

文章编号: 1671-6833(2006)04-0101-05

基于最小均方差下的 3D 模型数字水印算法

谭秀湖, 刘国枝, 孙旭

(哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 使得三维模型变换带来的误差能量, 最小影射到嵌入水印上. 为使嵌入的水印对于三维模型的拓扑变换和几何变换都具有鲁棒性, 提出一种基于最小均方差的 3D 几何模型算法, 算法首先通过对三维网格顶点排序和挑选, 排序和挑选的原则是使得被挑选的顶点具有最小的边距和, 即通过对 3D 模型网格顶点优化选择, 使得选择后的顶点受到拓扑攻击影响最小; 然后, 计算选择后顶点扰动均方误差能量, 将水印嵌入到受误差能量影响最小的空间, 使得嵌入的水印受到几何攻击影响最小. 实验结果表明, 算法对几何攻击和拓扑攻击具有好的抵御能力.

关键词: 3D 网格水印; 均方误差最小; 鲁棒性; 安全性

中图分类号: TP 391 **文献标识码:** A

0 引言

数字水印能够有效的对数字产品提供版权保护, 是信息隐藏技术领域的一个重要分支, 现在被广泛的应用到音像制品、数字图像、视频等领域^[1~3]. 然而, 由于 3D 模型自身的特性, 如表示不唯一, 数据没有固定的顺序, 用户可以进行几何和拓扑攻击等, 导致已成功应用到其它领域的算法很难以移植到三维模型上. 对于 3D 模型, O-hbuchi 提出了首先提出了 TSQ 和 TVR 算法^[4]. Benedens 提出了修改表面法^[5]. Praun 提出了嵌入水印三角型网格顶点的鲁棒算法^[6].

对三维几何模型嵌入水印, 应同时考虑到三维模型的拓扑关系和几何关系. 拓扑关系是三维模型的点、线、面之间的关系, 而几何关系是考虑三维模型的坐标位置. 通常, 攻击者对一个三维几何模型水印算法发动攻击, 分为拓扑攻击(诸如简化、重新网格化、剪切攻击等)和几何攻击(诸如旋转、尺度变化等), 以及压缩(网格优化)和加噪攻击等. 基于拓扑关系嵌入水印的算法, 对几何攻击的鲁棒性不好; 而基于几何关系的嵌入算法, 对拓扑攻击一般不具有鲁棒性.

正是基于以上的分析, 作者提出一种基于最优均方误差意义下非对称的 3D 几何模型算法, 算法的提出同时考虑到三维几何模型的拓扑关系

和几何关系, 使得嵌入的水印, 不仅受三维模型的拓扑攻击的影响最小, 同时受来自几何攻击所带来的误差能量影响最小, 因而使得算法具有好的鲁棒性.

1 水印嵌入位置的选择

对于三维模型, 不同于模型的其它属性(如颜色, 质地等容易发生改变), 顶点是最适合嵌入水印^[7], 作者同样也选择将水印嵌入到顶点. 然而, 并不是所有的顶点适合嵌入水印, 需要对顶点进行排序和挑选, 使得选择后的顶点具有最小边(受拓扑攻击影响最小), 通过以下方法对顶点进行挑选和排序.

设三维几何模型 O , 顶点 $v_j \in O$, v_i 对应的坐标为 $v_i = (v_{ix}, v_{iy}, v_{iz})$. 首先通过下式, 计算 O 中与 v_i 之间有线段连接的顶点数目

$$N(v_i) = \{v_j \mid |v_j v_i| > 0, j = 1, 2, \dots, N_i\} \quad (1)$$
式中: $|v_j v_i|$ 表示顶点 v_j 和 v_i 之间线段连接(没有线段连接, 则 $|v_j v_i| = 0$); $N(v_i)$ 表示与 v_i 间由线段连接关系的顶点数目(不包括 v_i 点本身). 设 $D(v_i)$ 表示与 v_i 相连接线段的 Euclidean 距离, 即

