

一种基于聚类分析的三角网格强壮水印方法

王彦伟¹ 郑英²

(华中科技大学国家CAD支撑软件工程技术研究中心 武汉430074)¹

(华中科技大学控制科学与工程系 武汉430074)²

摘要 针对计算机图形学中常用的三角网格模型,以聚类分析方法为基础建立了一种强壮的水印方案。首次将聚类分析常用的K-Means方法用于网格水印研究,并在完成球面三角化后通过调整表面片法矢嵌入水印;在分析方法特点基础上建立了高效的数值迭代过程,提高了水印方法的效率;通过实验结果验证了方法的有效性和鲁棒性。

关键词 网格水印,聚类分析,攻击,网格对齐,网格重采样

中图分类号 TP391

Cluster Analysis Based Robust Mesh Watermarking Approach

WANG Yan-wei¹ ZHENG Ying²

(CAD Center, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China)¹

(Dept. of Control Engineering, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China)²

Abstract We presented a cluster analysis based robust watermarking approach which can be used for watermark embedding and extraction of triangle mesh, a frequently research object in computer graphics. For the first time, we applied K-Means cluster method, which is a common method in cluster analysis, into mesh watermarking research. Watermark information was embedded by spherical triangulation of cluster result and subtle modification of facet normals. By analyzing characters of the whole process, the high efficient numerical iteration process was constructed. Discussion of the parameters and their effect used in our approach was given. And the effectiveness and robustness were testified too.

Keywords Mesh watermarking, Cluster analysis, Attack, Mesh alignment, Mesh resampling

1 概述

随着互联网的迅猛发展,包括音频、视频、图片以及三维网格等在内的数字化媒体也被传播和拷贝得越来越快,而在这种拷贝过程中引发的版权保护问题也越来越多。由于传统加密系统只允许密钥拥有者存取加密后的数据,而且加密后的数据一旦发布出去,版权所有者又无法有效跟踪数据本身的传播过程,因此传统加密技术在处理随着互联网发展而产生的版权保护问题时常显得力不从心^[1-3]。作为对传统加密技术的有效补充,数字水印技术正越来越广泛地用于数字化媒体的版权保护中。水印实际上是在不影响被保护对象原始功能的前提下向其中加入的标记,这些标记可以被重新提取出来用于版权甄别。最初,数字水印技术的研究集中在音频、视频和图像上。随着作为新一代媒体的三维网格应用得越来越广泛,三维网格的水印技术也正在蓬勃发展^[1-3]。

国际上最早从事网格水印研究的是 R. Obuchi,他将水印信息存储在由原始网格导出的几何参数上,这些参数包括三角形相似性(TSR, triangle similarity quadruple)和四面体体积比(TVR, tetrahedron volume ratio)^[4]。由于这些几何参数很容易被诸如网格简化、细分等攻击操作改变而导致水印

信息丢失,因此 Obuchi 的这些研究事实上只是一种抗攻击能力很弱的脆弱水印方法。在文献[5]中,他将水印信号存储在网格频谱的低频上。虽然在文献[6]中,他提高了计算网格 Laplace 矩阵特征值的效率,但是如何快速地得到大规模网格的频谱仍是一个亟待解决的难题。Emil Praue 等人^[7]利用网格渐进表示,首先在原始网格上形成隐含低频信息的网格簇,水印信号通过精心定义的基函数嵌入这些网格簇中。他们的方法运算速度快而且可以抵抗各种常见的攻击。S. Kannai 等^[8]首先对网格进行多分辨率小波分析,水印信号则嵌入在小波向量上。但是由于需要进行网格的小波分析,因此该方法需要首先构造具有子分连接的网格模型,无法直接处理拓扑连接非规整的一般网格。Oliver Benedens^[9,10]将表面法矢映射到单位球面上并划分为簇,通过轻微调整每个簇的中心嵌入水印,再通过多维下山单纯性法调整顶点坐标,得到嵌入水印后的网格。他的方法可以有效抵抗网格简化的攻击,但对其它形式的攻击是否有效尚待验证。

国内很多学者也对网格水印方法进行了研究。尹康康等^[11,12]结合网格的多分辨率表示,直接在低分辨率网格中嵌入水印信号,通过由低分辨率到高分辨率重构得到包含水印的网格。该方法与文献[7]的方法很类似,但将水印直接添加

到稿日期:2008-03-04 本文得到国家自然科学基金(60604030)和国家“863”基金项目(2007AA04Z136)资助。

王彦伟(1975-),男,博士,副教授,主要研究方向为特征造型、参数化设计、数字几何处理,E-mail: ywwang_cad@gmail.com;郑英(1977-),女,博士,副教授,主要研究方向为鲁棒控制、信号处理。

