

中国图形学象报

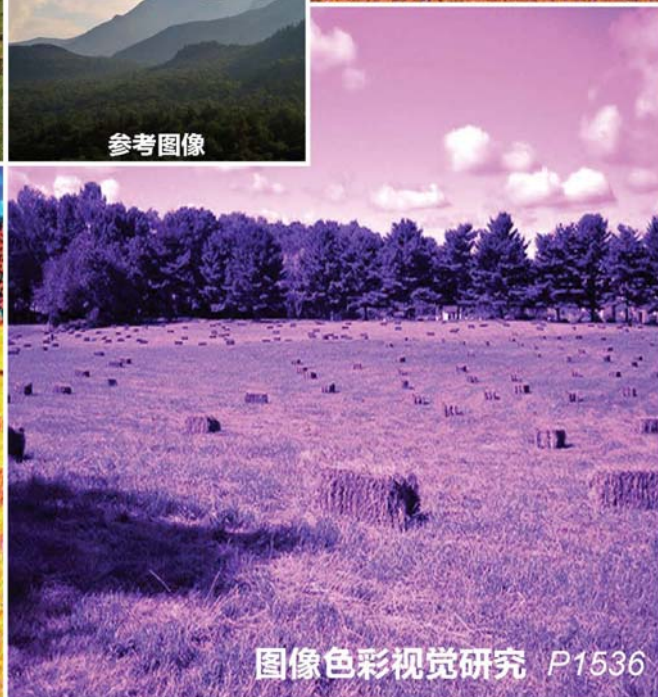
2013
11
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758 /TB



原始图像

参考图像



图像色彩视觉研究 P1536

中国图象图形学报

刊名题字：宋健 | 月刊（1996年创刊）



第18卷第11期（总第211期）

2013年11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

2013 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 010-82614429

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 010-82614429

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

综述

- 多媒体技术研究: 2012——多媒体数据索引与检索技术研究进展
中国计算机学会多媒体专业委员会 1383

图像处理和编码

- 热扩散和整体变分模型自适应调整的图像放大模型
王相海, 艾新南 1398
- 椒盐图像的方向加权均值滤波算法
李佐勇, 汤可宗, 胡锦涛, 林亚明 1407
- 3维自适应最小误差阈值分割法
刘金, 金炜东 1416
- 结构约束和样本稀疏表示的图像修复
康佳伦, 唐向宏, 任澍 1425
- 结合小波变换和自适应分块的多聚焦图像快速融合
刘羽, 汪增福 1435

图像分析和识别

- 飞行时间3维相机的多视角散乱点云优化配准
张旭东, 吴国松, 胡良梅, 王竹萌, 邱维巍 1445
- 采用独立色素浓度分布分割皮损图像
徐舒畅 1452
- 基于CUDA的并行加速渲染算法
刘镇, 郝冬宁, 梅向东 1457
- 连续最大流图像分割模型及算法
杨晓艺, 王小欢, 宋锦萍 1462
- 词袋特征压缩算法比较研究
杨赛, 赵春霞 1468

图像理解和计算机视觉

- 融合对象性和视觉显著度的单目图像2D转3D
袁红星, 吴少群, 朱仁祥, 安鹏 1478

计算机图形学

- 多风格融合的复杂森林场景自适应可视化
董天阳, 夏佳佳, 范菁 1486

遥感图像处理

- 保留结构细节的遥感海表温度图像的采样与重构
崔雪森, 杨胜龙, 伍玉梅, 戴阳, 范秀梅 1497
- 组合四相机拼接影像的颜色平衡
任超锋, 姚娜, 林宗坚 1504
- 复杂背景下多样水体遥感自动解译
夏列钢, 沈占锋, 李均力, 骆剑承 1513

“第十届全国智能CAD与数字娱乐会议”专栏

- 3D树木建模技术研究进展
谭云兰, 贾金原, 张晨, 李光耀 1520
- 网格分割的3维网格模型非盲水印算法
杜顺, 詹永照, 王新宇 1529
- 基于放缩系数和均值的多参数颜色迁移
王世亮, 徐岗, 储清林, 胡维华, 汪国昭 1536
- 基于参考图像的色粉画模拟
郑智斌, 张岩, 孙正兴, 杨克微 1542



融合对象性和视觉显著度的单目图像2D转3D(第1478页)



网格分割的3维网格模型非盲水印算法(第1529页)



基于参考图像的色粉画模拟(第1542页)

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Single-view image 2D-to-3D conversion based on objectness and visual saliency(P1478)



Non-blind watermarking algorithm for 3D mesh models based on mesh segmentation(P1529)



Color transfer with multiple parameters by combining the scaling and mean values(P1542)