$$D(v_i) = \sum_{v_j \in N(v_i)} \|v_i - v_j\|^2 \quad (2)$$

则第一个被选择和排序后的顶点 $v_{(1)}$ 由下式确定

$$v_{(1)} = \min_{v_i \in O} D(v_i) \quad (3)$$

收稿日期: 2006-07-11; 修订日期: 2006-09-22

作者简介: 谭秀湖(1971-), 男, 山东淄博人, 哈尔滨工程大学博士研究生, 主要从事信息安全和数字水印方面研究.

然后去除顶点 $v_{(1)}$ 及以顶点 $v_{(1)}$ 在之间有线段连接的顶点,再按照下式对顶点继续排序

$$\|v_{(k-1)} - v_{(1)}\|^2 \leq \|v_{(k)} - v_{(1)}\|^2 \quad (4)$$

每次排序后,都要将被挑选的顶点和与它有线段连接的顶点去除(并不是删除,只是在挑选下一个点时被排除,保证挑选后得顶点之间没有线段连接关系).如果当两个顶点的 Euclidean 距离相同时,再通过计算顶点连接三角形面积和的大小,即计算下式

$$A(v_i) = \frac{1}{2} \sum_{v_j \in N(v_i)} \|v_i - v_j\| \times \|v_i - v_{(j+1)}\| \sin(\angle v_j, v_{(j+1)}) \quad (5)$$

式中: $A(v_i)$ 为面积和,面积小的对应的顶点排在前面位置.

2 顶点扰动均方误差的计算

2.1 误差能量的求取

记挑选排序后的顶点序列为 $v_{(p)} = (v_{(1)}, v_{(2)}, \dots, v_{(n)})^T$, 其中 $\{v_{(i)} = v_{(i)x}, v_{(i)y}, v_{(i)z}\}^T, 1 \leq i \leq n\}$, 其中 v_{ix}, v_{iy}, v_{iz} 表示 $v_{(i)}$ 点的坐标. 为了使得攻击者对三维模型的攻击所带来的误差能量最小的映射到嵌入的水印上,我们首先模仿攻击者,对嵌入水印的三维模型 O 进行各种攻击操作.即首先将数字水印 $w, w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, 其中: $w_i = (w_{ix}, w_{iy}, w_{iz}), 1 \leq i \leq n$, 嵌入到顶点

$$v_{(p)}^M = v_{(p)} + w \quad (6)$$

对嵌入水印后的三维几何模型 O^M (选择排序后的顶点 $V_{(p)}^M = (v_{(1)}^M, v_{(2)}^M, \dots, v_{(n)}^M)$ 进行各种攻击操作,如旋转,简化操作,得到一组发生改变的三维几何模型,任取其中一个,记为 O^g, O^g 同样相应选择和排序后的顶点序列为 $V_{(p)}^g = (v_{(1)}^g, v_{(2)}^g, \dots, v_{(n)}^g)^T$. 误差能量为

$$\|e\|^2 = \sum_{i=1}^n \left[(v_{(i)x}^g - v_{(i)x}^M)^2 + (v_{(i)y}^g - v_{(i)y}^M)^2 + (v_{(i)z}^g - v_{(i)z}^M)^2 \right] \quad (7)$$

上式只考虑了随机误差中的一个个别事件,从更加普遍的意义,应计算下式

$$E(\|e\|^2) = E \left[\sum_{i=1}^n \left[(v_{(i)x}^g - v_{(i)x}^M)^2 + (v_{(i)y}^g - v_{(i)y}^M)^2 + (v_{(i)z}^g - v_{(i)z}^M)^2 \right] \right] \quad (8)$$

