

基于特征点提取的三维点云模型水印算法

齐向明, 史双宇*, 杨晓陶

(辽宁工程技术大学 软件学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

(* 通信作者电子邮箱 11150313@qq.com)

摘要: 为了有效提高三维水印的透明性、抗噪能力和水印提取准确度, 针对三维网格中不固定点云数据, 提出一种基于局部特征点提取的三维点云模型水印算法。根据协方差分析提取出三维模型初始特征点, 以初始特征点为核心, 在它 K 近邻领域中, 构建不跨越区域最小三角形为嵌入单元的底面, 将剩余顶点按照升序排列, 寻找合适的嵌入顶点, 构建局部嵌入单元, 通过改变嵌入顶点信息来嵌入水印。其中通过顶点在平面投影产生的夹角确定水印索引值, 实现盲水印。算法通过保留特征点信息, 改变非特征点嵌入水印信息能有效提高透明性和抗噪能力, 通过限制嵌入单元区域提高水印提取准确率, 同时实现了盲水印检测。

关键词: 特征点; 点云模型; 数字水印; K 近邻; 局部嵌入单元; 透明性

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

3D point cloud model watermarking algorithm based on feature points extraction

QI Xiangming, SHI Shuangyu*, YANG Xiaotao

(School of Software, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China)

Abstract: To effectively improve the transparency and noise immunity of three-dimensional watermark and accuracy of watermark extraction, for the unfixed point cloud data of three-dimensional grid, this paper proposed an three-dimensional point cloud watermarking algorithm based on feature points extraction. According to analysis of covariance, initial feature points were extracted from point cloud model. Every initial feature point was the core point of K -nearest neighbor local neighborhood to build no cross-regional and the smallest triangle, which was the embedding unit bottom, surface, and then the remaining vertices were arranged in ascending order. One suitable embedding vertex was searched as an embedding vertex. By changing the vertex information of local embedding unit, watermark was embedded. Blind watermark was achieved by the index values which was generated by the angle of the vertex's projection. Keeping feature point information, the proposed algorithm effectively improved transparency and noise immunity. By changing the non-characteristic point to embed watermark information and limiting the area of embedding unit, the proposed algorithm improves the watermark accuracy and achieves the blind watermark detection.

Key words: feature point; point cloud model; digital watermark; K -nearest neighbor; partial embedding unit; transparency

0 引言

数字水印技术作为数字产品版权保护的重要手段, 目标是在数字产品中嵌入不能被攻击者破坏和去除的标识信息, 更好地保护数字产品的版权。根据不同的嵌入空间, 三维水印算法分为频域和空域两类。频域算法特点是在特定的变换域内嵌入水印, 有效地平衡了鲁棒性与透明性, 该算法的缺点是算法复杂、嵌入量小^[1]。空域算法具有嵌入方法简单、嵌入量大的优势, 但存在透明性不强、盲水印实现难的弊端^[2-3]。

空域算法的发展经历了两个阶段。第一个阶段为非盲水印阶段, 算法通过简单改变信息点到质心的相对位置来嵌入水印信息, 提取时通过和原始模型信息对比, 将信息点不一致的提取出来^[4]。此类算法简单, 嵌入量小。经过不断改进, 彭伟等^[5]通过奇异值分解, 将水印嵌入奇异值为零的地方, 由于算法不可逆, 所

以能抵御解释攻击。算法鲁棒性和水印嵌入量虽得到有效提高, 但颇为复杂, 抵御攻击方式单一, 且为非盲水印。为了兼顾算法鲁棒性同时简单实现盲水印算法, 苏智勇等^[6]利用指定对称模型的对称性来完成盲水印算法, 但因为这种算法要求模型具有高度对称的特征, 适应范围较窄。何文广等^[7]提出一种三维模型的网格盲水印算法, 该算法在基于局部几何空间的基础上, 利用其一环邻域上的点嵌入水印, 这种算法有效提高了水印的鲁棒性, 同时利用顶点在一环邻域上投影的角度存储了水印索引信息, 具有盲水印检测优势^[8]。但算法存在两个问题: 算法没有考虑到改变的点是否为包含了三维模型重要信息的特征点, 透明性不强; 同时, 也没有考虑到一个顶点同时存在于两个嵌入单元, 影响水印嵌入的准确性。

