

针对三维彩色点云模型水印算法的研究

张国有, 刘佳华, 米 佳

(太原科技大学 计算机科学与技术学院, 山西 太原 030024)

摘 要:为实现三维彩色点云模型的版权保护, 有效提高数字水印算法的鲁棒性, 提出了一种基于冗余离散小波变换和奇异值分解的三维彩色点云模型的数字水印算法。首先, 该算法对三维彩色点云模型进行三维仿射不变性处理; 其次, 利用坐标投影算法将处理后的三维彩色点云模型转化为二维彩色图像; 接着, 将二维彩色图像应用冗余离散小波变换得到的低频部分 LL 子带作为水印的嵌入区域, 并且对 LL 子带进行奇异值分解, 此外应用 Arnold 变换将二值水印图像变为加密后的水印图像; 最后, 通过修改奇异值分解得到的矩阵 U 中的相关系数来实现加密水印图像的嵌入。水印提取是根据矩阵 U 中的相关系数的大小关系来实现。实验结果表明, 该算法对平移、旋转、均匀缩放、噪声、剪切、简化等攻击具有鲁棒性, 不仅有效提高了数字水印算法的鲁棒性, 而且也达到了保护三维彩色点云模型版权的目的。

关键词: 三维彩色点云模型; 版权保护; 数字水印; 冗余离散小波变换; 奇异值分解; 鲁棒性

中图分类号: TP309.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2023)05-0062-07

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2023.05.010

Research on Watermarking Algorithm for 3D Color Point Cloud Model

ZHANG Guo-you, LIU Jia-hua, MI Jia

(School of Computer Science and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to achieve copyright protection of 3D color point cloud models and effectively improve the robustness of digital watermarking algorithms, a digital watermarking algorithm for 3D color point cloud models based on redundant discrete wavelet transform and singular value decomposition is proposed. Firstly, the algorithm performs 3D affine invariant processing on the 3D color point cloud model. Secondly, the processed 3D color point cloud model is transformed into a 2D color image using a coordinate projection algorithm. Next, the LL sub-band, the low frequency portion obtained by applying the redundant discrete wavelet transform to the two-dimensional color image, is used as the embedding region of the watermark, and the singular value decomposition is performed on the LL sub-band, in addition to applying the Arnold transform to transform the binary watermark image into an encrypted watermark image. Finally, the embedding of the encrypted watermarked image is achieved by modifying the correlation coefficients in the matrix U obtained from the singular value decomposition. The watermark extraction is based on the relationship between the magnitude of the correlation coefficients in the matrix U . Experimental results show that the proposed algorithm is robust to attacks such as translation, rotation, uniform scaling, noise, clipping and simplification, which not only effectively improves the robustness of the digital water marking algorithm, but also achieves the purpose of protecting the copyright of 3D color point cloud models.

Key words: 3D color point cloud model; copyright protection; digital watermark; redundant discrete wavelet transform; singular value decomposition; robustness

0 引言

近几年, 三维彩色模型广泛应用于医学成像^[1]、地面扫描^[2-3]、自动驾驶^[4-5]、三维遗产文化重建^[6]以及室内场景建模^[7]等领域。然而, 它作为一种数字媒体, 在进行低成本无损复制和传输的同时也导致模型非法占有、复制等版权保护问题变得非常严重^[8]。

数字水印技术作为版权保护的重要手段, 对三维网格模型的版权保护有了大量的研究, 而三维点云模

型的研究却处于早期阶段。文献[9-10]在空间域中对三维点云模型进行水印嵌入, 但是由于点云模型数据量大、无拓扑结构, 导致计算复杂度高且鲁棒性弱等。所以, 国内外研究学者将点云模型的数据特性应用到频域中。频域包括离散余弦变换 (Discrete Cosine Transform, DCT)、图像傅里叶变换 (Graph Fourier Transform, GFT)、离散小波变换 (Discrete Wavelet Transform, DWT) 等。其中, 文献[11]提出了一种三

收稿日期: 2022-07-06

修回日期: 2022-11-09

作者简介: 张国有 (1972-), 男, 副教授, 博士, CCF 会员 (80252M), 通信作者, 研究方向为智能软件工程、信息安全; 刘佳华 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为大数据与智能软件开发。

