

3D 打印模型版权保护技术研究进展

冯小青¹⁾, 李黎²⁾, 王继林^{*1)}, 董克明¹⁾, 刘亚楠¹⁾, 严素蓉³⁾

1. 浙江财经大学信息管理与工程学院, 杭州 310018; 2. 杭州电子科技大学计算机学院, 杭州 310018; 3. 浙江财经大学东方学院, 海宁 314408

摘要: 目的 随着数字化、智能化的3D打印、3D扫描技术的快速发展, 传统制造业流水线上的产品都可被方便快捷的复制、生产时, 版权问题已成为了3D打印时代一个日益突出且无法回避的问题。近年来如何对3D打印模型进行有效的版权标注和保护引起了研究者的关注, 涌现了一些针对3D打印模型的版权保护方法, 但算法的有效性和检测率仍需要进一步提高。为了全面反映3D打印模型版权保护研究现状和最新进展, 本文对国内外公开发表的主要文献进行梳理和分析。**方法** 在广泛文献调研的基础上, 立足于3D打印模型版权保护的基本框架, 描述了3D打印模型文件, 并详细阐述3D打印模型攻击类型, 分析了3D打印和扫描过程对模型的影响。然后, 根据3D打印模型版权保护策略的技术特征, 对相关技术进行了分类, 描述了每类方法的基本框架, 并详细阐述了相关技术特征。最后, 根据相关文献对3D打印模型数字水印算法进行了性能分析, 主要从与传统网格水印算法的性能分析比较和抗3D打印-扫描攻击的性能比较2方面进行阐述。**结果** 由于3D产品模型即有数字化模型也有实体模型, 同时3D打印是三维数据从数字模型到实体打印模型的过程, 而3D扫描过程则把实体模型转换到数字扫描模型, 这2类转换过程涉及到多次不均匀的采样与量化, 是一个非常复杂的过程。而已有的三维模型数字水印算法主要侧重于对单一的数字模态模型的版权保护, 忽视了实体模态下的产品模型的版权保护。同时, 也未考虑3D打印输出过程的自身特性(即打印的分辨率、层厚度及光滑度, 阶梯分层效果等), 以及3D扫描精度对模型数据造成的几何失真和畸变攻击。因此, 传统的3D网格模型水印策略无法直接有效应用于3D打印模型。3D打印模型版权保护相关技术可以分为基于物理特性和基于数字水印的2类方法。基于物理特性的3D模型版权保护技术, 能对3D打印后的模型嵌入有效的具有一定隐蔽性的版权标识, 但该类技术在提取微结构体等信息时需要借助一些专用设备, 不具有普适性。基于数字水印的方法, 既能实现传统的数字模态下的相似性变换、剪切、噪声、细分、量化、光顺等攻击, 又能有效抵抗3D模型的数/模等模态转换攻击, 并且高精度的3D打印机和扫描仪能有效提高水印的检测率。**结论** 3D打印产品是设计者和生产企业的智慧和心血的结晶, 包含知识产权。随着3D打印在工业领域的广泛应用, 3D打印模型版权保护有着广阔的应用前景和研究价值, 但针对目前3D打印模型的版权保护的检测和评估机制存在一些局限性还需进一步深入研究, 需要构建统一3D打印模型测试库和3D打印模型水印评测体系等。

关键词: 3D打印; 3D扫描; 版权保护; 数字水印; 评估指标

Research Progress on Copyright Protection

Technology of 3D Printing Model

基金项目: 国家自然科学基金项目(61370218, 61502414); 浙江省科技厅公益技术应用研究项目(2016C31081, LGG19F020016); 教育部规划基金项目(12YJAZH136)。

收稿日期: ; **修回日期:**

第一作者简介: 冯小青, (1977-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为信息安全、数字水印。E-mail: fenglinda@zufe.edu.cn

通信作者: 王继林, 教授, E-mail: wangjilin@msn.com

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61370218, 61502414); Public Welfare Technology and Industry Project of Zhejiang Provincial Science Technology Department (2016C31081, LGG19F020016); Planning Fund Project of Ministry of Education(12YJAZH136)

Feng xiaoqing¹, Li li², Wang jilin^{1*}, Dong keming¹, Liu yanan¹, Yan surong³

1. School of Information and Engineering, Zhejiang University of Finance and Economics, Hangzhou, 310018, China;

2. School of Computer, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

3. School of Dongfang, Zhejiang University of Finance and Economics, Haining, 310018

Abstract: **Objective** With the rapid evolution of 3D printing and 3D scanning technology, products on the traditional manufacturing line can be easily and quickly copied, copyright issues have become an unavoidable and increasingly prominent problem in the 3D printing era. Through 3D printing-scanning technology, users can quickly and easily copy and produce 3D models. The copyright protection problems become increasingly serious. In recent years, how to effectively protect the copyright of 3D printing models is causing more and more attention from the researchers. There are some copyright protection methods for 3D printing models have proposed, but the effectiveness and detection rate of the algorithms still need to be further improved. In order to fully reflect the research status and the latest development of copyright protection of 3D printing models, this paper focuses on the main literature published at home and abroad for comprehensive analysis. **Method** On the basis of extensive literature research, based on the basic framework of copyright protection of 3D printing model, the 3D printing model file is represented in detail. And the 3D printing model attack type is elaborated. Furthermore, the influence of 3D printing and scanning process on the model is analyzed. Then, according to the technical characteristics of the copyright protection strategy of 3D printing model, the related technologies are classified. The basic framework of each type of method and related technical features are described. Finally, according to some related references, the performance analysis of 3D printing model digital watermarking is carried out. It is mainly discussed from two aspects, mainly from the performance comparison of traditional grid watermarking algorithm and the performance comparison of 3D printing-scanning attack. **Result** The 3D product model has both a digital model and a solid model. At the same time, the 3D printing is a process of converting a digital model to a physical model, and a physical model is transformed to a digital scanning model during a scanning process. These processes involve multiple uneven sampling and quantization and they are very complicated processes. The existing 3D model digital watermarking algorithm mainly focuses on the copyright protection of a single digital modal model, ignoring the copyright protection of the product model under the physical mode. At the same time, the 3D printing characteristics (i.e., print resolution, layer thickness and smoothness, step layering effect, etc.) and the geometric distortion caused by 3D scanning are not considered. Therefore, the traditional 3D mesh model watermarking strategy cannot be directly applied to the 3D printing model. According to the technical characteristics of the 3D printing model copyright protection strategy, the related technology is divided into two categories: physical characteristics method and digital watermark. The copyright protection technology based on physical characteristics can embed effective copyrighted logos for 3D printed models. However, this kind of technology needs some special equipment when extracting micro-structure information and it has no universality. Methods based on the digital watermarking can not only resist against attacks of similarity transformation, cutting, noise, subdivision, quantization, smoothing in the traditional digital domain, but also effectively resist the modal transition attack of the 3D model. And the high-precision of 3D printers and scanners can effectively improve the detection rate of watermarks. **Conclusion** 3D printing products are the crystallization of wisdom and hard work of manufacturers and designers, and contain huge intellectual property rights. With the extensive penetration of 3D printing into the industrial field, copyright protection of 3D printing models has potential application and research value. However, there are some limitations in the detection and evaluation mechanism of the copyright protection of the current 3D printing model. Further research is needed. It is necessary to construct a unified 3D printing model test library and a 3D printing model watermark evaluation system.