Review

- Researches on multimedia technology, 2012
Multimedia data indexing and retrieval technology: a review
CCF Multimedia Technology Committee 1383

Image Processing and Coding

- Image magnification model based on adaptive adjustment of thermal diffusion and TV model
Wang Xianghai, Ai Xinnan 1398
Directional weighted mean filter for image with salt & pepper noise
Li Zuoyong, Tang Kezong, Hu Jinmei, Lin Yaming 1407
Three-dimensional adaptive minimum error thresholding segmentation algorithm
Liu Jin, Jin Weidong 1416
Image inpainting by structural constraints and sample sparse representation
Kang Jialun, Tang Xianghong, Ren Shu 1425
Multi-focus image fusion based on wavelet transform and adaptive block
Liu Yu, Wang Zengfu 1435

Image Analysis and Recognition

- Multi-view scattered point cloud optimization registration using a TOF camera
Zhang Xudong, Wu Guosong, Hu Liangmei, Wang Zhumeng, Di Weiwei 1445
Skin lesion segmentation by using independent pigment concentration distribution
Xu Shuchang 1452
Based on the parallel rendering algorithm in CUDA
Liu Zhen, Hao Dongning, Mei Xiangdong 1457
Image segmentation model and algorithm based on continuous max-flow approach
Yang Xiaoyi, Wang Xiaohuan, Song Jinping 1462
Comparative research on compression algorithms of bag-of-features
Yang Sai, Zhao Chunxia 1468

Image Understanding and Computer Vision

- Single-view image 2D-to-3D conversion based on objectness and visual saliency
Yuan Hongxing, Wu Shaoqun, Zhu Renxiang, An Peng 1478

Computer Graphics

- Adaptive visualization of multi-style composition for complex forest scene
Dong Tianyang, Xia Jiajia, Fan Jing 1486

Remote Sensing Image Processing

- Structural detail-reserving method of sampling and reconstruction of remote sensing SST image
Cui Xuesen, Yang Shenglong, Wu Yumei, Dai Yang, Fan Xiumei 1497
Color balancing of the stitched images of a combined four-head camera
Ren Chaofeng, Yao Na, Lin Zongjian 1504
Automatic interpretation of diverse water bodies from remotely sensed images in complex background
Xia Liegang, Shen Zhanfeng, Li Junli, Luo Jiancheng 1513

Issum of CIDE' 2013

- Survey on Virtual 3D Tree Modeling Technologies
Tan Yunlan, Jia Jinyuan, Zhang Chen, Li Guangyao 1520
Non-blind watermarking algorithm for 3D mesh models based on mesh segmentation
Du Shun, Zhan Yongzhao, Wang Xinyu 1529
Color transfer with multiple parameters by combining the scaling and mean values
Wang Shiliang, Xu Gang, Chu Qinglin, Hu Weihua, Wang Guozhao 1536
Image-based pastel simulation
Zheng Zhibin, Zhang Yan, Sun Zhengxing, Yang Kewei 1542

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)11-1529-07

论文引用格式: 杜顺, 詹永照, 王新宇. 网格分割的 3 维网格模型非盲水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(11): 1529-1535. [DOI: 10.11834/jig.20131118]

网格分割的 3 维网格模型非盲水印算法

杜顺, 詹永照, 王新宇

江苏大学计算机科学与通信工程学院, 镇江 212013

摘要: 信息技术的发展使得面向 3 维模型版权保护的问题越来越突出, 提出一种新的基于网格分割的 3 维网格模型非盲水印算法。首先使用基于形状直径函数的网格分割算法对 3 维网格模型进行有意义的网格分割, 然后计算每个分块的鲁棒重心并以此为中心将模型由直角坐标系转换到球面坐标系, 最后通过调制每个顶点范数的分布来嵌入水印, 在水印检测阶段使用非盲检测的方法提取水印。针对目前基于网格分块的水印算法其网格分割不一致以及对分割边界依赖性过强等问题, 引入基于形状直径函数的网格分割算法并在重对齐、重采样过程中加入待检测模型与原始模型分块匹配过程以保证网格分割的一致性, 并且选取分块的顶点范数的分布作为水印嵌入基元, 使得算法能够有效地减弱对分割边界的依赖性。实验结果表明, 该算法可以有效抵抗平移、旋转、缩放、噪声、细分、简化、剪切等常见的攻击以及多种攻击的联合攻击。