维点云模型的非盲水印算法,该算法对每个点云顶点的颜色信息进行 GFT 变换并将水印嵌入到变换后的 GFT 系数中,但存在的问题是 GFT 变换只通过频率来分析信号,抗简化攻击的能力较弱。文献[12]提出了基于 2D-DCT 的三维彩色点云模型的数字水印算法,将三维彩色点云模型投影为二维彩色图像,通过修改 2D-DCT 系数插入水印信息,完成水印的嵌入,提高了不可见性,但是无法完全抵抗几何仿射变换的攻击。文献[13]提出了根据地质点云模型的空间特征得到空间特征变量,将空间域信息转换为频率域信息,最后利用数理统计方法对频率域信息进行水印嵌入。在几何仿射变换和简化攻击的鲁棒性表现较好,但是不同简化率使得不可见性具有不确定性。所以,频域算法^[11-13]相比于空域算法^[9-10]的鲁棒性得到了提高,但还是存在透明性和鲁棒性难以权衡的问题。

文献[14]研究发现 DWT 被认为是更适合作为水印的频域,因为它的时间/频率分解特性在本质上类似于人类视觉系统(Human Visual System, HVS),可以提供更好的透明性和鲁棒性。因此,文献[14]提出了一种基于 DWT 的三维点云模型数字水印算法,对模型各点到重心距离值进行 DWT 变换,并选择其一维 LL 子带作为水印嵌入域,但是当水印容量增加到 1 024 位时,不可见性降低。

文献[15]提出 DWT-DCT 混合嵌入水印的方法,将三维点云模型利用坐标投影算法生成二维图像,在二维图像 DWT 域中的 LL 子带进行 DCT 变换,将水印嵌入到 DCT 变换的 DC 系数中。文献[14-15]较好地平衡了水印的透明性和鲁棒性,但是由于 DWT 变换存在下采样的过程,导致点云模型中有价值的点被修改或移位。

针对这一问题,Roy 等人^[16]提出了冗余离散小波变换(Redundant Discrete Wavelet Transform, RDWT),不仅克服了 DWT 的移位变量特性,而且比 DWT 具有更完整的图像信息。此外,利用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)的代数性质,严格证明了嵌入水印的图像在遭受缩放、平移、旋转、转换等几何攻击后,奇异值具有良好的不变性,为该算法提供了理论依据^[17]。但是 Jia 等人^[18]研究发现当一个奇异值被修改时,一个图像像素矩阵的所有值都将被改变,导致水印图像的鲁棒性得不到改善。

为此,该文以三维彩色点云模型为载体,提出一种新的混合冗余离散小波变换和奇异值分解(Redundant Discrete Wavelet Transform - Singular Value Decomposition, RDWT-SVD)的数字水印算法。该算法提高了抵抗各类攻击尤其是几何仿射变换、剪切、简化和噪声攻击的鲁棒性。

1 相关理论知识

1.1 冗余离散小波变换

由于小波分解具有空间分辨率与频率分辨率,因此在图像处理中得到了广泛的应用^[16]。DWT 使用低通滤波器 $H(Z)$ 、高通滤波器 $G(Z)$ 和下采样,通过将信号分解为粗略系数和细节系数来分析具有不同分辨率的不同频带的数字图像。但是下采样过程会导致图像中潜在信息可能被删除,降低了从图像中提取水印的可能性。为了克服 DWT 的移位变量特性,Roy 等人^[17]提出了移位不变的 RDWT 变换。首先,对图像上的行应用 $H(Z)$ 和 $G(Z)$ 来分析图像。这样就构造了大小均为 8×8 的粗略系数和细节系数。下一步,对粗略系数的列和细节系数的列应用 $H(Z)$ 和 $G(Z)$ 生成四个大小为 8×8 的不同图像子带(LL, LH, HL, HH)。其中,用 $G(Z)$ 分析的行和列用 H 指定。同样,用 $H(Z)$ 分析的行和列用 L 指定。例如, LH 子带是使用行上的低通滤波器和列上的高通滤波器产生的。为了重建图像,使用了合成滤波器,由于上采样和下采样在两个滤波器中都不存在,所以每一步的输出图像大小与前一步相同。因此, RDWT 变换对存储空间要求更高,因为冗余组件被存储到下一层,而且它比 DWT 更完备,可以完整地保存图像信息。

1.2 奇异值分解

对于一个秩为 $r(r \leq N)$ 的 $N \times N$ 矩阵 I ,其 SVD 由式(1)表示:

$$I = UDV^T = \begin{bmatrix} u_{1,1} & \cdots & u_{1,N} \\ u_{2,1} & \cdots & u_{2,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{N,1} & \cdots & u_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{1,1} & \cdots & v_{1,N} \\ v_{2,1} & \cdots & v_{2,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{N,1} & \cdots & v_{N,N} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, U 和 V 是 $N \times N$ 的正交矩阵, D 是奇异值矩阵,对角元素满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_N$ 。