Key words: 3D printing; 3D scanning; copyright protection; digital watermarking; evaluation criteria

0 引言

随着智能化、数字化技术的迅猛发展，普通消费者就可以在家方便快捷地通过3D扫描和打印技术复制和生产3D模型，因此3D模型版权问题成为了3D打印时代一个不可回避的问题。采用水印技术对3D模型进行版权保护，是一种已被广泛认可的有效技术手段。传统的3D模型水印技术主要应用对象为数字模态的3D网格模型，文献[1-3]对早期3D网格水印算法进行了较为详细的综述分析。在早期网格数字水印研究的基础上，近几年涌现了一些更具鲁棒性和实用性的数字水印方法，如：Wang等人^[4]提出面向大规模三维网格的基于径向基函数的鲁棒水印算法。Zhan等人^[5]提出了基于顶点曲率的3D网格模型盲水印算法。钱逸等人^[6]根据顶点与模型中心的距离值的分布特征嵌入盲水印的策略。Yuan等人^[7]提出了基于整数优化策略的大容量3D网格模型数字水印算法。李杭凯等人^[8]引入多重水印耦合处理优化模型，并结合分组策略和邻域关系定位实现3D网格模型双重水印嵌入算法。

虽然已有众多优秀的3D网格模型水印算法，但是这些水印算法都只是针对单一数字模态下的模型版权保护，未考虑模型的模态转换（如：数字模态与实体模型间的转换）。而在3D打印时代，人们是直接通过3D打印、3D扫描实现3D模型的快速复制。因此，3D打印模型版权保护需要能抵抗3D打印-扫描攻击，而传统3D网格模型水印无法抵抗这种新的攻击类型。而人类对3D模型的版权保护需求也从单一的数字模型扩展到了3D打印后的实体模型。

3D打印模型版权保护作为一种新的实际需求，引起了众多科研工作者的兴趣。虽然该领域较新，研究成果相对较少，但是已经出现了一些较为有效的保护策略。本文在已有的知识基础上，对国内外在该领域公开发表的相关文献，进行了全面地综述及对比分析。

本文第1章描述了3D打印模型文件的特点。第2章分析了3D打印-扫描过程对模型的影响及相关的攻击类型分析。第3章按照嵌入原理分类分析了面向3D打印模型的版权保护技术。第4章阐述了3D模型数字水印评估指标，并对相关3D打印模型数字水印算法进行性能比较分析。第5章进行了总

结和展望。

1 3D打印模型文件

STL模型文件是工业界广泛采用的3D打印模型文件格式，它通过一系列三角网格面片来描述3D模型。每个三角形面片单元facet包含3个法方向分量 (n_i, n_j, n_k) 和3个顶点坐标信息vertex1 $(v1_x, v1_y, v1_z)$, vertex2 $(v2_x, v2_y, v2_z)$, vertex3 $(v3_x, v3_y, v3_z)$ ，如图1所示。STL文件只含有模型的几何信息，不包含模型的纹理、颜色、材质等相关信息，也无法表达模型内部的中空结构。

3D打印的STL文件，需满足如下4个规则^[9]：

- 1) 共顶点规则：两个相邻三角形的两个顶点必须重合，且任意三角形的顶点不能出现在其他三角形的一条边上。
- 2) 右手规则：三角面片的顶点顺序和面法向量要满足右手规则，且法向量指向模型外部，如图2。
- 3) 取值规则：任意三角面片的顶点坐标必须是正数。
- 4) 充满规则：三维模型的表面都要被三角面片覆盖，不能有任何遗漏。

```

solid filename.stl //文件路径及文件名
facet normal n_i n_j n_k // 三角面片法向量的 3 个法矢量分量
  outer loop
    vertex1 v1_x v1_y v1_z //三角面片第一个顶点的坐标
    vertex2 v2_x v2_y v2_z // 三角面片第二个顶点的坐标
    vertex3 v3_x v3_y v3_z //三角面片第三个顶点的坐标
  endloop
endfacet // 第一个三角面片定义完毕
.....//其他三角面片
endsolid filename.stl

```

图 1 STL的模型文件格式

Fig.1. STL file

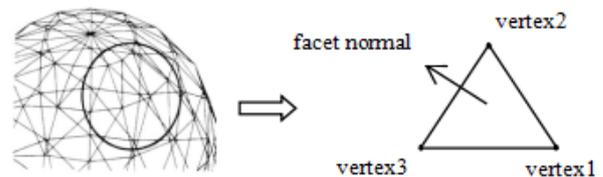


图 2 右手规则的三角网格面片

Fig. 2 A facet using right-hand rule

2 3D打印-扫描过程对模型的影响及相

关攻击类型分析

3D 打印是一种快速成型方法，它先将 3D 数字模型用切片软件分成若干层，然后把粉末状塑料或金属等可粘合材料按切片图形逐层打印叠加，最终堆积成完整物体的技术^[10]。

3D 扫描利用激光测距的原理，通过记录被测物体表面采样点的三维坐标、纹理和反射率等信息，实现对数字模型的快速重建^[11]。

文献[12-13]分析指出 3D 打印中主要包含 2 个关键过程：模型离散与材料叠加。前者主要是分层切片，后者主要是层片堆积成型。3D 扫描主要有云采样和点云拼合两个关键步骤。因此，3D 打印-扫描过程从信号学角度分析，实质上是数字模型向模拟模型转换（D/A 变换）、模拟模型向数字模型转换（A/D）的过程。原始数字模型经 D/A 和 A/D 的转换后获得的 3D 扫描体模型，与原始的数字模型有着相似的几何结构，但是顶点信息与连接信息与原始模型会存在一定的差异。

2.1 3D打印过程对模型的影响

3D打印前需要先沿垂直于打印轴的方向，将模型切分成若干层平面切片，然后通过层状堆积的方式进行打印，如图3。整个打印过程会涉及到打印方向的选择，因此需要进行相似性变换（即：平移、旋转、缩放及组合操作）。同时，打印时需要设定切片厚度，层厚越小，3D打印越精细。但是不管切片厚度多少，都会在模型表面产生层状阶梯现象，如图4所示。在3D打印时，部分模型需要使用支撑结构，如图5所示，在后处理阶段需要对模型进行去支撑、打磨、抛光等操作。

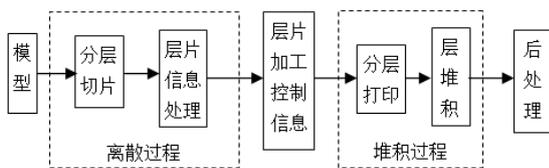


图3 3D打印流程图

Fig. 3 The flowchart of 3D printing

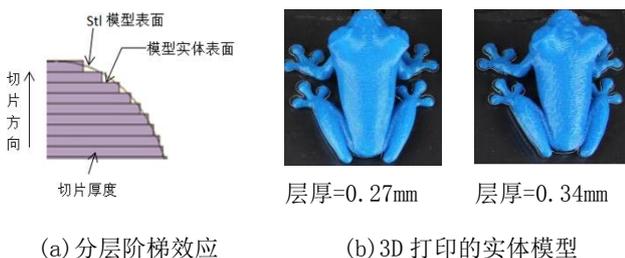


图 4 3D 打印时的分层阶梯效应和分层厚度
Fig.4 Layered step effect and layer thickness in 3D printing((a) stair stepping effect; (b)3D printing models)



图 5 3D 打印支撑结构

Fig.5 Support structure of 3D printing model

2.2 3D扫描过程对模型的影响

常见的3D扫描仪主要利用激光扫描获取物体表面各点的空间坐标，然后进行目标物体重构的一种全自动测量技术^[14]，流程图如图6所示。由3D扫描得到的模型数据都会有不同程度的失真，主要由测量过程中会产生的大量的冗余数据和由光学系统产生的数据波动。除此之外，在扫描的过程中，由于激光不能到达有遮盖的曲面，会引起模型局部细节的缺失。且通过3D扫描不能直接得到三维网格模型，需要对获取的离散的三维点云数据进行拼接、去噪和网格重构操作。



