

局部集的3D模型水印方法

张朝辉 刘文予 郑玉婷 张帆

(华中科技大学电子与信息工程系宽带无线与多媒体研究中心, 武汉 430074)

摘要 提出了一种新的3D模型水印方法,利用模型顶点局部集信息来实现水印信息的嵌入和盲检测。水印嵌入阶段利用模型顶点局部集信息选取恰当的水印嵌入点以降低嵌入水印对模型视觉质量的损害。水印检测阶段,相同的局部集面积信息被提取,从而在水印嵌入和检测间建立了准确的同步关系,提高了水印抗攻击能力。利用一阶矩仿射不变性所提取的局部集信息能够抵御旋转、平移、均匀缩放等几何攻击。实验结果表明,在攻击强度不足以损害模型视觉质量的前提下,该方法对加噪、平滑滤波等攻击也具有较高鲁棒性。

关键词 网格 水印 局部集 盲检测

中图法分类号: TP309 TN918.74 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)07-1298-09

Watermarking 3D Objects Using Local Set Information

ZHANG Zhao-hui, LIU Wen-yu, ZHENG Yu-ting, ZHANG Fan

(Wireless Broad Band and Multimedia Research Center, Department of Electronics & Information Engineering,
Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

Abstract We propose a new watermarking method in the time domain, which utilizes a local set of information of each vertex to embed watermarking information and blind-detect. During the embedding process, appropriate vertices are selected to be embedded with the watermarking information according to local set area of each vertex on purpose of improving imperceptibility. As the detection progresses, the same local set area information is obtained to build the synchronization between embedding and detecting. This improves the robustness of the proposed. The property of affine invariant of first order moment makes the algorithm resisting attacks of rotation, translation, uniform scaling easily. The experiment has shown that, while the attacks are not so strong to damage the visual quality of 3D object, the algorithm acquires high robustness to resist attacks of adding noise and smooth-filtering.

Keywords mesh, watermarking, local set, blind-detect

1 引言

在开放式网络环境中,数字媒体产品可以通过计算机网络高速率任意传输。这一特性为数字媒体产业的发展提供了便利,同时也给数字媒体产品的版权保护带来了问题。当前计算机图形技术的迅速发展使得3维模型技术在国民生产中的应用愈加广泛,3维模型的商业价值日益凸现,对3维模型的版

权保护也显得愈发重要。数字水印技术通过向数字媒体产品中嵌入水印信息,为数字媒体产品的版权保护提供了行之有效的解决方案。

在过去一段时间里,人们对数字水印技术的研究主要集中于文本、音频、图像、视频等数字媒体的应用研究上,其中以图像水印的应用研究最为成熟^[1-2]。与这些研究相比,3维模型水印的应用研究面临更多挑战。首先,3维模型没有固定的数据表示顺序,也没有明确的采样率的概念。其次,3维模

基金项目:教育部博士点基金项目(20070487028);国家自然科学基金项目(60873127)

收稿日期:2007-10-30;改回日期:2008-03-04

第一作者简介:张朝辉(1981~),男,华中科技大学通信与信息系统专业硕士研究生。主要研究方向为图像水印、视频水印、图形水印。E-mail:jjfzhang@163.com

型数据表示方法众多,同一3维模型存在多种不同的3维建模方法。另外,3维模型的攻击方法多样,为水印信息的提取增加了难度。基于以上等原因,早期模型水印的研究集中于鲁棒嵌入和非盲检测,能够做到盲检测的模型水印算法较少^[3]。

实际中,根据应用需求的不同,模型水印主要可以划分为易碎性模型水印和鲁棒性模型水印。易碎性模型水印可用于验证模型内容的完整性,当模型内容遭受篡改后能够指出是模型内容的哪些地方遭受了篡改。鲁棒性模型水印可用于验证模型内容的版权信息,当模型内容遭受有意或无意的几何或拓扑攻击后仍然能够检测出模型内容的版权信息。Yeung等提出了一种基于网格模型的易碎性模型水印算法^[4],易碎性水印是水印研究领域一个重要分支,可广泛用于模型内容完整性验证以及多级用户管理。Ohbuchi等针对3维模型的网格模型,根据网格替换、拓扑替换和可见模式等概念提出了几种鲁棒性模型水印算法^[5]。随后,又提出了一些更为鲁棒的模型水印算法,其中以三角形相似四元组法和四面体体积比法最具代表性^[6]。Ohbuchi早期的工作为模型水印的研究提供了思路,但提出的算法较简单,鲁棒性较差,难以应用于实际。随后他又对变换域的模型水印做了研究^[7-8]。新的水印算法鲁棒性较高,特别是提高了水印抗网格简化和组合攻击的能力,但在水印检测中需要利用原始网格进行网格校准和重新采样。Benedens提出了一种基于调整网格曲面法向量分布的模型水印算法^[9-11],该算法可以有效地抵御顶点随机化、网格重采样和网格简化等几何攻击,具有较好的鲁棒性。Praun和Hoppe等将传统的扩频技术应用用于3维网格模型,取得了较好的效果^[12]。该算法可以抵御一般的网格操作,如位移、旋转、比例缩放、剪切、平滑、简化、重采样,对加噪、数据低位改变和其他的干扰攻击也具有较好的鲁棒性,但在水印检测时无法做到盲检测。Wagner等提出一种可以应用于任意拓扑结构的、基于多边形网格模型的鲁棒性水印算法^[13],该方法对位移、旋转、缩放等仿射变换具有较好的鲁棒性,但对抵御网格重建和网格简化攻击的鲁棒性较差。Li等尝试对简化后的模型嵌入水印信息来提高水印的鲁棒性^[14]。Alface等提出了一种利用模型曲率提取特征点的方法来实现水印鲁棒性嵌入的模型水印方法^[15]。Cayre等对模型水印的安全性做了初步的探索^[16],还对适用于压缩框架下的模型水