从图像处理的角度看,奇异值对应图像的亮度特性,奇异向量对应图像的几何特性^[17]。Jia 等人^[18]研究发现左奇异向量 U 矩阵的第二行第一列 $U_{2,1}$ 和第三行第一列元素 $U_{3,1}$ 之间存在很强的相关性,这意味着两个元素之间的关系可以保留和进一步用于提取嵌入式水印而不借助原始数据。因此,通过修改正交矩阵 $U_{2,1}$ 和 $U_{3,1}$ 的关系来嵌入和提取水印。

1.3 Arnold 变换

Arnold 变换可以提高水印图像的安全性^[19]。Arnold 变换的定义如式(2)所示:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \bmod N \quad (2)$$

其中, $\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}$ 代表移位后的矢量位置, $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ 代表移位前的原始位置, mod 表示除数 N 的模运算。置乱迭代次数也由 N 给出。文中 N 被认为是一个密钥。在数字水印的应用中, 主要利用变换把错误的比特位进行“均匀”的分布, 这样使得载体在经受各种攻击之后仍能表现出较好的鲁棒性能^[16]。

2 针对三维彩色点云模型的数字水印算法描述

文中算法的嵌入过程主要包括四个阶段, 分别是三维仿射不变性处理阶段; 投影平面图像阶段; 根据水印信息, 修改矩阵 U 的 $U_{2,1}$ 和 $U_{3,1}$ 的值, 实现水印嵌入阶段; 将含有水印信息的二维彩色图像利用点云模型还原算法得到含水水印模型的阶段。算法嵌入过程如图1所示。水印提取是对含水水印的三维彩色点云模型执行水印嵌入前的模型预处理和根据 $U_{2,1}$ 和 $U_{3,1}$ 的大小关系来实现的。

$$C = \frac{1}{M-1} \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^M (x'_i - u_x)^2 & \sum_{i=1}^M (x'_i - u_x)(x'_i - u_y) & \sum_{i=1}^M (x'_i - u_x)(z'_i - u_z) \\ \sum_{i=1}^N (y'_i - u_y)(x'_i - u_x) & \sum_{i=1}^N (y'_i - u_y)^2 & \sum_{i=1}^N (y'_i - u_y)(z'_i - u_z) \\ \sum_{i=1}^N (z'_i - u_z)(x'_i - u_x) & \sum_{i=1}^N (z'_i - u_z)(y'_i - u_y) & \sum_{i=1}^N (z'_i - u_z)^2 \end{vmatrix} \quad (5)$$

(3) 旋转三维点云模型使最大主元与 z 轴重合, 最终得到其顶点坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 实现了三维点云模型的旋转不变性和均匀缩放不变性^[21]。

这样, 三维点云模型的顶点坐标就具有仿射不变性, 即平移不变性、旋转不变性和均匀缩放不变性。

2.1.2 投影平面图像算法

为了应用基于 RDWT-SVD 的水印算法, 需要完成三维点云模型到二维图像的变换。步骤如下:

(1) 对三维点云模型经过仿射不变性处理得到顶点坐标 $v_i(x'_i, y'_i, z'_i)$, 并计算 z'_i 的平均值 z'_{i_mean} , 找到并返回最接近 z'_{i_mean} 的中心点 z'_{i_center} 、最大值 z'_{i_max} 和最小值 z'_{i_min} , 选择中心点附近的波动范围 $(z'_{i_max} - z'_{i_min})$ 并存储有效点的索引;

(2) 获取有效点的二维坐标 (x'_i, y'_i) 和 RGB 颜色信息;

(3) 对选定的有效点进行归一化, 将处理后的点返回位置信息和颜色信息;

(4) 组合 RGB 颜色分量, 形成二维彩色图像。

根据点云模型的位置信息, 每一个 z'_i 与 (x'_i, y'_i) 索引相同, 所以在判断 z'_i 为有效值之后根据索引得到 (x'_i, y'_i) 。此外, 对经过仿射不变性处理的点云模型

2.1 算法的嵌入过程

2.1.1 三维点云模型仿射不变性处理算法

为了方便对三维点云模型施加其他后续操作, 需要对它进行仿射不变性处理^[20]。假设三维点云模型表示为 $V\{v_i, i=1, 2, \dots, M\}$, 式中 v_i 为第 i 个顶点坐标, $v_i = (x_i, y_i, z_i)$, M 为顶点总数。仿射不变性处理过程如下:

(1) 根据式(3)、(4) 计算三维点云模型的中心坐标 $U(u_x, u_y, u_z)$ 并将中心坐标作为新的原点 $(0, 0, 0)$ 进行平移, 实现了三维点云模型的平移不变性。

$$U(u_x, u_y, u_z) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M v_i(x_i, y_i, z_i) \quad (3)$$

$$v'_i(x'_i, y'_i, z'_i) = v_i(x_i, y_i, z_i) - U(u_x, u_y, u_z) \quad (4)$$

(2) 对三维点云模型运用主成分分析 (Principal Components Analysis, PCA), 计算协方差矩阵 C 、矩阵 C 所对应的特征值和特征向量, 其中最大特征值所对应的特征向量为三维点云模型的最大主元。协方差矩阵见式(5)。

