

三维点云模型高鲁棒性多重盲水印算法研究

张绣亚, 孙刘杰, 王文举, 秦杨, 商静静

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要:目的 为了满足多用户共享三维模型版权时的单用户版权独立认证等需求, 结合 CDMA 技术, 提出一种三维点云模型高鲁棒性多重盲水印算法。方法 为不同用户分配不同的 Walsh 码, 并利用 Walsh 码, 对各自的二值水印图像进行编码, 得到多路混合的水印; 对三维点云模型进行仿射不变性处理, 并将模型的顶点坐标转换为球面坐标, 角度值按照升序排序, 按顺序选择顶点到重心的距离组成的二维矩阵, 作为水印的嵌入对象。对二维矩阵进行二级小波变换, 将多路混合的水印嵌入到对角线方向高频部分, 经过小波逆变换得到含多重水印的三维点云模型。结果 该算法对噪音、仿射、重排序等攻击具有很强的鲁棒性。能够嵌入多重水印, 且多重水印之间没有发生相互碰撞。结论 文中算法能够满足多用户共享三维模型版权时单用户版权独立认证和版权保护的需求。

关键词: 三维点云模型; 数字水印; 小波变换; CDMA

中图分类号: TS853⁺.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)19-0181-06

A High Robustness Multiple Blind Watermarking Algorithm Research on 3D Point Cloud Model

ZHANG Xiu-ya, SUN Liu-jie, WANG Wen-ju, QIN Yang, SHANG Jing-jing

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: To meet the demand of single-user independent authentication when multi-users share copyright of 3D model, the work proposes a 3D point cloud model with a high robustness multiple blind watermarking algorithm combined with CDMA technology. Different Walsh codes were assigned to different users. Walsh codes were also used to encode individual binary watermark image. Then mixed watermark signal was obtained. The 3D point cloud model was treated by affine invariant processing. And the vertex was coordinated into spherical coordinate system. The angular values were sequenced in ascending order. Then the vertex to the center of gravity from the composition was selected as a watermark embedded object. By wavelet transform, multi-channel mixing watermark was embedded in the diagonal direction of the high frequency part. Through the inverse wavelet transform, 3D point cloud model containing multiple watermark information was obtained. The algorithm had a high robustness for noise, rotation, translation, scaling, etc., attacks. It was able to embed multiple watermarks, and no collision occurred among multiple watermarks. In conclusion, the algorithm can meet the demand of single-user independent authentication and copyright protection when multi-users share copyright of 3D model.

KEY WORDS: 3D point cloud model; digital watermark; DWT; CDMA

互联网的发展使得数字产品在各个行业的使用越来越普遍, 伴随的数字产品版权保护问题也越来越

重要。数字水印技术作为保护数字产品版权技术的一种, 目前主要被用于图像版权保护, 对三维模型版权

收稿日期: 2016-03-30

基金项目: 上海市委科研创新重点项目 (13ZZ111); 上海高校青年教师培养资助计划 (slg14039); 上海理工大学科技发展项目 (16KJFZ017)

作者简介: 张绣亚 (1990—), 男, 山东菏泽人, 上海理工大学硕士生, 主攻数字水印。

通讯作者: 孙刘杰 (1965—), 男, 安徽怀宁人, 上海理工大学教授, 硕导, 主要研究方向为数字水印、印刷防伪。

保护的研究相对较少,并且主要是用于单水印嵌入的研究。但单水印已经不能满足人们在多用户共享三维模型版权时的单用户版权独立认证等方面的需求。例如在分工合作的今天,一个三维模型作品在其整个生命周期中,必然要经历发布、销售、使用等不同阶段,在这个过程中也就产生了多个不同的用户。为保护各个用户的权益,在三维模型中除了应该添加一个或多个作者的水印信息外,有时还需要添加代理公司等其他的水印信息,且这些水印信息之间是相互独立的。当发生版权纠纷时,就可以根据嵌入的多重水印来验证三维模型的版权归属,因此,研究多重水印技术在三维模型中的应用是十分必要的,对于数字产品版权保护具有重要意义。

与单水印算法不同,多重水印算法在设计时,除了应该考虑能够抵抗一些常见的攻击的同时,更应该考虑多重水印之间可能存在的相互碰撞。目前大部分学者对音频、图像中多重水印算法进行了深入的研究。文献[1]把每位水印信息采用量化方法嵌入到 SVD 值中,实现水印的多重嵌入。文献[2]将置乱、降维处理后的不同水印嵌入到音频信号的低频小波系数中。文献[3]利用小波变换,实现多个彩色水印图像在彩色载体图像中的嵌入及提取。文献[4]提出在图像中同时嵌入多个不同性质的水印。文献[5]利用不同密钥嵌入多重水印。