图 6 3D 扫描流程图

Fig. 6 The flowchart of 3D scanning

2.3 3D打印-扫描过程中的攻击类型分析

根据上述2小节的描述，模型在打印-扫描过程中经历了多次不均匀的采样和量化操作，包含了多种特有的信息处理和几何攻击方式，如图7所示。



图 7 3D 打印-扫描过程的攻击类型

Fig.7. attack types of 3D printing-scanning

文献[2]对3D网格水印模型的攻击进行了分类阐述。根据文献[2]的攻击分类标准，模型在3D打印-扫描过程遭受的攻击类型可以分为如下几类：

1)几何攻击：主要包括相似性变换、噪声、光顺等攻击操作。对3D模型选择打印方向,该过程涉及到旋转、平移、缩放等多种相似性变换。在模型打印时，打印材料的堆积过程会带来一定噪声攻击。后期3D打印模型需要进行涂层和抛光操作，这类操作可被视为光顺攻击。并且，3D扫描中过程中的采样误差和点云拼合会给模型带来一定的噪声攻击。

2)连接攻击：剪切、模型简化、重新网格化等攻击。模型进行3D打印时需要支撑结构，而打印后支撑结构的去除会引起模型的局部变形。在对打印模型进行3D扫描的数据采样过程中，由于扫描光束无法达到某些区域，而导致部分局部细节表达的缺失，从而产生的剪切攻击。在3D扫描后处理中，点云模型会根据实际需求进行简化处理和网格重建，该类操作会带来网格简化攻击和重新网化建攻击。

3)分层阶梯效应攻击：阶梯效应攻击是增材制造特有的一种攻击类型。这是由于3D打印的工作原理造成的，所以该类攻击在3D打印中无法避免。而该类攻击的强弱由分层制造工艺的分辨率决定。

综上所述，3D打印-扫描过程中的攻击与三维网格模型水印遭受的攻击类型存在一定的差别，特别是3D打印-扫描过程中的阶梯效应攻击，是3D打印模型所特有的攻击类型。因此，传统的3D网格模型水印算法无法有效抵抗3D打印-扫描过程中的几何攻击、连接攻击和阶梯效应攻击所带来的模型的几何数据失真和形状畸变，从而无法从3D打印、扫描后的模型中正确提取水印信息。

3 面向3D打印模型的版权保护技术

随着 3D 打印的广泛应用，面向 3D 打印模型的版权保护技术引起了众多研究者的兴趣，也涌现了若干有效的版权保护技术。文献[15-17]介绍了 3D 数字模型和打印模型的知识产权保护需求和可行性分析。根据 3D 打印模型版权保护方法的技术特征，将现有的保护技术分为基于物理特性的方法和基于数字水印的方法，如图 8 所示。

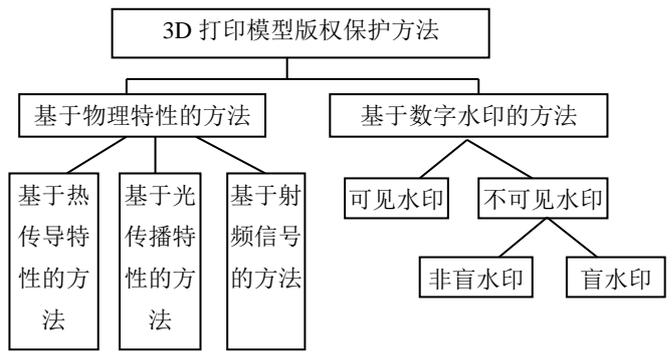


图 8 3D 打印模型版权保护方法分类

Fig.8 Classification of copyright protection methods for 3D printing models

3.1 基于物理特性的方法

基于物理特性的方法，主要利用不同物质的热传导和光传播的不一致特性，或一定频率的射频信号，构建内部微结构体的编码规则，并分析光、热、电磁波的传导信号，建立信号解码数学模型，进行秘密编码信息的提取。因此，该类方法需要借助一些专用设备才能进行版权信息的解码。该类方法的基本框架可归纳为如图9所示，分为微结构体编码规则，模型数据与微结构体数据的集成、3D打印、编码信号分析与提取。该类版权保护技术的关键步骤是微结构体编码规则和编码信号分析与提取。

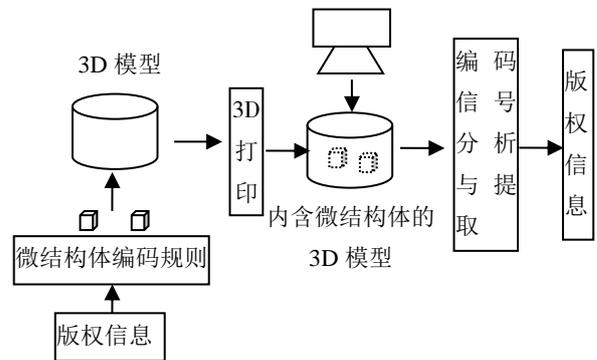


图 9 基于物理特性的版权保护基本框架

Fig.9 Basic framework of copyright protection based on physical characteristics

1)基于热传导特性的方法

Suzuki等人^[18-19]提出了基于热传导特性的微结构体编码策略。该策略的原理是当物体内部存在空腔时，材料的连续性会发生中断，从而影响热量在材料内的传输过程，并最终影响向外辐射的能量分布，如图10。Suzuki等人先把版权信息编制成一串

二进制字符串。然后根据该二进制字符串，在3D打印实物内部构建一系列空洞，然后对实体模型表面进行热光照，获取模型表面温度场分布，并对该温度场分布进行解码得到版权信息，如图 11。

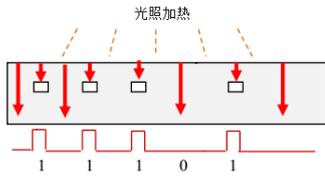


图10 热成像图

Fig. 10 Thermographic image

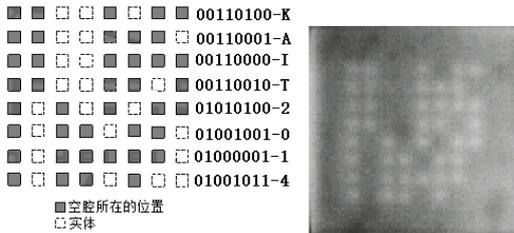


图 11 热成像编码图实例

Fig.11 Example of thermal imaging

文献[20]深入讨论了文献[18]方法的使用条件，构建了基于微腔体的嵌入技术的评价机制。进行了多项实验测试，详细评估腔体结构参数（如：腔体尺寸大小、深度、间距等）对版权信息解码率的影响，并获得了各项参数的最小经验阈值。（如：从顶部看至少 $1.5 \times 1.5\text{mm}$ 的空腔可以独立于其深度被检测到；间距 ≥ 0.9 毫米的多个空腔可以分开检测到；空腔距离顶部的深度 $\leq 2\text{mm}$ ）。

2)基于光传播特性的方法

Willis 等人^[21]利用太赫兹光波在不同的材料中的反射率不同的特性，提出基于 Thz 图像的内嵌入微结构体的版权保护技术。内嵌的微结构体由 2 种不同的材料构建而成，其编码规则如下：具有高的反射率为高密度材料，表示“1”的编码信息；具有低的反射率位低密度材料，表示“0”信息。通过对高密度和低密度材料进行多种顺序的叠加，从而实现不同的信息编码，信息如图 12 所示。