印算法做了研究^[17]。

从以上参考文献中可以看出,不同水印方法的不同特性使得它们能在水印系统的某一方面取得性能优势,但从整体上来看,它们只关注了水印系统的某一方面,大部分集中于如何提高水印算法的鲁棒性,而对水印嵌入容量、水印模型保真度、水印系统安全性等方面缺乏考虑。本文提出了一种新的空域水印方法,通过修改模型顶点坐标的方式实现水印信息的嵌入。空域的嵌入方法很好地满足了实际应用中水印嵌入容量的要求。根据模型顶点局部集面积信息以挑选合适的水印嵌入点可以很好地保证水印嵌入质量,提高水印模型保真度,对水印嵌入强度的控制进一步降低了嵌入水印对模型视觉质量造成的损害,保证了模型的可用性。在水印检测过程中,相同的水印嵌入点被选取,嵌入和检测间能建立准确的同步关系,提高了水印系统抗攻击能力。一阶矩的仿射不变性使得本方法可以很好地抵御旋转、平移、均匀缩放等几何攻击。在攻击强度不是很大的情况下,局部集信息统计意义上的不变性使得本方法对加噪、滤波等扰动攻击具有鲁棒性。对扩频后的水印信息使用平衡Gold序列进行调制,不仅提高了水印系统抗裁剪和扰动攻击的能力,还在一定程度上减少了系统对水印密钥的信息泄漏,提高了系统的安全性。实验结果表明,该方法在水印嵌入容量、嵌入保真度、检测鲁棒性、系统安全性等方面均有不错的性能优势,可以很好地满足实际应用的需求。

2 系统框架

直观上讲,实际的水印系统通常可以划分为嵌入和检测两部分。图1给出了采用本文方法嵌入水印信息的过程。在本过程中,选取局部集面积较小的点作为水印嵌入点,局部集面积可以看作模型区域变化剧烈程度的度量,在模型变化剧烈区域嵌入水印能提高水印模型保真度。模型顶点坐标的修改量 $f(x(k), w(k))$ 不仅与嵌入水印数据 $w(k)$ 有关,还与当前的模型数据 $x(k)$ 相关。 $f(x(k), w(k))$ 与当前模型数据 $x(k)$ 的相关性使得嵌入水印具有局部自适应性。模型顶点坐标的修改量参数 $\alpha(k)$ 是检测有效性和模型保真度间的折中。嵌入过程中,可以通过参数 $\alpha(k)$ 控制水印嵌入强度,提高模型保真度,保证对顶点坐标的修改不会破坏模型的可

用性。

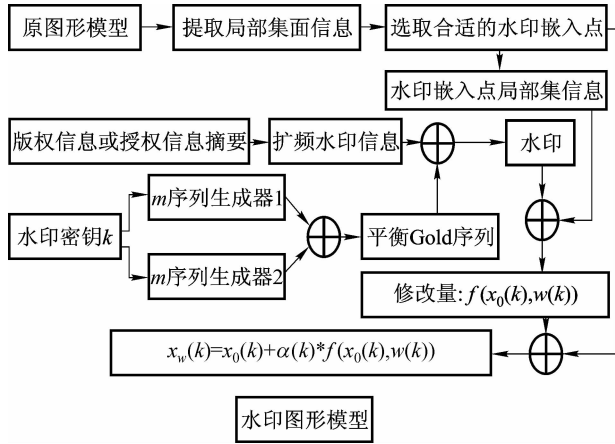


图 1 水印信息的嵌入过程

Fig. 1 The proposed progress of embedding watermark information

图 2 描述了水印信息的检测过程。在检测过程中,同样地根据局部集面积大小来选取水印嵌入点的方法保证了选取点集的完备性,使得嵌入和检测间能建立准确的同步关系。一阶矩对仿射变换的不变性及在攻击强度不是很强的条件下,一阶矩统计意义上的不变性使得嵌入和检测过程中能提取近似相同的局部集信息。图 2 中局部集质心 C'_k 和局部集法向量 Ψ'_k 均利用局部集一阶矩建立。这些量在水印嵌入前后的不变性可以实现盲检测,并提高了水印抗攻击能力。相关检测的方法进一步提高了检测的有效性。