关键词: 非盲水印; 网格分割; 顶点范式分布; 鲁棒水印

Non-blind watermarking algorithm for 3D mesh models based on mesh segmentation

Du Shun, Zhan Yongzhao, Wang Xinyu

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

Abstract: The issue of copyright protection for 3D models is increasing prominently with the development of information technology. A non-blind watermarking algorithm for 3D mesh models based on mesh segmentation is presented. First, meaningful mesh segmentation on 3D mesh model is conducted using the mesh segmentation algorithm based on shape diameter function. Then, the robust center of gravity for each sub-block is calculated which is used as the center to transform the model to the spherical coordinate system from the Cartesian coordinate system. Finally, watermark sequence is embedded by modulating the distribution of vertex norms for each sub-block. In watermark detection, a non-blind method is used to detect the watermark sequence. Aiming at the problems of inconsistent mesh segmentation and the strong dependence on the patch boundary in current watermarking algorithms based on mesh patching, a mesh segmentation algorithm is introduced in and a block matching process with an original model is added to the register and resample process to ensure the consistency of the mesh segmentation. Furthermore, the distribution of vertex norms for each sub-block is chosen to be the watermark embedding primitive, which can weaken the dependence on the patch boundary. Experimental results show that the proposed algorithm can resist a variety of common attacks including translating, rotating, uniform scaling, noise adding, mesh subdivision, mesh simplification, mesh cropping and their combined attacks.

Key words: non-blind watermarking; mesh segmentation; distribution of vertex norms; robust watermarking

收稿日期: 2013-04-10; 修回日期: 2013-06-08

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: 杜顺(1988—), 男, 江苏大学计算机应用技术专业在读硕士研究生, 主要研究方向为计算机图形学。E-mail: dushun1000@163.com

0 引言

数字水印作为数字产品版权保护技术之一,近20年来发展迅速,Ohbuchi等人^[1]首次提出3维模型数字水印的思想,标志着数字水印技术的研究开始从音频、图像等1、2维媒体拓展到3维网格模型领域。随着研究人员的不断探索与研究,涌现了不少针对3维数字水印的算法^[2-4]。与2维图像相比,由于3维模型数据结构的复杂性,3维水印常表现出对水印嵌入后模型的形变较大、受到攻击后水印信息丢失严重以及受到攻击后水印提取与嵌入不一致等问题。

3维模型非盲水印算法是指在水印检测阶段可以使用原始模型数据作为参考的一类水印算法,虽然此类算法需要耗费一些存储资源来保存原始模型数据,但在存储资源低廉的现今这已不再是问题,并且由于水印检测时可以有更多的信息作为参考,使得此类算法有着较高的鲁棒性。

由于全局的水印算法对剪切攻击的鲁棒性不高,因此人们提出了基于分块的水印算法,主要思想是先将3维模型分割或提取出若干个分块,然后将水印数据分别嵌入到不同分块中,即每个分块都有一组或若干组水印数据,在水印提取时,只要有若干分块保存完整,那么就能够从这些分块中提取出完整的水印信息。Jabra等人^[3]在3维网格模型上提取出3块最稳定的区域(MSMs),然后在这3块区域内分别嵌入基于几何、拓扑与频率的3种不同类型的水印,提取水印时,只要从这3块网格区域提取出一组水印信息就能证明3维模型的版权所有。Al-face等人^[4]提出的以凸出特征点为中心、以一定测地距离为半径在3维网格模型上划分出若干个待嵌入水印分块,以每个区域不相交为原则来确定分块的半径,并根据每个分块中的顶点数据计算分块重心,通过调制分块中每个顶点到其重心的距离来嵌入水印序列。Tsai等人^[2,5]通过3维网格模型分割算法将模型分割成有意义的分块,然后以分割边界作为测地距离起始边界计算分块中顶点到边界的测地距离,最后通过调制分块中每个顶点的测地距离来嵌入水印序列。

通常此类基于分块的3维网格水印存在以下问题:1)在模型受到攻击后,提取水印时进行的网格分割不能得到一个与嵌入水印时完全一致的分块结

果,尤其在发生网格剪切时。2)网格分割的方法一般不能保证分块模型的边界问题,因为边界上多一个点或少一个点对网格分割在视觉上不会造成影响,因此对于依赖模型分割边界的水印算法会因为边界分割略微不一致而导致提取的水印数据不准确。

针对这些问题,提出一种基于网格分割的3维网格模型非盲水印算法:首先,使用基于形状直径函数的网格分割算法对3维网格模型进行有意义分割;然后,对每个分块计算鲁棒重心,并以此重心为中心将分块由直角坐标系转换成球面坐标系;最后,通过调制每个分块中的顶点范数分布来嵌入水印。在水印检测阶段使用非盲提取的方法检测水印,对待检测模型与原始模型进行重对齐、重采样操作并确定待检测模型的分块信息后再进行水印提取。

1 网格模型分割

网格分割作为本文水印算法的预处理步骤,必须分割结果是稳定的、分块数是固定的以及分块边界是明确的。文献[5]中将网格模型进行多维尺度(MDS)变换后提取凸出特征点,并作球面镜像操作得到粗分割结果,再精细化得到最终分割结果^[6],该方法仅仅适用于链式模型,并且提取的凸出特征点不同会导致分割的结果不同,而特征点提取的一致性又难以控制。