在低分辨率的网格上,使得水印嵌入比较直观。周昕^[13]、李黎^[14,15]和金剑秋^[16]则分别在网格参数化(平面参数化、球面参数化)的基础上构建了网格水印方法。基于参数化的水印方法的共同特点是首先构建网格的参数化方案,再运用空域/频域变换工具(快速傅立叶变、离散余弦变化、球面调和函数、球面小波变换等)将参数化后的网格信号变换到频域,尔后向低频部分嵌入水印信号,最后通过频域/空域反变换并根据网格的参数化信息构造包含水印的网格模型。这类方法面临的重大问题是如何消除网格参数化和采样过程中存在的变形对水印嵌入和检测的影响。张新宇等^[2]、潘志庚^[3]等则对国内外的网格水印方法进行了详尽的综述。

2 对水印方法的要求

虽然实现网格水印的具体方法不尽相同,但从使用水印技术进行版权保护这个最终目的来看,网格水印方法都要考虑以下要求:

不可察性

指的是在保持网格模型原始功能的前提下,用户感觉不到水印的存在。定量地衡量不可察性涉及网格变形的评估,P. Rondao 等人^[17]给出了一些评估标准。

鲁棒性

主要指网格模型在经受各种攻击操作后,水印方法仍可以从受攻击后的模型中正确进行水印检测。

无二义性

指的是在多个用户都声称对同一网格模型持有版权的时候,水印方法应该无二义地辨别出该网格模型的版权拥有者和版权信息^[18]。

大容量

好的水印方法应该允许向网格模型中嵌入数量足够的水印信号,用于代表版权信息。

公有性

指的是在进行水印检测时,除待检测的网格外,水印方法需要用户提供其它信息应尽可能少。公有性不强的水印方法在进行水印检测时,除待检测网格外,还往往要求用户提供原始网格以及其它的信息。

高效率

实用的网格水印方法应该在合理的时间内完成网格模型的水印添加和检测;运算效率越高,水印方法越好。

3 基于聚类分析的网格水印方法

由于多边形网格容易转化为三角网格进行处理,因而本文也以三角网格为研究对象。我们在传统的聚类分析方法 K-Means^[19]的基础上,构建了一个强壮的网格水印方法。图 1 给出本方法的框架。在水印嵌入时,我们首先对表面片使用 K-Means 方法进行聚类分析,尔后将得到的每个簇映射为单位球面上一个点;所有这些都与簇对应的球面点经过球面三角化后,得到许多球面三角形,通过调整球面三角形的边长嵌入水印信号;最后通过求解关于顶点坐标的方程组得到嵌入水印后的三角网格模型。在提取水印时,首先对经过攻击的网格进行对齐和重采样,得到和原始网格拓扑相同的网格模型,尔后根据在水印嵌入过程中记录下的簇与面片的包含关系,重新计算各个簇对应的球面中心,通过对比球面三角形边

长的变化提取水印信号。

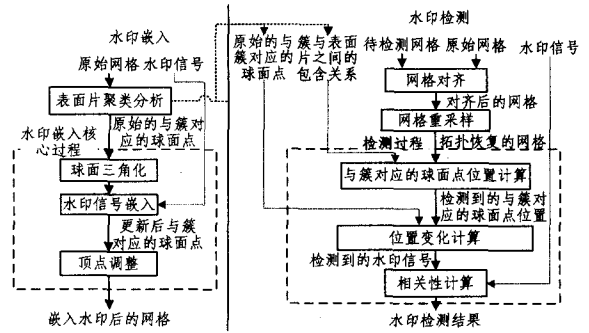


图 1 基于聚类分析的三角网格水印方法框架

3.1 水印嵌入过程

3.1.1 表面片聚类分析

聚类分析的作用是将具有相近属性的表面片凝聚在一起。在此我们选择高斯曲率和表面法矢作为表面片属性的代表,并使用 K-Means 方法进行聚类分析。使用 K-Means 方法进行聚类分析时,两个不同数据点之间距离的定义直接影响聚类分析结果。我们使用式(1)定义这种距离:

$$d(i, j) = \beta |e_i \cdot e_j| + (1 - \beta) |k_i - k_j| \quad (1)$$

式中 i, j 为两个不同的表面片的编号; e_i 和 e_j 代表表面片 i, j 的归一化后的表面法矢; k_i 和 k_j 是表面片 i 和表面片 j 归一化后的高斯曲率; β 为权重系数。