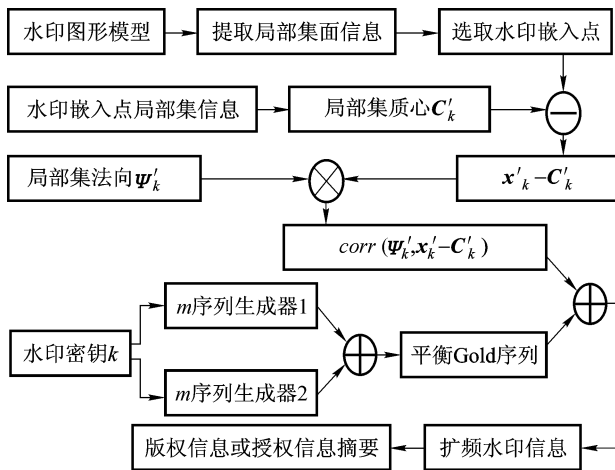


图 2 水印信息的检测过程

Fig. 2 The proposed progress of detecting watermark information

本文方法有两个值得研究的关键问题:水印嵌入点的选取、水印信息的嵌入和检测。

3 水印嵌入点的选取

一般而言,3 维模型的颜色、光照、纹理等属性很容易被修改或删除,这对 3 维模型本身并不会造成伤害,因而大部分的 3 维模型水印算法是采用修改模型顶点坐标的方法来嵌入水印信息^[10]。这种情况下,攻击者想通过修改或删除顶点坐标的方法来移除水印变得不可行。对模型顶点坐标的修改或删除会降低模型的视觉质量,破坏模型的可用性。

在本文方法中,选取模型变化剧烈区域的顶点作为水印嵌入点,通过修改顶点坐标嵌入水印信息。在嵌入过程中,利用对嵌入强度参数的控制将水印模型的失真降低到最小,并保证嵌入水印后不会改变原模型的拓扑结构。为了嵌入水印信息,首先需要给出模型顶点局部集的定义。设 v_i 为模型中任意顶点,记 N_{v_i} 为顶点 v_i 的局部集,表示模型中所有与顶点 v_i 邻近且到 v_i 的路径长度不大于 2 的顶点集,即 v_i 的二阶邻域。

$$N_{v_i} = \{v_j | 0 < |v_i v_j| \leq 2, j = 0, \dots, N_i\} \quad (1)$$

式中, $|v_i v_j|$ 表示模型顶点 v_j 到顶点 v_i 的路径长度, N_i 为局部集 N_{v_i} 的阶数。这些点信息确定了顶点 v_i 的局部集信息。在 3 维模型中,模型变化剧烈区域具有区域内网格面积相对较小,顶点数相对较多的特性。在这样的模型区域内嵌入水印,可以有效降低嵌入水印的感知度,提高水印模型的保真度。定义模型顶点 v_i 的局部集面积为 S_i ,它是顶点 v_i 二阶邻域内所有网格面积的平均值,是模型区域变化剧烈程度的度量。

$$S_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} s_j \quad (2)$$

式中, s_j 为模型顶点 v_i 二阶邻域内第 j 个网格曲面的面积。当该网格曲面均为三角形时,设三角形顶点坐标分别为 $A(x_1, y_1, z_1), B(x_2, y_2, z_2), C(x_3, y_3, z_3)$,由三角形的面积公式 $s = \frac{1}{2} ab \sin \theta$,则该网格曲面的面积可计算为

$$2s_j = |CA| \cdot |AB| \sin \theta$$

$$= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_1 - x_3 & y_1 - y_3 & z_1 - z_3 \end{vmatrix}$$

$$= \sum_{i=0}^3 [(x_i y_{i+1} + y_i z_{i+1} + z_i x_{i+1}) - (x_{i+1} y_i + y_{i+1} z_i + z_{i+1} x_i)] \quad (3)$$

使用式(3)计算空间三角形面积的一个显而易见的优点就是可以降低计算的复杂度。事实上,式(3)还可以用来计算空间有向三角形的面积。当邻域内所含曲面为多边形时,将此多边形看作由一些首尾相连的有向线段围成。如图 3 所示,在多边形所在平面上任取一点,该点与多边形每一条有向边构成一个有向三角形,所有有向三角形的面积和就是此多边形的面积。

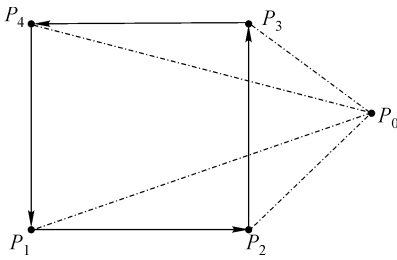


图 3 用有向三角形方法计算四边形 $P_1P_2P_3P_4$ 面积
Fig. 3 Calculate the area of quadrangle $P_1P_2P_3P_4$ using oriented triangle method

由于要求 P_0 与多边形共面,一个简单易行的方法是取多边形重心作为 P_0 。用有向三角形求取多边形面积的方法扩展了本文方法的应用范围,使得本文方法可以处理任意拓扑结构的网格模型。在求

得每一个模型顶点局部集面积后,就可以根据模型顶点局部集面积的大小界定出模型变化剧烈的区域。设 S 为模型所有顶点局部集面积的平均值。由 S 的大小可以界定出模型变化剧烈的区域 Ω 。

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \quad (4)$$

式中 S_i 为模型第 i 顶点局部集的面积, N 为模型的总顶点数。定义所有局部集面积小于 S 的模型顶点组成点集 Ω , 则 Ω 定义为:

$$\Omega = \{v_i | S_i < S, i = 0, \dots, N\} \quad (5)$$

在水印嵌入点选取过程中,要求所选模型顶点必须满足以下条件:(1)在集合 Ω 内;(2)局部集面积最小;(3)后选的水印嵌入点不能在已入选顶点的二阶邻域内出现。水印嵌入点个数的选取是水印嵌入容量和模型保真度的折中。当水印嵌入容量要求较高时,选取的水印嵌入点较多,嵌入水印时对模型的修改量也随着增大,这会降低水印模型保真度。图 4(a) 给出了采用本文方法所选取的水印嵌入点及其局部集,图中用黑色表示。未入选的模型顶点及区域用灰白色表示。图 4(b) 则给出了原模型。图 4(c) 给出了嵌入水印后的模型。模型从 princeton shape benchmark 3 维模型库^[18] 中挑选。从图中可以看出,嵌入水印后的模型图 4(c) 和原模型图 4(b) 从人眼视觉上难以分辨出来,这说明采用本方法嵌入水印可以获得较高的模型保真度。

