

基于自旋图和 ICP 算法的 3D 实体签名算法

莫可酪¹ 任 义² 魏春子² 周福才¹

(东北大学软件学院 沈阳 110819)¹ (东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)²

摘 要 针对已有的 3D 实体真实性认证方法中实体的标识不与实体自身绑定且难以验证的问题,提出了一种面向 3D 实体的签名算法。给出了 3D 实体签名算法的设计思想、签名产生算法以及签名验证算法。在粗匹配和精匹配阶段分别通过自旋图(Spin Image)和 ICP(Iterative Closest Point)算法对签名表面和待测表面进行匹配,从而提高了验证的准确率。对所设计的签名算法进行了实验仿真,所获得的迭代误差和匹配率表明该算法可以区分原始和伪造的签名表面,进而证明了算法的有效性。

关键词 3D 实体签名,表面匹配,自旋图,迭代最近点算法

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A

3D Object Signature Algorithm Based on Spin Image and ICP Algorithm

MO Ke-ming¹ REN Yi² WEI Chun-zi² ZHOU Fu-cai¹

(Software College, Northeastern University, Shenyang 110819, China)¹

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)²

Abstract The existing methods for verifying 3D object authenticity have some problems that the identity of 3D object is not bound to itself and difficult to verify. According to the problems, this paper proposed a signature algorithm suitable for 3D physical object, provided the design idea, signature generation and signature verification algorithm of 3D object signature algorithm. The spin image and ICP algorithm are used to match the surface of signature model and the testing model relatively in the coarse matching and fine matching phase thereby improving the accuracy of verification. The simulation for the designed 3D signature algorithm was carried out. The obtained iterate error and match rate show that the algorithm can differentiate between the original and counterfeit model, thereby demonstrating the validity of algorithm.

Keywords 3D object signature, Surface registration, Spin image, Iterative closest point

随着 3D 制造和 3D 打印技术^[1]的出现与日益普及,3D 对象的版权问题逐渐突出。目前 3D 对象真实性检验技术主要有三维网格模型数字水印^[2]和射频识别技术 RFID^[3]。三维网格模型数字水印^[4]将水印数据通过某种算法嵌入三维模型中,再从待检测的模型中提取水印信息来判断是否与原水印一致。但是三维网格模型数字水印只能针对数字产品(如 CAD 模型),对于数字化制造的实际物品真实性验证则无能为力。RFID 技术^[5]通过在实体上附着包含实体识别号的电子标签来达到防伪造的目的,但实体和其电子标签是可分离的,一旦电子标签的信息被窃取和复制,将其附着在高仿制的实体上,则无法区分真实和仿制的实体。D. Aliaga 提出了对 3D 实体嵌入基于密钥随机生成的签名^[6],只要实体表面有足够空间就可以在加工时嵌入这种特殊的签名,因此签名与实体本身是不可分离的,适用于数字化加工的 3D 实体的真实性认证。D. Aliaga 的方法是运用统计学的方法检验待测模

型是否包含非预期的误差,但需要知道与加工工艺精度有关的系统的总方差,这在实验中较难获得。

自旋图^[7](spin image)是一种将三维点的匹配问题转化为二维投影图像的特征提取方法,可作为 3D 对象检索^[8]的形状特征描述算子。迭代最近点匹配 ICP 算法^[9]是三维点云匹配的经典算法,目前两者相结合能较好地应用在三维物体识别^[10]上,而其尚未应用于 3D 实体认证领域中。

本文在文献^[6]的研究基础上,基于自旋图和 ICP 算法相结合的方法提出了一种适用于 3D 实体的真实性签名算法。文中给出了算法设计思想、签名产生算法、签名验证算法以及仿真实验过程。本文将签名验证阶段分为粗匹配和精匹配,在粗匹配阶段通过自旋图找到模型之间的初始匹配点,精匹配阶段通过 ICP 算法获取最终匹配结果。由于签名算法产生的表面平滑,一些特征点(如角点、拐点)很少甚至不存在,使用自旋图和 ICP 相结合的方法能以较高的收敛精度达到有效