在计算顶点的高斯曲率时,我们首先根据网格的拓扑连接关系搜索该顶点的 2 环邻域顶点,而后根据这些顶点坐标建立二次的拟合多项式,在计算该二次多项式的一阶和二阶导数基础上计算顶点的高斯曲率。

使用 K-Means 方法并通过式(1)定义的距离对表面片进行聚类分析时,簇的数目 K 以及权重系数 w 对聚类分析结果和水印检测结果都会有巨大影响,我们在第 4 节对此进行详细讨论。在完成表面片聚类分析后,我们将包含在某个簇中的所有面片的表面法矢相加并进行归一化,从而将该簇映射为单位球面上的一个点,与多个簇对应的球面点经过球面三角化形成许多球面三角化(球面三角化的过程参见文献^[20])。

3.1.2 水印嵌入的核心过程

待嵌入的水印信号是从均值为 0、方差为 1 的高斯分布上进行随机采样得到的实数序列,如式(2)所示:

$$w = \{w_1 \dots w_m\} \quad (2)$$

m 代表水印信号长度。

随后,我们选择 $\lceil m/2 \rceil$ 个球面三角形来嵌入这 m 个水印信号,每个球面三角形嵌入两个水印信号。嵌入过程如图 2 和式(3)所示。

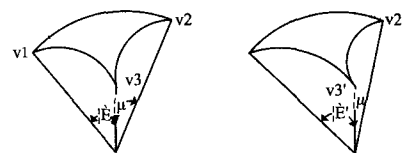


图 2 嵌入水印信号到球面三角形

$$\begin{cases} \varphi' = (1 + \alpha)\varphi \\ \theta' = (1 + \alpha)\theta \end{cases} \quad (3)$$

单位球面上点的距离事实上是角度。式(3)中, θ, φ 是初

始的球面点之间的距离; θ' , ϕ' 是嵌入水印后的距离; α 是调整水印明显程度的系数, 称为水印强度。在嵌入水印时, v_1, v_2 的位置保持不变, v_3 的位置则由 θ', ϕ' 决定。

水印嵌入后, 一些与簇对应的球面点位置发生了变化。假设共有 N 个球面点的位置发生了变化, 通过求解式(4), 我们将球面点的变化映射为网格顶点坐标, 得到嵌入水印后的网格。

$$\sum_{i=0}^{M_k} \left[\frac{(v_{i,2} - v_{i,1}) \times (v_{i,3} - v_{i,2})}{\| (v_{i,2} - v_{i,1}) \times (v_{i,3} - v_{i,2}) \|} \right] / \left\| \sum_{i=0}^{M_k} [(v_{i,2} - v_{i,1}) \times (v_{i,3} - v_{i,2})] \right\| = n_k', k=0 \dots N-1 \quad (4)$$

如图3所示, 假设第 k 个簇中包含 M_k 个三角片, $V_{i,1}$, $V_{i,2}$ 和 $V_{i,3}$ 代表了该簇中第 i 个三角形的三个顶点的坐标; n_k' 代表与该簇变化后球面点位置对应的单位法矢; 不同的颜色代表不同的簇。

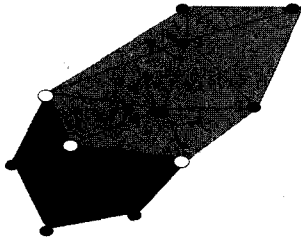


图3 排他性包含顶点

在式(4)中, 我们通过 $\frac{(v_{i,2} - v_{i,1}) \times (v_{i,3} - v_{i,2})}{\| (v_{i,2} - v_{i,1}) \times (v_{i,3} - v_{i,2}) \|}$ 计算第 k 个簇, 第 i 个三角片的归一化表面法矢, 然后把第 k 个簇中所有面片的法矢相加并进行归一化, 该归一化结果应等于 n_k' 。以上为式(4)中的第 k 个方程的建立过程。

3.1.3 数值迭代过程分析

假设原始网格中包含 M 个顶点, 则式(4)是一个包含 $3M$ 个自变量 (M 个顶点的坐标)、 N 个等式的方程组。一般而言, 由于待嵌入的水印信号长度远小于 M , 因而在式(4)中, $N \ll 3M$, 这说明式(4)是一个大规模欠约束方程组。式(4)的求解效率将直接决定水印嵌入方法的效率。