采用基于形状直径函数(SDF)的分割算法对模型进行有意义分割,此算法由Shapira等人^[7]首先提出,3维网格模型,可以看做是由连续的2维网格表面包围起来的特定形状的空间,SDF可以用来表示3维模型体积到其包围网格表面的映射,可以直观地理解为模型局部形状的直径,所以此分割算法的使用范围不仅仅局限于链式模型,不会因为特征点提取而影响分割结果。根据文献[8],基于SDF的分割算法相较于其他分割算法在执行时间与分割效果上都有不错的表现。其具体分割算法步骤如下:

1) 计算形状直径值

对于一个面片,作一个以该面片中心为圆锥顶点、它的法向量的逆方向为中心线方向的圆锥体,从该顶点上引出若干条圆锥体范围内的射线交于模型的表面网格,通过构建八叉树结构来计算与网格相交的射线,去掉与顶点法线方向相同的射线(夹角小于90°认为是方向相同),取剩下长度在所有射线

长度中位数标准差之内的射线作加权平均,即得到该顶点的 SDF 值。根据实验的经验值,本文取圆锥角的角度为 120° 并均匀取 30 条射线进行计算。

2) GMM-EM 聚类

使用最大期望 (EM) 算法构建 3 维模型面片 SDF 值的柱状分布图^[9],用一个高斯混合模型 (GMM) 得到 k 个高斯分布^[10],将网格模型的所有面片聚类成 k 个聚类,在模型视图上表现为若干个分块,即得到网格的 k 层次的粗分块。

3) 切割边界精细化

对于有意义的分割问题,另一个重要问题是分割边界的平滑性以及如褶皱之类的局部特征是否保留,使用扩展的阿尔法图形切割算法 (alpha expansion graph-cut algorithm) 最小化能量函数^[11]来确定面片的归属,得到最终的边界。

2 基于网格分割的非盲水印算法

设二元组 $M = (V, F)$ 表示一个 3 维网格模型,其中 V 为 3 维模型的顶点信息, F 表示面片信息。在模型分割阶段将模型分割成若干个有意义分块,去除面片过少的分块,取 k 个分块嵌入水印,则每个分块可表示为 $M_\alpha = (V_\alpha, F_\alpha)$, $\alpha = 1, 2, \dots, k$, V_α 和 F_α 表示为第 α 个分块中的顶点与面片信息。

2.1 计算每个分块的鲁棒重心

对于均匀采样的网格模型(顶点在模型表面均匀分布),顶点坐标的平均值可以较为准确地表示模型的重心^[12-13]。但是一般情况下,网格模型都是不均匀采样的,这使得由此方法得到的模型重心会偏向于采样程度高的位置(即顶点密度大的区域),产生重心的偏差。因此加入面积因子来计算网格模型的重心,该方法得到的重心有更高的鲁棒性。对于每个分块 M_α 计算对应的鲁棒重心

$$m_\alpha = \frac{1}{S(M_\alpha)} \sum_{f_i \in M_\alpha} S(f_i) (A_i + B_i + C_i) / 3 \quad (1)$$

式中, m_α 表示模型分块 M_α 的重心, A_i, B_i, C_i 表示组成三角面片 f_i 的 3 个顶点坐标值, $S()$ 表示当前区域的面积。

2.2 计算分块中每个顶点的顶点范数

对于每个分块 M_α , 首先根据式(1)计算出鲁棒重心 $m_\alpha(x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha)$, 以 m_α 为中心将每个顶点 $v_i(x_i, y_i, z_i) \in M_\alpha$ 由笛系坐标系转换到球面坐标系 $v_i(\rho_i, \theta_i, \phi_i)$, 即

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_\alpha)^2 + (y_i - y_\alpha)^2 + (z_i - z_\alpha)^2} \quad (2)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{y_i - y_\alpha}{x_i - x_\alpha} \quad (3)$$

$$\phi_i = \cos^{-1} \frac{z_i - z_\alpha}{\sqrt{(x_i - x_\alpha)^2 + (y_i - y_\alpha)^2 + (z_i - z_\alpha)^2}} \quad (4)$$

单位化得到顶点范数

$$\rho_i = (\rho_i - \rho_{\min}) / (\rho_{\max} - \rho_{\min}) \quad (5)$$

式中, $\rho_{\max}$ 与 $\rho_{\min}$ 是分块 M_α 中所有点的 ρ 的最大值与最小值。

将分块 M_α 中所有顶点按照单位化后 ρ 的值划分成 L 个区间, 每个区间表示为 $I_j = [j \times \frac{1}{L}, (j+1) \times \frac{1}{L}]$, $j = 0, 1, \dots, L-1$, L 对应于水印序列长度。

