

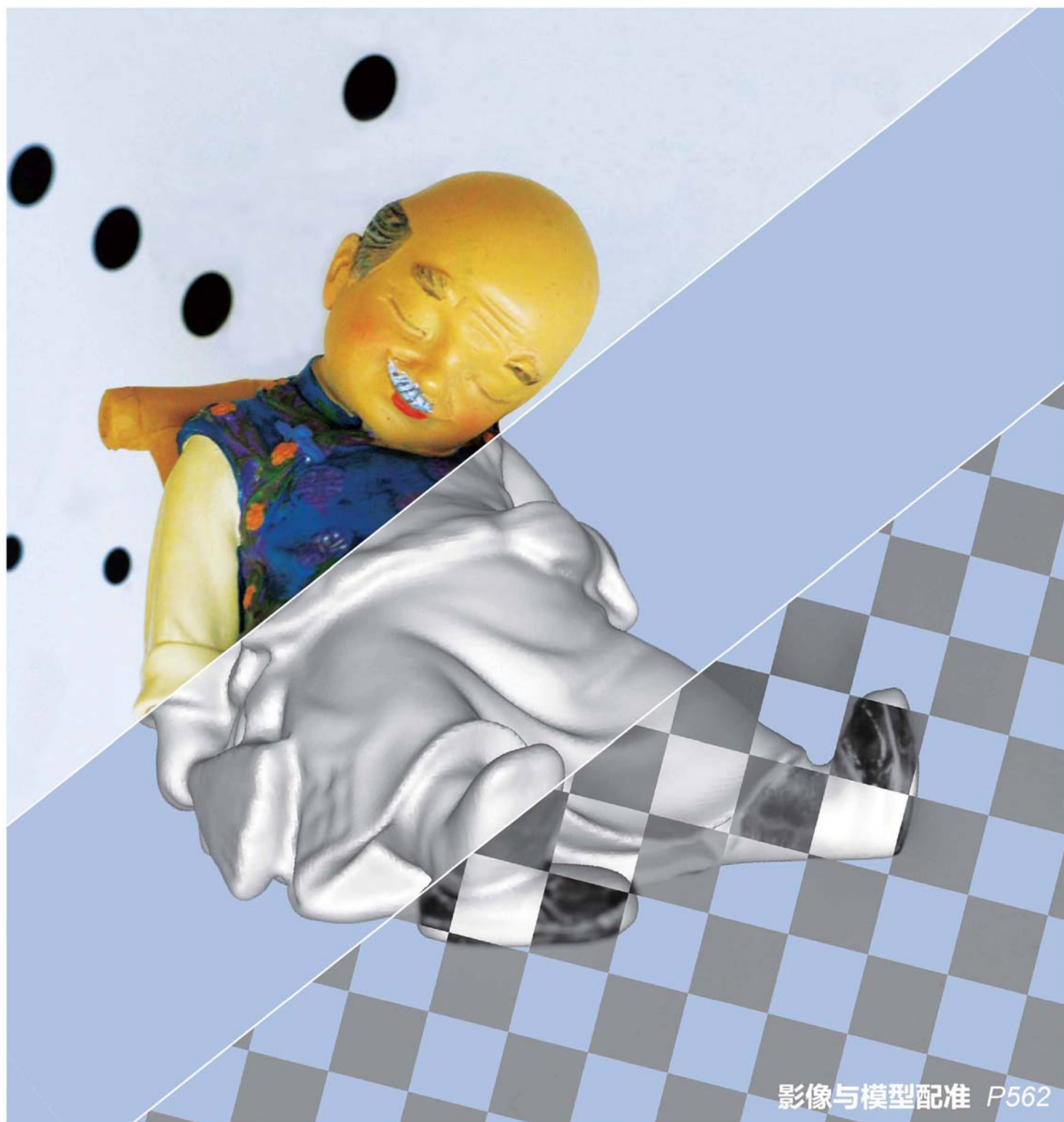


主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014
04
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



影像与模型配准 P562



第19卷第4期（总第216期）

2014年4月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

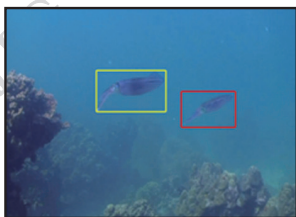
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

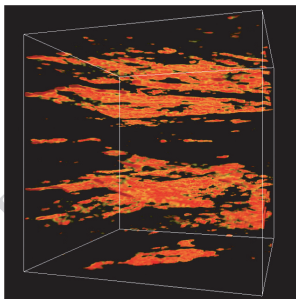
国内定价 50.00元



面泊松融合结合色彩变换的无缝纹理辐射处理(第512页)



融合视觉深度的特征计算与水下目标跟踪(第534页)



针对全空子数据体的GPU体绘制(第577页)

图像处理和编码

- 梯度矢量扩散控制实现边缘保持的彩色图像去噪
贾迪, 孟祥福, 张一飞, 董娜, 李思慧 0493
- 联合矩阵F范数的低秩图像去噪
刘新艳, 马杰, 张小美, 胡钊政 0502
- 面泊松融合结合色彩变换的无缝纹理辐射处理
周漾, 郑顺义, 黄荣永, 马电 0512
- 改进的局部方向模式纹理表示方法
刘海军, 常东超, 张凌宇 0520
- 图像插值空间大容量可逆数字水印算法
王继军 0527

图像分析和识别

- 融合视觉深度的特征计算与水下目标跟踪
王慧斌, 程勇, 陈哲 0534
- 融合颜色属性和空间信息的显著性物体检测
徐丹, 唐振民, 徐威 0541
- 采用人工鱼群的改进广义Hough变换目标定位
李志, 谢强 0549
- 非规则弯曲形变的不变量表示
李国祥, 夏国恩 0556

图像理解和计算机视觉

- 小物体3维重建中影像与几何模型的配准
郑顺义, 王晓南 0562
- 像素聚类改进二进制描述子鲁棒性
惠国保, 李东波 0569

计算机图形学

- 针对全空子数据体的GPU体绘制
李国和, 段忠祥, 吴卫江, 洪云峰, 刘智渊, 程远 0577

医学图像处理

- 基于无损水印的医学图像篡改检测和质量恢复
邓小鸿, 陈志刚, 毛伊敏 0583

遥感图像处理

- 特征点和不变矩结合的遥感图像飞机目标识别
曾接贤, 付俊, 符祥 0592
- 结合稀疏识别的自适应Wallis滤波在高分辨率影像控制点匹配中的应用
耿蕾蕾, 孙权森, 纪则轩, 刘佑鑫, 袁凯 0603