我们采样牛顿法^[21] 求解式(4), 原因有两方面: 首先, 与许多方程组求解的数值方法 (如优化方法和单纯形法^[21]) 相比, 传统的牛顿法收敛较快。其次, 考虑到水印应具有不可察性, 因而和原始网格相比, 嵌入水印后的网格应只发生很小的变形。这意味着, 如果按照变形大小建立一个网格序列, 则嵌入水印后的网格和原始网格是很临近的。这一点和牛顿法的局部收敛性不谋而合。

众所周知, 牛顿法在迭代过程的每一步需要计算雅克比矩阵 J 的 (伪) 逆矩阵。基于对式(4)的分析, J 是一个大规模的列数远大于行数的矩阵, 直接求 J 的 (伪) 逆矩阵效率非常低下。我们注意到式(4)的雅克比矩阵 J 的第 i 行第 j 列实际上是一个分块矩阵, 形式如下:

$$J_{ij} = \{ \partial F_i / \partial V_{j,x}, \partial F_i / \partial V_{j,y}, \partial F_i / \partial V_{j,z} \} \quad (5)$$

F_i 是式(4)中第 i 个方程的左部; $V_{j,x}$, $V_{j,y}$ 和 $V_{j,z}$ 代表第 j 个顶点的 x, y, z 坐标; J_{ij} 的数值代表 F_i 相对第 j 个顶点位置变化的比例。与矩阵 J 对应的布尔阵 BJ 定义如下:

$$BJ_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } \partial F_i / \partial V_{j,x} \neq 0 \text{ or } \partial F_i / \partial V_{j,y} \neq 0 \text{ or } \partial F_i / \partial V_{j,z} \neq 0; \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, M \quad (6)$$

BJ_{ij} 代表了第 j 个顶点位置变化时 F_i 的值是否变化。由于 F_i 代表第 i 个簇的归一化法矢, 因此 BJ_{ij} 事实上表示第 i 个簇的归一化法矢是否会受第 j 个顶点位置变化的影响。如果这种影响存在, 则 $BJ_{ij}=1$, 否则 $BJ_{ij}=0$ 。

假设顶点 v (编号 l) 只被第 i 个簇包含, 而不被其他簇包含 (这种只被一个簇包含而不被其它簇包含的顶点称为排他性包含顶点, 即 ECV, Exclusive contained vertex), 那么可以想见, v 的变化只会影响第 i 个簇, 而不会影响其他簇。所以必有下式成立:

$$BJ_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } j=l \\ 0, & \text{if } j \neq l \end{cases} \quad j=1, 2, \dots, M \quad (7)$$

在图3中, 所有 ECV 以实心圆点表示, 而其它顶点则以空心圆点表示。因此, 假如每个簇都至少包含一个 ECV, 根据式(7), 则 BJ 必然存在 N 个线性无关的行向量, 故式(8)成立

$$\text{Rank}(BJ) = N \quad (8)$$

$\text{Rank}(BJ)$ 代表 BJ 的秩, N 是 BJ 的列数。式(8)意味当每个簇都至少包含一个 ECV 时, BJ 行满秩。图4给出这样一个 BJ 的例子, 阴影列对应 ECV。

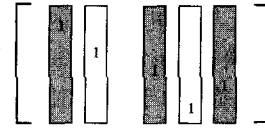


图4 行满秩的布尔化雅克比矩阵

当式(8)成立时, 根据(6)式中 BJ 的定义, 雅克比 J 也行满秩, 所以 J 右可逆。可以使用式(9)计算 J 的右逆^[22] 进行牛顿迭代:

$$J^T (JJ^T)^{-1} \quad (9)$$

式(9)只涉及矩阵乘法运算和一个很小规模的矩阵求逆运算, 因而与直接通过奇异值分解求 (伪) 逆相比, 运算效率大大提高。根据我们的测试结果, 在处理面片规模数十万左右的网格模型时, 式(9)的效率是奇异值分解法的 20 倍左右。

值得指出的是, 对于一般较大规模的网格而言, (8)式成立的前提都可以得到满足; 但网格规模较小时, 如果无法保证每个簇都包含 ECV, 我们仍采样奇异值分解方法求 J 的 (伪) 逆, 完成式(4)的求解。

3.2 水印检测过程

3.2.1 网格对齐

当网格受到诸如旋转、平移等仿射变换攻击时, 需要首先将待检测网格和原始网格进行对齐。我们采样文献[23, 24]的方法对齐网格。文献[23]实际是通过分支定界算法根据几何元素的表征参数对齐几何模型的。由于采用了分支定界算法, 因而文献[23]的方法可以快速得到对齐结果, 而且对初始值的要求不高。文献[24]则通过迭代最近点 (Iterative Closest Point, ICP) 方法实现模型对齐。由于采用 ICP 方法, 因而文献[24]要求两个模型已基本对齐, 对迭代初始值要求较高。在本文, 我们首先采用文献[23]方法对网格进行粗略对齐, 而后采文献[24]的方法对网格进行精细对齐。