进行投影即可得到唯一的二维彩色图像。

2.1.3 水印嵌入算法

(1) 图像颜色空间从 RGB 到 YCbCr 的转换。二维彩色图像通过式(6)将 RGB 转换为 YCbCr。

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.169 & -0.331 & 0.500 \\ 0.500 & -0.419 & -0.081 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} \quad (6)$$

(2) YCbCr 颜色空间提取 Y 分量并划分为 8×8 非重叠块。

(3) 二值水印使用 Arnold 变换并划分为 8×8 非重叠块, 并存储密钥 N 。

水印嵌入:

(1) 对 Y 分量的每个块应用 RDWT 变换得到 LL 子带, 并对 LL 子带进行 SVD 变换得到矩阵 U 。

(2) 根据以下规则修改 U 矩阵的 $U_{2,1}$ 和 $U_{3,1}$ 的元素进行水印嵌入。

水印 $w_i = 1$

$$\begin{cases} U_{2,1} = \text{sign}(U_{2,1}) (U_{\text{avg}} + \frac{T}{2}) \\ U_{3,1} = \text{sign}(U_{3,1}) (U_{\text{avg}} - \frac{T}{2}) \end{cases} \quad U_{\text{avg}} < T \quad (7)$$

水印 $w_i = 0$

$$\begin{cases} U'_{2,1} = \text{sign}(U_{2,1}) (U_{\text{avg}} - \frac{T}{2}) \\ U'_{3,1} = \text{sign}(U_{3,1}) (U_{\text{avg}} + \frac{T}{2}) \end{cases} \quad U_{\text{avg}} < T \quad (8)$$

其中,二值水印图像中 $w_i = 1$ 代表像素值为 255, $w_i = 0$ 代表像素值为 0; $U_{\text{avg}} = \frac{U_{2,1} + U_{3,1}}{2}$; T 为阈值, T 越大,水印的不可见性就越差,水印的鲁棒性就越好^[18],所以该文根据参考文献[18]选择阈值 $T = 0.040$ 。

(3) 应用逆 SVD 变换,然后对每个块应用逆 RDWT 变换以创建带水印的 Y 分量。

(4) 重建 Y 分量与 Cb 和 Cr 相结合,利用式(9)将含水图像转换到 RGB 颜色空间。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & 1.402 \\ 1.000 & -0.344 & -0.714 \\ 1.000 & 1.732 & 0.000 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y \\ Cb - 128 \\ Cr - 128 \end{bmatrix} \quad (9)$$

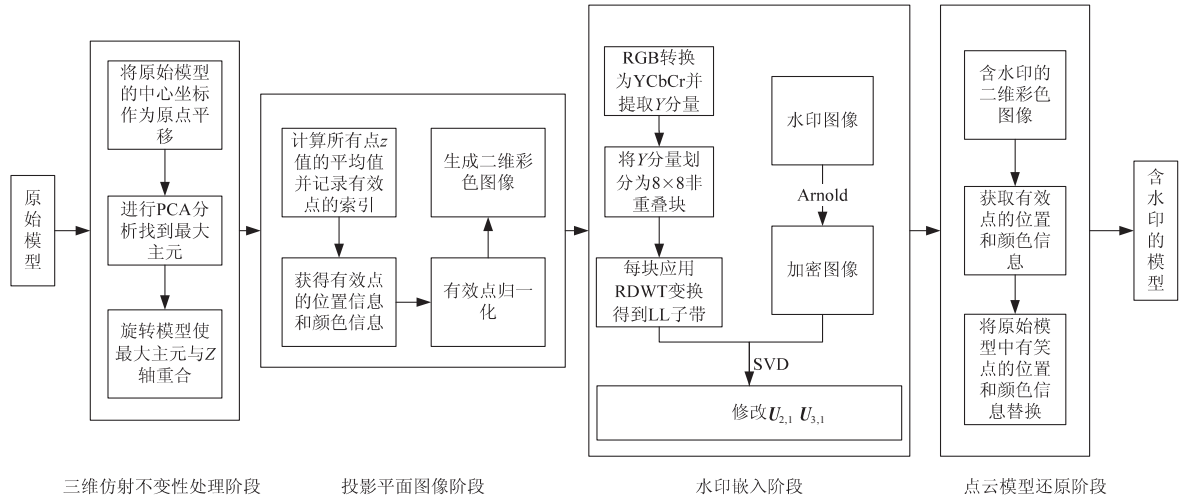


图1 算法嵌入过程

(2) 根据式(10)中 $U_{2,1}$ 和 $U_{3,1}$ 的关系提取出相应的水印信息。

$$w' = \begin{cases} 0, & U'_{2,1} > U'_{3,1} \\ 1, & U'_{2,1} \leq U'_{3,1} \end{cases} \quad (10)$$