第9届和谐人机环境联合学术会议专栏

- 局部特征点的3维模型变换域水印算法
张建明, 周小梅, 王新宇, 詹永照 0613
- 足球视频搜索引擎中的用户偏好挖掘
胡雨成, 于俊清, 黄贤强, 何云峰, 管涛 0622
- 随机亮度差量化的二进制特征描述
庄东晔, 张冬明, 张勇东, 李锦涛 0630
- L_1 优化在网格去噪中的应用
王鹏, 王胜法, 曹俊杰, 李楠楠, 李波, 苏志勋 0637
- 多视点视频双向实时转码技术的设计与实现
孙立峰, 蔡飞飞, 杨士强 0645

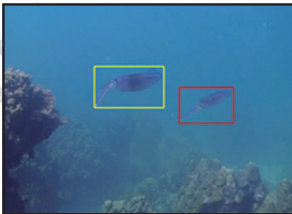
- 第五届数字地球高峰论坛征文通知 封三

CONTENTS

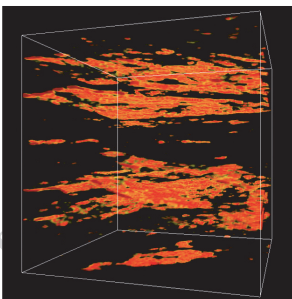
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Face-wise Poisson blending with color transfer in seamless texturing(P512)



Visual depth based feature calculation and underwater target tracking(P534)



GPU-based volume rendering for full-empty subdata blocks(P577)

Image Processing and Coding

- Edge preserving denoising of color image through controlling the gradient vector
Jia Di, Meng Xiangfu, Zhang Yifei, Dong Na, Li Sihui 0493
- Image denoising of low-rank matrix recovery via joint Frobenius norm
Liu Xinyan, Ma Jie, Zhang Xiaomei, Hu Zhaozheng 0502
- Face-wise Poisson blending with color transfer in seamless texturing
Zhou Yang, Zheng Shunyi, Huang Rongyong, Ma Dian 0512
- Improved local directional pattern texture descriptor
Liu Haijun, Chang Dongchao, Zhang Lingyu 0520
- High capacity reversible watermarking for image interpolation space
Wang Jijun 0527

Image Analysis and Recognition

- Visual depth based feature calculation and underwater target tracking
Wang Huibin, Cheng Yong, Chen Zhe 0534
- Combining color names with spatial information for salient object detection
Xu Dan, Tang Zhenmin, Xu Wei 0541
- Improved generalized Hough transform using artificial fish swarm algorithm in target location
Li Zhi, Xie Qiang 0549
- The global descriptor for bending non-rigid shapes
Li Guoxiang, Xia Guoen 0556

Image Understanding and Computer Vision

- Images and geometric model registration in 3D reconstruction of small objects
Zheng Shunyi, Wang Xiaohan 0562
- Robust descriptor structured by pixel clustering
Hui Guobao, Li Dongbo 0569

Computer Graphics

- GPU-based volume rendering for full-empty subdata blocks
Li Guohe, Duan Zhongxiang, Wu Weijiang, Hong Yunfeng, Liu Zhiyuan, Chen Yuan 0577

Medical Image Processing

- Lossless watermarking algorithm for medical image's tamper detection and recovery with high quality
Deng Xiaohong, Chen Zhigang, Mao Yimin 0583

Remote Sensing Image Processing

- Aircraft target recognition in remote sensing images based on distribution of the feature points and invariant moments
Zeng Jiexian, Fu Jun, Fu Xiang 0592
- Adaptive enhancement via sparse recognition for automatic control point extraction in high-resolution images
Geng Leilei, Sun Quansen, Ji Zexuan, Liu Jixin, Yuan Kai 0603

Special Issue on HHME 2013

- Transform domain watermarking scheme of 3D models based on local feature points
Zhang Jianming, Zhou Xiaomei, Wang Xinyu, Zhan Yongzhao 0613
- User preference mining for soccer video search engine
Hu Yucheng, Yu Junqing, Huang Xianqiang, He Yunfeng, Guan Tao 0622
- Novel binary feature from intensity difference quantization
Zhuang Dongye, Zhang Dongming, Zhang Yongdong, Li Jintao 0630
- The application of l_1 -optimization in mesh denoising
Wang Peng, Wang Shengfa, Cao Junjie, Li Nannan, Li Bo, Su Zhixun 0637
- The design and implementation of real time MVC transcoding
Sun Lifeng, Cai Feifei, Yang Shiqiang 0645

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)04-0613-09

论文引用格式: 张建明, 周小梅, 王新宇, 詹永照. 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.
[DOI:10.11834/jig.20140416]

局部特征点的 3 维模型变换域水印算法

张建明, 周小梅, 王新宇, 詹永照

江苏大学计算机科学与通信工程学院, 镇江 212013

摘要: **目的** 为进一步提高变换域水印的鲁棒性, 解决多分辨率小波变换对三角形网格形状的限制, 提出一种基于局部特征点的变换域水印算法。 **方法** 首先根据经度角和纬度角对模型分区, 并求出局部特征点; 其次由局部特征点的模长与非局部特征点模长的均值构成的比值组成 2 维矩阵, 对 2 维矩阵进行离散小波变换, 并修改小波系数中的各分辨率层的中高频系数来嵌入水印; 最后通过逆向离散小波变换得到空域信号, 修改 3 维模型局部特征点的模长以得到含水印的 3 维网格模型。 **结果** 本文方法能够不受平移、旋转、均匀缩放和顶点重排序的影响, 并能有效抵抗噪声、简化、剪切、细分、量化和联合攻击等一系列的常见攻击。 **结论** 实验结果表明, 该算法具有很好的鲁棒性和不可见性, 对模型的网格形状无严格要求。

关键词: 3 维水印; 3 维网格模型; 局部特征点; 变换域; 离散小波变换(DWT)

Transform domain-watermarking scheme of 3D models based on local feature points

Zhang Jianming, Zhou Xiaomei, Wang Xinyu, Zhan Yongzhao

School of Computer Science and Communications Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