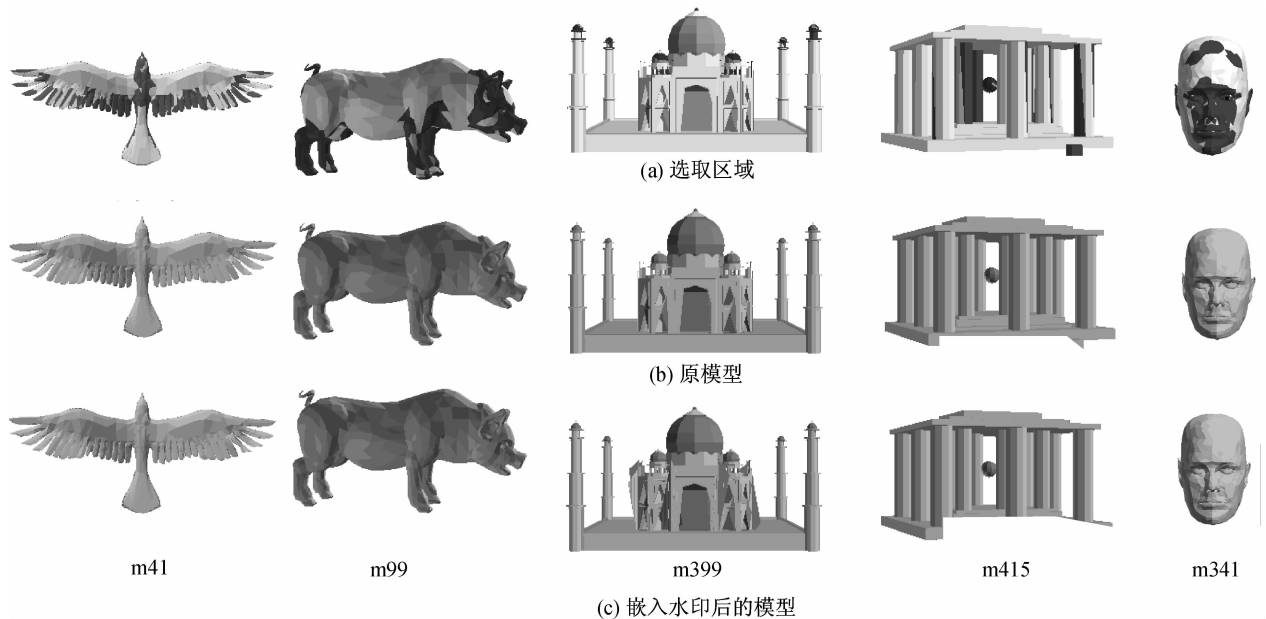


图 4 水印嵌入效果图

Fig. 4 Comparisons of embedding watermark on different models

4 水印信息的嵌入和提取

4.1 嵌入水印

为了验证模型的归属,需向模型中添加适当的版权信息,可以是 128 位的 MD5 值也可以是 160 位的 SHA 值^[9]。嵌入水印信息的相关性可能会泄漏加密密钥的一些信息,因此在嵌入水印信息前需对其进行预处理,以降低嵌入水印的互相关性。水印的生成和检测过程如图 1、图 2 所示。由 2 个 m 序列优选对复合而成的 Gold 序列具有良好的相关特性,采用平衡 Gold 序列能降低扩频系统的信息泄漏,提高系统的安全性^[16]。将扩频后的水印信息 $i(k)$ 与平衡 Gold 序列 $g(k)$ 异或,结果作为最终嵌入的水印 $w(k)$ 。

$$w(k) = i(k) \oplus g(k) \quad 0 < k \leq n \quad (6)$$

设 v_i 为 3 维模型任意顶点, N_{v_i} 为顶点 v_i 的局部集, Ψ_i 为局部集 N_{v_i} 的法向量,是顶点 v_i 二阶邻域内所有网格曲面单位法向量的平均值。 n_j 为顶点 v_i 二阶邻域内第 j 个网格曲面单位法向量, M_i 为顶点 v_i 二阶邻域内网格曲面的总个数。

$$\Psi_i = \frac{1}{M_i} \sum_{j=0}^{M_i} n_j \quad (7)$$

设 T_i 为与 Ψ_i 相垂直的单位向量,定义 $T_i = \text{Normal}(\{v_i - C_i\} - [\Psi_i \times (v_i - C_i)] \times \Psi_i)$ 。 C_i 为 v_i 的局部集 N_{v_i} 的质心。若向量 $(v_i - C_i)$ 沿 Ψ_i, T_i 方向上的分量分别为 φ_i, τ_i , 则

$$\varphi_i = [\Psi_i \cdot (v_i - C_i)] \cdot \Psi_i \quad (8)$$

$$\tau_i = (v_i - C_i) - [\Psi_i \cdot (v_i - C_i)] \cdot \Psi_i \quad (9)$$

水印嵌入过程如图 5(a) 所示。首先按照本文第 3 节给出的方法选取合适的水印嵌入点,计算嵌入点局部集信息 C_i, Ψ_i 和 T_i 。当嵌入水印比特为 1 时,将水印嵌入点投影到 Ψ_i 方向上。这相当于在质心坐标 C_i 上叠加一个投影分量 φ_i ,嵌入水印后的顶点坐标为 $\hat{v}_i^1 = C_i + \varphi_i$ 。当嵌入水印比特为 0 时,将水印嵌入点投影到 T_i 方向上。这等效于在质心坐标 C_i 上叠加一个投影分量 τ_i ,则嵌入水印后的顶点坐标为 $\hat{v}_i^0 = C_i + \tau_i$ 。