上式中的 $E(\cdot)$ 为求数学期望运算. 由线性代数可知,式(8)右侧等价于计算下式

$$\sum_{i=1}^n \left[(v_{(i)x}^g - v_{(i)x}^M)^2 + (v_{(i)y}^g - v_{(i)y}^M)^2 + (v_{(i)z}^g - v_{(i)z}^M)^2 \right] =$$

$$\text{trace}((V_{(p)}^G - V_{(p)}^M)^T (V_{(p)}^G - V_{(p)}^M)) \quad (9)$$

上式中的 $\text{trace}(\cdot)$ 为矩阵求迹运算,再由线性代数[文献 10, P55]可知

$$\text{trace}((V_{(p)}^G - V_{(p)}^M)^T (V_{(p)}^G - V_{(p)}^M)) = \text{trace}((V_{(p)}^G - V_{(p)}^M)(V_{(p)}^G - V_{(p)}^M)^T) \quad (10)$$

因而可得到下式

$$E(\|e\|^2) = \text{trace} \left[E((V_{(p)}^G - V_{(p)}^M)(V_{(p)}^G - V_{(p)}^M)^T) \right] \quad (11)$$

2.2 水印嵌入空间的求取

式(11)计算得到的值为平均误差能量,而我们更关心如何使误差能量影射到嵌入水印上的能量为最小.为此求解下面方程

$$x^T E((V_{(p)}^G - V_{(p)}^M)(V_{(p)}^G - V_{(p)}^M)^T) x = 0 \quad (12)$$

对 $E((V_{(p)}^G - V_{(p)}^M)(V_{(p)}^G - V_{(p)}^M)^T)$ 进行奇异值分解(SVD),得到

$$E((V_{(p)}^G - V_{(p)}^M)(V_{(p)}^G - V_{(p)}^M)^T) = U \sum U^T \quad (13)$$

其中,矩阵 $U = (u_1, u_2, \dots, u_n), U \in R^{n \times n}$ 为正交矩阵,(由于 $E((V^G - V^M)(V^G - V^M)^T)$ 为对称矩阵,所以SVD分解得到两个正交矩阵相同),奇异值矩阵 \sum 为对角矩阵, $\sum = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma, \dots, \sigma_n^2)$, 并且满足 $\sigma_i^2 \geq \sigma_{i+1}^2 \geq 0, 1 \leq i \leq n$. 将式(13)代入到式(12)中,得到

$$x^T U \sum U^T x = 0 \quad (14)$$

由正交矩阵的性质,如果根据如下原则选取 $x \in G$,

$$\begin{cases} u_i \in G & (\sigma_i^2 = 0) \\ u_i \in H & (\sigma_i^2 \neq 0) \end{cases} \quad (15)$$

则误差能量影射到 G 空间的能量为零.因而如果选取 w 满足下面关系

$$w = Gw_0 \quad (16)$$

则误差能量影射到 w_0 能量为零,使得因三维模型操作带来的均方误差能量投影到 G 空间的值为最小,因而保证水印提取质量.在实际使用中,由于 \sum 中奇异值为零的个数长度不能够满足嵌入水印信息的长度(从水印安全的角度,水印的长度必须足够大),可以选取较小奇异值对应的特征向量来构成特征空间,按照下式划分

$$\begin{cases} \sigma_i^2 > \sigma^2 & (\text{则与 } \sigma_i^2 \text{ 相对应的特征向量 } u_i \in H) \\ \sigma_i^2 \leq \sigma^2 & (\text{则与 } \sigma_i^2 \text{ 相对应的特征向量 } u_i \in G) \end{cases} \quad (17)$$

其中 σ^2 为设定的门限,这里假定 $G \in R^{n \times (n-L)}$,

$H \in \mathbb{R}^{n \times L}$.