为了在兼顾鲁棒性和盲水印的同时解决空域三维水印算法的透明性, 提高水印提取准确度, 提出一种基于特征点提取的三

收稿日期: 2013-11-06; 修回日期: 2013-12-17。

作者简介: 齐向明(1966-), 男, 辽宁阜新人, 副教授, 硕士, 主要研究方向: 图形图像处理、数字水印; 史双宇(1988-), 男, 湖南株洲人, 硕士研究生, 主要研究方向: 图形图像处理、数字水印; 杨晓陶(1989-), 男, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 图形图像处理、数字水印。

维网格水印算法。特征点包括了三维模型的重要信息,如果改变,会对三维模型的透明性产生很大的影响。通过对三维模型进行特征点的提取,将原始模型点分为两类集合,非特征点集合和初始特征点集合。利用非特征点构建局部坐标系,通过改变目标顶点在空间中的位置实现水印嵌入,来提高水印的透明性和抗噪能力。

1 特征点提取算法

三维模型特征指的是自由形状的特征,自由形状的特征是模型在视觉上突出的部分,包括显著的边、脊线和谷线,同时也包括线性或角点等尖锐特征;三维模型中的特征点是指能反映出模型表面特征、形状、几何特征或纹理特征的点的集合^[9]。在三角形网格模型中,设 $|M|$ 为顶点的个数, $P_M = \{0, 1, \dots, |M| - 1\}$ 为顶点集合, $p = \{i\}$ 表示单个顶点, $l = \{p_i, p_j\}$ 表示直线, $|p_i p_j|$ 表示直线长度。 $\Phi = \{i\}$ 表示平面,顶点的一邻域定义为 $N(p_i)$,顶点的度为 $N(p_i)$ 元素个数 $|N(p_i)|$ 。

1.1 局部嵌入单元的构造

如图1所示,局部嵌入单元是由嵌入底面和嵌入顶点组成。嵌入底面为 $\Delta p p_0 p_n$ 所确定的平面 Φ ,嵌入顶点为 p_0 。在嵌入水印的时候,为了尽量保证三维模型的透明性, $\Delta p p_0 p_n$ 为局部不变量,仅通过修改嵌入顶点坐标嵌入水印。

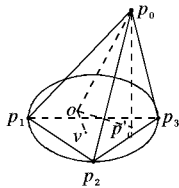


图1 局部嵌入单元示意图

1.1.1 初始特征点提取

预处理阶段主要完成工作:在原始三维模型中提取出初始特征点集。根据文献[10]的方式,通过 K 近邻邻域的设定,选择合适的特征点提取区域,通过局部邻域协方差公式得出阈值 σ_p ,最后设置一个合适的阈值来得到初始特征点。为了有效提取出特征点并且为接下来更好地构造局部嵌入单元, K 取值20。

用 \bar{p} 表示 K 近邻的质心,协方差矩阵为:

$$T = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} p_1 - \bar{p} \\ \vdots \\ p_k - \bar{p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 - \bar{p} \\ \vdots \\ p_k - \bar{p} \end{bmatrix}^T; \quad p_i \in N_p \quad (1)$$

定义 $\sigma_p = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2}$,其中, λ_i 为 T 的特征值且 $\lambda_0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2$ 。

公式中, σ_p 是判断一个点成为特征点的可能,一般情况下,很难仅通过选取一个阈值进行准确的特征点判定。由于本文嵌入算法只改变非特征点信息故只需选择一个较为宽松的阈值,保证非特征点集合中一定不含有特征点即可。

1.1.2 嵌入单元底面的选择

本文受到文献[11-12]的启发,将 $\Delta p p_0 p_n$ 构建成为不跨越其他区域的最小三角形集合,通过分离出这些三角形的集合,进一步缩小嵌入顶点选择范围。其方法如下:

1) 初始三角形集合的选择。定义初始特征点 p 的 K 近邻为 $p_i (i = 1, 2, \dots, K; K = 20)$, p_i 根据到 p 的距离按照升序排列, $N(p)$ 为 p_i 的 K 近邻邻域。根据上述定义, p_0 为离 p 最近的