到稿日期:2013-06-17 返修日期:2013-09-19 本文受国家科技重大专项项目(2013ZX03002006),国家高技术研究发展计划 863 项目(2009AA01Z122)以及沈阳市科学技术计划项目(F12-277-1-41)资助。

莫可酪(1990—),硕士生,主要研究方向为密码学与网络安全、3D 认证技术;任 义(1973—),男,博士生,主要研究方向为密码学与网络安全、3D 认证技术;魏春子(1988—),女,硕士生,主要研究方向为密码学与网络安全、3D 认证技术;周福才(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为网络与信息安全、可信计算、电子商务基础理论及关键技术,E-mail:fczhou@mail.neu.edu.cn(通信作者)。

区分原始签名和存在一定噪声的签名表面的目的,且不需要事先知道系统总方差。因此,本文首先把传统的表面匹配方法应用到 3D 实体认证过程中。实验结果证明本文算法能有效验证 3D 实体真实性。

1 预备知识

1.1 自旋图的生成

自旋图的基本思想是根据 3D 点与其他顶点的几何位置关系,构建独立于实体刚性变换的二维图像。顶点连同其自身的法向量可称为有向点(oriented point),建立坐标系,如图 1 所示。 P 为有向点, n 为 P 的法向量, Z 为 P 的切平面。 x 是表面的其他点, x 到直线 L 的距离 α 和到切平面 Z 的距离 β 构成了 x 点的自旋图坐标,即对于给定的有向点 P ,表面任一点 x 建立了映射 $x \rightarrow (\alpha, \beta)$,如式(1)所示:

$$S_0: R^3 \rightarrow R^2$$

$$S_0(x) \rightarrow (\alpha, \beta) = (\sqrt{\|x-p\|^2 - (n \cdot (x-p))^2}, n \cdot (x-p)) \quad (1)$$

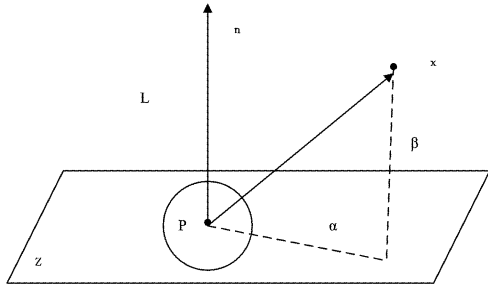


图 1 自旋图坐标系

得到的相对于有向点的其他位于表面上的点的 (α, β) 坐标呈现为二维图像上的一堆散点,表征对于此有向点的实体表面形状,自旋图最终表现形式为表示落入某方格(bin)内的散点数量的灰度图像。自旋图易受到表面网格的分辨率、支撑角和支撑距离的影响。文献[11]详细描述了在自旋图生成过程中应该如何选取小方格大小(bin size)、自旋图大小(image width)、支撑角(support angle)等参数。

1.2 相似性度量

自旋图使用二维图像作为三维实体表面的表示方式,因此可以借助二维图像的模板匹配方法解决相似性度量的问题。给定两幅旋转图 s_1 和 s_2 ,相关系数 $R(s_1, s_2)$ 通过式(2)计算。

$$R(s_1, s_2) = \frac{N \sum pq - \sum p \sum q}{((N \sum p^2 - (\sum p)^2)(N \sum q^2 - (\sum q)^2))^{1/2}} \quad (2)$$

式中, N 表示自旋图所有像素数目, p 表示自旋图矩阵 s_1 在某个小方格内的取值, q 表示自旋图矩阵 s_2 在对应方格的取值。考虑重叠像素的影响,计算相似性度量值 $C^{[12]}$ 。

$$C(s_1, s_2) = [\text{atanh}(R(s_1, s_2))]^2 - \lambda / (N \text{bins} - 3) \quad (3)$$

λ 为常数,用来控制重叠方格数 $N \text{bins}$ 对相似性度量值的影响程度。

1.3 ICP 算法

在精确匹配阶段采用 ICP 算法迭代方式逐渐逼近最佳结果。ICP 算法实质上是基于点云间最小距离的匹配方法,其核心算法可定义为:

已知:两个对应点集合 $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$, $Q = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_n\}$ 。寻找最优旋转矩阵 R 和平移向量 t ,使得总误差

差度量函数 E 达到最小:

$$E(R, t) = \text{argmin} \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|q_i - (Rp_i + t)\|^2 \quad (4)$$

2 3D 实体签名算法

2.1 设计思想

本算法思想主要包括真实性签名生成和真实性签名验证。通过 3D 建模设计,构造真实性签名,并将其嵌入 3D 数字模型中,假设敌手根据数字模型进行机械加工生成实物,验证者对待测的实体签名区域进行三维重建,获取待测模型并将其与原始模型进行匹配,验证签名的真实性。

在签名生成阶段通过密钥生成一组随机的序列数,进而生成随机但平滑变化的表面形变,以此作为 3D 实体的签名。在验证阶段将待测表面进行三维重建,提取签名信息;粗匹配阶段通过自旋图确定初始匹配点;精匹配阶段利用初始匹配点计算初始变换,进而利用 ICP 算法获取精确匹配结果。匹配的目的是检验两组签名数据对应样本点之间的形变差值。在本签名算法中,由于算法的密钥是保密的,且三维实体在生产加工中不可能完美复制,因此敌手不能获得与原始签名完全一致的表面。粗匹配和精匹配相结合提取模型对应点,可提高收敛精度,有效区分原始签名和仿造签名表面。

2.2 签名产生算法

3D 实体的真实性签名是在实体表面添加一定的形变。形变可用样本的位移值 c_i 和方差值 v_i 加以控制,它们的值是基于密钥 K 的二维的柏林噪音生成的。设 m, r 值作为控制签名形变的量级,使凹凸深度在一定的阈值内,不影响实体使用。

$$c_i = 2m\rho(K) - m \quad (5)$$

$$v_i = 2r\rho(K) - r$$

签名的基本组成元素样本 $s_i = \{(c_i, v_i)\}$,当两个样本的方差值小于一定的阈值时,它们属于同一分组,用 G 表示。为了确保空间上临近方差的相似,计算一个组包含的所有样本平均方差值 \bar{v}_k 。

$$\bar{v}_k = \frac{1}{|v_i \in G|} \sum_{i \in G} v_i \quad (6)$$

将位移值和方差值相结合作为形变的因素得到式(7),其中 $N(\mu, \sigma)$ 返回一个期望为 μ ,标准差为 σ 的正态分布的随机值, $k(i)$ 返回包含 s_i 的分组索引。

$$c_i^* = c_i + N(0, \sqrt{\bar{v}_{k(i)}}) \quad (7)$$

基于线性插值生成平滑签名模型的最终位移:

$$c_p^* = (1-s)c_1^* + sc_2^* + (1-t)c_3^* + tc_4^* \quad (8)$$

最终生成的三维签名模型如图 2 所示。

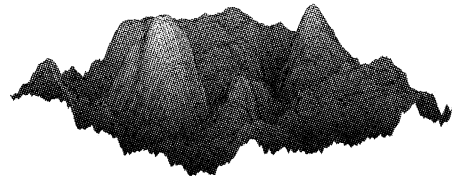


图 2 三维签名模型

2.3 签名验证算法

签名验证过程就是原始签名模型与三维重建采集的待测模型相匹配的过程,通过旋转或平移变换,使两个处于不同坐标系下的模型尽可能地重合,计算出模型之间的匹配率。

首先需要采集实体上的签名信息,只对签名区域进行三

维重建和比对,而不需要重建整个物体。使用光度立体法对签名模型进行三维重建,设置3个平行光源,每次开启一个,得到3幅签名的阴影图像(见图3),基于图像还原实体表面的三维结构,采集的签名模型结果如图4所示。