2.3 水印嵌入

文献[2-3]通过调制分块中顶点到分块边界的测地距离分布来嵌入水印,边界点的选取对算法的影响非常大,而模型分割算法往往不能保证边界点的唯一性,因此本文选取基于分块顶点范数分布的方法^[12],此方法可有效地弱化分块边界点不唯一对整体算法的影响。

假设水印序列为 $W = (w_0, w_1, \dots, w_{L-1})$, $w_j \in \{-1, +1\}$, $0 \leq j \leq L-1$, L 为水印序列的长度,每个区间 I_j 嵌入一个水印位 w_j 。假设 $w_j = +1$, 其具体嵌入步骤如下:

1) 对区间 I_j 中的每个顶点 $v_p(\rho_p, \theta_p, \phi_p) \in I_j$ 的顶点范数进行单位化 $\rho_p = (\rho_p - \frac{j}{L}) \times L$;

2) 计算区间 I_j 中所有顶点范数的平均值 $\bar{\rho}_j$, 若 $\bar{\rho}_j > 0.5 + \Delta$, 则认为区间 I_j 已嵌入水印位 w_j , 进入步骤 4), 否则进入步骤 3);

3) 对于区间 I_j 中所有 $\bar{\rho}_j \leq 0.5 + \Delta$ (Δ 为水印强度 $0 < \Delta < 0.5$) 的顶点, 修改 ρ_p 使 $\rho_p = \sqrt{\rho_p}$, 转到步骤 2);

4) 对于区间 I_j 的所有顶点: $\rho_p = \rho_p \times \frac{1}{L} + j \times \frac{1}{L}$ 。

对于 $w_j = -1$ 的情况, 只须将步骤 2) 的判断条件 $\bar{\rho}_j > 0.5 + \Delta$ 改为 $\bar{\rho}_j < 0.5 + \Delta$, 以及将步骤 3) 中的判断条件 $\bar{\rho}_j \leq 0.5 + \Delta$ 改为 $\bar{\rho}_j \geq 0.5 + \Delta$ 和 $\rho_p = \sqrt{\rho_p}$ 改为 $\rho_p = \rho_p^2$ 即可。

对于分块 M_α 的每个区间 I_j 都处理完成后, 得到每个顶点新的球面坐标值 $v_i'(\rho_i', \theta_i, \phi_i)$, 还原 ρ_i' 为

$$\rho'_i = \rho'_i(\rho_{\max} - \rho_{\min}) + \rho_{\min} \quad (6)$$

并将球面坐标重新转换成直角坐标 $v'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$

$$x'_i = \rho'_i \cos \theta_i \sin \phi_i + x_\alpha \quad (7)$$

$$y'_i = \rho'_i \sin \theta_i \sin \phi_i + y_\alpha \quad (8)$$

$$z'_i = \rho'_i \cos \phi_i + z_\alpha \quad (9)$$

处理完所有模型分块,得到嵌入水印后的模型 M' ,发布的3维模型为嵌入水印后的模型 M' ,然后将原始模型以及分割参数一起进行保存,作为水印提取时的依据。

2.4 水印检测

当发布的3维模型出现版权纠纷时,就需要使用水印检测步骤来检测零水印信息。本文算法是一种非盲检测算法,需要使用存储的原始模型和分割参数作为水印检测的依据,检测过程类似于水印嵌入过程的逆过程。

1) 根据存储的原始网格模型和分割参数,使用基于 SDF 的分割算法进行有意义的划分,去除面片过少的分块得到 k 个分块,并对每个分块进行标记;

2) 将待检测模型与原始模型进行重定位与重采样操作,根据原始模型上的分块标记对待检测模型进行分块,得到待检测模型上的 k 个分块。本文算法不对待检测模型进行重新分割,而是对原始模型分割后,在进行重采样的同时进行分块的匹配,达到对待检测模型分割的结果,同时避免了嵌入与提取阶段分割不一致的问题;

3) 对于每个分块 $M'_\alpha, \alpha = 1, \dots, k$ 同样进行 2.1 节、2.2 节的操作,计算出鲁棒重心 $m'_\alpha(x'_\alpha, y'_\alpha, z'_\alpha)$,将每个顶点的直角坐标 $v_i(x_i, y_i, z_i) \in M'_\alpha$ 转换为球面坐标 $v_i(\rho_i, \theta_i, \phi_i)$,并将单位化后的顶点范数划分为 L 个区间,则每个区间可表示为 $I_j = [j \times \frac{1}{L}, (j+1) \times \frac{1}{L}]$, $j = 0, 1, \dots, L-1$, L 为水印序列长度;