图5给出了一个受仿射变换攻击后的兔子模型对齐结果。图5(a)为原始的兔子模型, 包含 5553 个面片。对齐该模

型的数值迭代过程结束时所得到的模型如图 5(b)所示,与原始模型的误差为 $3E-6$,从视觉上已感觉不到与原始模型的区别。

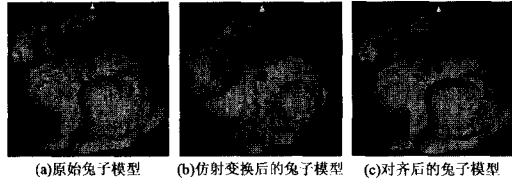


图 5 仿射变换后兔子模型的对齐

3.2.2 重采样

在水印提取过程中,为了得到和原始网格拓扑一致的网格,需要对待检测的网格模型进行重采样^[7]。网格重采样通过最小化以下能量函数完成:

$$E(v^*) = E_{dist}(v^*) + cE_{deform}(v^*) \quad (10)$$

其中 v^* 是原始网格顶点在待检测网格上的投影; c 是比例因子,我们设置 $c=10^{-7}$ 。具体过程如下:

(1)将原始网格每个顶点向待检测网格投影并按照原始网格建立拓扑连接,形成网格 M_d ;

(2)对于 M_d 上的每个顶点 V_d ,利用 KDTree 算法建立搜索树,搜索原始网格上与其距离最近的顶点 V_o ,计算 V_d 与 V_o 距离,所有这些距离相加形成 $E_{dist}(v^*)$;

(3)计算 M_d 的每条边由于变形(伸长或缩短)产生的变形能,所有边的变形能相加形成 $E_{deform}(v^*)$;

(4)使用共轭梯度法^[21]最小化式(10),迭代过程中需要反复进行(2)、(3)步运算。

图 6 给出了对由图 5(a)所示原始兔子模型进行一次细分后得到的模型进行拓扑恢复的结果。图 6(a)为细分后的兔子模型,包含 22212 个面片。图 6(b)为根据图 5(a)原始模型进行拓扑恢复后的结果。对比图 6(a)与图 6(b)可以看出,图 6(b)模型从总体上较好地保持了图 6(a)模型的几何信息。

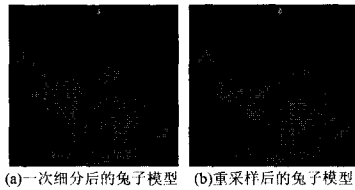


图 6 细分后兔子模型的重采样

通过重采样,我们得到了和原始网格拓扑一致但仍保持待检测网格几何信息的一个网格模型。在该模型基础上,便可以进行水印检测。

3.2.3 相关性检验

和文献[7,11,12]一样,我们采样计算原始水印信号和检测到的水印信号相关系数的方法来确定待检测网格是否包含水印:

$$\rho = \frac{\sum_i (w_i^* - \bar{w}^*)(w_i - \bar{w})}{\sqrt{\sum_i (w_i^* - \bar{w}^*)^2 \times \sum_i (w_i - \bar{w})^2}} \quad (11)$$

其中 w 是原始水印信号, w^* 是检测到的水印信号。当 ρ 小于某个与阈值时,认为待检测网格没有包含水印;否则认为是包含水印。根据文献[12]的随机试验结果,我们将阈值选择为 0.3。

4 实验与讨论

4.1 参数及其影响

我们的方法主要包含以下 4 个参数:

- w , 聚类分析过程中定义数据距离时调整曲率和法矢的系数;
- K , K-Means 聚类分析是簇的数目;
- m , 水印信号长度;
- α , 水印强度。

由于本文通过调整球面三角形的边长嵌入水印信号,因而为保证有足够的球面三角形用于嵌入水印,我们设置 $K=2m$,因而以上 4 个参数实质上只有 3 个: (w, m, α) 。在此,我们以一个马的网格模型为例,主要从水印的不可察性和鲁棒性两个方面讨论参数的影响。