Abstract: **Objective** To improve the robustness of transform domain watermarking and solve the limits of the grid shape in multi-resolution wavelet transform, a transform domain-watermarking scheme of 3D models based on local feature points is presented in this paper. **Method** 3D models are partitioned through longitude and latitude angles to get the local feature points. Two-dimensional matrices are composed by the ratio of the length of the local feature points and the other points in this region. The discrete wavelet transform is carried out on the two dimensional matrix modifying the wavelet coefficients of each layer in the intermediate frequency and high frequency coefficients to embed the watermarking. Then, the airspace signal is obtained by the inverse discrete wavelet transform and the length of the local feature points is modified to obtain a 3D watermarked mesh model. **Result** The proposed watermarking scheme is robust against attacks such as translation, rotation, uniform scaling, vertex re-ordering, noise, simplification, cropping, subdivision, quantization, combination attacks and so on. **Conclusion** The experimental results show that this watermarking scheme has good robustness and imperceptibility. Besides, it has no strict requirement for the shape of the mesh model.

Key words: 3D watermarking; 3D mesh model; local feature points; transform domain; discrete wavelet transform (DWT).

收稿日期: 2013-09-10; 修回日期: 2013-12-05

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(201132271100211); 江苏省研究生科研创新计划资助项目(CX10B_273Z)

第一作者简介: 张建明(1964—), 男, 教授, 2005 年于南京理工大学获计算机应用专业博士学位, 主要研究方向为图像处理与模式识别、系统仿真、虚拟现实、计算机图形学。E-mail: zhjm@ujs.edu.cn

0 引言

随着多媒体技术的发展,越来越多的3维模型在互联网上进行传播,随之而来的是非法的占有、复制、修改、传播未经授权产品的侵权行为,因此3维模型的知识产权保护成为各厂商及政府非常重视的问题。Ohbuchi等人^[1]在ACM Multimedia'97国际会议上发表了第1篇关于3维模型数字水印的文章,此研究很快地就得到了大家的重视,目前这一领域已经成为数字水印的热点课题,但由于3维模型的载体数据较少且具有不规则性,同一模型的表示方法不具有唯一性,而且模型数据缺少内在顺序,难以将模型变换到频域进行操作,以及攻击方式的复杂化,即对3维模型的顶点和拓扑结构均进行攻击等特点,在同时满足不可见性和强鲁棒性的情况下,怎样在3维模型中嵌入水印和检测水印是3维水印研究的关键,随着攻击方式的复杂化,对3维水印的嵌入算法和检测算法带来一定的挑战,而强鲁棒性的水印算法也一直是3维模型数字水印技术的一个难点。

3维网格的水印技术可以在空域和变换域上分别加入水印。与数字图像水印算法一样,对3维网格模型的数字水印算法研究也是从空间域开始的,现正逐步向变换域方向发展。变换域水印先对模型的某些基元进行变换(离散傅里叶变换(DFT),离散余弦变换(DCT),离散小波变换(DWT)等),通过修改变换后的频谱系数来嵌入水印,然后反变换得到含水印的模型。变换域的共同点是水印序列的一个元素被嵌入到模型的多个顶点中,这有利于提高算法的鲁棒性。DWT将信号分解成不同分辨率层次的频率系数,由于DWT的计算量小,且能很好地抵抗图像操作,最近它被广泛用于信号处理,而且DWT很容易实现不可见^[2-3]。Kanai等人^[4]首次应用变化域内的信号处理技术,提出一种基于多分辨率小波分解的3维网格数字水印算法,该算法首次应用小波变换处理3维水印的相关问题。谢守江等人^[5]提出了基于网格小波变换,得到一个基网格和一系列小波系数,选择在低频子带的小波系数中嵌入水印,该算法是针对网格数据的变换方法,对3维网格的频谱分解提供了方法,但只能抵抗仿射变换、随机噪声、低通滤波和多分辨率增强攻击,能抵抗的攻击类型不多。Wang^[6]提出基于小波变换的半正

则网格的分层水印,3种不同的水印被同时嵌入到同一个半正则网格中,该算法是通过修改小波分解的各级小波系数嵌入水印,能够嵌入高容量的水印,但只能应用在半规则三角形网格中。Hachani^[7]提出基于小波变换的3维不规则网格水印,该算法应用不规则小波分析处理规则或不规则三角形网格,在合适的分辨率的小波系数上嵌入水印,能满足高容量的数据嵌入且能保持不可见性,但基于网格的水印嵌入对网格的形状有严格的要求。文献[8-9]提出基于小波变换的3维模型水印算法,该算法是结合标准模型、顶点聚类 and DWT处理3维网格模型,但该算法只能抵抗几何攻击、平滑和剪切攻击,抵抗的攻击类型偏少。张建海等人^[10]提出基于小波变换的3维网格数字水印技术,提取模型中的显著区域,并在球面坐标下进行小波变换,在低频和高频系数下嵌入水印,该算法能满足鲁棒性和不可见性,但是该算法运算量很大,只能抵抗几何攻击、平滑和噪声攻击。针对已有的研究所存在的对网格形状要求严、抵抗的攻击种类少等问题,提出一种基于局部特征点的3维模型变换域水印算法,该算法对模型的网格形状没有要求,不仅能抵抗一般的攻击种类,对联合攻击也有一定的鲁棒性。

1 算法思想

3维模型数字水印的工作难点是怎样使嵌入水印的模型能够抵抗更多的攻击种类,攻击种类的多样性给在3维模型中选取嵌入基元带来了困难,选取局部特征点模长与其他非局部特征点的模长均值的比值作为水印嵌入基元,该比值是一个仿射不变量,不会受到几何变换的影响。局部特征点相对于全局特征点能更好地反映模型的特征,本文是根据经度角和纬度角对模型进行分区,在每个区域中求取特征点作为局部特征点,因此在局部特征点中嵌入水印对简化攻击的效果比较好,而且可以通过调整区域内的局部特征点数目来得到可观的水印嵌入容量;特征点是由与该顶点相连接的其他顶点集合决定的,跟该顶点所在的拓扑结构是什么形状没有必然关系,也不要求一定是三角形网格形状,因此该算法对网格拓扑结构的形状没有严格要求;一般来讲,在小波变换中嵌入的水印,嵌入在低分辨率的低频成分能提高水印的鲁棒性,但是不可见性极差,而嵌入到高分辨率小波系数上,虽然不易引起视觉上