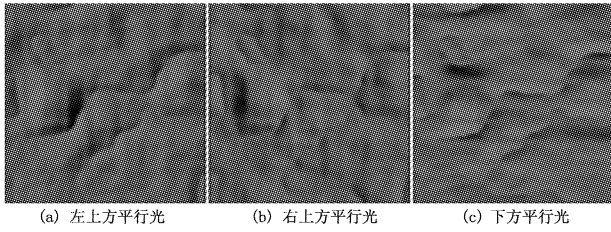


图3 不同方向光源下的签名图像

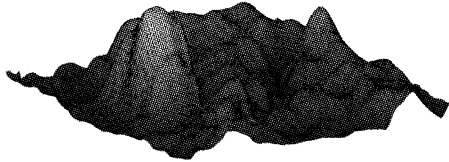


图4 签名模型三维重建结果

对原始和待测签名模型的匹配分为粗匹配阶段和精匹配阶段。粗匹配阶段获得不同视角数据间少量的对应点,由于对应点在物体上的分布是相同的,落入同一个小方格(bin)当中的点数应该相似,因此可以直接通过对比自旋图选取初始对应点。而粗匹配阶段并不获得精确且数量足够的对应点对,因此很难达到较高精度。在精匹配阶段将粗匹配阶段选取的初始对应点作为参数传入ICP算法中,将少量对应点通过邻接点扩散到表面的大部分区域,直到不能建立新的对应点对。最终匹配对的数目占原始模型顶点数的比例为匹配率。由于点云规模较大,采用避免重复搜索的方法提高精匹配的效率。签名表面匹配算法流程如下:

(1)计算原始签名模型所有顶点 $\{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ 的自旋图 $\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 。

(2)生成 m 个均匀分布的随机整数($m < n$)作为待测模型的点索引,生成待匹配自旋图 $\{s'_1, s'_2, \dots, s'_m\}$ 。

(3)将 $\{s'_1, s'_2, \dots, s'_m\}$ 中的每个自旋图与原始签名模型所有点的自旋图 $\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 进行比较,计算相似性度量值 $\{C_1(s'_1, s_1), C_2(s'_1, s_2), \dots, C_n(s'_1, s_n)\}, \{C_1(s'_2, s_1), C_2(s'_2, s_2), \dots, C_n(s'_2, s_n)\}, \dots, \{C_1(s'_m, s_1), C_2(s'_m, s_2), \dots, C_n(s'_m, s_n)\}$ 。最终得到 m 组 C 值,每组 C 值都可以用直方图表示,除去存在多个离群值和不存在离群值的情况,选择3对对应点 $[p_i, q_i]$ 作为对应点列表的初值,其中 p_i 为原始签名模型的点, q_i 为待测模型的点。

(4)通过 $[p_i, q_i]$ 用奇异值分解(Singular value decomposition, SVD)方法计算初始最优变换,对原始签名模型应用该变换,更新旋转矩阵 R 和平移向量 t 。考察 $[p_i, q_i]$ 的邻接点集 $AD(p_i)$ 和 $AD(q_i)$,对 $AD(q_i)$ 中的每个点在 $AD(p_i)$ 中寻找最近的点,得到可能的对应点 $[p_j, q_j]$ 。设定阈值 τ ,如果对应点距离 $d(p_j, q_j)$ 小于 τ ,则加入对应点列表中。对应点列表按照索引点和欧氏距离进行排序,有重复索引点的只保留距离最近的一组值。

(5)更新对应点集、对应点 $[p_j, q_j]$ 中的待测模型点 q_j ,如果在 $AD(p_j)$ 中有比 p_j 距离更近的点 p_i ,则用 $[p_i, q_j]$ 替换 $[p_j, q_j]$,再次计算对应点集的最优变换并对原始模型应用该变换,更新当前的旋转矩阵 R 和平移向量 t 。定义迭代误差为归一化的点云对应点间平均欧式距离,表达式为:

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^N Dist(p_i, q_i)}{N \cdot res} \quad (9)$$