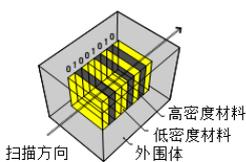


图 12 单个微结构体
Fig. 12 An infrastruct

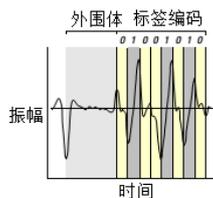


图 13 Thz-DS信号图
Fig. 13 Thz-DS signal

提取版权信息时，需要进行对测试模型进行太赫兹扫描，提取相关的太赫兹时域光谱信号图(Thz-TDS),如图 所示，并对这些信号进行解码，从而获得嵌入在实体模型内部的编码信息。由于该方法的微结构体可以设计成多种形式（格雷码、几何体、随机空隙、矩阵体、图像等）。因此该方法有较广泛的应用场景。但是该技术中3D模型和微结构体是各自单独打印，最后再把微结构体嵌入到3D模型内部。

Uehira等人^[22]提出基于红外光的微结构体策略。该策略主要应用于打印材料为塑料数脂的模型体。由于塑料树脂具有非常低的密度，而红外光在低密度材料中几乎不会发生散射现象。因此，利用该特性，Uehira等人在低密度物体内部形成高密度区域作为微结构体，并通过强光从一侧照射该物体，并用红外相机从另一侧捕获物体的成像信息。如图14所示。图像中比其他区域更暗的区域为高密度区域，因为大多数光在那里散射，很少光通过它们。实验结果显示蓝色和绿色的样本模型能获得较清晰的编码区域。

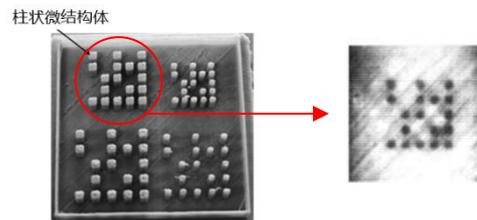


图14 高密度材质构建的区域编码及局部光成像图

Figure 14 Coding and image of high-density materials

Suzuki 等人^[18-19]的基于热传导特性的微结构体编码策略的解码率容易受热源的光照强度和时间的影 响。他们又利用 X-射线对不同密度材质的成像差异性，对内部腔体微结构提出了解码率更稳定的基于 X-射线方法^[23]。

Flank 等则利用化学标记物的特定光谱特征，使用定向能量沉积多材料添加剂制造系统产生隐蔽材料指纹信息，并用 X 射线荧光光谱法进行检测^[24]。

3)基于射频信号的方法

迪士尼公司^[25]对研发了面向3D打印模型的基于RFID标签的实用版权保护专利。3D打印模型文件不仅包含3D模型的形状数据，还包含了若干个打印层的ID元件。通过使用RFID阅读器检测或提取版权信息。由于RFID标签位于打印对象的内部，因此无

法在不损坏3D模型的情况下去除标签。

表1是基于物理特性的版权保护方法比较,这类技术能对3D打印后的模型嵌入有效的具有一定隐蔽性的版权标识。若在可疑产品内部没有检测到相关的微结构体信息,即可判定该产品是盗版,但该类技术在提取微结构体信息时需要借助一些专用设

备。Suzuki等人^[18-19,22]虽然分别针对光和热传导提出了相关的版权保护策略,但是只对规整形状(正方形、长方形)的薄板进行了相关的实验测试。而实际应用领域的3D打印模型的形状是多样化,模型不同部位的厚薄也不一致。因此,该类的版权策略测试样本少,适应对象局限性较大。

表1 基于物理特性的版权保护方法比较

Table 1 Comparison of copyright protection methods based on physical characteristics

算法	物理特性	微结构体形式	3D打印材料	微结构体与3D模型一起打印成型	检测设备	备注
文献 [18-19]	热传导	空腔	PLA	是	红外热像仪	测试样例为规则的平面薄块
文献[23]	X射线	空腔	PLA	是	X光成像仪	
文献[22]	红外光	高密度柱体	PLA	是	红外照相机	
文献[21]	太赫兹光	高低密度材质层状叠加	PLA、ABS、树脂	否	太赫兹光谱仪	微结构体有多种形式:格雷码、几何体、随机空隙、矩阵体、图像
文献[24]	射频信号	电子元件	PLA、ABS、树脂	是	全息图用专用设备、条形码和QRC用智能手机	数字、字母、条形码、QRC码、全息图、2D或3D几何体

3.2 数字水印

3D 打印模型是 3D 网格模型的其中一种类型。而在 3D 网格模型中使用数字水印进行版权保护,已经获得了研究者的一致认可。且经过近十几年的发展,3D 网格模型数字水印已经涌现了大量有效的方法。文献[1-3]对早期 3D 网格水印算法进行了较为详细的综述分析。Wang^[2]等对 3D 模型数字水印的攻击类型进行分类和并分析比较了早期的 3D 网格模型水印算法抵抗各类攻击的性能。根据文献[2]的分类标准,数字水印可以分为以下几类:

1)根据水印的视觉感知度:嵌入水印后,能否通过人的肉眼直接识别水印信息。可分为可见水印、不可见水印。

2)根据水印抵抗各类攻击的能力分为:鲁棒水印、半脆弱水印、完全脆弱水印。

3)根据水印提取过程是否需要原始模型分为:盲水印和非盲水印。盲水印不需要原始模型,而非盲水印需要原始模型。

文献[2]分析讨论上述各类水印的优缺点,提出不可见的鲁棒的盲水印策略是一种具有较强实用价值的水印方案。

根据上述的第一种水印分类标准,3D打印模型水印可以分为:可见水印和不可见水印。可见水印是在打印模型表面绘制人眼可察觉的水印体信息,该方法可以直接实现3D打印模型的防伪信息标识,但可见水印容易被在3D扫描后的数字模型中去除。不可见水印则与模型数据融合在一起,不能直接被人眼感知,且经历3D打印-扫描后,仍能从模型数据中提取到。

3.2.1 可见的数字水印

浙江大学的钱博磊等提出了基于着色图区间约束编辑的三维可见数字水印方法^[26]。首先对模型进行平面参数化,获得所需的法向图和着色图,然后对平面化的模型进行着色区间约束的水印信息添加与编辑,最后采用核函数的法向曲面重构技术完成3D曲面重建,最终模型表面实现可见水印的添加。算法流程图如图15所示。

该方法在求解新法向时，既要求满足着色约束

$$\begin{cases} \alpha_i = 2(\max(\frac{i-0.5}{N}, 0))^r - 1, \\ \alpha_{i+1} = 2(\min(\frac{i+0.5}{N}, 0))^r - 1 \end{cases} \quad (1)$$

又需要把 $D(\mathbf{n}_j) = \mathbf{n}_j - \frac{1}{|V_j|} \sum_{k \in V_j} \mathbf{n}_k$ 最小化，于是把新法向的求解问题转换为一个二次规划问题，表达式如公式(2)。

$$\begin{cases} \min \sum_j \|D\mathbf{n}_j - D\mathbf{n}_j'\|^2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} \langle \mathbf{n}_j', \mathbf{l} \rangle \geq \alpha_{i+1} \\ \langle \mathbf{n}_j, \mathbf{l} \rangle \geq \alpha_i \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

该方法在检测水印时，不需要借助任何检测仪器，只需在特定的光照方向就可通过肉眼清晰识别的水印信息。

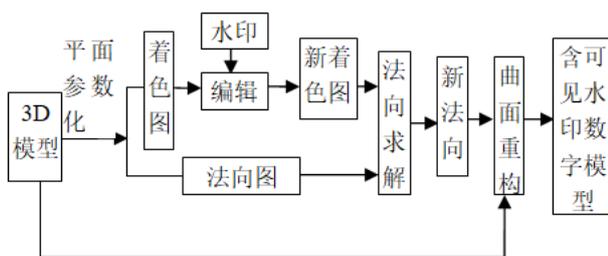


图15 可见水印流程图

Fig. 15 Flow chart of visible watermark

Adobe公司也研发了一种在3D打印物体表面嵌入3D可视符号矩阵方法进行版权标识^[27]。

上述的可见水印实质是一种曲面编辑技术，能对3D打印前的数字化模型的进行有效的标注，但该类文献并没有讨论3D打印后的层状攻击对水印肉眼识别率的影响。且由于水印体可见，既容易影响3D模型质量，又容易被盗版用户在3D扫描体中剔除。