在嵌入过程中,当嵌入点坐标与质心坐标重合,将无法嵌入水印,对于这样的嵌入点必须予以舍弃。

4.2 检测水印

在检测中,按照本文第 3 节给出的方法,相同的水印嵌入点 v_i' 被选取,计算嵌入点局部集质心 C_i' 、

法向方向 Ψ_i' 和垂直方向 T_i' 。当检测到空间向量 $(v_i' - C_i')$ 与局部集法向方向 Ψ_i' 大体同向时,输出水印比特 1。当检测到空间向量 $(v_i' - C_i')$ 与局部集垂直方向 T_i' 大体同向时,输出水印比特 0。对于空间向量 $(v_i' - C_i')$ 是否与局部集法向方向 Ψ_i' 同向,可以采用相关检测的方法做出判断。

$$\text{corr}(\Psi_i', v_i' - C_i') = \frac{\Psi_i' \cdot (v_i' - C_i')}{\|\Psi_i'\| \cdot \|v_i' - C_i'\|} \quad (10)$$

$\text{corr}(\Psi_i', v_i' - C_i')$ 实际上测量的是向量 $(v_i' - C_i')$ 和 Ψ_i' 之间夹角的余弦值。向量 $(v_i' - C_i')$ 和 Ψ_i' 相关性越强,其之间的夹角就越小,空间方向就越相近。用阈值 $thres$ 度量向量 $(v_i' - C_i')$ 和 Ψ_i' 相关性强弱。当相关检测值 $\text{corr}(\Psi_i', v_i' - C_i') > thres$ 时,认为向量 $(v_i' - C_i')$ 和 Ψ_i' 同向,此时输出水印比特为 1。当 $\text{corr}(T_i', v_i' - C_i') > \sqrt{1 - (thres)^2}$ 时,认为向量 $(v_i' - C_i')$ 和 T_i' 同向,此时输出水印比特为 0。检测过程如图 5(b) 所示。当水印嵌入点 v_i' 位于图 5(b) 所示倒圆锥区域内,输出水印比特 1。反之则输出水印比特 0。设倒圆锥体圆锥角为 α , 则 $\alpha = 2\arccos(thres)$ 。

简单起见,在检测过程中只需要对向量 $(v_i' - C_i')$ 和 Ψ_i' 相关性做出检测即可。当 $\text{corr}(\Psi_i', v_i' - C_i') > thres$, 输出水印比特为 1。反之则输出比特 0。当 $\text{corr}(\Psi_i', v_i' - C_i') = thres$ 时,则随机输出比特 1 或 0。

4.3 嵌入保真度与检测有效性

从图 5(b) 可以看出,在检测阈值 $thres$ 一定条件下,检测点 v_i' 离圆锥体底部越近,即使在攻击强度很大的情况下, v_i' 就越难以逾越到圆锥体外。反映在图 5(a) 水印嵌入过程中,以嵌入水印比特 1 为例,当嵌入水印点 \hat{v}_i^1 距离局部集质心 C_i 越远,嵌入水印的模型抗攻击能力就越强。嵌入水印点 \hat{v}_i^1 离局部集质心 C_i 距离远近可以通过水印嵌入强度参数 $\alpha(l)$ 来调整

$$(1) \text{ 当嵌入水印比特 1 时,嵌入水印后的顶点坐标为 } \hat{v}_i^1 = C_i + \alpha(i) \varphi_i \quad (11)$$

$$(2) \text{ 当嵌入水印比特 0 时,嵌入水印后的顶点坐标为 } \hat{v}_i^0 = C_i + \alpha(i) \tau_i \quad (12)$$

由于点到直线的距离垂线段最短,当 $\alpha(i) = 1$, 此时对模型顶点坐标修改量最小,嵌入水印保真度最高。当 $\alpha(i) > 1$, 嵌入强度 $\alpha(i)$ 越大,嵌入点 \hat{v}_i^1 离局部集质心 C_i 距离越远,水印模型抗攻击能力越强,相应地对模型顶点坐标的修改量就越大,嵌入水