3 水印的嵌入和提取方法

3.1 水印的嵌入

原始三维几何模型 O , 经过挑选和排序后顶点序列为 $V_{(p)} = (v_{(1)}, v_{(2)}, \dots, v_{(n)})^T$. 将一二进制序列 m , 进行扩频, 得到扩频后的行向量 $w_2 \in \mathbb{R}^{1 \times (n-L)}$ 后, 按照下式嵌入水印 $w_1 \in \mathbb{R}^{(n-L) \times 3}$,

$$w_1 = (w_1^T, w_2^T, w_3^T)_{L \times 3} \tag{18}$$

将 w_1 嵌入到三维几何模型的顶点

$$V_{(p)}^M = V_{(p)} + G \times w_1 \tag{19}$$

为获得高信噪比(SNR), 应调节正数 k_1 , 使水印嵌入强度 $k_1 \|Gw_1\| (\|\cdot\|_F \text{ 为矩阵 Frobenius 范数})$ 尽可能大, 但不应使 $k_1 \|Gw_1\|$ 对三维模型视觉效果有明显影响. 然后由 $V_{(p)}^M$ 得到含水印三维模型 O^M .

3.2 水印的提取

对一个三维模型进行检测, 必须先将其重新定位到原先定义的坐标轴上, 然后, 重新抽样(具体方法见第 4 节). 设得到三维几何模型 O^{M1} , 对其顶点挑选排序后的顶点序列为 $v_{(p)}^{M1}$ 后, 通过下式进行水印提取

$$G^T(V_{(p)}^M - V) = w_1^* \tag{20}$$

为了增加提取水印信号的鲁棒性, 再进行平滑处理. 设列向量 $d = \frac{1}{3}(1, 1, 1)^T$, 即提取的水印 w_2^* 为

$$w_2^* = (w_1^* \times d)^T \tag{21}$$

当作水印检测时, 将 w_2^* 与 w_2 作相关判决, 或经过解扩, 即可得到嵌入的秘密信息 m .

3.3 检测概率和虚警概率

检测函数使用相关判决函数, 将 $V_{(p)}^{M*} - E \cdot V_{(p)}^M$ 通过 G^T 投影, 得到

$$\begin{aligned} G^T(V_{(p)}^{M*} - EV_{(p)}^M)d &= (c \times w_1^* + n_1)d \\ &= c \times w_2^T + n_2 \end{aligned} \tag{22}$$

上式中, c 为 $V_{(p)}^{M*} - EV_{(p)}^M$ 通过 G^T 投影的常数; $n_2 \in \mathbb{R}^{(n-L) \times 1}$ 为投影误差. 设检测判决函数满足下式,

$$\begin{cases} \|n_2\| \ll \|w_2^T\| & \text{(如果 } V_{(p)}^{M*} - EV_{(p)}^M, \\ & \text{通过 } G^T \text{ 投影后含有 } w_2^T) \\ |c| \rightarrow 0 & \text{(如果 } V_{(p)}^{M*} - EV_{(p)}^M, \\ & \text{通过 } G^T \text{ 投影后含有 } w_2^T) \end{cases} \tag{23}$$

使用相关测试函数

$$\begin{aligned} &\text{sim}(w_2^T, G^T(V_{(p)}^{M*} - V_{(p)})(d)) \\ &= \text{sim}\left\{w_2^T, G^T\left[\begin{matrix} V_{(p)}^{M*} - EV_{(p)}^M \\ (EV_{(p)}^M - V_{(p)}) \\ V_{(p)}^{M*} - EV_{(p)}^M \\ (EV_{(p)}^M - V_{(p)}) \end{matrix}\right]d\right\} \\ &= \frac{w_2^T G^T \left[\begin{matrix} V_{(p)}^{M*} - EV_{(p)}^M \\ (EV_{(p)}^M - V_{(p)}) \\ V_{(p)}^{M*} - EV_{(p)}^M \\ (EV_{(p)}^M - V_{(p)}) \end{matrix}\right]d}{\|w_2\| \left\|G^T \times \left[\begin{matrix} V_{(p)}^{M*} - EV_{(p)}^M \\ (EV_{(p)}^M - V_{(p)}) \end{matrix}\right]d\right\|} \end{aligned} \tag{24}$$