点。然后需要寻找一个点 $p_n (n = 1, 2, \dots, K)$,当 p_n 满足条件 $\angle p p_0 p_n$ 最大时,由 $\{p, p_0, p_n\}$ 所组成的外接圆最小。

2) 不跨越区域三角形的确定。

当 $N(p)$ 中有大部分点都落在了 $\{p, p_0, p_n\}$ 所确定的平面 Φ 上或者附近,那么, $\Delta p p_0 p_n$ 就依附在 $N(p)$ 区域内一个潜在的曲面上,定义为有效三角形。从全局观察,每一个有效的 $\Delta p p_0 p_n$,都依附在了模型表面的曲面上,并且因为初始特征点的存在,这些三角形集合包含了模型绝大部分特征信息。

基于这一理论,对 $N(p)$ 中所有不包含 $\{p_0, p_n\}$ 两点到平面 Φ 的距离进行计算。定义 $l_i \in \{l_0, l_1, \dots, l_{(K-1)}\}$ 为每一个点到平面的距离,将这些距离集按照升序排列,设定 l_{lim} 为最小距离限制, α 表示 $N(p)$ 中符合要求的点所占比例:

$$\alpha_i = n/K$$

其中: n 表示小于或等于 l_{lim} 的个数。

通过设定一个合适的阈值 σ_l 判断 $\Delta p p_0 p_n$ 的有效性。

3) 有效三角形集合的提取。在判断三角形的有效性之后,提取所有有效三角形,组成不跨越区域三角形集合。该集合虽然没有完全地覆盖三维模型中含有特征点的表面区域,却包含了绝大部分模型的特征信息区域,通过保证这些三角形集合能很好地保证三维模型的保真性。

1.1.3 嵌入单元顶点的选择

在点 p 的 K 近邻邻域里,已经固定不能改变的点为 $\{p, p_0, p_n\}$,从剩下的点中寻找合适的嵌入顶点,作为局部嵌入单元的顶点。

对于嵌入底面来说,不同的嵌入顶点可以共用同一个嵌入底面,但是,对于嵌入顶点来说,一个嵌入顶点是不能够同时存在于多个嵌入单元之中,因此对于每一个嵌入顶点,只能选择一个嵌入单元。定义嵌入底面三角形的集合为 $T(i)$,初始特征点 K 近邻邻域集合为 $N(i)$, $N(i) = \{p, p_0, p_1, \dots, p_{|K|-1}\}$,嵌入顶点的集合为 $v(i)$,具体方法为:

步骤1 选择初始嵌入顶点。因为 p 点 K 近邻邻域按照升序来排列,定义 $N(i)$ 中的点指针 $*p$, $*p$ 刚开始指向 p_1 ,通过循环算法将所有 $N(i)$ 中 $*p$ 指向的点提取出来组成初始嵌入顶点集合 $v'(i)$,之后将指针跳到 p_2 (注意在这一过程中,如果出现指针指向 p_n ,则自动往后面跳一个点)。

步骤2 检测。将提取的初始特征点集合 $v'(i)$ 分别与 $T(i)$ 逐个对应,如果出现了一个 $v'(i)$ 同时对应两个 $T(i)$ 时,标记此点为非嵌入顶点,返回步骤1进行第二次检测。

步骤3 当步骤2检测出所有顶点不同时出现在两个嵌入单元时,或者步骤1指针到达上线值 K 时,停止循环,返回顶点集合即为 $v(i)$ 。

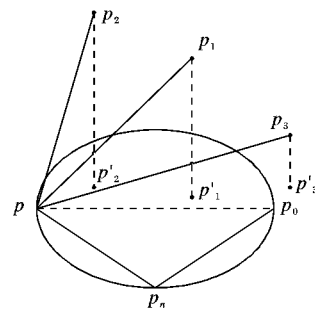


图2 嵌入顶点选取过程示意图

1.2 水印嵌入

嵌入水印的过程是在局部嵌入单元中进行。如图1所

示,点 o 为 $\Delta pp_0 p_n$ 外接圆圆心,点 v 为 $\Delta pp_0 p_n$ 质心, p'_0 为 p_0 在 $\Delta pp_0 p_n$ 中的投影。