(3) 使用相同的密钥 N 应用逆 Arnold 变换来恢复二值水印图像。

3 实验结果分析

实验采用了 MatlabR2018 平台,以文献[11]中的 Bunny(35 947 点)、Guy(66 860 点)、Lion _ statue(536 240点)和 Vase(147 420 点)三维彩色点云模型进行实验测试。图 2(a)为原始三维彩色点云模型,图 2(b)为秘密信息及其预处理图像,图 2(c)为嵌入水印信息后的三维彩色点云模型。图 2(a)采用图 2(c)中 $N = 100$ 的置乱参数。

2.1.4 点云模型还原算法

(1) 获取有效点的二维坐标 (x_i'', y_i'') 及 RGB 颜色信息。

(2) 对含水水印的二维彩色图像的有效点 (x_i'', y_i'') 进行映射,并且有效点 (x_i'', y_i'') 对应的颜色信息与原始点云模型中有效点 (x_i'', y_i'', z_i'') 的颜色信息进行替换。

(3) 利用替换后的颜色信息生成含水水印的三维彩色点云模型。

将之前嵌入水印的二维彩色图像中有效点 (x_i'', y_i'') 的颜色信息改为黑色并保存,作为提取水印的密钥 N 。水印嵌入的原理如图 1 所示。

2.2 算法的提取过程

(1) 从含水水印的点云模型中进行三维仿射不变性处理并找到有效点,利用 2.1.1 和 2.1.2 节算法获得含水水印的 2D 彩色图像。

3.1 水印的不可见性

利用文中算法对 Bunny、Guy、Lion _ statue 和 Vase 模型嵌入水印后,为了定量地分析该算法的不可见性,引入峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Rate, PSNR)和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)计算点云模型嵌入水印前后的几何误差。

(1) 峰值信噪比(PSNR)是衡量信号失真程度的典型数学指标,利用式(11)测试含水水印模型与原始模型的失真度。PSNR 越大,不可见性越好。

$$\text{PSNR}(f, f_w) = 10 \log_{10} \left[\frac{\max_{\forall (m,n)} f^2(x, y, z)}{\frac{1}{N_f} \sum_{\forall (m,n)} (f_w(x, y, z) - f(x, y, z))^2} \right] (\text{dB}) \quad (11)$$