检测概率: 如 $V_{(p)}^{M*} - E(V_{(p)}^M)$ 通过 G^T 投影后含有 w_2^T , 由式(23), 得

$$\begin{aligned} &\text{sim}(w_2^T, G^T \times (V_{(p)}^{M*} - EV_{(p)}^M)) \\ &= \text{sim}(w_2^T, ((1+c)w_2 + n_2)) \\ &\approx \frac{|1+c| \|w_2 w_2^T\|}{|1+c| \|w_2\| \|w_2^T\|} = 1 \end{aligned} \tag{25}$$

虚警概率: 如 $V_{(p)}^{M*} - E(V_{(p)}^M)$ 通过 G^T 投影后不含有 w_2^T , 由式(23), 得

$$\begin{aligned} &\text{sim}(w_2^T, G^T \times (V_{(p)}^{M*} - EV_{(p)}^M)) \\ &= \text{sim}(w_2^T, ((1+c)w_2 + n_2)) \\ &\approx \frac{|c| \|w_2^T w_2\|}{|c| \|w_2^T\| + \|w_2\| \|n_2\|} = 0 \end{aligned} \tag{26}$$

4 三维模型的重新定位和重新抽样

对于三维模型的重新定位问题, 已经在几种算法中给出, 采用的是文献[9]中的定位算法, 但增加了一个自由度, 即一致缩放外, 在对三维模型重新定位后, 使用了文献[10]中网格重新抽样方法, 再对三维几何模型的顶点, 进行顶点挑选和排序.

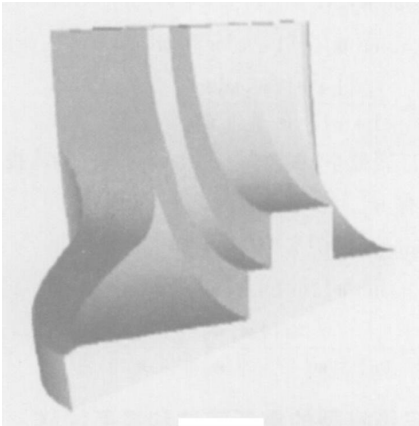
5 仿真实验

实验中选取的三维几何模型如图 1(a), 该模型具有 6 475 个顶点和 12 946 个面. 在实验中, 三维模型的数据格式都为 3D-Studio(3ds). 按照之前的分析, 我们对顶点进行排序和挑选. 挑选和排序后, 共选定 1 024 个顶点. 将 16 位的 m (输入信息, 由 0, 1 构成) 经过扩展频谱, 得到 128 位的水印 w_2 , 再将行向量 w_2 按照如下方式展开为 1 024 维行向量

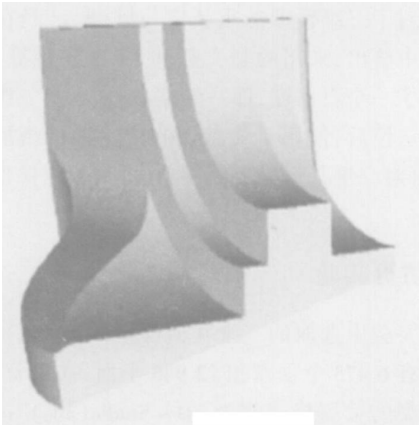
$$w_2^Q = (w_2, w_2, w_2, w_2, w_2, w_2, w_2, w_2)_{1 \times 1024} \tag{27}$$

将 w_2^Q 再经过式(18)的变换嵌入到排序和挑选后的 1 024 个顶点中. 然后, 对含水印的三维模型进行几何变换和拓扑变换等, 诸如旋转($\pm 1^\circ, \pm 2^\circ$), 三维旋转、剪切、加噪等, 共获得 216 个变换