的失真,但是算法的鲁棒性降低,因此本文算法是通过修改小波系数来嵌入水印,选取低分辨率的中高频和中分辨率的中高频系数分别嵌入水印,可以保证水印模型的安全性和不可见性。

2 变换域水印算法

假设 $V = \{v_i \in \mathbf{R}^3 | 0 \leq i \leq N-1\}$ 是3维模型顶点集合, N 为顶点数目, $v_i = (x_i, y_i, z_i)$ 表示顶点坐标。

2.1 模型的预处理

对3维模型的顶点坐标进行预处理。将顶点的笛卡儿坐标转化为球面坐标,从而便于分区和求取局部特征点,并根据分区的结果映射到2维平面进行水印的嵌入。预处理的步骤如下:

1) 计算3维模型重心坐标

$$v_c = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} v_i \quad (1)$$

式中, $v_c = (x_c, y_c, z_c)$ 表示3维模型的重心。

2) 3维模型平移。计算出3维模型的重心坐标后,就将模型的重心平移到原点。用 x'_i, y'_i, z'_i 表示重心平移到坐标原点后的3维模型各顶点的坐标值。计算公式为

$$\begin{cases} x'_i = x_i - x_c \\ y'_i = y_i - y_c \\ z'_i = z_i - z_c \end{cases} \quad (2)$$

式中, x_i, y_i, z_i 为3维模型的原始顶点坐标值。

3) 将3维模型顶点的笛卡儿坐标转化为球面坐标

$$\begin{cases} r_i = \sqrt{x_i'^2 + y_i'^2 + z_i'^2} \\ \theta_i = \begin{cases} \arccos\left(\frac{x'_i}{\sqrt{x_i'^2 + y_i'^2}}\right) & y'_i \geq 0 \\ 2\pi - \arccos\left(\frac{x'_i}{\sqrt{x_i'^2 + y_i'^2}}\right) & y'_i < 0 \end{cases} \\ \varphi_i = \arccos\left(\frac{z'_i}{r_i}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $(r_i, \theta_i, \varphi_i)$ 是顶点 $v'_i = (x'_i, y'_i, z'_i)$ 的球面坐标, $\theta_i \in [0, 2\pi]$, $\varphi_i \in [0, 2\pi]$, r_i 是第 i 个顶点到坐标原点的距离。

2.2 局部特征点的提取

根据 θ 和 φ 将网格模型分成 $N \times N$ 个区域,则

经度角方向的间隔角度 $d\theta$ 为 $\frac{2\pi}{N}$, 纬度角方向的间隔角度 $d\varphi$ 为 $\frac{\pi}{N}$, 对每个区域内的顶点进行局部特征点提取,在每个区域内求取 b 个特征点,即可以得到 $N \times N \times b$ 个特征点。

模型中顶点的离散法向量是由与该顶点相连接的周围顶点决定的,特征点是由离散法向量之间的夹角和的大小确定^[11]。选取法向量方向变化比较大的顶点作为3维模型的特征点,这些特征点具有较好的旋转、平移不变性。将局部特征点的欧几里德模长与其他非局部特征点的模长均值的比值作为嵌入基元,则其是一个仿射不变量,可以抵抗仿射变换。具体的处理步骤如下:

1) 找出与 v_i 相连接的各项点,构成集合 $N(v_i)$, 其中 M 是与 v_i 相邻顶点数目,定义为

$$N(v_i) = \{v_j | |v_i v_j| > 0, j = 1, 2, \dots, M\} \quad (4)$$

2) 由与顶点 v_i 相连接的各项点 v_j 到模型重心距离的均值来确定顶点 v_i 的离散法向量,计算公式为

$$\alpha_{v_i} = \frac{\sum_{v_j \in N(v_i)} (v_j - v_c)}{N_i} \quad (5)$$

式中, N_i 是第 i 个集合中顶点数目, v_c 是模型重心。

3) 根据该顶点和与其连接的其他顶点的离散法向量之间的夹角和来估算出法线方向变化剧烈的区域,计算公式为

$$D(v_i) = \sum_{v_j \in N(v_i)} \arccos(\alpha_{v_i} \cdot \alpha_{v_j}) \quad (6)$$

式中, $\arccos(\alpha_{v_i} \cdot \alpha_{v_j})$ 是顶点的离散法向量和其邻域顶点的离散法向量之间的夹角,将 $D(v_i)$ 降序排列, $D(v_i)$ 较大的表示该点的法向量变化比较大。

将每个区域内的顶点进行上列的步骤,并将求得的 $D(v_i)$ 进行降序排列,可得前 b 个 $D(v_i)$ 值所对应的顶点作为该区域的局部特征点。

2.3 水印嵌入

根据上述步骤可以得到每个区域内的局部特征点和非局部特征点,将特征点模长与其他非局部特征点的模长均值的比值作为水印嵌入基元。

1) 根据 θ 和 φ 分割网格模型的原则,按间隔度 $d\theta$ 和 $d\varphi$ 将模型划分成 $N \times N$ 个区域,在每个区域中提取 b 个特征点,第 (i, j) 区域第 k 个局部特征点的模长与非局部特征点的模长均值的比值记为 $P_{i,j,k}$ ($1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq b$),并将这些值存入一个 $N \times N \times b$ 的矩阵 I 中,其矩阵形式为

$$I = \begin{bmatrix} p_{1,1,1} & p_{1,1,2} & \cdots & p_{1,1,b} & p_{1,2,1} & \cdots & p_{1,2,b} & \cdots & p_{1,N,1} & \cdots & p_{1,N,b} \\ p_{2,1,1} & p_{2,1,2} & \cdots & p_{2,1,b} & p_{2,2,1} & \cdots & p_{2,2,b} & \cdots & p_{2,N,1} & \cdots & p_{2,N,b} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{N,1,1} & p_{N,1,2} & \cdots & p_{N,1,b} & p_{N,2,1} & \cdots & p_{N,2,b} & \cdots & p_{N,N,1} & \cdots & p_{N,N,b} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2) 将密钥 K 作为随机数产生长度为 m 的水印信息 $w = (w_0, w_2, \dots, w_{m-1})$ 。

