋. 基于几何特征的自适应三维模型数字水印算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, **20**(3): 390−394, 402)

12 Liao Xue-Liang, Wang Yu-Ping. A new spatial domain method for watermarking in 3D models. *Chinese Journal of Computers*, 2008, **31**(10): 1848−1856
(廖学良, 王瑀屏. 一种新的三维模型水印嵌入空域算法. 计算机学报, 2008, **31**(10): 1848−1856)

13 Wang Xin-Yu, Zhan Yong-Zhao. Blind watermarking scheme for 3D mesh models based on length of vector. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2008, **29**(3): 248−251
(王新宇, 詹永照. 基于矢量长度的三维网格模型公有水印算法. 江苏大学学报 (自然科学版), 2008, **29**(3): 248−251)

14 Quan L, Liu Y. Watermarking of 3D polygonal meshes based on feature points. In: Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Application. Harbin, China: IEEE, 2007. 1837−1841

15 Jin J Q, Wang X. A novel 3D mesh blind watermarking algorithm based on nielson affine invariant norm. In: Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer-aided Design and Computer Graphics. Beijing, China: IEEE, 2007. 294−297

16 Cho J W, Prost R, Jung H Y. An oblivious watermarking for 3-D polygonal meshes using distribution of vertex norms. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, **55**(1): 142−155

17 Lee S H, Kwon K R. Mesh watermarking based projection onto two convex sets. *Multimedia Systems*, 2008, **13**(5−6): 323−330

18 Corsini M, Gelasca E D, Ebrahimi T, Barni B. Watermarked 3-D mesh quality assessment. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2007, **9**(2): 247−256

19 Cheng Y M, Wang C M. An adaptive steganographic algorithm for 3D polygonal meshes. *Visual Computer*, 2007, **23**(9): 721−732

20 Liu Y, Prabhakaran B, Guo X H. A robust spectral approach for blind watermarking of manifold surfaces. In: Proceedings of the 10th ACM Workshop on Multimedia and Security. New York, USA: ACM, 2008. 43−52

21 Wang K, Luo M, Bors A G, Denis F. Blind and robust mesh watermarking using manifold harmonics. In: Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Image. Piscataway: IEEE, 2009. 3657−3660

22 Ji Feng, Li Zhan-Li. A novel method for the topological reconstruction based on STL files. *Journal of Hunan University of Science and Engineering*, 2006, **27**(5): 154−157
(纪峰, 李占利. 基于 STL 文件的拓扑重构新方法. 湖南科技学院学报, 2006, **27**(5): 154−157)

23 Kalivas A, Tefas A, Pitas I. Watermarking of 3D models using principal component analysis. In: Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal (ICASSP′03). New York: IEEE, 2003. 676−679

24 Berchtold S, Bohm C, Kriegel H P. The pyramid-technique: towards breaking the curse of dimensionality. In: Proceedings of the 1998 International Conference on Management of Data. New York: ACM Press, 1998. 142−153

25 Zhang R, Ooi B C, Tan B C. Making the pyramid technique robust to query types and workloads. In: Proceedings of the 20th International Conference on Data Engineering. New York: IEEE, 2004. 313−324

26 Liu J X, Cui H G, Dai X. Three dimensional point clouds watermarking algorithm based on sphere degenerated octree. *Advanced Materials Research*, 2011, **314−316**: 2064−2070

27 Zhuang Yi, Hu Hai-Yang, Hu Hua. Centroid-slice-based uncertain high-dimensional indexing structure. *Acta Electronica Sinica*, 2011, **39**(5): 1136−1142
(庄毅, 胡海洋, 胡华. 基于质心片的不确定高维索引研究. 电子学报, 2011, **39**(5): 1136−1142)

28 Meng Xian-Fu, Meng Hong-Xi, Zhang Zhen-Qiang. Bit-code and distance-based range query for high-dimensional data in Chord network. *Journal of Dalian University of Technology*, 2011, **51**(3): 433−439
(孟宪福, 孟泓汐, 张振强. 基于区位码和距离的 Chord 网络高维数据范围检索. 大连理工大学学报, 2011, **51**(3): 433−439)

29 Melax S. A simple fast and effective polygon reduction algorithm. *Game Developer*, 1998, **5**(11): 44−49

**崔汉国** 海军工程大学动力工程学院教授. 主要研究方向为计算机图形学, 虚拟现实, 科学计算可视化. 本文通信作者.
E-mail: cuihanguo@163.com
(**CUI Han-Guo** Professor at the College of Power Engineering, Naval University of Engineering. His research interest covers computer graphics, virtual reality, and visualization in scientific computing. Corresponding author of this paper.)

**刘健鑫** 海军蚌埠士官学校讲师. 2012 年获海军工程大学博士学位. 主要研究方向为科学计算可视化, 三维模型数字水印技术.
E-mail: ljx0601406@163.com
(**LIU Jian-Xin** Lecturer in the Department of Electromechanical Engineering, Bengbu Naval Petty Officer Academy. He received his Ph. D. from Naval University of Engineering in 2012. His research interest covers visualization in scientific computing and 3D model digital watermarking.)

**李正民** 海军工程大学动力工程学院博士研究生. 2012 年获海军工程大学硕士学位. 主要研究方向为科学计算可视化.
E-mail: lizhengm100@163.com
(**LI Zheng-Min** Ph. D. candidate at the College of Power Engineering, Naval University of Engineering. He received his master degree from Naval University of Engineering in 2012. His main research interest is visualization in scientific computing.)