三维模型一般是由点、线、面等基元组成,与按像素位置排序的图像和按时间排序的音频相比,这些基元的集合没有一个固定的排序标准。因此三维模型多重水印算法的设计比二维多重水印算法更加复杂。文献[6]提出的基于三维网格模型的双重数字盲水印算法和文献[7]提出的面向 3D 网格模型的多重数字水印算法都是通过直接改变嵌入基元的空域信息来嵌入水印的,水印的鲁棒性不太好。文献[8]提出的基于 DCT 变换的三维网格模型多重水印算法,是一种非盲水印,提取水印时需要原始三维模型。文中根据在无线通信中 CDMA 系统具有多址复用,容量大、抗干扰性强的特性,提出一种三维点云模型高鲁棒性多重盲水印算法。

1 算法理论分析

1.1 利用 CDMA 技术对多重水印进行编码与解码

CDMA 技术被广泛应用在无线通讯中,其原理是将相互正交(或准正交)的不同编码分配给不同

用户来调制信号,实现多用户使用同一频率通信。三维模型中水印的嵌入、提取过程同样可以看成一次通信过程。水印是信源,三维模型是信道,水印的嵌入对应通信中的编码过程,水印的提取对应通信中的解调过程。可以利用 CDMA 技术对水印图像进行信号调制(编码过程),然后嵌入到三维模型中。在提取水印时,用调制时使用的编码进行解调(解码过程),恢复原始水印。由于 CDMA 具有多址复用的特性,因此,可以同时嵌入多个用户的不同水印。

文中使用 Hadamard 矩阵^[9]产生 Walsh 码对多个用户的水印图像编码^[10],用于保证不同水印之间的正交性。Hadamard 矩阵是以 ± 1 为元素且任意 2 行互为正交的一种方阵。其行向量与列向量之间是相互正交的 Walsh 码。多重水印图像的编码^[11]过程如下:

1) 为了平衡混合信号,将原始二值水印由 $\{0,1\}$ 映射成 $\{-1,1\}$ 。

$$e_k = 1 - 2b_k \quad (1)$$

式中: b_k 为第 k 个用户的二值水印图像; e_k 为映射后的第 k 个用户的水印。

2) 用 Walsh 码对映射后的水印进行编码:

$$w_k = e_k c_k \quad (2)$$

式中: c_k 为第 k 个用户的 Walsh 码; w_k 为编码后待嵌入的第 k 个用户的水印。

3) 将编码后的多个用户水印信息进行多路混合:

$$W = \sum_{k=1}^M w_k \quad (3)$$

式中: M 为用户数量; W 为多路混合后的水印。多重水印图像的解码过程为用户用各自的 Walsh 码将水印信息从多路混合信号中分离出来。

$$A_k = \frac{W' \otimes c_k}{c_k \otimes c_k} \quad (4)$$

式中: A_k 为第 k 个用户解码后的水印; W' 为从三维点云模型中提取到多路混合水印。

1.2 三维点云模型仿射不变性处理

通过对三维点云模型进行仿射不变性处理,可以使三维点云模型获得平移、旋转、等比例缩放不变性的特性。嵌入的水印也就具有了抵抗平移、旋转、缩放攻击的能力。三维点云模型表示为 $V = \{v_i, i=1, 2, \dots, N\}$,式中: v_i 是第 i 个顶点的坐标, $v_i=(x_i,$

y_i, z_i); N 为顶点总数。对三维点云模型进行仿射不变性处理如下。

1) 计算三维点云模型重心 $U(u_x, u_y, u_z)$, 并将重心作为新的原点进行坐标平移得:

$$U(u_x, u_y, u_z) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i(x_i, y_i, z_i) \quad (5)$$

$$v_i'(x_i', y_i', z_i') = v_i(x_i, y_i, z_i) - U(u_x, u_y, u_z) \quad (6)$$

式中: $v_i'(x_i', y_i', z_i')$ 为以重心作为新原点后的

$$C = \frac{1}{N-1} \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^N (x_i' - u_x)^2 & \sum_{i=1}^N (x_i' - u_x)(y_i' - u_y) & \sum_{i=1}^N (x_i' - u_x)(z_i' - u_z) \\ \sum_{i=1}^N (y_i' - u_y)(x_i' - u_x) & \sum_{i=1}^N (y_i' - u_y)^2 & \sum_{i=1}^N (y_i' - u_y)(z_i' - u_z) \\ \sum_{i=1}^N (z_i' - u_z)(x_i' - u_x) & \sum_{i=1}^N (z_i' - u_z)(y_i' - u_y) & \sum_{i=1}^N (z_i' - u_z)^2 \end{vmatrix} \quad (7)$$