3.2.2 不可见的数字水印

为了从3D打印-扫描后的模型中提取数字水印信息，都需要对扫描后3D点云模型进行重新网格化预处理。该类水印的基本流程如图16所示。

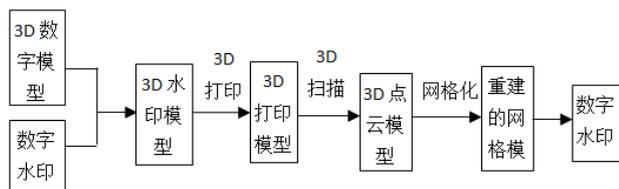


图 16 数字水印系统流程

Fig. 16 Digital watermark system process

根据提取时是否需要原始模型数据，可以把数字水印进一步区分非盲数字水印和盲数字水印方案。

3.2.2.1 非盲数字水印

基于同源网格重构的水印算法: Yamazaki 等对抗 3D 打印-扫描攻击的不可见数字水印进行了初次探索^[28]。为了实现抗 3D 打印-扫描攻击，他们对 3D 扫描后的点云模型，提出了一种有效的基于 Laplacian 频域子空间的同源网格重构算法。重构后的网格不仅几何信息与原始网格保持一致，而且顶点的连接关系也与原网格一致，如图 17。网格的重建主要包括两组参数的估计。首先，通过迭代最近点 (ICP) 技术来估计相似变换 T ，用于扫描体 S^* 与原始网格 M 对齐。然后，重构可疑网格 M^* 的谱 s^* ，使得顶点之间的欧几里得距离最小化。因此，该方法能在一定程度上抵抗 3D 打印-扫描攻击。水印嵌入采用了 Ohbuchi 的基于 Laplacian 算子的网格水印嵌入方法^[29]。但该算法对一些具有复杂表面信息的模型提取水印时会失败。主要原因是，3D 打印具有阶梯效应攻击，而模型复杂表面的细节信息会在 3D 打印时会丢失，从而给模型带来一些全局的几何畸变，而这种几何畸变改动 Laplacian 频域中低频系数，并最终导致水印提取失败。

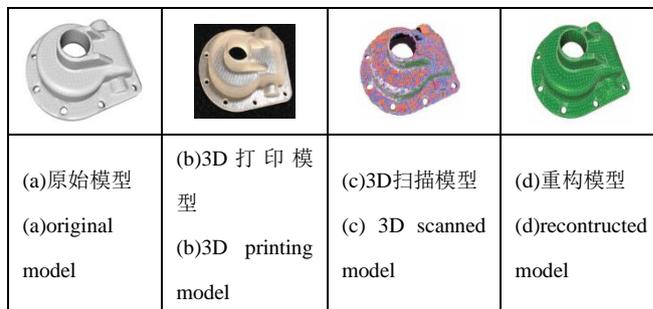


图 17原始模型、打印模型、扫描模型、重构模型

Fig. 17 Original, printing, scanned, reconstructed model

基于分层循环移位编码结构的水印方法: Hou^[30]方法借鉴了 Cho 的 3D 网格模型水印算法思想，并针对 3D 打印攻击的特点，提出了抗 3D 打印-扫描攻击的水印算法。该算法有以下 2 个创新点：

1)该算法提出了一种新的水印编码策略---分层旋转移位编码。当编码结构的旋转盘与 3D 打印的层平行排列时，该编码策略能有效保持来自分层过程的每个旋转盘的统计特征。具体编码过程如下：一个 λ 位的二进制序列 R ，分成 n 段， $x_i(1 \leq i \leq n)$ ，对需要嵌入的数据 x_i ，通过对 R 右移相应的位数，得到 n 层新的二进制序列的水印信息，如图 18 所示。计算公式如下：

$$P_m = \begin{cases} P_1[i] = R[i] \\ P_{j+1}[i] = R[\text{mod}(i + \lambda \lfloor \frac{x_j}{2^k} \rfloor, \lambda)] \end{cases} \quad (3)$$

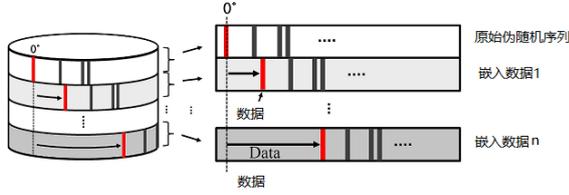


图 18 循环移位编码结构

Fig. 18 Shift coding structure

2)为了使得水印能抵抗 3D 打印-扫描攻击,提取三角面片法向量在与基准轴正交的平面上的投影的角度分布作为统计的特征信息。角度计算公式如下:

$$\theta_j = \text{mod}(a \tan 2(\vec{b} \times \vec{f}, \vec{b} \cdot \vec{f}), 2\pi) \lfloor \frac{180}{\pi} \rfloor \quad (4)$$

每层水印信息通过修改对应分块中的角度分布直方图方差嵌入,如图19。

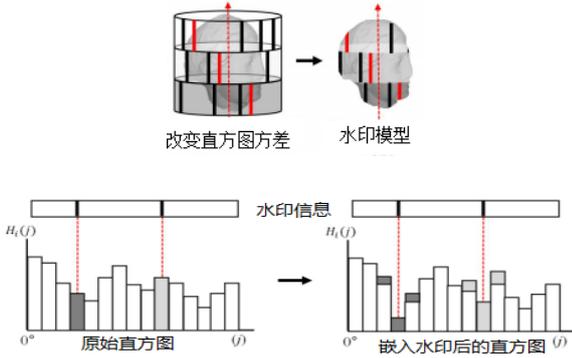


图19 调整直方图进行水印嵌入

Fig. 19 Adjusting the histogram to embed the watermark

提取水印时需要一些先验知识,密钥、重新网格化的信息、基轴信息和原始模型。计算每层水印串与相应的旋转角度的互相关系数提取嵌入的水印数据。该方法相对Yamazaki方法来说,提供了一种更为有效的水印保护策略,但是该方法要求严格按照基轴打印模型,且基轴必须与打印切片层正交。当水印模型沿不同方向打印时,水印提取将会失败。

基于 K 均值聚类的水印方法: Pham 等人^[31]构造了三角面片 Menger 曲率值, Menger 曲率定义为:

$$K_M = \frac{1}{R} = \frac{4A}{a \times b \times c}, \quad (5)$$

示意图如图 20 所示。

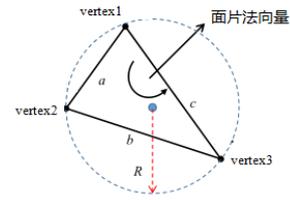


图20 Menger 曲率

Fig.20 Menger curvature

并根据 Menger 曲率用 K 均值聚类法对三角面片进行分组,计算每组的平均 Menger 曲率。然后调整每个组的平均 Menger 曲率,将水印数据嵌入到模型中,计算公式如下

$$\text{if } \omega_g = 1, K_{\text{mean}}^{m_g} = \begin{cases} \lfloor m_g \rfloor + \frac{\lfloor m_g \rfloor - K_{\text{mean}}^{m_g}}{2}, & \text{if } K_{\text{mean}}^{m_g} < \lfloor m_g \rfloor \\ K_{\text{mean}}^{m_g}, & \text{if } K_{\text{mean}}^{m_g} > \lfloor m_g \rfloor \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{if } \omega_g = 0, K_{\text{mean}}^{m_g} = \begin{cases} \lfloor m_g \rfloor - \frac{K_{\text{max}}^{m_g} - K_{\text{mean}}^{m_g}}{4}, & \text{if } K_{\text{mean}}^{m_g} > \lfloor m_g \rfloor \\ K_{\text{mean}}^{m_g}, & \text{if } K_{\text{mean}}^{m_g} < \lfloor m_g \rfloor \end{cases} \quad (7)$$

$$, \left(\text{这里 } K_{\text{mean}}^{m_g} = \frac{\sum K_i \in m_g}{|m_g|} \right).$$