4) 假设分块 M'_α 中待检测的水印信息为 $W'_\alpha = (w'_{\alpha 0}, w'_{\alpha 1}, \dots, w'_{\alpha(L-1)})$,计算得区间 I_j 中顶点范数的平均值为 $\bar{\rho}_j$,则检测出的水印位为

$$w'_{\alpha j} = \begin{cases} +1 & \bar{\rho}_j > (j+0.5) \times \frac{1}{L} \\ -1 & \bar{\rho}_j \leq (j+0.5) \times \frac{1}{L} \end{cases} \quad (10)$$

$$0 \leq j \leq L-1$$

5) 对每个分块都进行上述操作可以得出 k 个水印序列 $\{W'_\alpha | \alpha = 1, \dots, k\}$,对每个水印序列的同

一个水印位进行求和操作

$$\sum W'_\alpha = \left(\sum w'_{\alpha 0}, \sum w'_{\alpha 1}, \dots, \sum w'_{\alpha(L-1)} \right)$$

则每个水印位为

$$w'_j = \begin{cases} +1 & \sum w'_{\alpha j} \geq 0 \\ -1 & \sum w'_{\alpha j} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$0 \leq j \leq L-1$$

得到最终检测出的水印序列 $W^d = (w'_0, w'_1, \dots, w'_{L-1})$;

6) 引入相关性系数来表示检测水印与原始水印的相似度

$$R_{\text{Corr}}(W^d, W) = \frac{\sum_{i=0}^{L-1} (w_i^d - \bar{w}^d)(w_i - \bar{w})}{\sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (w_i^d - \bar{w}^d)^2 \sum_{i=0}^{L-1} (w_i - \bar{w})^2}} \quad (12)$$

式中, R_{Corr} 表示相关性系数, $\bar{w}^d$ 是检测水印序列的水印位 w_i^d 的平均值, $\bar{w}$ 是原始水印序列的水印位 w_i 的平均值。相关系数值越大,模型的相似度就越高。通常在验证版权信息的时候,可以给一个相关性系数阈值,大于这个阈值则证明待检测模型涉及了侵权,可以为版权保护提供一定的佐证。

3 实验及结果

本文算法程序是在英特尔酷睿双核 3 GHz 处理器、2 G 内存的计算机上,使用 vc++2008 开发平台以及 CGAL 开源图形库来实现的。选择 bunny、dinopet 等具有代表性的 3 维数据模型, bunny 有 34 835 个顶点与 69 666 个面片,其中 dinopet 有 3 916 个顶点与 7 828 个面片。在实验中,用密钥随机生成长度为 128 bit 的二值水印序列,并取水印强度 Δ 为 0.2。

3.1 模型分割效果

使用基于 SDF 的分割算法分别对模型 bunny 与 dinopet 进行有意义分割,如图 1 所示,图 1(a) 将 bunny 模型划分为 6 个分块,图 1(b) 将 dinopet 模型划分为 7 个分块(舍去面片过少的尾部,取 6 个分块嵌入水印)。

3.2 透明性实验

将模型分块后,在每个分块后嵌入水印,在空间上每个分块更加集中,调制顶点范数也更加细腻,对

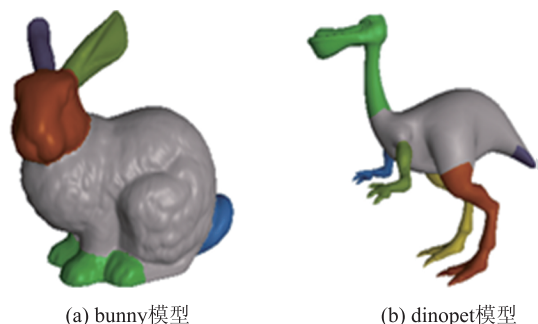


图1 3维模型的分割效果

Fig. 1 segmentation result of 3D models

模型的视觉改变更加细微。为比较视觉差别,主要从肉眼观察以及计算水印嵌入前后两模型之间的 Hausdorff 距离来量化透明性^[14]。假设 $h(A, B)$ 表示模型 A 到 B 的有向 Hausdorff 距离,则 A, B 之间的 Hausdorff 距离定义为

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (13)$$

由表1可以看出,水印嵌入前后两模型之间的视觉差别很小,对应的 Hausdorff 距离均低于平均邻接顶点的距离 0.000 36,因此具有很好的不可见性。

表1 水印嵌入前后的比较

Table 1 Comparison before and after embedding

	原始模型	嵌入水印后	Hausdorff 距离
bunny			0.000 21
dinopet			0.000 27

3.3 鲁棒性实验

为了验证本文算法的鲁棒性,对模型分别进行几何变换、网格简化、网格细分、随机噪声、网格剪切以及联合等多种攻击,将从受攻击模型中检测出来的水印序列与原始水印序列进行比较,通过计算相关系数 R_{Corr} 以及位错误率(BER)来验证水印的鲁棒性。