这样三维点云模型就具有了仿射不变性。

1.3 离散小波变换理论

离散小波变换^[12]是一种变换域信号处理方法, 能够将二维数据在独立的频带和不同空间方向上进行分解。如图 1b 所示, 二维数据经过一次小波分解, 能够被分成水平 (HL₁)、垂直 (LH₁)、对角线低频 (LL₁)、对角线高频 (HH₁) 4 个子带。对图 1b 中对角线低频子带(LL₁)再进行一次小波分解, 结果如图 1c 所示。得到水平 (HL₂)、垂直 (LH₂)、对角线低频 (LL₂)、对角线高频 (HH₂) 4 个子带。

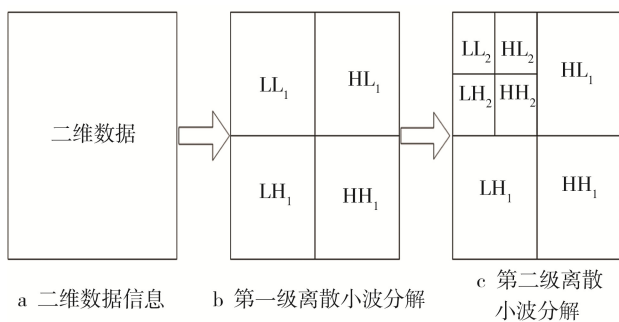


图 1 小波分解

Fig.1 DWT decomposition

经小波变换后的低频部分集中了二维数据的大部分信息, 在这个地方嵌入水印鲁棒性较好, 不易被破坏, 但人眼对这部分比较敏感。人眼对高频部分比较迟钝, 如果在这个地方嵌入水印则易被破坏。出于折中考虑, 文中算法将混合的多路水印 W 嵌入到二级离散小波变换后的对角线高频子带 (HH₂), 这样既着重考虑水印鲁棒性的同时也兼顾了水印的不可见性。

三维点云模型顶点的新坐标。

2) 对三维点云模型进行主成分分析, 提取模型的最大主成分, 旋转模型使最大主元与 z 轴重合, 最终得到的三维点云模型的顶点坐标为 $v_i''(x_i'', y_i'', z_i'')$ 。由式(7)求出各顶点与重心的协方差矩阵 C , 计算矩阵对应的特征值、特征向量。其中最大特征值所对应的特征向量即三维点云模型的最大主元。协方差矩阵计算见式(7)。

2 多重盲水印算法设计

2.1 水印的嵌入算法

嵌入水印的基本步骤^[13]为: 利用 CDMA 技术对多个用户的二值水印图像进行编码, 得到多路混合的水印 W ; 对三维点云模型进行仿射不变性处理, 得到顶点坐标 $v_i'(x_i', y_i', z_i')$; 将三维点云模型的顶点坐标 $v_i'(x_i', y_i', z_i')$ 转换到球面坐标 $(\gamma_i, \theta_i, \ell_i)$ 。

$$\begin{aligned} \gamma_i &= \sqrt{(x_i')^2 + (y_i')^2 + (z_i')^2} \\ \theta_i &= \arccos(z_i' / \gamma_i) \\ \ell_i &= \arctan(y_i' / x_i') \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{式中: } \gamma_i \geq 0, -\frac{\pi}{2} \leq \theta_i \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq \ell_i \leq 2\pi。$$