其中, $Dist(p_i, q_i)$ 表示对应点间的欧氏距离, N 是对应点的数量, res 是网格分辨率。若每次应用变换后迭代误差减小,重复步骤(5)。

(6)重复步骤(4)–(5),直到不能建立新的对应点对,签名匹配的过程如图5所示。

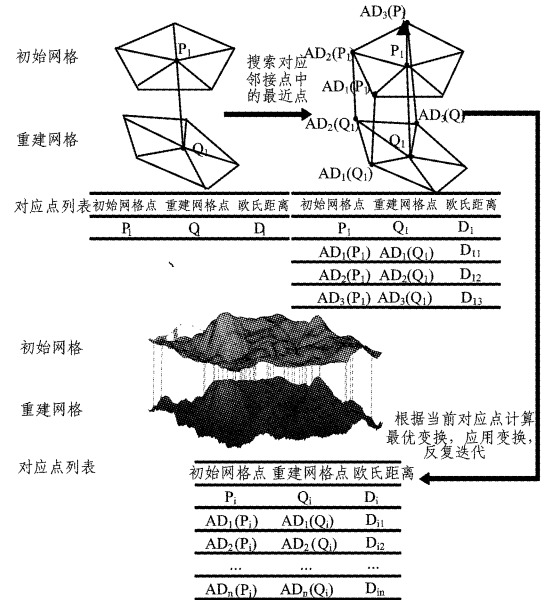


图5 签名模型由粗匹配到精匹配过程

3 实验结果及分析

3.1 实验数据

为了验证签名的有效性,实验通过2.1节签名生成算法产生多个3D签名表面,对其进行Delaunay三角剖分,生成点云网格存储实体的几何和拓扑信息,包括顶点的坐标位置和组成各三角形面片的顶点索引、网格分辨率、顶点法向量。

签名生成函数Create的参数如下:样本尺寸、签名形变参数 m 、签名形变参数 r 、密钥 $key1$ 和 $key2$ 。其中样本尺寸为 100×100 ,签名形变参数 m 和 r 值经过多次测试, m 与 \sqrt{r} 的比值在5:1附近,这样表面的光滑度刚好合适,既能不影响使用,又能够满足真实性检验对方差值变化程度的要求。改变 $key1$ 和 $key2$ 产生多个3D签名表面,如图6所示。

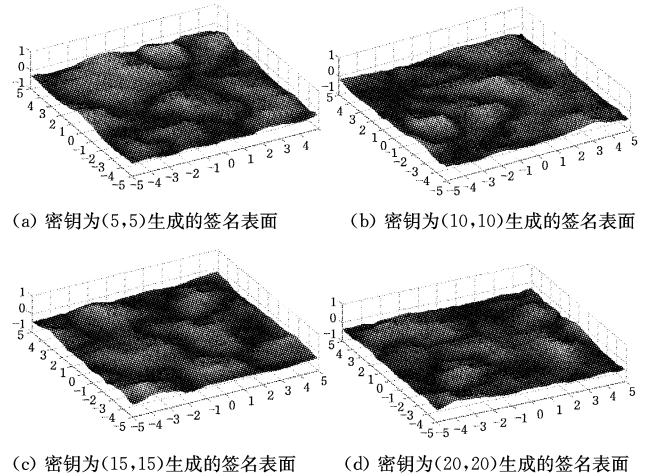


图6 3D签名表面

3.2 实验方法

对多个 3D 签名表面进行三维重建,若真实性签名有效,则通过签名验证后的模型之间的迭代误差应在阈值之内;若敌手对原始签名进行仿制,则迭代误差大于阈值。

以图 7(a)的签名表面为例,对其每一个点计算自旋图。综合考虑自旋图的辨识度和计算所花费的代价,自旋图大小设置为 60×60 ,小方格大小为网格分辨率,支撑角为 $\pi/3$ 。其中第 6158 个点自旋映射散点图及自旋图如图 7 所示。对于生成的签名 3D 模型,结合使用 Auto CAD 和 3ds Max,基于图像的三维重建还原出实体 3D 模型,重建模型随机选取的点产生的自旋图在图形的表现上一致,故不列出。