3.3.1 仿射与重排序攻击

对3维模型进行平移、旋转、均匀缩放之类的仿射攻击,由于选取的是分块的顶点范数分布作为数

据宿主,平移、旋转不影响顶点范数的值;而对均匀缩放攻击,由于有单位化操作,并且在非盲检测时会进行重对齐,所以在受到不同程度的均匀缩放攻击后仍能提取出完整水印序列。实验结果表明,对嵌入水印后的模型进行20%与500%均匀缩小与放大后,提取的水印与原始水印的相关值均为1。

对于顶点重排序攻击,由于本文算法与顶点排列顺序无关,因此此类攻击也对水印检测无影响,相关值同样为1。

3.3.2 简化与细化攻击

对于顶点面片数少的模型,侵权者常常会对模型进行细化操作来得到更细致的模型;而对于模型顶点面片数多的模型,又常常会对模型进行简化操作来使模型更为实用,这些操作会改变模型的采样程度并影响其拓扑结构。

由于简化攻击后网格模型的顶点数据仍能保持攻击前模型的顶点分布特征,而且本文算法在非盲检测阶段的重采样步骤中恢复网格的原始采样程度,并且顶点范数不依赖于网格的拓扑连接,使得本文算法抵抗简化和细分的性能更高。实验结果表明,文中算法能够抵抗简化与细化攻击,如表2所示。

3.3.3 剪切攻击

对模型进行剪切攻击,由于使用模型的分块作为算法执行的载体,因此只要在发生剪切后有一个或多个分块保存完好,那就能从保存完好的局部分块中提取出完整的水印信息。并且对于剪切攻击后的模型检测水印时,不对重采样阶段恢复的网格进行水印检测,而是只对剪切后剩余的分块检测水印,以保证不受恢复后的模型分块的影响。实验结果表明,本文算法能够抵抗较大程度的剪切攻击,如表2所示。

3.3.4 噪声攻击

对模型进行噪声攻击,对每个顶点坐标进行修改: $\mathbf{v}_i' = \mathbf{v}_i + a_i \cdot \bar{d} \times \mathbf{n}_i$, $\mathbf{v}_i$ 表示顶点坐标, $\mathbf{v}_i'$ 表示修改后的顶点坐标, a_i 表示 $[-A, A]$ 之间的一个随机数, A 是最大噪声强度, $\bar{d}$ 表示模型所有顶点到模型质心的平均长度, $\mathbf{n}_i$ 是 $\mathbf{v}_i$ 的单位法线向量。由于水印嵌入过程中使用统计的方法弱化了噪声的影响,实验结果表明,该算法能够有效抵抗噪声攻击,如表2所示。

3.3.5 联合攻击

为了破坏3维模型中的水印信息,往往不止对模型进行单一攻击,会进行多种攻击的联合攻击,而

由于联合攻击对模型进行多次攻击,破坏性比单一攻击要大的多。实验中,设计了3种联合攻击,如表2所示,简化80%加剪切75%攻击、剪切75%加噪声0.5%攻击、简化30%加噪声0.5%攻击以及简化30%加剪切75%再加噪声0.5%攻击,表2实验结果表明,本文算法对此类联合攻击有较强的鲁棒性。

表2 鲁棒性实验结果
Table 2 Results of robustness experiments

攻击类型	dinopet		bunny	
	R_{Corr}	BER/%	R_{Corr}	BER/%
简化30%	0.967	1.16	0.981	0.76
简化80%	0.813	7.85	0.873	5.23
细化	0.983	0.83	0.988	0.67
剪切30%	0.961	2.03	0.976	0.93
剪切75%	0.864	6.31	0.913	3.85
噪声0.5%	0.931	2.71	0.947	2.33
噪声1.0%	0.784	8.15	0.801	6.73
简化80%+剪切75%	0.793	8.35	0.843	6.81
剪切75%+噪声0.5%	0.857	6.67	0.867	6.25
简化30%+噪声0.5%	0.783	9.13	0.827	7.73
简化30%+剪切75%+噪声0.5%	0.765	10.25	0.783	9.53

3.4 相关水印算法的比较

将本文算法与文献[2,4-5]3种算法在相同的bunny模型上进行鲁棒性实验,表3列出这4种算法在抵抗简化、剪切、噪声以及联合攻击下的性能比较,以相关系数大于0.7作为可抗标准。由表3可以看出,在抵抗简化、剪切和噪声攻击的性能上,本文算法明显优于其他3种算法,并且在抵抗联合攻击上本文算法也表现出强于其他3种算法的鲁棒性。