其中, f 是原始彩色点云模型, f_w 是含水水印的彩色点云

模型, (x, y, z) 是给定点云模型的坐标值, N_f 是点云模型离散点总个数, 对于 8 bit 彩色点云模型, 式子中

的分子为 255×255 。

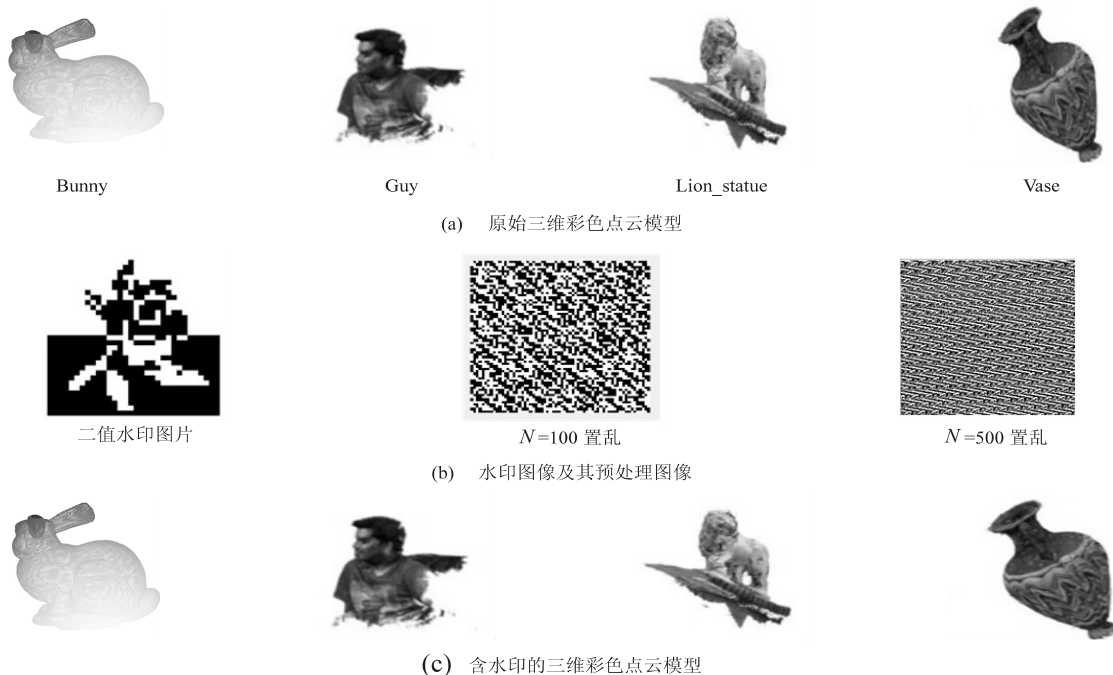


图 2 针对三维彩色点云模型的数字水印算法实现效果

(2) 均方根误差 (RMSE) 是嵌入水印后模型的顶点坐标 (x'_i, y'_i, z'_i) 与原始模型顶点坐标 (x_i, y_i, z_i) 的偏差的平方和观察次数比值的平方根。利用式 (12) 计算模型的形变程度。RMSE 值越小, 原始模型的形变越小, 不可见性也就越好。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^M (x'_i - x_i)^2 + (y'_i - y_i)^2 + (z'_i - z_i)^2}{M}} \quad (12)$$

其中, M 代表模型顶点的个数。

经过计算, 水印位数 1 024 位, 这四种模型的均方根误差和峰值信号噪声比如表 1 所示。考虑到颜色强度的范围 $[0, 255]$, 一般来说这样的 PSNR 被认为很高, RMSE 值被认为很低, 所以表示两个模型之间有很强的相关性, 说明该算法具有良好的不可见性。

表 1 1 024 位含水印的 3D 彩色点云模型的均方根误差和峰值信噪比

嵌入强度		Bunny	Guy	Lion_statue	Vase
1%	PSNR	44.00	48.14	57.14	52.33
	RMSE	1.60	0.99	0.35	0.16
2%	PSNR	38.10	42.12	54.93	46.37
	RMSE	3.17	1.98	0.46	1.22

3.2 水印的鲁棒性

在对 Bunny、Guy、Lion_statue 和 Vase 模型进行噪声攻击、几何仿射变换攻击、简化攻击和剪切攻击后, 为了定量地分析文中算法的鲁棒性, 引入误码率 (Bit

Error Rate, BER) 和归一化相关系数 (Normalized Coefficient, NC) 分析该算法的鲁棒性。其中图 3 为部分攻击后的点云模型及其提取水印图像。

(1) 误码率 (BER) 是指提取的错误水印位数与原始水印位数的比值, 比值越接近于 0, 说明水印的提取越成功, 算法的鲁棒性就越强。BER 的计算公式如式 (13)。

$$\text{BER} = \frac{\sum_{i=1}^n (w'_i \neq w_i)}{n} \quad (13)$$

其中, w_i 和 w'_i 分别是原始水印信息和提取水印信息的第 i 位水印位, n 是原始水印的位。

(2) 归一化相关系数 (NC) 是指原始水印信息与提取水印信息之间的相关度, 它的取值范围是 $[-1, 1]$, 如果 NC 值越接近 1, 则说明提取的水印信息和原始的水印信息越接近, 相似度越高, 即提取的水印内容完整性越高, 算法的鲁棒性越好。NC 的计算公式如式 (14) 所示。

$$\text{NC} = \frac{\sum_{x=1}^{M_s} \sum_{y=1}^{N_s} \sum_{\delta \in \{R, G, B\}} w_{\delta}(x, y) w'_{\delta}(x, y)}{\sqrt{\sum_{x=1}^{M_s} \sum_{y=1}^{N_s} \sum_{\delta \in \{R, G, B\}} w_{\delta}^2(x, y)}} \sqrt{\sum_{x=1}^{M_s} \sum_{y=1}^{N_s} \sum_{\delta \in \{R, G, B\}} w_{\delta}^2(x, y)} \quad (14)$$

其中, w_{δ} 和 w'_{δ} 分别表示原始水印和提取水印的三个颜色分量, $\delta \in \{R, G, B\}$ 。

为了更好地验证文中算法的鲁棒性,将该算法的测试结果与基于 GFT 的三维彩色点云模型的数字水印算法^[11](记为 GFT 算法)与基于 DCT 的三维彩色点云模型的数字水印算法^[12](记为 DCT 算法)的测试结果进行了对比。