1) 调整嵌入角度,实现盲水印。由于任何一个局部嵌入单元中, o 和 v 属于不动点。以线段 ov 为起始边,逆时针旋转为正方向, $\angle vop'_0$ 范围为 $[0,360]$ 。在平面 Φ 上,以 ov 为起始边,将其等分为 m 份,根据以下公式将 p'_0 调整到嵌入状态,其方法为:

$$\begin{cases} \theta_w = \frac{360}{m}, & \text{带嵌入水印} \\ \varphi = \min\left[\left|\theta - \frac{360}{m}(i + 0.5)\right|\right], & \text{水印调整角度} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $i = \text{index}, \text{index} + N, \dots, \text{index} + (k - 1) \times N$ 。

2) index 表示水印的序号。每一个 index 都对应着水印 w 的一个比特位,并且通过选取合适的 m 值可获取模型的较高保真度。

3) 比特位嵌入。在确定水印序列索引嵌入后,则要进行二进制数值的嵌入。每个索引对应着1 bit的嵌入信息。以顶点 o 为圆心, $|ov|$ 为半径做圆;在半径方向上将圆划分为三个同心圆,表示三个区域其中,根据顶点 p_0 落在哪个区域判断比特位信息,落在最里面一层区域表示比特信息0;中间区域表示没有嵌入信息;最外面一层区域表示比特信息1。嵌入方法如式(3)所示,同心圆如图3所示。其中: r 为嵌入长度标量, r_w 为改变量。通过调整 p_0 的位置,来改变平面 Φ 中 p'_0 的距离来嵌入水印。嵌入时 n 强度控制因子, n 的值越大,顶点的移动距离就越小,嵌入水印的差异性就越小。

$$\delta = \frac{r_w}{r} = \frac{\left| \frac{op'}{n} \right| \% \left| \frac{ov}{n} \right|}{\left| \frac{ov}{n} \right|} = \begin{cases} 1/6, & w(\text{index}) = 0 \\ 1/2, & \text{不嵌入水印} \\ 5/6, & w(\text{index}) = 1 \end{cases} \quad (3)$$

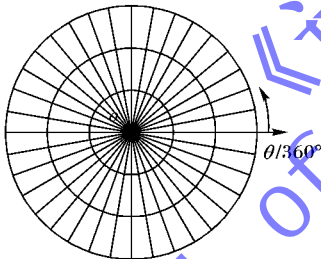


图3 半径、圆周等分示意图

1.3 水印提取与检测

水印提取步骤相对简单,便于理解,只需对整个三维模型进行以下步骤即可。

1) 提取所有嵌入了水印索引的局部嵌入单元。如前所述,局部嵌入单元都携带了两个重要参数: $\angle vop'_0$ 和距离 r_w ,含有水印信息的局部嵌入单元应该符合:

$$\begin{cases} \theta'_w = 360/m, & \text{已嵌入水印} \\ \theta'_w = \text{其他}, & \text{不嵌入水印} \end{cases} \quad (4)$$

即局部嵌入单元是否携带了水印 w 的 index 。

2) 提取该索引值中相应比特位信息,判定比特值的方法遵循以下原则:

$$\left| \frac{op'}{n} \right| \% \left| \frac{ov}{n} \right| = \eta \quad (5)$$

其中: $w(\text{index}) = 0$ 时, $0 \leq \eta < 1/3$;不嵌入水印时, $1/3 \leq \eta < 2/3$; $w(\text{index}) = 1$ 时, $2/3 \leq \eta \leq 1$ 。

3) 组合完整的水印信息并判断正确性。根据每一位比特位信息以及相应的索引值组合成完整的水印信息。然后采用

相关系数(Correlation coefficient, Cor)函数来确定是否正确,同时采用比特位误码率(Bit Error Rate, BER)来度量嵌入水印的强度:对原始水印和进行攻击之后所提取水印的二进制序列进行异或运算,计算比特误差率。

$$\text{Cor}(w^d, w) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (w_i^d - \bar{w}^d)(w_i - \bar{w})}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} (w_i^d - \bar{w}^d)^2 \sum_{i=0}^{N-1} (w_i - \bar{w})^2}} \quad (6)$$