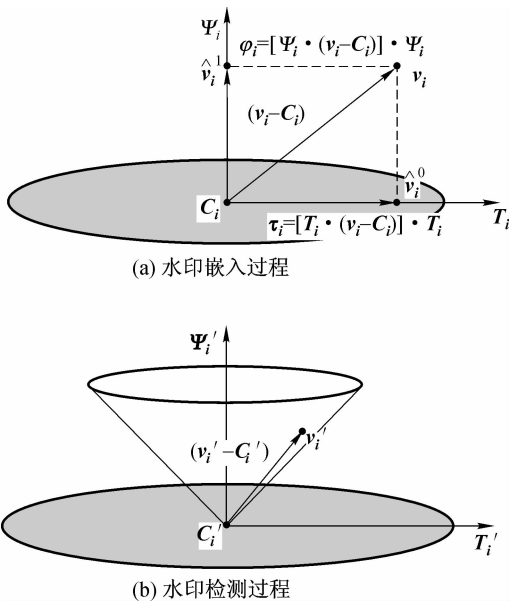


图 5 水印嵌入检测过程

Fig. 5 The progress of embedding and detecting watermark

印的保真度越低。参数 $\alpha(i)$ 的选取是嵌入保真度和检测有效性的折中。

嵌入强度 $\alpha(i)$ 不能无限大, 必须限定在一定的范围内。对模型顶点坐标的修改可能会破坏原模型的拓扑结构, 这种状况主要是由对顶点 v_i 的坐标的修改量过大造成的。设模型其他顶点到顶点 v_i 的最小距离为 R 。当嵌入水印比特为 1 时, 距离 $\|v_i^1 - v_i\| < R$ 可以保证对顶点 v_i 的修改不会改变原模型的拓扑结构。同样地, 当嵌入水印比特为 0 时, 则要求 $\|v_i^0 - v_i\| < R$ 。从几何上解释, 当嵌入水印后的顶点 v_i^1, v_i^0 位于以顶点 v_i 为球心, 以 R 为半径的球体内, 则对顶点 v_i 的修改不会改变原模型的拓扑结构。

5 实验结果

在实际应用中, 往往会对水印嵌入容量提出要求。采用空域的方法嵌入水印, 一个显而易见的优点就是可以提高嵌入水印的容量。值得一提的是, 水印嵌入容量的提高不仅可以满足水印信息大容量嵌入的应用要求, 还可以通过重复多次嵌入的方法来提高水印的鲁棒性, 重复分区域的嵌入方法可以有效地抵御裁剪攻击^[8], 当然重复分区域的嵌入方法会降低水印嵌入容量。本文实验所用模型从 princeton shape benchmark 模型库中挑选^[18], 如图

4(a) 所示。按第 2 节所描述的方法选取水印嵌入点, 选取实验结果如表 1 所示。从实验结果来看, 大约占模型总点数 8% 的模型顶点可用于嵌入水印。当嵌入水印信息为 128 位的 MD5 值时, 则要求模型至少有 1 600 个点以上。

表 1 不同 3 维模型的水印信息嵌入容量
Tab. 1 Capability of embedding watermark information for different 3D objects

模型	总点数	嵌入点数	入选率(%)	嵌入比特
m41	1 824	150	8.22	150
m99	1 450	123	8.48	123
m341	1 884	157	8.33	157
m399	7 530	71	7.58	571
m415	508	36	7.08	36

实际应用中除了对水印嵌入容量提出要求外, 还会对嵌入水印的模型保真度提出要求。通常, 不希望由于嵌入水印而损害原模型的视觉质量, 也不希望由于嵌入水印而破坏原模型的可用性。从当前研究成果来看, 对水印嵌入质量的研究主要集中于图像、视频水印, 而对模型水印研究较少^[17]。Corsini 等在这一研究领域做了初步的探索, 提出了一种测量水印模型视觉质量的客观方法^[19]。该方法通过测量水印嵌入前后模型粗糙程度的变化情况来客观反映嵌入水印对模型视觉质量的影响。表 2 给出了 Corsini 法和传统信噪比法的实验测量值。嵌入水印后的模型如图 4(c) 所示。从实验结果来看, 无论是客观的视觉质量测量值还是嵌入水印后模型给人的主观感受, 采用本文方法嵌入水印可以很好地保留原模型的视觉质量, 不会对模型的可用性造成损害。

表 2 利用 SNR 法和 Corsini 法评估嵌入水印质量
Tab. 2 Evaluate the visual quality of watermarked object using SNR and Corsini's method

模型	SNR 方法(dB)	Corsini 方法
m41	112.90	-0.209 6
m99	91.24	-0.152 8
m341	95.44	1.068 1
m399	95.88	-0.418 1
m415	83.67	0.187 9

一个实际的水印系统还可能会遭受各种有意或无意的、几何或拓扑的攻击。这些攻击能破坏水印嵌入和检测过程间的同步关系, 有的会对嵌入水印

产生干扰,甚至直接删除水印嵌入点,造成嵌入水印信息丢失。Benedens 列举了实际水印系统可能会遭受的各种攻击^[9]。需要指出的是,实际中攻击的强度都不会太大,因而可以假定水印系统所遭受的攻击不会对模型视觉质量造成损害,也不会破坏模型的可用性。实验中考虑了两种攻击方法:随机噪声攻击和平滑滤波攻击。图 6 给出了模型 m99 在遭受这两种攻击后的结果,其中图 6(b)为噪声攻击后的模型,噪声强度为网格最大尺度的 1%;图6(c)为 Gauss 滤波后的模型,滤波系数为 0.25。图中所给的攻击强度对模型的视觉质量造成了明显的损害,损害了模型实际应用价值。