水印提取,先对 3D 扫描扫描体进行网格重建和基于 Menger 曲率的分组操作,然后判断每组的平均 Menger 曲率是否大于阈值,实现水印的提取。该水印算法嵌入过程基于每组的平均 Menger 曲率,而该曲率对几何攻击和三角面片排列顺序是具有不变性。因此,该算法能抵抗几何攻击和三角面片重排序。

3.2.2.2 盲数字水印

在文献[30]的研究基础上,Hou 提出了更为实用水印方法^[32],基于层状加工痕迹分析的 3D 打印模型盲水印策略。该方法创新地利用了 3D 打印模型的层状特征信息,提出了基于表面投影、滤波、傅里叶频率分析的打印方向预估算法,如图 21 所示。通过打印轴预估算法,模型在经历 3D 打印-扫描过程后,能有效实现水印的同步,从而不需要原始模型信息就能实现水印的提取。

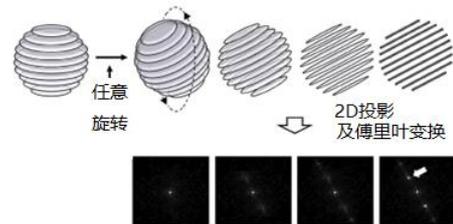


图21 分层痕迹2D投影分析及傅里叶变换

Fig. 21 Layered trace 2D projection analysis and Fourier transform

该算法的水印嵌入与提取流程图如图 22 所示。

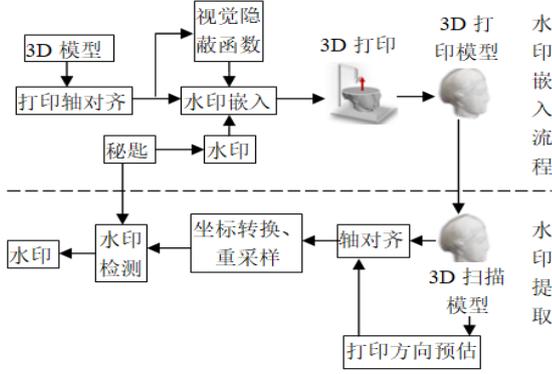


图22 水印嵌入与提取流程图

Fig. 22 The flow chart of watermark embedding and extraction

为了提高水印透明性，该方法在水印嵌入过程中，构造了基于曲面粗造度、水印嵌入强度和平滑系数的视觉隐蔽函数 $a(v_i) = s \gamma_i \beta_i$ 。并结合扩频信号，过把水印信息嵌入顶点的柱状坐标系中的径向距离，公式如下：

$$\rho_i' = \rho_i + a(v_i) \psi(\varphi_i), \quad (8)$$

其中， $a(v_i)$ 是视觉隐蔽函数， $\psi(\varphi_i)$ 为扩频信号。

$$\psi(\varphi_i) = \sum_{m=1}^{l_w} \mathbf{w}_m \sin(2\pi\varphi_i(m + f_s) + \phi_{i,l}) \quad (9)$$

这种基于频域的嵌入策略，使得该水印在传统的数字模态下能抵抗噪声、光顺、量化、细分、简化、剪切、旋转等多种攻击。在基于熔融沉积成型(FDM)的 3D 打印测试中，该算法获得了较好的测试结果。

4. 3D打印模型数字水印算法评估指标

和水印算法性能比较分析

传统的 3D 模型数字水印算法中，透明性、鲁棒性以及水印容量是水印技术的 3 大重要评估指标。其中，水印容量指嵌入水印量的大小，是一种直接的估计指标，不需进行额外的计算。而透明性和鲁棒性则需要构建复杂的公式进行计算。3D 打印模型

数字水印是 3D 模型水印的一种。因此，传统水印的评估指标也适用于 3D 打印模型水印算法。

4.1 3D打印模型数字水印算法的评估指标

4.1.1 鲁棒性

鲁棒性指水印模型经历攻击后，提取到水印的性能指标。常用的指标：相关性系数 $Corr$ 和误码率 BER (Bit Error Rate)^[2]。其中 $Corr$ 指标较常用。

1)相关性系数 $Corr$ ：对遭受攻击后三维水印模型提取的水印信息，与原始水印信息的相似程度。具体计算公式如下：

$$Corr = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (w_i' - \bar{w}')(w_i - \bar{w})}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} (w_i' - \bar{w}')^2 \sum_{i=0}^{N-1} (w_i - \bar{w})^2}} \quad (10)$$

其中， w_i 和 \bar{w} 分别为是原始水印和水印的均值， w_i' 和 \bar{w}' 为受攻击后提取的水印和水印的均值。

$Corr \in [-1,1]$ ，当 $Corr=1$ 时，说明提取的水印信息被完全提取。

2)误检率 (false positive)

$P_{fp} = \frac{FP}{TN + FP}$ ， FP 在未嵌入水印的模型中检测到水印的次数。 TN 为在未嵌入水印的模型中，没有检测到水印的次数。 P_{fp} 值越小，水印的误检率越低。

4.1.2 透明性

透明性是衡量嵌入水印后引起的模型的形变程度。水印模型的形变越小，水印算法的透明性越好。透明性评价标准一般分为主观评价和客观评价。主观评价由人眼直接观察三维模型的形变度获得，受人眼的敏感度影响较大，稳定性相对较差。客观评价则通过构建一系列复杂公式计算获得，稳定性较高。常用的客观评价指标主要有：网格结构畸变度量 (Mesh Structural Distortion Measure, MSDM) 和最大均方根误差 (Maximum Root Mean Square Error, MRMS)^[2]。其中 MRMS 指标较常用。

1)网格结构失真量 (Mesh Structural Distortion Measure, MSDM)：计算两个三维模型在人类视觉感受上的结构相似程度。MSDM 越接近 0，三维模型水印的透明性越好。

$$d_{MSDM}(M, M') = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{LMSDM}(p_i, q_i)^3 \right)^{\frac{1}{3}} \in [0, 1] \quad (11)$$

公式中的 p 和 q 分别为原始模型 M 和水印模型 M' 上的局部窗口。

$$d_{LMSDM}(p, q) = (0.4 \times L(p, q)^3 + 0.4 \times C(p, q)^3 + 0.2 \times S(p, q)^3)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

其中 L 、 C 和 S 分别代表曲率、对比度和结构比较函数。

2)最大均方根误差 (MRMS): MRMS 值越小, 数字水印的透明性越好。

$$d_{MRMS}(M, M') = \max(d_{RMS}(M, M'), d_{RMS}(M', M)) \quad (13)$$

M 是原始模型, M' 是水印模型, d_{MRMS} 是均方根误差。

$$d_{RMS}(S, S') = \sqrt{\frac{1}{|S|} \int \int_{p \in S} d(p, S')^2 dS} \quad (14)$$