其中: w 是原始水印序列, w_d 是提取出来的水印序列, $\text{Cor}(w^d, w)$ 为相似度, N 是水印长度, \bar{w} 是平均值。最终通过相关系数 Cor 和误差率 BER 来判断算法的优劣。

2 实验结果及其分析

本文选取斯坦福兔子模型作为实验对象进行实验。实验分别验证了算法的透明性和鲁棒性,同时与文献[1-2]作了对比。本文中 m 取360,以二进制伪随机序列作为水印信号,即水印长度为360比特二进制数值。

2.1 透明性测试

索引 index 的强度因子和距离嵌入控制参数 m 的取值控制了三维模型的嵌入量与透明性的平衡。 m 和 n 的取值越大,嵌入量会增大,但随之不可见性会降低,反之不可见性提高,嵌入量会减少。通过测试,当 $m = 360, n = 12$ 时候能达到一个比较好的效果,如图4所示。

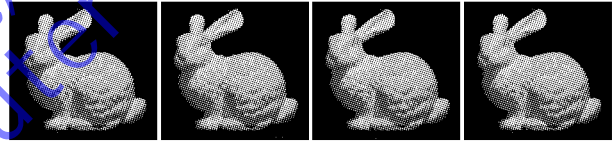


图4 嵌入前后载体对比

嵌入前后载体没有明显变化,由于本文是通过对原始三维模型进行特征点的提取,并将原始载体分离成非特征点集和初始特征点集合两类,保留所有可能的特征点信息,改变其他非特征点信息嵌入水印,因此算法在透明性方面得到了很大的提高。

Bunny点云模型透明性测试结果如表1所示,其中 m 为式(4)中控制嵌入量大小的变量, n 为式(3)中控制嵌入水印时点云模型改变量大小, Cor 为嵌入前后三维水印模型相似度对比。

表1 Bunny点云模型透明性测试对比表

m	n	Cor	m	n	Cor	m	n	Cor
360	12	0.932	720	12	0.937	360	24	0.891

2.2 鲁棒性测试

本文算法是通过对原始载体模型进行特征点的提取,以提取出来的初始特征点为核心,在它 K 近邻的邻域选取最合适的四个点构成局部嵌入单元嵌入水印。

1) 旋转攻击测试。由于不改变顶点结构,不造成点的缺失,并且算法本身没有固定坐标系,在嵌入与提取水印时是通过每个点相互位置进行的,故平移、旋转、等比例缩放和顶点重排序攻击对于检测和提取水印不会造成太大干扰。同时,对比文献[1-2]算法,本文在特征点提取、局部嵌入单元构建的同时也划分了区域,使得每一个嵌入单元都在自己的区域中,在嵌入水印的时候不会对其他区域内信息点进行改变,

降低了水印提取的误码率。噪声攻击实验的结果如表2所示,效果如图5所示。

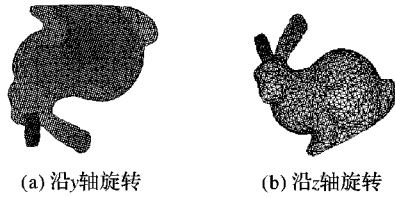


图5 旋转攻击前后对比

2) 剪切攻击测试。剪切攻击、简化攻击、局部顶点的缺失和破坏能使模型重心发生较为严重的偏移现象,但是本文嵌入水印是以局部特征点的 K 近邻邻域为嵌入单元,重心的偏移对于整体嵌入的水印算法有很大影响,但对于本文算法,有可能丢失部分信息,对整体水印信息的提取没有影响。剪切实验的结果如表2所示,效果如图6所示。