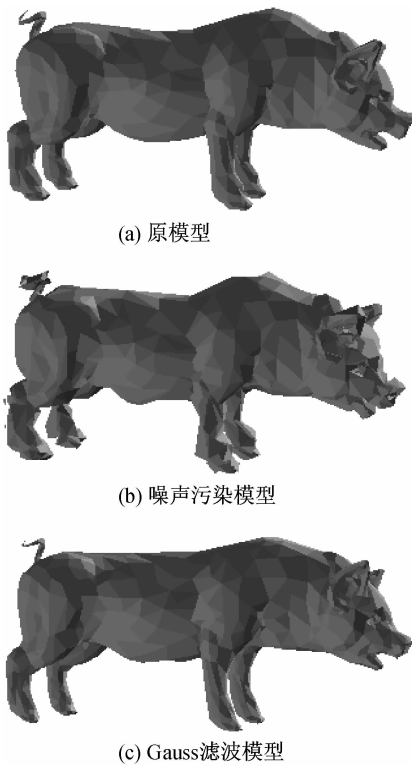


图 6 模型 m99 原图及经噪声和 Gauss 滤波攻击后的模型
Fig. 6 The original m99 object and the objects attacked by adding white noise and Gauss filtering

图 7、图 8 给出了模型在遭受这两种攻击的情况下水印信息的检测效率。从图中可以看出,随着攻击强度的增强,检测效率在下降。

在实际应用中,对模型的攻击强度必须限定在一定的范围之内,因此,实际的检测效率应该是一定攻击强度下的检测效率。表 3 给出了在加噪和滤波两种攻击下,模型所能经受最大攻击强度下的检测效率。从表中可以看出攻击强度在可以接受的条件

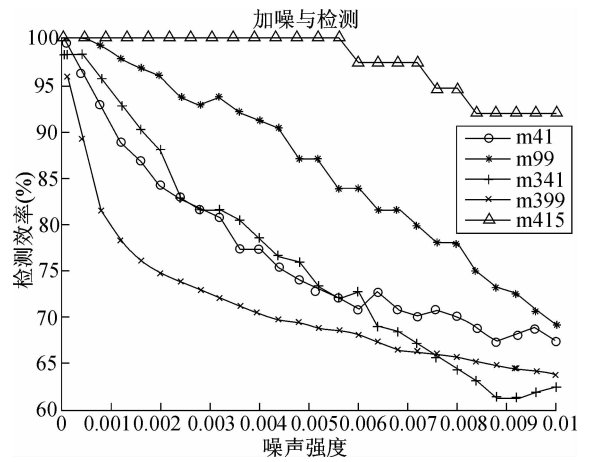


图 7 模型在经受加噪攻击后的检测效率
Fig. 7 Detecting rate of the watermarked objects when they have been attacked by adding white noise

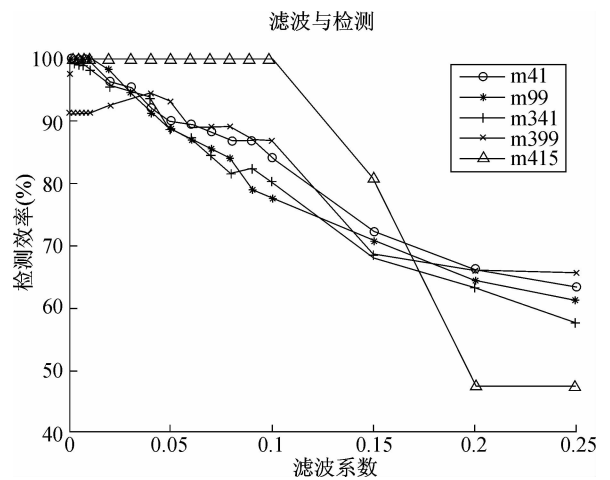


图 8 模型在经受 Gauss 滤波攻击后的检测效率
Fig. 8 Detecting rate of the watermarked objects when they have been attacked by Gauss filtering

表 3 在加噪和滤波两种攻击下,模型所能经受最大攻击强度下的检测效率

Tab. 3 Maximum detecting rate of the objects when they have been attacked by adding noise and Gauss filtering

模型	添加随机噪声		Gauss 平滑滤波	
	噪声强度	检测效率 (%)	滤波系数	检测效率 (%)
m41	0.001 6	86.7	0.06	89.3
m99	0.006	83.7	0.1	77.2
m341	0.003 2	81.5	0.07	84.7
m399	0.001 2	78.1	0.007	91.2
m415	0.003 6	100	0.02	100

下,水印检测的有效性可以达到77%以上。

对于模型简化攻击,尽管简化后模型基本形状会保持不变,基于统计特性的局部集法向量不会有大的变化,但简化过程中可能会直接删除某些水印嵌入点,造成嵌入水印信息丢失,降低水印检测效率。如果在水印嵌入过程能考虑到模型的一些特征信息则有助于提高水印的鲁棒性。在简化过程中,简化算法会首先删除那些次要的模型顶点,而对那些较重要的、代表模型特征信息的顶点予以保留。在选取水印嵌入点时结合模型特征信息来选取合适的水印嵌入点可以提高水印鲁棒性,但对水印嵌入点的进一步限制会降低水印嵌入容量。

水印算法的鲁棒性是水印系统的一个重要方

面,但就实际应用而言,公有水印对于水印嵌入容量要求较高而对水印鲁棒性要求相对较低^[9]。以往的水印算法^[8-9,12-13]往往只关注于水印系统的某一方面——算法的鲁棒性,而对水印嵌入容量、水印模型保真度、水印安全性缺乏考虑。本文方法在嵌入水印时考虑了嵌入水印对模型视觉质量的影响,并对嵌入水印后模型的视觉质量做了客观的评价,在模型变化剧烈区域嵌入水印的方法很好地保证了水印模型的保真度。合适的水印嵌入容量,水印检测算法的低复杂度,以及对常见模型操作的抗攻击能力,使得本方法可以很好地满足公有水印应用要求。表4给出了本方法同以往的水印算法^[8-9,12-13]的一些比较。