3) 设矩阵 I 有 l 行 c 列, 其中 $1 \leq l \leq N, 1 \leq c \leq Nb$, 对矩阵 I 做 DWT 变换, 记为 $I_{\text{DWT}}(l, c)$ 。 $I_{\text{DWT}}(l, c)$ 是由各级的小波子带组成, 分别为 $I_{\text{DWT}}(l, c)_{\text{LL}}, I_{\text{DWT}}(l, c)_{\text{HL}}, I_{\text{DWT}}(l, c)_{\text{LH}}, I_{\text{DWT}}(l, c)_{\text{HH}}$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 表示小波分解的级数。LL, HL, LH, HH 分别是小波变换的低—低频子带, 高—低频子带, 低—高频子带和高—高频子带, 水印将嵌入在 $I_{\text{DWT}}(l, c)_{\text{HL}}, I_{\text{DWT}}(l, c)_{\text{LH}}, I_{\text{DWT}}(l, c)_{\text{HH}}$ 子带的系数上, 这有利于水印算法的不可见性。

将各级需要嵌入水印的小波系数依次提取并形成 1 维数列 I_{DWT_j} , 其中 $j = 1, 2, \dots, H, H$ 是提取的各级小波系数的数目, 对 I_{DWT_j} 进行水印嵌入, $n = \lfloor \frac{H}{m} \rfloor$ 为水印重复嵌入次数, 嵌入公式为

$$\begin{cases} I'_{\text{DWT}_j} = I_{\text{DWT}_j} + a |I_{\text{DWT}_j}| & w_{(j-1)\%m} = 1 \\ I'_{\text{DWT}_j} = I_{\text{DWT}_j} - a |I_{\text{DWT}_j}| & w_{(j-1)\%m} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, a 为水印的嵌入强度。

4) 通过对嵌入水印后的小波系数进行逆变换得到含有水印的矩阵 I' , 矩阵 I' 相应位置上的数值为 $p'_{i,j,k}$, 其中 $1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq b$, 最终通过修改特征点的模长来嵌入水印, 即

$$r'_{i,j,k} = \frac{p'_{i,j,k}}{p_{i,j,k}} r_{i,j,k} \quad (9)$$

式中, $r'_{i,j,k}$ 为嵌入水印矩阵中第 (i, j) 区域中的第 k 个特征点的模长, $r_{i,j,k}$ 为原始矩阵中第 (i, j) 区域中的第 k 个特征点的模长, $p'_{i,j,k}$ 为嵌入水印矩阵中第 (i, j) 区域中的第 k 个上的数值, $p_{i,j,k}$ 为原始矩阵第 (i, j) 区域中的第 k 个上的数值。

通过上述步骤则可以得到含有水印的 3 维网格模型。

2.4 水印检测

当嵌入水印的 3 维模型产生版权纠纷时, 可以利用水印检测算法提取出 3 维模型中嵌入的水印并对之进行验证, 从而解决版权的归属问题。在水印检测时, 需要提供原始模型和原始水印的长度。

1) 重定位。如果待检测模型遭受了平移、旋转

或均匀缩放攻击等仿射变换时, 模型会发生变化, 在提取前需要对 3 维模型进行重定位, 使之恢复到原始位置、方向和尺度。采用文献[12]中的重定位算法对待测模型进行重定位, 网格定位算法是一个反复迭代的过程, 需要合理的初始条件, 重定位过程必须是在被检测模型和原始的未嵌入水印的模型之间进行。

2) 重采样。待检测模型经历了网格简化、剪切、顶点重排序或细分等处理或攻击后, 3 维网格模型的顶点数目、顶点顺序和拓扑结构均会发生改变, 而这些都是严重影响水印的提取结果, 所以在提取水印前需要对待检测模型进行重采样以得到与原始模型相同的顶点数目、顶点顺序和拓扑结构。采用文献[13]的方法对 3 维模型进行重采样, 即对原始模型的顶点, 从原始模型的中心引出一条到该顶点的射线与待检测模型进行相交, 如果存在交点, 则寻找最靠近该顶点的交点作为待检测模型上的匹配点, 否则, 直接以该顶点的坐标作为待检测模型上匹配点的坐标。

3) 将原始网格 M 和待检测网格 M' 都进行局部特征点提取, 并映射到 2 维平面, 得 2 维矩阵 I 和 I' , 则该矩阵每个元素的值都对应对应特征点模长与其同区域内其他非局部顶点模长均值的比值。

4) 对 I 和 I' 进行小波变换得到相应的变换系数 $I_{\text{DWT}}(l, c)$ 和 $I'_{\text{DWT}}(l, c)$ 。将低—高频子带, 高—低频子带和高—高频子带的小波系数组成 1 维数列 I_{DWT_j} 和 I'_{DWT_j} , 其中 $j = 1, 2, \dots, H$, 根据水印嵌入时的方法确定提取小波系数位置, 同时不存在 $I'_{\text{DWT}_j} - I_{\text{DWT}_j} = 0$ 的情况下, 提取水印信号, 即

$$\begin{cases} w_{((j/m)+1), (j-1)\%m} = 1 & I'_{\text{DWT}_j} - I_{\text{DWT}_j} > 0 \\ w_{((j/m)+1), (j-1)\%m} = 0 & I'_{\text{DWT}_j} - I_{\text{DWT}_j} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

根据式(10)可知, 同一位水印可以提取出 n 个数值, 如原始水印 w_0 可以提取出 $w_{1,0}, w_{2,0}, \dots, w_{n,0}$ 。对提取出的同一位水印上的数值进行统计, 若提取出 0 的个数大于 1 的个数, 那么该位水印为 0; 反之, 该位水印为 1。根据统计得出最终的水印序列。

5) 由于侵权者大都不会直接使用 3 维模型, 一般都会进行一些变换操作后再进行使用^[14], 因此提取出的水印信息与原始水印信息不是完全相同的,

为此,通过计算提取出的水印与原始水印的相关性来判断待检测模型是否嵌有原始水印信息,即

$$C(w^*, w) = \frac{\sum_{i=1}^N (w_i^* - \bar{w}^*)(w_i - \bar{w})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (w_i^* - \bar{w}^*)^2 \sum_{i=1}^N (w_i - \bar{w})^2}} \quad (11)$$