(1) w 的影响

w 对聚类分析结果有着直接影响,并间接影响本文水印嵌入和检测结果。但 w 对水印可察性和鲁棒性的影响并不明显。图 7 给出了包含 33800 个面片的马模型分别在 $w=0.05, 0.5$ 时的聚类分析结果。可以看出,结果差别很大。图 8 给出了嵌入水印后的模型($\alpha=0.01, m=32$),从视觉上基本感觉不到这两个模型的差别,且都可以从中成功检测出水印。这验证了 w 对水印可察性和鲁棒性的影响不大。

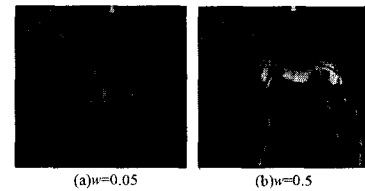


图 7 不同 w 时聚类分析结果

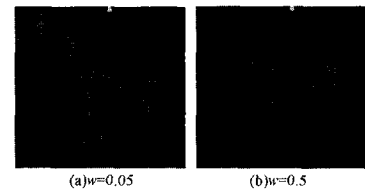


图 8 不同 w 时嵌入水印后的网格

(2) m 的影响

本文设置 $K=2m$,因而 m 也直接影响聚类分析结果。根据水印方法大容量的要求, m 应尽可能大。但是随着 m 增加,每个簇包含的面片数目将减少,这将导致鲁棒性降低。同时 m 也不能太小,因为太小的 m 将使得我们通过相关系数判断水印的存在性失去意义。我们推荐 m 取大于等于 32 的值,并随网格规模的扩大而适当增加。

(3) α 的影响

α 显著而直接地影响水印的可察性和鲁棒性。随着 α 上升,嵌入水印后的网格将发生越来越大的变形,不可察性降低,但鲁棒性随着 α 的上升而提高。因而选择 α 时,必须在不可察性和鲁棒性直接进行权衡。图 9 给出了不同 α 时嵌入水印后的马模型($m=32, w=0.5$)。从图 9 可以看出, $\alpha=0.08$ 时,马模型的变形清晰可见,水印信号丧失了不可察性。我们

对图 9 中不同 α 时的水印模型进行噪声攻击(噪声强度为模型包容盒最大边长的 0.2%), 水印提取结果如表 1 所示。可以看出, 随着 α 的增加, 相关系数越来越大, 水印鲁棒性增强。我们在实验中发现, 对于大多数网格模型而言, $\alpha=0.01$ 是个很好的选择, 可以在保持水印不可察性的前提下取得较好的水印检测结果。

表 1 与不同 α 对应的水印检测结果

α	0.005	0.01	0.05	0.08
相关性系数	0.478378	0.692805	0.957383	0.967456

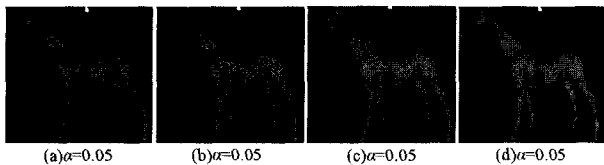


图 9 不同 α 时嵌入水印后的网格

4.2 ROC 曲线

上一节我们以单个模型为例对参数的影响进行了讨论。在本节采用 30 个不同的网格模型通过建立 ROC 曲线^[25], 对我们的方法进行总体的性能评估。在生成 ROC 曲线时, 对于这 30 个网格模型的原始模型和嵌入水印后的模型, 分别进行以下攻击操作:

- 边折叠网格简化(简化算法参见文献[26]), 面片数目减少至原来的 50%;
- 网格细分(细分算法参见文献[27]), 细分次数为 1;
- 顶点随机噪声, 噪声幅度为模型最大包容盒边长的 0.7%;
- 滤波(滤波方法参见文献[28]), 滤波次数为 2;
- 随机性节点顺序重排。

上述攻击操作共生成 300 个网格模型, 包括 150 个未加入水印的和 150 个加入水印的。在使用水印检测过程得到相关性系数后, 我们设置阈值:

$$V_{\text{threshold}} = 0.05 \times i, i = 0, 1, 2, \dots, 20 \quad (12)$$

对于每个阈值, 利用检测到的上面 300 个模型的相关系数按照式(13)计算 R_{fp} 和 R_{tp} ,

$$\begin{cases} R_{fp} = N_{fp} / (N_{fp} + N_m) \\ R_{tp} = N_{tp} / (N_{tp} + N_{fn}) \end{cases} \quad (13)$$

其中, N_{fp} 为从没有嵌入水印的模型中检测到水印的次数(false positive); N_m 为在没有嵌入水印的模型中检测不到水印的次数(true negative); N_{tp} 为在嵌入水印的模型中检测到水印的次数(true positive); N_{fn} 为在嵌入水印的模型中检测不到水印的次数(false negative)。