后的三维模型. 对这 216 个三维模型进行顶点挑选和排序, 并且计算这 216 个挑选和排序后顶点序列的数学期望. 再从这 216 个三维模型的挑选和排序后顶点序列中任取一个, 与求得的数学期望作差值后, 计算差值的协方差, 得到 $(1\ 024 \times 1\ 024)$ 维的协方差矩阵. 对协方差矩阵进行 SVD 分解, 得到的酉矩阵为 1 024 维. 在酉矩阵 1024 维空间中, 选取对应特征值小的 128 维特征向量为水印嵌入空间(水印嵌入空间不能太小, 否则密钥容易被破译和攻击), 将嵌入到鲁棒性空间, 形成了含水印三维模型如图 1(b)所示.



(a)原始三维几何模型(6 475 个顶点,12 946 个面)

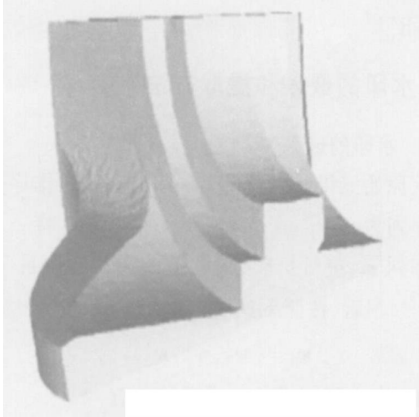


(b)嵌入水印后的三维几何模型(6 475 个顶点,12 946 个面)

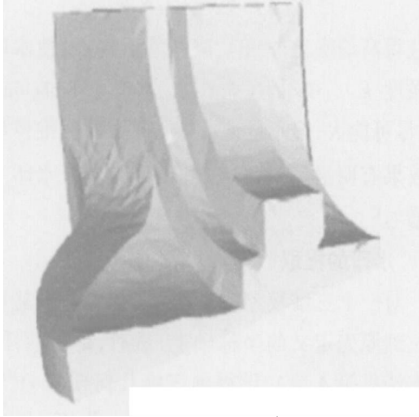
图 1 实验中使用的模型

Fig.1 Related model in test

同时, 又对算法进行了简化攻击测试, 攻击后的三维模型如图 2 所示. 对含和不含水印的三维模型进行各种攻击操作后, 作相关检测, 得到了检测概率和虚警概率如图 3 所示. 从图 3 可以看到算法有较高的检测概率和低的虚警概率. 我们对含水印的三维模型进行了几何攻击和拓扑攻击测试, 得到的实验结果见表 1. 实验结果已证明了我们的理论分析. 由于篇幅的关系, 这里仅列出实验的几个主要指标图表.



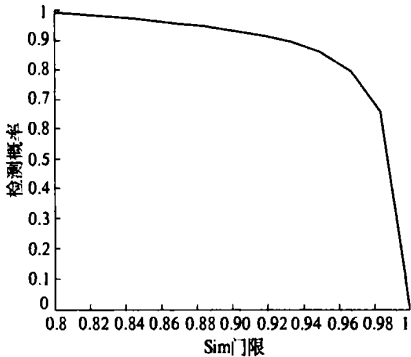
(a)简化攻击 (1/2)



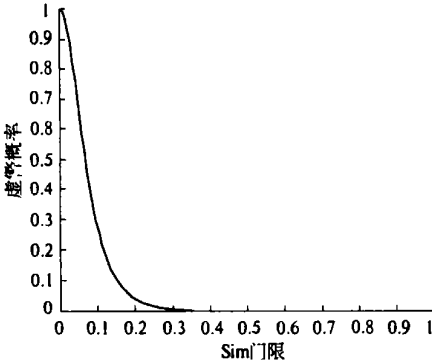
(b)简化攻击 (1/4)