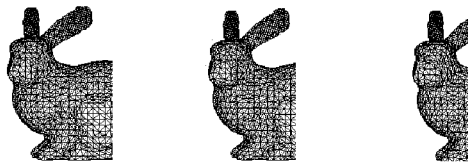


图6 剪切攻击前后对比

3) 噪声攻击测试。本文在测试算法对噪声攻击的抵抗能力时,为了模拟现实传输、存储中受到均匀随机噪声干扰,将含水印载体模型的每个顶点上加入一个噪声矢量,这个矢量的方向沿网格顶点到原点的连线,噪声的幅度定义为水印模型顶点的最大位移量与最长边长比值^[3]。在受到噪声、简化等攻击时,由于会改变模型重心位置,同时使顶点序列有所改变,特别是有时能改变模型的局部特征,对特征点的提取有一定影响,因此,本算法通过在 K 近邻区域中选取合适嵌入单元,通过增加 K 的值,来提高对攻击的容忍度。噪声攻击实验的结果如表2所示,效果如图7所示。

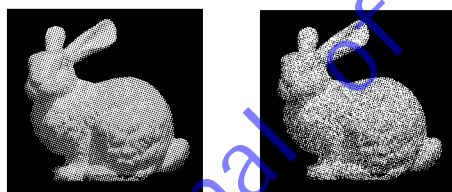


图7 噪声攻击前后对比

表2 Bunny 点云模型鲁棒性测试对比

攻击类型	参数说明	文献[1]算法		本文算法	
		Cor	BER	Cor	BER
旋转攻击	沿 z 轴旋转 45°	0.9300	0.0018	1.0000	0.0000
	沿 y 轴旋转 90°	0.9000	0.0102	1.0000	0.0000
	剩余顶点 70%	0.9800	0.0070	0.9800	0.0060
剪切攻击	剩余顶点 50%	0.9000	0.0087	0.9000	0.0076
	剩余顶点 30%	0.8143	0.1385	0.8412	0.0480
噪声攻击	噪声幅度 0.001	0.8516	0.0873	0.9216	0.0403
	噪声幅度 0.005	0.5797	0.2301	0.7161	0.1701

2.3 盲水印

盲水印的实现过程是通过局部嵌入单元中顶点 p_0 投影到平面 Φ 中,形成点 p'_0 。通过链接 p'_0 与其他三点 $\{p_1, p_2, p_3\}$ 形成外接圆圆心 o 与 $\{p_1, p_2, p_3\}$ 质心 v 和圆心 o 的连线形成夹

角。通过对角度的微调完成索引的嵌入。其中每一个角度代表相应的比特索引。在检测和提取水印时,步骤简单,通过对所有点进行检测,将符合条件的所有单元及其索引提取并组合出完整的水印信息。

3 结语

针对三维网格中散乱的点云信息,提出了一种基于特征点提取的水印算法,通过对模型进行初始特征点的提取、嵌入区域的划分、局部嵌入单元的选择,将水印信息嵌入到与原始三维模型非重要信息当中,保证了水印具有较好的不可见性。通过修改模型顶点在局部三维坐标系中的位置嵌入水印,和水印在整体模型中的重复嵌入,保证了三维模型鲁棒性;同时,利用局部坐标顶点所映射在平面上的角度来实现盲水印的嵌入。实验结果表明:三维网格模型在抵抗平移、旋转、缩放等几何变化攻击的时候具有很强的鲁棒性,同时可以抵抗一定程度的剪切、网格简化攻击和随机噪声;通过定义新的索引角度,提高了水印嵌入总量。

参考文献:

- [1] ZHANG J, WEN X, LEI M, *et al.* Dimensional grid based on wavelet transform digital watermarking technology research [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 16(8): 1-7. (张建设, 温显斌, 雷鸣, 等. 基于小波变换的三维网格数字水印技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 16(8): 1-7.)
- [2] LI P, YAN H, CUI G, *et al.* Image local invariant features matching using global information [C]// Proceedings of the 2012 International Conference on Information Science and Technology. Piscataway: IEEE Press, 2012: 627-633.
- [3] ZHANG D, YAO L. A non-blind watermarking on 3D model in spatial domain [C]// Proceedings of the 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling. Piscataway: IEEE Press, 2010, 10: 267-269.
- [4] HU M, XIE Y, XU L, *et al.* A geometry property based adaptive watermarking scheme for 3D models [J]. Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2008, 20(3): 390-394. (胡敏, 谢颖, 许良凤, 等. 基于几何特征的自适应三维模型数字水印算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(3): 390-394.)
- [5] PENG W, JI Q, MOU N, *et al.* Non-invertible watermarking scheme for 3D meshes [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(7): 1418-1425. (彭伟, 季庆革, 牟宁, 等. 不可逆的3维网格模型数字水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(7): 1418-1425.)
- [6] SU Z, LI W, DAI Y, *et al.* Digital watermarking for 3D process plant models based on logistic chaotic system [J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2011, 23(3): 426-432. (苏智勇, 李蔚清, 戴跃伟, 等. 采用 Logistic 混沌系统的三维流程工厂模型数字水印算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(3): 426-432.)
- [7] HE W, LI Y, YIN Z. A watermarking algorithm for 3D model triangular meshes [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(3): 325-329. (何文广, 李岩, 尹朝平. 一种3维模型的网格盲水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(3): 325-329.)
- [8] TANG B, KANG B, WANG G, *et al.* Dual digital blind watermark algorithm based on three-dimensional mesh model [J]. Computer Engineering, 2012, 38(6): 119-122. (唐斌, 康宝生, 王国栋, 等. 基于三维网格模型的双重数字盲水印算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(6): 119-122.)

(下转第1353页)

6 结语

本文利用粒子群优化算法协助学生从大量多样性的教材中挑选适合自己的适应性学习资源,实验结果表明该方法具有较高的可行性和有效性,但随着教学资源数目的增加,虽然可以求得较好的适应值,挑选的教材也能够满足学生进行适应性学习的需求,但是算法的复杂度却有了较大的增加,今后可以开展降低算法时间复杂度的研究。

参考文献:

- [1] CHEN S, ZHANG J. Research hotspot and development trend in intelligent teaching system [J]. *E-education Research*, 2007, 28(10): 41–46. (陈仕品, 张剑平. 智能教学系统的研究热点与发展趋势[J]. *电化教育研究*, 2007, 28(10): 41–46.)
 - [2] YANG L, LIU K, YAN Z. Research on personalized recommendation of learning resources for virtual learning community[J]. *E-education Research*, 2010, 31(4): 67–71. (杨丽娜, 刘科成, 颜志军. 面向虚拟学习社区的学习资源个性化推荐研究[J]. *电化教育研究*, 2010, 31(4): 67–71.)
 - [3] XU G, ZENG W, HUANG C. Research on intelligent tutoring system [J]. *Application Research of Computers*, 2009, 26(11): 4019–4022. (许高攀, 曾文华, 黄翠兰. 智能教学系统研究综述[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(11): 4019–4022.)
 - [4] MANOUSELIS N, VUORIKARI R, van ASSCHE F. Collaborative recommendation of e-learning resources: an experimental investigation [J]. *Journal of Computer Assisted Learning*, 2010, 26(4): 227–242.
 - [5] TANG T, McCALLA G. Smart recommendation for an evolving e-learning system: a simulation-based study [C]// *Proceedings of the 17th Conference of the Canadian Society for Computational Studies of Intelligence*. Berlin: Springer, 2004: 439–443.
 - [6] GORDON M, FAN W G, RAFAELI S, *et al.* The architecture of commKnowledge: combining link structure and user actions to support an online community [J]. *International Journal of Electronic Business*, 2003, 1(1): 69–82.
 - [7] DING L, WU C. Application of data mining in personalized services for distance education[J]. *E-education Research*, 2002, 23(9): 43–46. (丁琳, 吴长永. 数据挖掘在远程教育个性化服务中的应用[J]. *电化教育研究*, 2002, 23(9): 43–46.)
 - [8] WANG Y. Research on e-learning system to support personalized learning[J]. *China Educational Technology*, 2008, 29(3): 102–107. (王艳芳. 支持个性化学习的 E-learning 系统研究[J]. *中国电化教育*, 2008, 29(3): 102–107.)
 - [9] HE L, GAO L. Personalized recommendation of learning resources in the network environment [J]. *Distance Education in China*, 2009, 29(2): 67–69. (何玲, 高琳琦. 网络环境中学习资料的个性化推荐方法[J]. *中国远程教育*, 2009, 29(2): 67–69.)
 - [10] YANG L, LIU K, YAN Z. Research on personalized recommendation of learning resources based on case reasoning Agent under the cooperation framework [J]. *China Educational Technology*, 2009, 30(12): 105–109. (杨丽娜, 刘科成, 颜志军. 案例推理 Agent 合作框架下的个性化学习资源推荐研究[J]. *中国电化教育*, 2009, 30(12): 105–109.)
 - [11] ZHAO W, YU Y, ZHANG S. Open e-learning solutions for personalized recommendation service: an idea of exploration facing to digital learning service for lifelong learning mode [J]. *China Educational Technology*, 2010, 30(11): 110–116. (赵蔚, 余延冬, 张赛男. 开放式 e-Learning 解决方案个性化推荐服务: 一种面向终身学习的数字化学习服务模式探索思路[J]. *中国电化教育*, 2010, 30(11): 110–116.)
 - [12] WANG L. Research on some key technologies of educational resource recommendation service [D]. Changchun: Jilin University, 2013. (王龙. 教育资源推荐服务中若干关键技术的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.)
 - [13] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory [C]// *MHS '95: Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science*. Piscataway: IEEE Press, 1995: 39–43.
 - [14] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]// *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*. Piscataway: IEEE Press, 1995, 4: 1942–1948.
 - [15] YAN F, AN X. Research on the tactic of intelligent test-paper generation based on PSO algorithm [J]. *Journal of North University of China: Natural Science Edition*, 2008, 29(4): 333–337. (阎峰, 安晓东. 基于粒子群优化算法的智能抽题策略研究[J]. *中北大学学报: 自然科学版*, 2008, 29(4): 333–337.)
 - [16] YU Q, YANG Z, LEI J, *et al.* Applied binary particle swarm optimize algorithm based on probability to test-sheet composition [J]. *Computer Simulation*, 2012, 29(9): 387–391. (于庆梅, 杨争争, 雷景生, 等. 概率表示的二进制粒子群算法在组卷中的应用[J]. *计算机仿真*, 2012, 29(9): 387–391.)
 - [17] CHEN Q, LING P, XIAO Y. Control method for learning path optimization problem based on improved particle swarm optimization [J]. *Computer Engineering*, 2008, 34(4): 190–195. (陈其晖, 凌培亮, 萧蕴诗. 基于改进微粒群优化的学习路径优化控制方法[J]. *计算机工程*, 2008, 34(4): 190–195.)
 - [18] SUN Z, GU Q. Intelligent matching algorithm of concept maps to support personalized learning [J]. *Computer Engineering and Design*, 2012, 33(10): 3954–3958. (孙珠婷, 顾倩颐. 概念图智能匹配机制用于支持个性化网络学习[J]. *计算机工程与设计*, 2012, 33(10): 3954–3958.)
 - [19] LI Y. Application of item response theory in constructing the standardized examination question bank system [J]. *Journal of Shaoyang University: Social Science Edition*, 2012, 11(5): 91–95. (李映红. 项目反应理论在构建标准化考试题库系统中的应用[J]. *邵阳学院学报: 社会科学版*, 2012, 11(5): 91–95.)
-
- (上接第 1312 页)
- [9] WEBER C, HAHMANN S, HAGEN H. Sharp feature detection in point clouds [C]// *Proceedings of the 2010 Shape Modeling International Conference*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010: 175–186.
 - [10] WANG X, LIU X, LI B, *et al.* Feature detection on point cloud via local reconstruction [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2013, 25(5): 659–665. (王小超, 刘秀平, 李宝军, 等. 基于局部重建的点云特征点提取[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(5): 659–665.)
 - [11] OLSON M, DYER R, ZHANG H, *et al.* Point set silhouettes via local reconstruction [J]. *Computer and Graphics*, 2011, 35(3): 500–509.
 - [12] GRIMM C, SMART W D. Shape classification and normal estimation for non-uniformly sampled, noisy point data [J]. *Computers and Graphics*, 2011, 35(4): 904–915.