其中 p 是三维曲面 S 上的点, $|S|$ 表示曲面 S 的面积, $d(p, S')$ 表示点 p 到曲面 S' 的距离。均方根误差是不对称的, 即 $d_{RMS}(S, S') \neq d_{RMS}(S', S)$ 。

4.2 3D打印数字水印性能分析

3D 打印数字水印方法不仅要抵抗传统的数字水印攻击, 而且还要抵抗 D/A-A/D 的模式转换攻击。因此, 3D 打印数字水印性能分析包括 2 部分, 第 1 部分是传统的网格水印算法进行性能比较。第 2 部分是抗 3D 打印-扫描攻击的性能比较。由于文献[32]已对相关的水印算法进行了测试实验, 本节分析的实验数据来自文献[32]。

1)与传统网格水印算法的性能分析比较

与传统网格水印算法性能比较只测试水印在数字模态下的各类攻击实验, 不涉及到 DA/AD 的模式转换攻击。

Cho 方法^[33]是一种经典的基于统计特征的传统 3D 网格模型数字水印方法, 该算法主要通过修改顶点范数分布的统计特征, 进行水印嵌入, 能有效实现水印的盲检测, 且算法鲁棒性较强, 能抵抗噪声、简化、平滑、量化、细分和剪切攻击等多类攻击。

由于上一节介绍的抗 3D 打印的数字水印算法

中, 只有[32]算法是盲水印算法。因此, 本节对文献[32]与 Cho 算法^[33]进行了讨论分析, 相关的实验数据(表 2)来源于文献[32]。测试实验在 Wang 的 Benchmark 平台^[34]进行。表[2]表明, 文献[32]算法虽然对噪声、光顺、量化、细分、剪切、旋转有一定的鲁棒性, 但对简化攻击较脆弱。同时在抵抗各类攻击的性能上, Hou[32]算法的鲁棒性没有 Cho[33]算法强。上述实验数据还表明, Hou[32]算法在模型没收到任何攻击时, 并不能完全提取到水印。主要原因是该算法在提取水印时需要进行统一的重采样过程和重新网格化操作。因此, 当模型表面复杂较高时, 水印的检测精度会降低。同时, 重新网格化的操作也会对水印模型带来一定的形变, 会降低水印的检测率。

表2 Hou[32]与Cho[33]算法的比较

Table 2 Comparison of Hou[32] and Cho[33]

Algorithm	Corr	
	Hou[32]	Cho[33]
no attack	0.73	1
Noise(0.2%)	0.676	0.956
Smoothing($N_{irr}=30$)	0.532	0.716
Quantization(8bits)	0.545	0.912
Subdivision(Loop)	0.696	0.896
Simplification(10%)	0.494	0.597
Cropping(10%)	0.511	0.508
Rotation(3 度)	0.643	1

2)抗 3D 打印-扫描攻击的性能比较

抗3D打印-扫描攻击性能受打印机和扫描仪精度的影响。常用的3种型号的3D打印机(Makerbot Replicator、OTS Deltabot、Objet Eden250)。Makerbot Replicator和OTS Deltabot利用熔融沉积建模(FDM), 具有0.1-0.3mm层厚的打印精度。Objet Eden250基于聚合物喷射技术(Polyjet)创建3D对象, 平均厚度为16-30 μ m。3D扫描仪为Maestro3D MDS400, 它基于多条纹激光三角测量(MLT)方法扫描3D模型, 具有0.07mm的空间分辨率。

文献[32]分析了3D打印机的精度对不同水印模型的水印误检率的影响, 相关的测试结果如表 3 所示。测试的水印模型为网格结构失真量 MSDM<0.3 的 Bunny-1 和 venus-1, 以及 MSDM<0.5 的 Bunny-2 和 venus-2 四种水印模型。实验数据显示, 虽然 FDM(熔融沉积)的 3D 打印机的分辨率相对

Polyjet(喷墨)的分辨率要低,但是算法[32]在基于FDM的3D打印机能获得较高的水印检测率。主要原因在于FDM的3D打印有较为明显的打印分层痕迹,从而导致[31]算法能很好地利用该特性进行打印轴估计,而Polyjet的打印方式则无法有效对印刷方向进行估算,水印检测结果也不稳定。

同时上述实验也表明抗3D打印-扫描攻击的水印方法的检测率与FDM的3D打印机的分辨率有较大的相关性。Makerbot Replicator的精度比OTS Deltabot精度高,水印检测率也高。因此,使用高质量的3D打印机,能有效提高水印从3D扫描体中的检测率。

表3 不同精度的3D打印机对水印误检率 P_{fp} 的影响

Table 3 Different precision 3D printers

3D 打印机	测试模型 MSDM			
	Bunny-1<0.3	Bunny-2<0.5	Venus-1<0.3	Venus-2<0.5
Makerbot Replicator	0.068	10^{-5}	0.004	10^{-7}
OTS Deltabot	0.103	10^{-4}	0.07	10^{-5}
Objet Eden250	0.322	0.260	0.083	10^{-6}

表4是文献[32]的水印鲁棒性测试数据,采用 P_{fp} 指标进行数据分析。3种算法方法都能抵抗一定的3D水印-扫描攻击。其中算法[32]的鲁棒性能最好,且能实现盲检测。[30]方法仅能在venus-2测试模型中获得理想的误检率。而算法[28]由于它是通过重建一个同源网格,并没有没有任何特性来保证3D打印扫描过程的稳健性,包括层切片攻击,因此对3D打印-扫描攻击的鲁棒性相对较弱,误检率较高。

表4 抗3D打印-扫描攻击的水印鲁棒性比较

Table 4 Watermark robustness against 3D printing-scanning attacks

算法	盲/非盲	水印嵌入域	P_{fp}			
			Bunny-1	Bunny-2	Venus-1	Venus-2
[28]	非盲	频域	0.353	0.390	0.413	0.089
[30]	非盲	空域	0.399	0.091	0.687	10^{-4}
[32]	盲	频域	0.068	10^{-5}	0.04	10^{-7}

5 总结与展望

3D打印已在各个领域得到应用,而面向3D打印模型版权保护技术的研究刚刚起步,相关研究论文较少。本文立足于3D打印版权保护的基本框架,阐述了3D打印-扫描过程对模型的影响,并分析了3D打印-扫描过程涉及的攻击类型。对已有的3D打印版权保护技术进行了分类讨论,并分析了各自的优缺点。基于物理特性的版权保护技术不受3D打印方式的影响,但是受打印材料的影响较大,并且在检测时需要复杂的专业设备。而基于数字水印的方法,主要针对低端的3D打印机。在检测的时候一般需要进行网格重建或根据打印痕迹获取打印方向。

3D打印模型版本保护今后的研究工作中,研究人员应该重点在以下几个方面进行研究和改进:

1)构建统一、公开的3D打印模型库和3D打印模型水印评测体系的建立。目前缺乏公开的3D打印模型库,并且没有统一的评测指标与评价体系。

2)目前的3D打印水印算法都需要进行重新网格化操作。未来研究可以通过使用印刷轴估计器设计印刷噪声衰减器,则可以提高水印的鲁棒性和不可见性。

3)为了有效抵抗3D印刷和扫描过程中,对模型带来的剧烈扭曲,研究具有并提取旋转不变特性:如形状分布,进行水印的嵌入。

参考文献(References)

- [1] Pan Z.G., Sun S.S., Li L. An overview of 3D model watermarking[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2006, 18(8): 1103-1110. [潘志庚, 孙树森, 李黎, 三维模型数字水印综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006,18(8): 1103-1110.]
- [2] Wang K., Lavoue G., Denis F., et al. A Comprehensive Survey on Three-Dimensional Mesh Watermarking[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2008,10(8): 1513-1527.
- [3] Zhang X.Y, Peng W., Zhang S.Y. Review of watermarking techniques for 3D ploygonal models[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics. 2003,15(8):912-920. [张新宇,彭维,张三元,叶修梓. 3D网格数字水印研究进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学