图 2 简化攻击后的三维几何模型

Fig.2 Simplify attacked models



(a) 检测概率



(b)虚警概率

图 3 检测概率和虚警概率

Fig.3 Detection probability and false probability

表 1 几何攻击和拓扑攻击测试

Tab.1 Geometric attack and topologic attack

攻击类型	Sim 均值	Sim 方差
加噪(噪声密度 0.04)	0.968 8	0.023 6
加噪(噪声密度 0.02)	0.981 0	0.009 9
加噪(噪声密度 0.01)	0.995 5	0.001 0
旋转(20)	0.991 0	0.007 6
三维旋转(20))	0.972 5	0.017 6
平滑	0.998 9	0.001 3
简化攻击(1/2)	0.988 6	0.015 4
简化攻击(1/4)	0.971 0	0.016 9
切割(切割下 1/16)	0.982 5	0.008 7
位移(2%)	0.995 6	0.006 6
重新网格化	0.979 9	0.017 1

6 结论

我们提出了一种基于最小均方误差意义下的 3D 模型数字水印算法,该算法通过分析三维模型拓扑变换和几何变换对嵌入水印带来的误差影响,利用了均方误差最小准则和特征空间分解原理,对水印嵌入顶点位置和嵌入矩阵进行求取。该算法适合于具有各种形状的表面三维模型的水印嵌入问题。

参考文献:

[1] SU K, KUNDUR D, HATZINAKOS D. Statistical invisibility for collusion-resistant digital video watermarking

[J].IEEE Trans Multimedia, 2005, 7(1):43~51.
[2] WEI L, XUE X Y, PEI Z L. Localized robust audio watermarking robust against time scale modification[J].IEEE Trans Multimedia, 2006, 8 (1):60~69.
[3] 丘保志,张西芝. 基于网格的参数自动化聚类算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006, 27(2): 91~93.
[4] OHBUCHI R, MASUDA H, AONO M. Watermarking three-dimensional polygonal models through geometric and topological modifications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1998, 16(4):551~560.
[5] BENEDENS O. Geometry-based watermarking of 3D models[J]. IEEE Computer Graph, Special Issue on Image Security, 1999, 19(1):46~55.
[6] PRAUN E, HOPPE H, FINKELSTEIN A. Robust mesh watermarking [A]. Proceeding of ACM Conference on Computer Graphics [C]. Los Angeles: ACM, 1999. 69~76.
[7] ADRIAN G B. Watermarking mesh-based representations of 3-D objects using local moments[J]. IEEE Trans Image Processing, 2006, 15(3):687~701.
[8] 张贤达. 矩阵分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2004. 45~60.
[9] NEUGEBAUER P. Geometrical cloning of 3D objects via simultaneous registration of multiple range images[A]. International Conference on Shape Modeling and Applications [C]. USA:IEEE Computer Society, 1997. 130~139.
[10] 喻志强,赵荣椿,叶豪盛,等. 自适应于局部几何特征的三维模型水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(22):23~27.

A 3-D Model Watermarking Algorithm Based on Minimum Mean Square Error

TAN Xiu-hu, LIU Guo-zhi, SUN Xu

(College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In this paper, the basic idea is to lead to the embedding watermark that has the least value of error energy, which is caused by various transforms of 3D model. In order to the embedding watermark that has the robustness to the topological and geometrical attacks, we firstly choose the vertexes of 3D mesh, and the principle of chosen vertexes has the shortest edge among vertexes. Namely, those chosen vertexes have the least influenced to topology transform of the 3D geometry model. Then, resisting to the geometrical transforms, we calculate the Mean Square Error of triangle mesh vertexes, and project them to the space that has the least mean square error value. So, we obtain that the robustness of the approach lies in hiding a watermark in the space that is least susceptible to the 3D model potential modification. AS a result, our algorithm is able to resist the topological and geometrical attacks. The robustness of our method is demonstrated by various attacks through computer simulation.

Key words: 3D mesh watermark; minimum mean square error; robustness; security