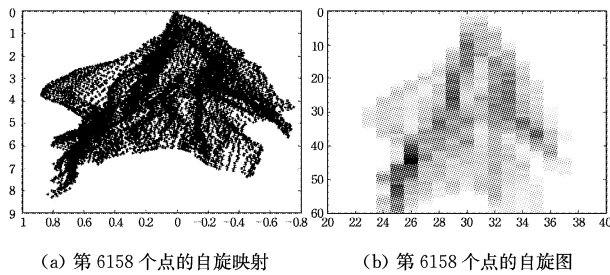


图 7 签名表面中第 6158 个点生成的自旋映射及自旋图

选取初始对应点阶段,以待测模型的 11400 个点为例画出直方图,如图 8 所示。

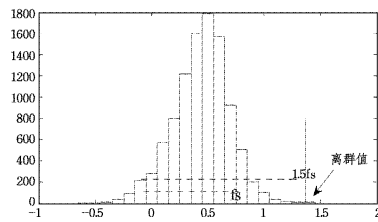


图 8 相似性度量直方图

根据箱式图法,四分位数间距记为 f_s ,选取大于 1.5 倍 f_s 的数值作为离群值。该直方图的离群值在 $C=1.3745$ 时出现,对应的匹配点为原始模型中的第 5519 个点。由此得到粗匹配初始对应点列表为: $\{[855, 1519, 0.3621], [1269, 2403, 0.3390], [5519, 11400, 0.2813]\}$,将其传入 ICP 算法中,进行精匹配步骤。假设敌手仿制的实体在待匹配签名区域存在噪点,对原始签名模型依次添加标准差为 0.01、0.1、0.2 的高斯噪声(均值均为 0),并依次进行三维重建得到待匹配三维表面,表 1 显示了敌手攻击下匹配率的结果。

3.3 实验结果

(1)对原始签名模型进行重建。设定阈值 τ 为初始模型网格分辨率的 3 倍,值为 0.34,若迭代误差在阈值之内,可认为算法收敛。精确匹配结果如图 9 所示,匹配率为 99%,迭代误差 $\epsilon=0.2988$,最终旋转矩阵和平移向量分别为:

$$R = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0015 & -0.0026 \\ -0.0015 & 0.9999 & -0.0110 \\ 0.0026 & 0.0110 & 0.9999 \end{bmatrix}, t = \begin{bmatrix} 0.0345 \\ 0.1051 \\ -0.2810 \end{bmatrix}$$

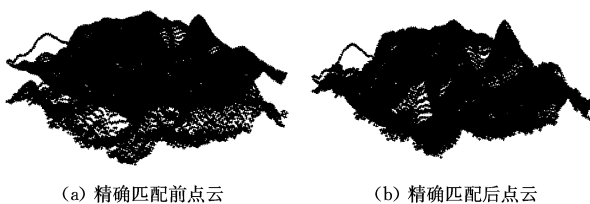


图 9 对原始签名进行重建的精确匹配结果

(2)敌手对签名进行仿制,对仿制的模型进行重建。在标准差为 0.01 的水平时,迭代误差已经大于阈值,在标准差为 0.1 水平及以上时,对应匹配点数目下降。

表 1 不同噪声水平下匹配率对比

噪声标准差	0	0.01	0.1	0.2
最终对应点对数目	9897	9171	7767	6400
达到模型的比例	99%	92%	78%	64%
迭代误差 ϵ	0.2988	0.6538	0.8393	1.0185

(3)对不同密钥产生的多个 3D 签名表面,重复进行原始签名检验和仿制签名检验的过程,记录迭代误差值,如图 10 所示。真实签名与仿制签名的迭代误差值存在差异,且对于所有的原始签名,迭代误差均在阈值之内,证明了签名检验的有效性。