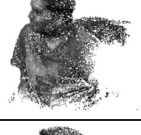







攻击测试	含水印模型	提取水印
噪声攻击		
旋转 180°		
简化率 20%		
简化率 50%		
剪切率 20%		
剪切率 30%		

图 3 部分攻击后的点云模型及其提取的水印图像

3.2.1 噪声攻击

对嵌入水印的三维彩色点云模型的顶点坐标进行噪声攻击,实验中噪声强度取值分别为 0.5%、1%、1.5%。噪声攻击的测试结果如表 2 所示,除 Vase 模型外,其他模型在遭受噪声攻击后,BER 值小于 0.01,NC 值大于 0.98,对噪声攻击表现出较好的鲁棒性。

表 2 噪声攻击测试的位错误率与归一化相关系数结果

噪声攻击		Bunny	Guy	Lion_statue	Vase
0.5%	BER	0	0	0	0
	NC	1	1	1	1
1%	BER	0	0	0.001 3	0
	NC	1	1	0.987 2	1
1.5%	BER	0	0.014 6	0.009 8	0.014 6
	NC	1	0.971 1	0.981 9	0.812 2

以 Bunny 模型为例,文中算法与 DCT 算法、GFT 算法相比,在噪声强度小于 1% 时,NC 值始终等于 1 且高于对比算法,说明文中算法在噪声攻击强度较小时具有很强的鲁棒性,如图 4 所示。

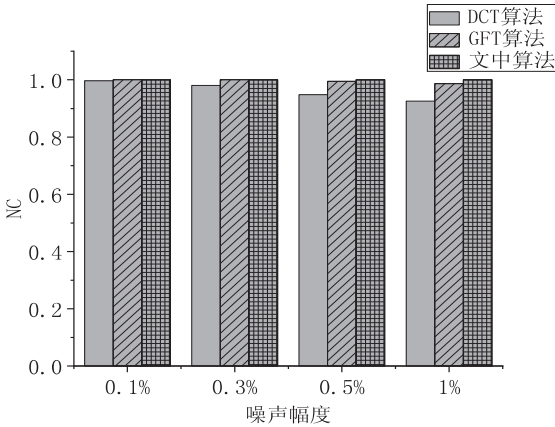


图 4 Bunny 模型与 DCT 算法、GFT 算法在 0.1%、0.3%、0.5%、1% 均匀噪声攻击的 NC 比较

3.2.2 仿射变换攻击

由于对点云模型进行了仿射不变性处理,可以避免模型的平移、旋转和缩放变换等仿射变换对水印提取的影响。因此,文中算法对于平移、旋转、缩放,以及混合攻击均可以完全抵抗。以旋转攻击为例,仿真结果如图 3 所示,可以准确无误地提取出水印图像(BER=0,NC=1),说明文中算法抗几何仿射变换攻击的鲁棒性强。

3.2.3 简化攻击

以 Guy 模型为例,对嵌入水印的三维点云模型进行简化攻击,简化率分别为 20% 和 50%。实验结果如图 3 所示,当简化攻击为 50% 时,点云模型的视觉感受变化较大,导致水印图像无法清晰识别。

为了进一步验证简化攻击的鲁棒性,以 Guy 模型为例,与 DCT 算法、GFT 算法相比,文中算法的 NC 值始终高于对比算法,是因为在对模型进行三维仿射不变性处理时,能够弱化简化攻击后点云模型顶点缺失带来的影响,使得文中算法可以有效抵抗简化攻击,有效提高了简化攻击的鲁棒性,如图 5 所示。

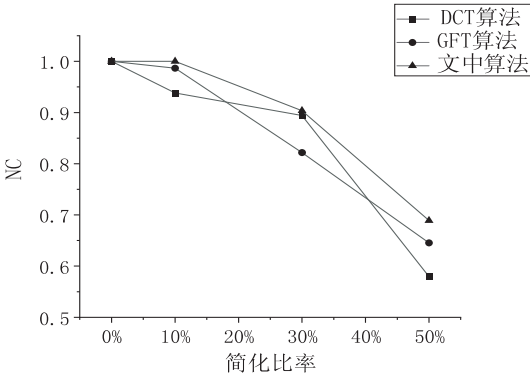


图 5 NC 对比衡量简化攻击的鲁棒性

3.2.4 剪切攻击

剪切攻击是通过移除点云模型的一部分区域以破坏点云模型的形态,文中算法是通过与 z 轴平均值邻近的坐标作为中心点进行投影,尽可能减少此攻击对水印提取的影响。分别对模型进行 20%、30% 的剪切,实验结果如图 3 所示,剪切率较为 50% 时,也能提取出水印图像大致信息。