式中, $\bar{w}^*$ 和 $\bar{w}$ 分别是提取的水印信息 w^* 和原始水印信息 w 的均值。相关值越大,表明水印的相似度越高。通过实验,文中将相关性的阈值设置为 0.4,将检测的结果与指定的阈值进行比较,大于阈值时认为存有水印信息。

3 实验与分析

为检验本文水印算法的鲁棒性,使用 Stanford 的 rabbit 模型、Venus 模型和 head 模型在 AMD 处理器 4 G 内存的计算机上进行实验,使用 matlab7.9 和 vs2008 进行实现。rabbit 模型有 21 198 个顶点, Venus 模型有 30 229 个顶点, head 模型有 27 726 个顶点。在实验中,方阵的分区数 N 的取值不仅与实验模型的顶点数有关,且需要在 $N \times N$ 的方阵上进行多分辨率小波变换,则 N 的取值形式为 2^c , 其中 c 为自然数;局部顶点数 b 是为增加本实验的鲁棒性而设定的,需要综合各区域的顶点数而取值,且为 2 的倍数;水印的嵌入强度 a 越小,嵌入水印后的 3 维模型与原始模型的视觉差异越小,引入的误差也越小,但相应地会减弱算法的鲁棒性,反之,视觉差异增大,鲁棒性增强,所以水印的嵌入强度 a 的取值需要在实验中进行多次验证而得;在低分辨率的中高频和中分辨率的中高频系数上嵌入水印,所以水印的总长度就是这些中高频系数的个数。考虑各参数的理论要求,并通过实验的验证,各参数的取值分别为:方阵的分区数 $N=16$,局部顶点数 $b=4$,水印的嵌入强度 $a=0.05$,水印信号是 160 位的随机二值序列,重复嵌入次数 $n=6$ 。

3.1 不可见性

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,而本文算法中提取特征点的部分正是选择变化剧烈的区域,选取局部特征点进行水印嵌入,因此能在视觉上实现不可见

性。图 1 分别给出了 rabbit、head 和 Venus 3 种模型的原始模型和不同嵌入强度的水印模型,在嵌入强度为 0.05 时,3 种水印模型与原始模型在视觉上均没有任何差别,因而该水印算法对模型误差影响较小,在视觉上有很好的不可见性。

评价水印的不可见性,除了使用直接观察法,还通过计算信噪比 (SNR)^[13] 来体现嵌入水印后的模型与原始模型的近似程度,一般来说,SNR 越大,则水印嵌入对 3 维模型的影响就越小。

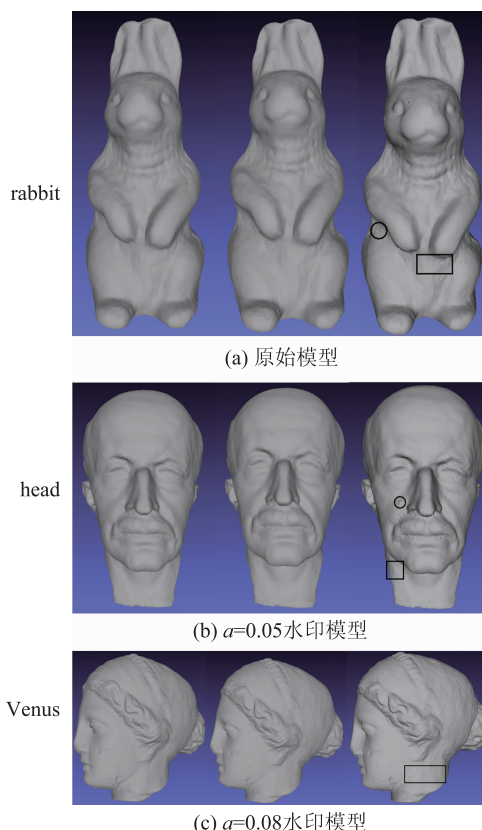


图1 原始模型与不同嵌入强度的水印模型
Fig. 1 Original models and watermarked models in different embedding intensity

水印嵌入对模型的变化量可以通过水印的嵌入强度 a 进行控制,在对水印的不可见性要求较高的情况下可以通过减小 a 来降低模型的形变,但随着 a 的减小,水印的鲁棒性也会降低,通过实验寻求不可见性和鲁棒性之间的平衡点,由图 1 中方框可知,当 3 种模型嵌入系数取 0.08 时模型均出现了局部变形情况,如表 1 所示,3 种模型的信噪比随嵌入强度 a 的增加,信噪比呈递减趋势,当信噪比过低时,水印将不能满足不可见性的要求。因此,通过具体实验验证,水印嵌入强度 a 取 0.05 时,能同时满足

不可见性和鲁棒性的要求。

表 1 嵌入水印后模型在不同嵌入系数下的信噪比
Table 1 SNR of watermarked models in different embedding coefficients

模型	嵌入系数 a	信噪比 SNR/dB
rabbit	0.01	79.65
	0.05	65.66
	0.08	65.54
head	0.01	81.55
	0.05	67.57
	0.08	63.48
Venus	0.01	85.04
	0.05	71.06
	0.08	66.98

3.2 鲁棒性

为了验证嵌入水印模型的鲁棒性,利用 LIRIS 实验室开发的 3D Mesh Watermarking Benchmark 软件对嵌入水印后的模型进行各种攻击,包括几何攻击、顶点重排序、剪切、简化、量化、细分、噪声和联合攻击等多种常见的攻击,将从攻击后模型中提取出的水印与原始模型进行比较,通过计算相关系数和位错误率 BER(错误的水印位数与水印总位数的比值 $\times 100\%$)来验证水印的鲁棒性。

1) 平移、旋转、缩放攻击。对平移、旋转、均匀缩放等攻击,由于在水印检测时对待测模型进行了

重定位,从而恢复到原始的位置、方向和尺度,因此在经历这类攻击后,水印能够全部正确提取出来。

2) 顶点重排序。本文提取的特征点只与局部粗糙程度有关,与顶点的顺序无关,经过顶点重排序,攻击模型的拓扑结构并未改变,受攻击模型仍然能够提取正确的局部特征点,因此嵌入在局部特征点上的水印能够全部正确提取出来。