- 报.2003,15(8):912-920.]
- [4] Wang J. R., Feng J. Q., Miao Y. W. A Robust Confirmable Watermarking Algorithm For 3d Mesh Based On Manifold Harmonics Analysis[J]. *Visual Computer*. 2012, 28(11): 1049-1062
- [5] Zhan Y. Z., Yan-Ting L. I., Wang X. Y., et al. A blind watermarking algorithm for 3D mesh models based on vertex curvature[J]. *Journal of Zhejiang University-Science C(Computers & Electronics)*, 2014, 15(5):351-362.
- [6] Qian Y., Wang X.Y., Zhan Y.Z. A blind watermarking Scheme for three-dimensional mesh models based on statistical characteristic of vertices. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*. 2015, 27(9):1661-1668. [钱逸, 王新宇, 詹永照. 基于顶点统计特征的三维网格模型盲水印算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2015, 27(9):1661-1668.]
- [7] Yuan W. Q., Li H. K., Li L., et al. A watermarking mechanism with high capacity for 3D mesh objects using integer planning[J]. *IEEE Multimedia*, 2018,1-1.
- [8] Li H.k. Research on digital watermarking algorithm for 3D mesh model[D]. 2018, Hangzhou Dianzi University. [李杭凯, 三维网格模型数字水印算法研究[D], 2018, 杭州电子科技大学.]
- [9] Luo Z.M. Research on algorithm and application of 3D printing[D]. 2015, Beijing Institute Of Graphic Communication. [罗中明, 3D打印算法研究及应用[D],2015,北京印刷学院]
- [10] Niu Y.F. Research on technologies of 3D printing[J]. *Printing Quality & Standardization*, 2014, 25(4):21-23.[牛一帆. 3D打印技术探究[J]. *印刷质量与标准化*, 2014, 25(4):21-23.]
- [11] Tang Q. Three-dimensional laser scanning technology and Enlightenment of Foreign Status[J]. *World Nonferrous Metal*, 2016(12):21-23. [唐琴. 三维激光扫描技术国外应用研究现状及启示[J]. *世界有色金属*, 2016(12):21-23.]
- [12] Liu H.X. A Study of optimization of slicing direction and slicing algorithm in 3D printing[D]. XiDian University, 201. [刘红霞. 3D打印分层方向优化与分层算法研究[D]. 西安电子科技大学. 2014]
- [13] Liu L.G., Xu W. P., Wang W.M., et al. Survey on Geometric Computing in 3Dprinting[J], *Chinese Journal Of Computers*, 2015, 38(6): 1243-1267.[刘利刚, 徐文鹏, 王伟明,等. 3D打印中的几何计算研究进展[J]. *计算机学报*. 2015, 38(6): 1243-1267]
- [14] Dou P. Monitoring method and accuracy analysis of existing railways based on laser scanning[D]. Lanzhou Jiaotong University,2014. [窦鹏. 基于激光扫描的既有轨道状态监测方法与精度分析[D]. 兰州交通大学, 2014.]
- [15] Alfaced P. R., Montanola M. Applicability of watermarking for intellectual property rights protection in a 3D printing scenario[C].// *Proceedings of International Conference on 3d Web Technology*. ACM, 2015:89-95.
- [16] Niess V., Wende S. Intellectual property and product liability chal- lenges in three-dimensional printing [J], *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 2017, 6(4):128–163
- [17] Fadhel N. F., Crowder R. M., Wills G. B. Approaches to maintaining provenance throughout the additive manufacturing process[C]. //*Proceedings of Internet Security*. IEEE, 2014:82-87.
- [18] Suzuki, M., Silapasuphakornwong P., Uehira K., Copyright Protection for 3D Printing by Embedding Information Inside Real Fabricated Objects[C]. 2015:180-185. //*Proceedings of the 10th International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP-2015)*. 2015: 180-185.
- [19] Silapasuphakornwong P., Suzuki M., Unno H., et al. Nondestructive readout of copyright information embedded in objects fabricated with 3-D printers[C]. //*Proceeding of Workshop Digit. Watermarking*. Cham, Switzerland, 2015: 232–238.
- [20] Suzuki M., Dechrueng P., Techavichian S., et al. Embedding Information into Objects Fabricated With 3-D Printers by Forming Fine Cavities inside Them[J]. 2017, 2017(7):6-9.DOI:10.2352/ISSN.2470-1173.2017.7.MWSF-317
- [21] Willis K.D.D. , Wilson, A.D. InfraStructs: Fabricating information inside physical objects for imaging in the terahertz region[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2013. 32(4): 96-96.
- [22] Uehira K., Suzuki M., Silapasuphakornwong P., et al. Copyright Protection for 3D Printing by Embedding Information Inside 3D-Printed Objects[C].//*Proceedings of*

- International Workshop on Digital Watermarking. Springer International Publishing, 2016:370-378.
- [23] Suzuki M., Silapasuphakornwong P., Takashima Y., et al. Number of detectable gradations in X-ray photographs of cavities inside 3D printed objects[J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2017,E100.D(6): 1364–1367
- [24] Flank S., Nassar A. R., Simpson T. W., et al. Fast authentication of metal additive manufacturing[J]. 3D Printing Additive Manuf., 2017, 4(3): 143–148
- [25] Voris J., Christen B. F., Altred J., et al. Three dimensional (3D) printed objects with embedded identification (ID) elements[P]. U.S. Patent 9656428, May 23 2017
- [26] Qian B.J. Shading based 3D geometry watermarking editing[D], 2013, Zhejiang University.[钱博嘉, 三维几何数据的着色水印方法[D]. 2013, 浙江大学.]
- [27] Kumar A., Goel N. P., Hemani M. Method and apparatus for storing and retrieving data embedded into the surface of a 3D printed object[P]. U.S. Patent 9400910, Jul. 26, 2016.
- [28] Yamazaki S. T., Kagami S. S., Mochimaru M. K. Extracting watermark from 3D prints[C]. //Proceeding of 22nd International Conference on Pattern Recognition. 2014.
- [29] Ohbuchi R., Takahashi S., Miyazawa T., et al. Watermarking 3D Polygonal Meshes in the Mesh Spectral Domain[C]. // Proceeding of the Graphics Interface. 2001.
- [30] Hou J.U., Kim D. D. G. , Choi S. S. H. , et al. 3D print-Scan resilient watermarking using a histogram-Based circular shift coding structure[C]. //Proceeding of . IH&MMSEC. 2015.
- [31] Giao N. Pham, Lee S. H., Kwon O. H., et al. A Watermarking Method for 3D Printing Based on Menger Curvature and K-Mean Clustering[J]. Symmetry, 2018, 10(4):97.
- [32] Hou J.U., Kim D.G., Lee H.K., Blind 3D Mesh Watermarking for 3D Printed Model by Analyzing Layering Artifact[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2017,12(11),2712-2725
- [33] Cho J.W., Prost R., Jung H.Y. An Oblivious Watermarking for 3-D Polygonal Meshes Using Distribution of Vertex Norms[J]. IEEE transactions on Signal Processing, 2007. 55(1): p. 142-155.
- [34] Wang K., Lavoué G., Denis F., et al. A Benchmark for 3D Mesh Watermarking[C]. //Proceedings of Shape Modeling International Conference. IEEE, 2013:231-235



冯小青, 1977年生, 女, 副教授, 主要研究方向: 信息安全、数字水印。

E-mail: fenglinda@zufe.edu.cn



王继林, 男, 教授, 主要研究方向: 信息安全。

E-mail: wangjilin@msn.com