表3 4种水印算法的鲁棒性比较
Table 3 Robustness comparisons of 4 kinds of watermarking algorithms

算法	可抗的简化强度/%	可抗剪切的强度/%	可抗噪声的强度/%	可抗联合攻击的程度
本文	80	75	1.0	较强
文献[2]	30	70	0.1	较弱
文献[5]	25	45	0.5	较弱
文献[4]	20	50	0.4	较弱

另外,本文选取的基于形状直径函数的分割算法对3维网格模型进行有意义划分,由于形状直径函数属于局部属性,相当于模型的局部直径,因此得到的分割结果稳定,不会因为特征点选择的问题而导致如文献[4-5]的分割结果不一致。而且,选取分块的顶点范数的分布作为水印嵌入基元,使用统计的方法,使得算法能够有效地避免基于分块的水印算法对分割边界的依赖性,克服了如文献[2,5]算法对分割边界依赖的弊端。最后,使用非盲检测的方法检测水印,使得算法在水印检测阶段更有参照性,并且在重采样阶段,通过对原始模型分块标记来分割待检测模型,使得水印嵌入与检测阶段的模型分割保持一致性。

4 结 论

面向3维网格模型的鲁棒非盲水印算法,通过对于模型分割后得到的每个分块以调制顶点范数分布的方法来嵌入水印序列。实验结果和分析表明,该3维网格模型非盲水印算法能够抵抗多种单一攻击手段,并且在受到多种攻击后的联合攻击下依然表现出良好的鲁棒性。虽然该算法使用非盲检测,需要保存原始模型数据,但应用于对精度要求较高的3维数字产品的版权保护中,这些存储资源的耗费是微不足道的。在下一步的工作中,将重点研究如何扩展此算法,更进一步地提高鲁棒性和实用性。

参考文献 (References)

[1] Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking three-dimensional polygonal models[C] //Proceedings of the 5th ACM International Conference on Multimedia. New York: ACM Press, 1997: 261-272.

[2] Tsai J S, Huang J T, Huang W B, et al. Geodesic-based robust blind watermarking method for three dimensional mesh animation by using mesh segmentation and vertex trajectory[C] //Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Kyoto: IEEE Press, 2012: 1757-1760.

[3] Jabra S B, Zagrouba E. A robust 3d mesh watermarking based on stable meshes detection and multi-signatures embedding[C] // Proceedings of the Fifth International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems. Marrakesh: IEEE Press, 2009: 192-199.

[4] Alface P R, Macq B, CAyre F. Blind and robust watermarking of 3d models: how to withstand the cropping attack? [C] //Pro-

- ceedings of the International Conference on Image Processing. San Antonio: IEEE Press, 2007: 465-468.
- [5] Tsai J S, Liao M C, Huang W B, et al. Geodesic distance-based pose-invariant blind watermarking algorithm for three-dimensional triangular mesh model [C] // Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Image Processing. Hong Kong, China: IEEE Press, 2010: 209-212.
- [6] Katz S, Leifman G, Tal A. Mesh Segmentation using feature point and core extraction [J]. The Visual Computer, 2005, 21 (8-10) : 649-658.
- [7] Shapira L, Shamir A, Cohen-Or D. Consistent mesh partitioning and skeletonisation using the shape diameter function [J]. The Visual Computer, 2008, 24 (4) : 249-259.
- [8] Chen X, Golovinskiy A, Funkhouser T. A benchmark for 3d mesh segmentation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28 (3) : 73 (1-12).
- [9] Vlassis N, Likas A. A greedy EM algorithm for Gaussian mixture learning [J]. Neural Processing Letters, 2002, 15 (1) : 77-87.
- [10] Dasgupta S. Learning mixtures of Gaussians [C] // Proceedings of the 40th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. New York: University of California, Berkeley, 1999: 634-644.
- [11] Zabih R, Kolmogorov V. Spatially coherent clustering using graph cuts [C] // Proceedings of Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington: IEEE Press, 2004: 437-444.
- [12] Cho J W, Prost R, Jung H Y. An oblivious watermarking for 3d polygonal meshes using distribution of vertex norms [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55 (1) : 142-155.
- [13] Zafeiriou S, Tefas A, Pitas I. Blind robust watermarking schemes for copyright protection of 3d mesh Objects [J]. IEEE Trans. Vis. Comput. Graph, 2005, 11 (5) : 596-607.
- [14] Jabra S B, Zagrouba E. A new evaluation protocol for robust 3D mesh watermarking [C] // Proceedings of the International Symposium on I/V Communications and Mobile Network. Rabat: IEEE Press, 2010: 1-4.