以 R_{fp} 为横坐标、 R_{tp} 为纵坐标变形成一个点, 随着阈值按式(12)从 0 变化至 1, 便得到包含 21 个数据点的 ROC 曲线。从以上 ROC 曲线形成过程可以知道, 该曲线越接近坐标点 (0, 1), 水印方法的鲁棒性越好。

图 10 给出了本文方法的 ROC 曲线。从图 10 可以看出, 如果想使 R_{tp} 达到 60%, 那么 R_{fp} 为 29%, 也就是说会有 29% 的可能从没有嵌入水印的网格中检测到水印的存在。

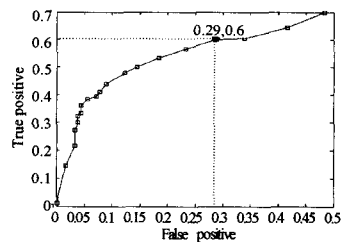


图 10 ROC 曲线

结束语 本文提出的基于聚类分析的三角网格水印方法具有以下特点:

(1) 使用聚类分析常用的 K-Means 方法进行网格面片的聚类分析, 从而将具有相同特性的面片凝聚在一起, 这样的方式便于在网格特征点(区域)处加入水印, 使得水印不易去除, 提高了水印方法的鲁棒性。

(2) 以聚类分析的簇为基础构建球面三角形, 尔后在球面三角形中嵌入水印, 这比起直接在每个簇内嵌入一个水印信号而言, 提高了水印方法的容量。

(3) 在牛顿法迭代求解方程组时, 使用雅克比矩阵的右逆取代伪逆进行迭代, 大大提高了水印嵌入的效率。

(4) 网格对齐方法结合了搜索树方法和 ICP 方法, 可以对齐经过较大相似变换攻击的网格。

将来要进行的工作包括:

(1) 寻找更有效的自适应的方法搜索网格表面的特征点或区域, 因为在这样的特征点或区域添加的水印是难以去除的。

(2) 提高水印方法的公有性, 水印检测时需要输入尽可能少的信息。

(3) 研究如何在多个用户对同一对象产生版权争执时无二义地水印检测和判别方法。

参考文献

- [1] Cox I J, Killian J, Leighton T, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. IEEE Transactions on Image Processing, 1997; 1673-1687
- [2] 张新宇, 彭维, 张三元, 等. 3D 网格数字水印研究进展. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(8): 913-920
- [3] 潘志庚, 孙树森, 李黎. 三维模型数字水印综述. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(8): 1103-1110
- [4] Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking three-dimensional polygonal models through geometric and topological modifications. IEEE J. Selected Areas in Communications, 1998, 16(4): 551-560
- [5] Ohbuchi R, Takahashi S, Miyazawa T, et al. Watermarking 3D polygonal meshes in the mesh spectral domain // Watson B, Buchanan J W, eds. Proceedings of Graphics Interface. 2001: 9-18
- [6] Ohbuchi R, Mukaiyama A, Takahashi S. A frequency-domain approach to watermarking 3d shapes. Eurographics, 2002, 21(3): 1-10
- [7] Praun E, Hoppe H, Finkelstein A. Robust mesh watermarking // Proceedings of SIGGRAPH 99. 1999: 49-56
- [8] Kanai S, Date H, Kishinami T. Digital watermarking for 3D polygons using multiresolution wavelet decomposition // Proceedings

of International Workshop on Geometric Modeling, Tokyo, 1998;296-307

[9] Benedens O. Geometry-based watermarking of 3d models. Image Security, 1999;2-11

[10] Lee S, Kwon K. Watermark for 3d mesh model using patch CE-GIs// ICCSA 2005, LNCS 3481, 2005; 557-566

[11] Yin K, Pan Z, Shi J, et al. Robust mesh watermarking based on multiresolution processing. Computer & Graphics, 2001, 25; 409-420

[12] 尹康康, 潘志庚, 石教英. 一种强壮的网格水印算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(2): 102-107

[13] 周昕. 三维几何模型数字水印技术及算法研究. 硕士学位论文. 浙江大学, 2002

[14] Li Li, Zhan D, Pan Zhigeng, et al. Watermarking 3D mesh by spherical parametrization. Computer & Graphics, 2004, 28; 981-989

[15] 李黎. 数字图像和三维几何模型水印技术研究. 博士学位论文. 浙江大学, 2004

[16] Qiu J, Dai M, Bao H, et al. Watermarking 3 d mesh based on spherical wavelet transform. International Journal of Zhejiang University, 2004, 5; 251-258