3) 噪声、量化攻击。噪声攻击实验,对 3 维网格模型的顶点坐标添加一个均匀的随机噪声,噪声向量的方向是随机的,噪声的幅度定义为噪声向量的长度与网格顶点到网格中心距离的比值^[15],它体现了噪声的强弱,本实验中的噪声强度分别在 0.05%~0.8% 中任意取值,3 种模型在不同噪声强度下的实验结果如表 2 所示。表 2 表明该算法对噪声有较强的鲁棒性,其中 head 模型对噪声的鲁棒性强于其他两种模型,即在噪声强度为 0.8% 时,提取出的相关值为 0.55。

对于量化攻击,将 3 维模型顶点坐标分别压缩至 11 bit、9 bit、8 bit、7 bit,实验结果如表 2 所示。从实验结果可知,3 种模型在量化值为 8 bit 时,提取出的水印相关值均大于 0.5,量化值为 7 bit 时,模型的质量已经遭到了严重的破坏,模型也失去了实用价值,但从待检测模型中提取出的相关值均在阈值以上,因此该算法对量化攻击具有一定的鲁棒性,其中 Venus 在相同量化值时提取出的水印相关值最高,即 Venus 对量化的鲁棒性最强。

表 2 噪声、量化攻击实验结果
Table 2 Results of the noise and quantization attacks

攻击类型与强度	rabbit 模型		Venus 模型		head 模型	
	相关值	位错误率/%	相关值	位错误率/%	相关值	位错误率/%
噪声 0.05%	1.0	0	1.0	0	1.0	0
噪声 0.1%	0.93	3.75	0.95	2.5	1.0	0
噪声 0.3%	0.75	12.5	0.81	10.0	0.83	8.12
噪声 0.5%	0.62	19.4	0.69	15.0	0.72	13.8
噪声 0.8%	0.43	28.8	0.49	25.6	0.55	22.5
量化 11 bit	0.93	3.75	0.98	1.25	0.95	2.5
量化 9 bit	0.71	13.8	0.78	10.6	0.75	12.5
量化 8 bit	0.59	21.3	0.66	17.0	0.64	18.0
量化 7 bit	0.45	27.5	0.52	23.8	0.49	25.7

4) 剪切、简化和细分攻击。对于剪切攻击, 将 3 维模型分别剪切 10%、30%、50%、70%, 实验结果如表 3 所示。该结果充分说明该算法对剪切具有较强的鲁棒性, 在剪切率为 70% 时, 相关值均大于 0.5, 其中 head 模型在剪切率为 70% 时, 取得的相关值为 0.65。

对于细分攻击, 分别采用中点细分、sqrt3 细分和 loop 细分 3 种策略分别对 3 维模型进行细分, 实验结果如表 3 所示。该 3 种模型对 3 种不同类型的

细分所提取出水印的相关值均大于 0.8, 即该算法对细分具有较强的鲁棒性, head 模型对细分攻击的抵抗力最强, 相关值均在 0.9 以上。

对于简化攻击, 将 3 维模型顶点数目分别简化 10%、30%、50%、70%, 实验结果如表 3 所示。在简化率为 70% 时, Venus 提取出的水印的相关值能达到 0.8, 表明该算法对简化攻击的鲁棒性较强, Venus 对简化攻击的鲁棒性最强, 在简化率为 97.5% 时, 提取水印的相关值为 0.68。

表 3 剪切、细分、简化攻击实验结果
Table 3 Results of the cropping, subdivision and simplification attacks

攻击类型与强度	rabbit 模型		Venus 模型		head 模型	
	相关值	位错误率/%	相关值	位错误率/%	相关值	位错误率/%
剪切 10%	1.0	0	1.0	0	1.0	0
剪切 30%	0.90	5.0	0.91	4.38	0.93	3.75
剪切 50%	0.80	10.0	0.79	10.3	0.80	10.0
剪切 70%	0.52	23.8	0.5	25.0	0.65	17.5
中点细分	1.0	0	1.0	0	1.0	0
Sqrt3 细分	0.95	2.5	0.98	1.25	1.0	0
Loop 细分	0.86	6.88	0.89	5.63	0.93	3.75
简化 10%	0.91	4.38	1.0	0	0.96	1.88
简化 30%	0.89	5.62	0.95	2.5	0.91	4.38
简化 50%	0.80	10.0	0.90	5.0	0.83	8.75
简化 70%	0.65	17.5	0.80	10.0	0.74	13.8

5) 联合攻击。对 head 模型采用剪切攻击和噪声攻击、简化攻击和噪声攻击这两种类型的混合攻击, 基于该算法分别进行了 4 种情况的实验, 实验结果如表 4 所示, 在经历了如表 4 所示的两种类型的联合攻击, 提取出的相关值均大于本文的阈值, 表明本文算法对这两种组合的联合攻击具有一定的鲁棒性, 且由表 4 中的结果可知, head 模型抵抗剪切加噪声的联合攻击比简化加噪声的联合攻击要强一些。

3.3 相关算法比较

目前小波变换主要集中在处理数字图像水印和视频水印, 由于 3 维模型自身的一些特点, 现有网格频谱分析方法仍不完善, 所以运用小波变换对 3 维模型嵌入水印的算法并不多, 将本文算法与近年来的小波变换处理的变换域水印算法^[5,7,9-10]进行比较,

表 4 head 模型的联合攻击的实验结果
Table 4 Results of the combination attacks

联合攻击的类型与强度	相关值	位错误率/%
剪切 10% + 噪声 0.1%	0.90	5.0
剪切 30% + 噪声 0.1%	0.79	10.3
剪切 50% + 噪声 0.1%	0.61	19.4
剪切 70% + 噪声 0.1%	0.49	25.6
简化 10% + 噪声 0.1%	0.89	5.63
简化 30% + 噪声 0.1%	0.74	13.8
简化 50% + 噪声 0.1%	0.57	21.9
简化 70% + 噪声 0.1%	0.41	29.4

文献[5]是对小波系数的统计特性进行实验分析, 并选择在低频子带的小波系数中嵌入水印, 但该算

法只针对半规则的多分辨率网格进行小波变换,只能抵抗几何攻击、噪声攻击等攻击类型;文献[7]基于小波变换的3维不规则网格水印,该算法应用不规则小波分析处理规则或不规则三角形网格,在合适的分辨率的小波系数上嵌入水印,该算法可以适用于不规则三角形网格,但必须是三角形网格的模型,能抵抗几何攻击、噪声攻击、量化攻击等攻击类型;文献[9]基于小波变换的3维模型水印算法,该算法是结合标准模型、顶点聚类 and DWT 处理3维网格模型,该算法可以适用于任意网格形状的3维模型,但只能抵抗几何攻击、剪切攻击等类型;文献[10]基于小波变换的3维网格数字水印技术,提取模型中