由于 DCT 算法未对 Guy、Vase 和 Lion_statue 模型进行剪切攻击的测试,故无法分析 DCT 算法抗剪切攻击的鲁棒性,因此文中算法只能与 GFT 算法进行分析比较,如表 3 所示。文中算法的 BER 值均处于 10^{-2} ,在剪切率小于 50% 的情况下,可以清楚地识别水印图像,对剪切攻击表现出较好的鲁棒性。

表 3 与 GFT 算法在模型剪切攻击中 BER 结果对比

剪切比例		Bunny	Guy	Lion_statue	Vase
		BER	BER	BER	BER
10%	文中算法	0	0	0	0
	GFT 算法	0	0	0	0
15%	文中算法	0	0	0	0
	GFT 算法	0	0	0.032 4	0
30%	文中算法	0.000 9	0	0.155 6	0
	GFT 算法	0.062 2	0	0.364 5	0
40%	文中算法	0.073	0	0.408 9	0.001 2
	GFT 算法	0.165 0	0.004 4	0.495 1	0.004 4
50%	文中算法	0.227 5	0.083 4	0.507 2	0.077 2
	GFT 算法	0.258 6	0.064 4	0.495 1	0.064 9

4 结束语

提出了一种针对三维彩色点云模型的数字水印算法。利用三维仿射不变性对三维彩色点云模型进行坐标变换,不仅可以抵抗仿射变换的攻击,也使得投影图像具有唯一性。对投影图像进行 RDWT 变换得到 LL 子带,对 LL 子带进行 SVD,并将水印嵌入矩阵 $U_{2,1}$ 和 $U_{3,1}$ 中,有利于保证水印的透明性。实验结果表明,该算法对几何仿射变换、简化、剪切等变换攻击,取得了满意的结果。今后工作将进一步提高算法对剪切、简化攻击的鲁棒性。

参考文献:

- [1] KLYUZHIN I S, SOSSI V. PET image reconstruction and deformable motion correction using unorganized point clouds [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2017, 36(6): 1263–1275.
- [2] CAI Z, CHIN T J, BUSTOS A P, et al. Practical optimal registration of terrestrial LiDAR scan pairs [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 147: 118–

- 131.
- [3] FEDORENKO R, GABDULLIN A, FEDORENKO A. Global UGV path planning on point cloud maps created by UAV [C]//2018 3rd IEEE international conference on intelligent transportation engineering (ICITE). Singapore: IEEE, 2018: 253–258.
- [4] WANG H, WANG B, LIU B, et al. Pedestrian recognition and tracking using 3D LiDAR for autonomous vehicle [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 88: 71–78.
- [5] ZENG Y, HU Y, LIU S, et al. RT3D: real-time 3-D vehicle detection in LiDAR point cloud for autonomous driving [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(4): 3434–3440.
- [6] SHAO J, ZHANG W, MELLADO N, et al. Automated markerless registration of point clouds from TLS and structured light scanner for heritage documentation [J]. Journal of Cultural Heritage, 2019, 35: 16–24.
- [7] WANG J, WU Q, REMIL O, et al. Modeling indoor scenes with repetitions from 3D raw point data [J]. Computer-Aided Design, 2018, 94: 1–15.
- [8] 王新宇. 面向版权保护的三维网格模型数字水印算法研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [9] ZHOU Y, ZENG F, QIAN J, et al. 3D shape classification and retrieval based on polar view [J]. Information Sciences, 2019, 474: 205–220.
- [10] LIU J, WANG Y, LI Y, et al. A robust and blind 3D watermarking algorithm using multiresolution adaptive parameterization of surface [J]. Neurocomputing, 2017, 237: 304–315.
- [11] FERREIRA F A B S, LIMA J B. A robust 3D point cloud watermarking method based on the graph Fourier transform [J]. Multimed Tools Appl, 2020, 79(3–4): 1921–1950.
- [12] ZHANG S, WANG F, ZHAI S. A novel watermarking algorithm for color point-cloud models based on 2D-DCT [C]//Advances in natural computation, fuzzy systems and knowledge discovery. Berlin: Springer International Publishing, 2020: 796–803.
- [13] ZHANG X, SHEN Z. Copyright protection method for 3D model of geological body based on digital watermarking technology [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2019, 59: 334–346.
- [14] 吴颖斌, 耿国华, 贺毅岳. 基于 DWT 的 3D 点云模型数字水印算法 [J]. 计算机工程, 2012, 38(6): 151–152.
- [15] DONG A, ZENG R. Research and implementation based on three-dimensional model watermarking algorithm [C]//2017 international conference on computing intelligence and information system (CIIS). Nanjing: IEEE, 2017: 277–282.
- [16] ROY S, PAL A K. An SVD based location specific robust color image watermarking scheme using RDWT and arnold scrambling [J]. Wireless Personal Communications, 2017, 98(2): 2223–2250.