表4 本文方法同以往的一些水印算法的比较

Tab. 4 Compare the proposed with existing methods

	是否需要原模型	预处理	图形模型保真度	抗攻击类型
Proposed	否	否	高保真度	仿射攻击、平滑滤波、随机噪声
Ohbuchi	是	是	未考虑	组合攻击、平滑滤波、随机噪声、简化
Benedens	是	否	未考虑	裁剪、简化、定点随机化
Wagner	否	否	未考虑	仿射变换
Praun	是	是	未考虑	仿射攻击、平滑滤波、简化、裁剪、重采样

6 结论

提出了一种鲁棒性的空域模型水印方法。根据模型顶点局部集面积大小以选取合适的水印嵌入点的方法提高了嵌入保真度,保证了嵌入和检测间准确的同步关系,提高了水印检测效率。一阶矩的仿射不变性使得本方法可以很好地抵御旋转、平移、均匀缩放等几何攻击。实验结果表明,攻击强度在可以接受的情况下,局部集信息统计意义上的不变性使得本方法对加噪、滤波等扰动攻击具有鲁棒性。

值得注意的是,高鲁棒的模型水印算法只能保证算法上的安全性。在实际中,由于各方面的应用需求,水印算法、嵌入水印信息、原模型等都可能为攻击者所获取。利用这些信息,攻击者能够估计出嵌入水印信息的密钥,实现对嵌入水印信号的读、写、删、改等操作^[16],因而对整个水印系统的安全性提出了更高、更广泛的要求。如何提高水印算法的安全性,包括算法安全和应用安全,将是今后研究工作中需要重点关注的一个方面。

参考文献 (References)

- 1 Tzeng J, Hwang W, Chern I. Enhancing image watermarking methods with/without reference images by optimization on second-order statistics [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(7):771-782.
- 2 Dong Ping, Brankov J, Galatsanos N, et al. Digital watermarking robust to geometric distortions [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12):2140-2150.
- 3 Bors A. Watermarking mesh-based representations of 3D objects using local moments [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(3):687-701.
- 4 Yeung M, Yeo B. Fragile Watermarking of Three-Dimensional Objects [A]. In: Proceedings of International Conference on Image Proceeding [C], Chicago, IL, USA, 1998, 3:442-446.
- 5 Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking three-dimensional polygonal models [A]. In: Proceedings of the ACM Multimedia, Seattle [C], Washington, DC, USA, 1997:261-272.
- 6 Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking 3D polygonal models through geometric and topological modifications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(4):551-560.
- 7 Ohbuchi R, Takahashi S, Miyazawa T, et al. Watermarking 3D polygonal meshes in the mesh spectral domain [A]. In: Proceedings of Graphics Interface [C], San Francisco, CA, USA: Morgan

- Kaufmann Publishers, 2001:9-17.
- 8 Ohbuchi R, Mukaiyama A, Takahashi S. A frequency-domain approach to watermarking 3D shapes [J]. Computer Graphics Forum, 2002, **21**(3):1-10.
- 9 Benedens O. Geometry-based Watermarking of 3D Models [J]. IEEE Computer Graphics and Application, 1999, **19**(1):46-55.
- 10 Benedens O, Busch C. Towards Blind detection of robust watermarks in polygonal models [J]. Eurographics, Blackwell Publishers, 2000, **19**(3):199-208.
- 11 Benedens O. GEOMARK-watermarking technology for 3D models and virtual scenes [J]. Computer Graphics Topics, 2001, **13**(1):20-21.
- 12 Praun E, Hoppe H, Finkelstein A. Robust Mesh Watermarking [A]. In: Proceedings of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C], Los Angeles, USA, 1999, **6**:69-76.
- 13 Wagner M G. Robust watermarking of polygonal meshes [A]. In: Proceedings of Geometric Modeling and Processing [C], Hong Kong, China, 2000:201-208.
- 14 Li A, Aoki Y. 3D mesh watermarking using subdivision surface representation [A]. In: Proceedings of International Conference on Signal Processing [C], Montreal, Canada, 2004, **3**:2310-2313.
- 15 Rondao-Alface P, Macq B. Blind watermarking of 3D meshes using robust feature points detection [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Genova, Australia, 2005, **1**:1693-1696.
- 16 Cayre F, Fontaine C, Furon T. Watermarking security: theory and practice [J], IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, **53**(10):3976-3987.
- 17 Cayre F, Rondao-Alface P, Schmitt F, *et al.* Application of spectral decomposition to compression and watermarking of 3D triangle mesh Geometry [J]. Image Communication on Signal Processing, 2003, **18**(4):309-319.
- 18 Princeton University. Princeton Shape Benchmark [DB/OL]. <http://shape.cs.princeton.edu/benchmark/>, 2006-11-07.
- 19 Gelasca E D, Ebrahimi T, Corsini M, *et al.* Objective evaluation of the perceptual quality of 3D watermarking [A]. IEEE International Conference on Image Processing [C], Genova, Australia, 2005, **1**:1241-1244.