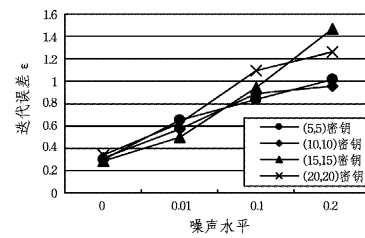


图 10 多个 3D 签名最终匹配迭代误差值

3.4 实验结论

实验中首先基于签名算法产生三维签名模型,该模型以三维曲面的形式表示,对其进行三维重建,通过自旋图和 ICP 算法相结合的表面匹配方法测试待测表面和签名表面的匹配度高低和迭代误差是否在给定的阈值内。该方法用较为良好的初始参数解决了 ICP 算法易陷入最优解的问题,达到了更高的匹配精度。由实验可知,对原始签名模型进行三维重建后匹配率达到 99%,并且最后迭代误差在阈值内,证明真实性签名验证通过。

其次,密钥和足够的签名尺寸能够保证签名的独特性以及使其难以完美复制。对于敌手仿制物品,在待测签名区域存在一定程度的噪声,对原始签名模型施加不同程度的高斯噪声,最终匹配的迭代误差值均不在阈值范围内,且对应点数目下降。最后,对于多个 3D 对象,迭代误差变化的规律一致,证明签名验证算法能有效区分与原始签名表面不一致的实体表面。

结束语 本文针对 3D 实体真实性验证研究中存在的问题,基于已有的研究为 3D 实体设计了一组由密钥产生的随机且平滑的位移作为签名,提出了适用于 3D 实体的签名算法,选取自旋图为三维实体模型提供了图表达方法,进而借助基于二维图像的工具模板匹配方法来解决比较和选取对应点的问题。对于少量的初始对应点对,通过其邻接点扩展到模型表面的其他点,在精匹配阶段通过 ICP 算法迭代寻找最优变换。实验中分别对原始签名模型和仿制模型进行重建,并依次与原始签名模型进行匹配,仅有对原始签名模型重建才能使匹配后的迭代误差在给定的阈值范围内,且匹配率最高。实验过程和结果分析表明,本文为 3D 实体签名设计和签名匹配,以及 3D 实体真实性验证提供了有效的方法。

(下转第 144 页)

后文件系统规格一致;(2)与隐藏文件相关的扇区未被使用;(3)隐藏文件大小不能超过 1MB(设每簇大小为 16 个扇区,每扇区 512B)。满足上述条件也属于可修正的恢复失败。由于 FHFR 实现文件隐藏的过程会产生伪异常簇,文件越大,产生异常簇越多。这可能会引起操作系统主动申请调用磁盘维护程序对磁盘进行修复操作,从而影响文件的恢复准确率。因此,FHFR 对大文件进行隐藏与恢复操作时具有更高的风险。

表 6 中示出了本文在隐蔽性测试、隐藏容量与执行效率测试及鲁棒性测试中,FHFR 准确恢复与恢复失败的结果。由于在鲁棒性测试中,50%的测试过程中包含高风险的全局性操作,因此鲁棒性测试中恢复率较低。在实际运用过程中,磁盘全局性操作的使用率极低,因此 FHFR 的实际恢复率远远高于表中的 92.1%。

表 6 历次试验中 FHFR 恢复成功与失败的统计结果

	一次成功	一次失败		可修正失败		成功率
		原因一	原因二	原因一	原因二	
隐蔽性测试	220	0	0	0	0	100%
隐藏容量与效率测试	110	0	0	0	0	100%
鲁棒性测试	132	6	60	6	18	78.8%
合计	462	6	60	6	18	92.1%

3.6 磁盘开销分析

对原文件的目录项,FAT 表链进行转移存储是实现文件隐藏、提高文件安全性与隐蔽性的关键步骤。文中算法实现是将目录项与 FAT 表转移存放在原文件系统数据区之下,因此需要额外的磁盘开销对其进行存放。

假设,FAT32 文件系统中,每簇大小为 16 个扇区,每扇区 512B,则每簇大小为 8kB,那么额外所需开销为 1/2048,因此,当文件小于 1M 时,所需额外开销小于 512B。FAT32 中单个文件最大为 4GB,故额外空间最大需 2MB。

结束语 本文针对 FAT32 文件系统的目录项与 FAT 表两个关键点,提出了通过擦除、转移存储目标文件目录项对文件 FAT 表项进行重定向改写的方法来达到对目标文件的深