[17] Alfacc P R, Macq B. Shape quality measurement for 3D watermarking schemes // Electronic Imaging, Security and Watermarking of Multimedia Contents VIII. volume 6072, San Jose, California, Jan. 2006; 15-19

[18] Adelsbach A, Katzenbeisser S, Veith H. Watermarking Schemes Provably Secure Against Copy and Ambiguity Attacks // Proceedings of the 2003 ACM Workshop on Digital Rights Manage-

ment. 2003;111-119

[19] Kanungo T, Mount DM, Netanyahu N, et al. An efficient k-means clustering algorithm; Analysis and implementation. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24; 881-892

[20] Renka R J. Algorithm 772; STRIPACK; Delaunay triangulation and Voronoi diagram on the surface of a sphere. ACM Transactions on Mathematical Software, 1997, 23(3); 416-434

[21] Press W H, Teulkolsky S A, Vetterling W T, et al. Numerical Recipes in C. 2nd ed. Cambridge University Press, 1996

[22] 余鄂西. 矩阵论. 北京: 高等教育出版社, 1995

[23] Faugeras O D. The representation, recognition, and locating of 3-d objects. International Journal on Robotic Research, 1986, 5; 27-52

[24] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shape. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14; 239-256

[25] Woods K. Generating ROC curves for artificial neural networks. IEEE Transactions on medical imaging, 1997, 16(3); 329-337

[26] Garland M, Heckbert P. Surface Simplification Using Quadric Error Metric // Computer Graphics (SIGGRAPH '97 Proceedings). 1997; 209-216

[27] Biermann H, Levin A, Zorin D. Piecewise smooth subdivision surfaces with normal control // Computer Graphics (SIGGRAPH'2000 Proceedings). 2000; 113-120

[28] Taubin G. A signal processing approach to fair surface design // ACM SIGGRAPH 95 Conference Proceedings. 1995; 351-358

(上接第 229 页)

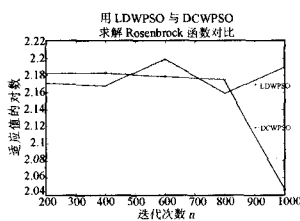


图 5 Rosenbrock 函数的比较

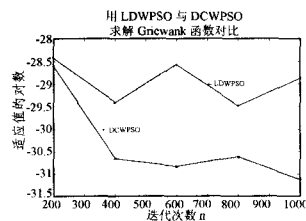


图 6 Griewank 函数的比较

从上面的表和图可以看出本文给出的 DCWPSO 方法比 LDWPSO 方法无论是在计算时间上还是在效率上都大大提高了,也改善了基本 PSO 可能出现的震荡现象。

结束语 本文提出了一种动态改变惯性权重的自适应粒子群算法(DCWPSO),在该算法中引入聚焦距离变化率的概念,并根据它对粒子群算法搜索能力的影响,将惯性因子表示为它的函数。在每次迭代时算法可根据当前粒子群聚焦距离变化率的大小动态地改变惯性权重,从而使算法具有动态自适应性。对 6 个典型函数的测试结果表明,DCWPSO 算法的收敛速度明显优于 LDWPSO 算法,收敛精度也有所提高。

参考文献

[1] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization // IEEE International Conference on Neural Networks. 1995; 1942-1948

[2] Elegbede C. Structural reliability assessment based on particles swarm optimization [J]. Structural Safety, 2005, 27(10); 171-186

[3] Pobinson J, Rahmat - Samii Y. Particle swarm optimization in electromagnetics [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(2); 397-406

[4] Salman A, Ahmad I, Al-Madani S. Particle swarm optimization for task assignment problem [J]. Microprocessors and Microsystems, 2002, 26(8); 363-371

[5] Shi Y, Eberhart R. Empirical study of particle swarm optimization [A] // International Conference on Evolutionary Computation [C]. Washington, USA; IEEE, 1999, 1945-1950

[6] Shi Y, Eberhart R. Fuzzy adaptive particle swarm optimization [A]. The IEEE Congress on Evolutionary Computation [C], San Francisco, USA; IEEE, 2001; 101-106

[7] Eberhart R, Shi Y. Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarm [A]. The IEEE Congress on Evolutionary Computation [C], San Francisco, USA; IEEE, 2001; 94-100

[8] 李宁, 孙德宝, 等. 带变异的粒子群优化算法. 计算机工程与应用, 2004, 17