的显著区域,并在球面坐标下进行小波变换,在低频和高频系数下嵌入水印,该算法适用于任意网格形状的3维模型,但只能抵抗几何攻击、噪声攻击、剪切攻击等类型;本文基于局部特征点的变换域算法,将3维模型的局部特征点映射在2维平面进行水印的嵌入,通过多分辨率小波变换,在低分辨率的中高频和中分辨率的中高频系数中分别嵌入水印,该算法适用于任意网格形状的3维模型,且能抵抗几何攻击、顶点重排序、噪声攻击、量化攻击、剪切攻击、细分攻击、简化攻击和联合攻击类型。具体的对比结果如表5所示,由表5可知,本文算法不仅可以适用于任意网格形状的3维模型,且抵抗的攻击类型最多。

表5 算法比较
Table 5 Algorithm comparison

攻击类型及网格形状要求	算法				
	文献[5]	文献[7]	文献[9]	文献[10]	本文
几何攻击	√	√	√	√	√
顶点重排序	×	×	×	×	√
噪声攻击/%	0.05	0.5	×	0.5	0.8
量化攻击/bit	×	7	×	×	7
剪切攻击/%	×	×	59.76	50	70
细分攻击	×	×	×	×	√
简化攻击/%	×	×	×	×	90
联合攻击	×	×	×	×	√
网格形状	半规则三角形	任意三角形	任意形状	任意形状	任意形状

注:√表示可抗,×表示不可抗,数值为可抗该攻击类型的最大值

4 结 论

本文算法是在变换域内基于离散小波变换系数嵌入水印,将3维模型的数据通过区域划分成一个个小网格区域,通过求取区域的局部特征点与其非局部特征点的比值作为2维平面的映射基元,在2维平面内通过小波系数进行水印的嵌入,实验结果表明该算法具有较强的鲁棒性和不可见性,且对网格形状无严格要求,能够不受平移、旋转、均匀缩放和顶点重排序的影响,对噪声、简化攻击表现出极强的鲁棒性,并能有效抵抗剪切、细分、量化和联合攻击等一系列的常见攻击。该算法是对3维网格模型在球面坐标系下进行均匀分区,该划分方法对顶点

分布不均匀的模型也同样适用,但是在分区数一定的情况下,该方法对模型的总顶点数有一定的要求,当模型的总顶点数过少以致某些分区区域的顶点数为零时,需要更改模型的分区数。下一步的工作重点是改进区域自适应划分问题,排除分区区域的顶点数出现为零的情况,根据模型的顶点数目和分布状况,能自适应地得出划分的区域数,并解决区域内顶点数的均衡问题。

参考文献 (References)

[1] Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking three-dimensional polygonal models[C]//Proceedings of ACM Multimedia. New York, USA: ACM Press, 1997: 261-272.

- [2] Porwik P, Lisowska A. The haar wavelet transform in digital image processing: its status and achievements [J]. Machine Graphics & Vision, 2004, 3(1-2): 79-98.
- [3] Alwakeel M. Face recognition based on haar wavelet transform and principal component analysis via levenberg-marquardt back-propagation neural network [J]. European Journal of Scientific Research, 2010, 42(1): 25-31.
- [4] Kanai S, Date H, Kishinami T. Digital watermarking for 3-D polygons using multi-resolution wavelet decomposition [C]// Proceedings of Int. Workshop Geometric Modeling: Fundamentals and Applications. Tokyo, Japan: [s. n.], 1998: 296-307.
- [5] Xie S J, Zhang H B, Liu B. Robust mesh watermarking using wavelet transform [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(10): 1387-1394. [谢守江, 张鸿宾, 刘波. 基于小波变换的3维网格数字水印 [J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(10): 1387-1394.]
- [6] Wang K, Lavou G, Denis F, et al. Hierarchical watermarking of semi-regular meshes based on wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2008, 3(4): 620-634.
- [7] Hachani M, Zaid A O. Wavelet based on watermarking on 3D irregular meshes [C]// Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference. Bucharest, Romania; EURASIP, 2012: 1742-1746.
- [8] Liu C C, Chen J Y. A watermarking scheme for 3D models using haar discrete wavelet transform [J]. International Symposium on Computer Communication Control and Automation, 2010, 1: 244-247.
- [9] Chen J Y, Liu C C, Chung P C, et al. A watermarking algorithm for three dimensional models using discrete wavelet transforms [C]// International Symposium on Computer, Consumer and Control. Taichung: IEEE, 2012: 874-877.
- [10] Zhang J H, Wen X B, Lei M, et al. Robust approach of 3D mesh watermarking in wavelet domain [J/OL]. 2012-08-16 [2013-05-26]. Computer Engineering and Applications, China. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20120816.1423.029.html> [张建海, 温显斌, 雷鸣, 等. 基于小波变换的3维网格数字水印技术研究 [J/OL]. 计算机工程与应用. 2012-08-16 [2013-05-26]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20120816.1423.029.html>]
- [11] Liu Q, Yang L. Watermarking of 3D polygonal meshes based on feature points [C]// Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Harbin, China: IEEE 2007: 1837-1841.
- [12] Ying S H, Peng J G, Du S Y. A scale stretch method based on ICP for 3D data registration [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2009, 6(3): 559-565.
- [13] Wang X Y, Zhan Y Z. A robust watermarking scheme for 3D models based on vertex norm [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2011, 32(6): 695-700. [王新宇, 詹永照. 基于顶点范数的3维模型鲁棒数字水印算法 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2011, 32(6): 695-700.]
- [14] Du S, Zhan Y Z, Wang X Y. A zero watermarking algorithm for 3D mesh models based on shape diameter function [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(5): 653-658. [杜顺, 詹永照, 王新宇. 基于形状直径函数的3维网络模型零水印算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(5): 653-658.]
- [15] Zhang J, Zheng G Q. A geometry property based on watermarking scheme for three dimensional meshes [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(4): 740-747. [张静, 郑国勤. 基于几何特征的3维网格数字水印算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(4): 740-747.]