度隐藏之目的,并将其命名为 FHFR 技术。FHFR 只需较少的额外存储空间用于目录项及 FAT 表项,即可获得较好的隐藏效果。

实验与分析结果表明,在隐蔽性方面,FHFR 能够有效抵抗多种磁盘取证手段的检测;FHFR 不受宿主文件数量大小的限制,最大可隐藏 GB 级文件,但耗时较长;在鲁棒性方面,FHFR 不仅能够有效抵御多类低烈度的文件操作的影响,而且在能够有效抵抗针对整个文件系统进行的高烈度操作对隐藏文件的影响;同时,FHFR 具有良好的安全性与恢复准确率。

参考文献

- [1] Microsoft Corporation. Microsoft extensible firmware initiative FAT32 file system specification[S]. FAT; general overview of ondisk format(Version 1.03). December 2000
- [2] Lin X, Li Q, Wang W. Information Hiding Based on CAVLC in H. 264/AVC Standard [C]//Proceeding of Multimedia Information Networking and Security (MINES), IEEE. Nanjing, China, 2012:900-904
- [3] Burton B J. How to hide file in slack file space with Slacker. exe [EB/OL]. www. jbbrowning. com, 2013. 4
- [4] Zhang Hui, Wu Chun-huan, Niu Xia-mu, et al. A Disk Disguising and Hiding Method[C]//Convergence and Hybrid Information Technology, Proceedings of Busan, Nov 2008; 520
- [5] 何耀彬,李祥和,孙岩. 基于驱动堆栈单元的文件隐藏方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(13): 9-12
- [6] 华中科技大学. 基于 FAT32 磁盘文件系统结构的文件隐藏方法[P]. ZL03118544. 4. 中国, 2003; 1-9
- [7] 蔡风华. 基于 FAT32 文件系统的文件隐藏研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007
- [8] 袁杰,江祖敏. 基于 FAT32 的文件隐藏方法及在 Linux 上的实现[J]. 电子设计工程, 2012, 20(13): 15-18
- [9] 刘伟. 数据恢复深度揭秘[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010

(上接第 106 页)

参考文献

- [1] Kesner S B, Howe R D. Design Principles for Rapid Prototyping Forces Sensors Using 3-D Printing[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(5): 866-870
- [2] Zafeiriou S, Tefas A, Pitas I. Blind robust watermarking schemes for copyright protection of 3D mesh objects[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(5): 596-607
- [3] 李辉,侯义斌,黄樟钦,等. 一种智能攻击模型在 RFID 防伪协议中的研究[J]. 电子学报, 2009, 37(11): 2565-2573
- [4] Kim K, Barni M, Tan H Z. Roughness-adaptive 3-D watermarking based on masking effect of surface roughness [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2010, 5(4): 721-733
- [5] 谢磊,殷亚凤,陈曦,等. RFID 数据管理: 算法, 协议与性能评测 [J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 457-470
- [6] Aliaga D G, Atallah M J. Genuinity Signatures; Designing Signa-

- tures for Verifying 3D Object Genuinity[J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(2): 437-446
- [7] Johnson A. Spin-images: A representation for 3D surface matching[D]. CMU, Robotics Institute, 1997: 1-288
- [8] 杨育彬,林琚,朱庆. 基于内容的三维模型检索综述[J]. 计算机学报, 2004, 27(10): 1297-1310
- [9] Besl P J, Mckay N D. A Method for Registration of 3D Shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239- 256
- [10] Halma A, ter Haar F, Bovenkamp E. Single spin image-ICP matching for efficient 3D object recognition[C]//Proceedings of the ACM workshop on 3D object retrieval. ACM, 2010: 21-26
- [11] Johnson A E, Hebert M. Using Spin Images for Efficient Object Recognition in Cluttered 3D Scenes[J]. IEEE Trans: Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(5): 433-449
- [12] Johnson A E, Hebert M. Surface Matching for Object Recognition in Complex 3-D Scenes[J]. Image and Vision Computing, 1998, 16: 635-651