对三维点云模型的球面坐标, 按 θ 的大小进行升序排序, 取前 $n \times n$ 个 γ 值, 存入矩阵 D 中, 作为水印的嵌入对象。

对矩阵 D 进行二级小波变换, 选择对角线高频部分(HH₂), 进行水印的嵌入。如式(9)所示, 嵌入方法为用 $H(i, j)$ 替换所选的图 1c 中高频子带(HH₂)。

$$H(i, j) = L \times W(i, j) \quad (9)$$

式中: L 为水印嵌入强度; $W(i, j)$ 为多路混合后的多重水印。

对嵌入水印后的小波系数进行逆变换, 获得新的矩阵 D' , 由 D' 得到新的 γ 值序列, 将球面坐标还原成顶点坐标, 得到含有多重水印的三维点云模型。

2.2 水印的提取算法

提取水印的基本步骤为：对三维点云模型进行仿射不变性处理，并将顶点坐标转变为球面坐标，并对 θ 进行升序排序，取前 $n \times n$ 个 γ 值，得到含水印矩阵 D' ；对 D' 进行一次小波变换得到对角线低频系数，对其再进行一次小波变换，找到对角线高频系数，进行水印提取，即可得到嵌入的多路混合水印信息 W' ；用户用各自的 Walsh 码，将水印信息从多路混合信号中分离出来。

2.3 水印的检测

仿真实验过程中，采用相关性系数对提取的水印性能进行评估见式(10)。

$$R = \frac{\sum_m \sum_n (s' - \bar{s}') (s - \bar{s})}{\sqrt{\sum_m \sum_n (s' - \bar{s}')^2} \sqrt{\sum_m \sum_n (s - \bar{s})^2}} \quad (10)$$

式中： s' 为提取的水印； s 为原始水印， $\bar{s}$ 为水印信息的平均值； m, n 为水印图像的宽和高。

3 实验结果与分析

为了测试文中算法的鲁棒性，选择兔子模型进行仿真实验，该模型具有 35 947 个顶点。选取的用户数量 $M=4$ ，分别记为用户 1、用户 2、用户 3、用户 4，嵌入的水印信息分别为“U”，“S”，“S”，“T”，水印大小均为 10×10 ，水印嵌入强度 $L=0.05$ 。实验对嵌入多重水印的点云模型进行了水印不可见性测试与鲁棒性测试。

3.1 水印不可见性测试

文中算法是通过小波变换找到模型中水印鲁棒性好、人眼不敏感的顶点，进行水印嵌入，相当于对顶点坐标在相当小的范围内做轻微的扰动，这并不会改变模型的外观。

为了定量评估嵌入的水印对原始点云模型的影响，引入 Hausdorff 距离^[14]来计算嵌入水印后的点云模型与原始点云模型的几何误差。Hausdorff 距离是一种能顾及空间目标整体形状的距离量度，它被广泛用于衡量 2 个集合之间的差别，结果为 0.000 72。Hausdorff 距离越小说明嵌入水印后的点云模型与原始点云模型误差越小，嵌入的水印对点云模型的影响就越小，水印的不可见性也越好。实

验结果表明水印的不可见性较好。

3.2 水印鲁棒性测试

对水印进行鲁棒性测试是为了模拟现实生活中可能遇到的复杂情况，检验嵌入水印的点云模型经过常规操作或者恶意的攻击后是否还能提取出水印。由于模型在传输、存储过程中，不可避免的会受到噪声的污染，因此，验证算法抵抗噪声攻击的能力就显得比较重要。在模型的使用中对其进行平移、旋转、缩放等仿射变换操作属于常规操作，因此，有必要验证抵抗仿射变换攻击的能力。由于侵权者大都不会直接使用带有水印信息的模型，模型的顶点坐标中已经嵌入了水印，通过水印提取，就可以验证模型的版权信息，他们通过一些恶意攻击手段试图破坏掉水印后再使用，如重排序、简化攻击等，因此，算法对这些攻击也应该有一定的鲁棒性。

1) 噪声攻击。对嵌入多重水印的三维点云模型的顶点坐标进行噪声攻击。对模型的每个顶点都加一个噪声，噪声的大小为模型中所有点的 γ 值大小的均值乘以噪声强度。实验中噪声强度取值分别为 10%、20%、30%，实验结果见图 2，提取 4 个用



a 噪声攻击强度10%



b 噪声攻击强度20%



c 噪声攻击强度30%

图 2 噪声攻击仿真实验

Fig.2 Noise attack experiment

户的水印图像都是清晰的。通过结果分析，文中算法具有很强的抵抗噪声攻击的能力。

2) 仿射变换攻击。由于在嵌入水印前对点云模型进行了仿射不变性处理,将模型变换到一个仿射不变空间,再进行水印的嵌入,模型能够抵抗旋转、平移、缩放等仿射变换攻击,见图 3—5。文中算法具有抵抗仿射攻击的能力。

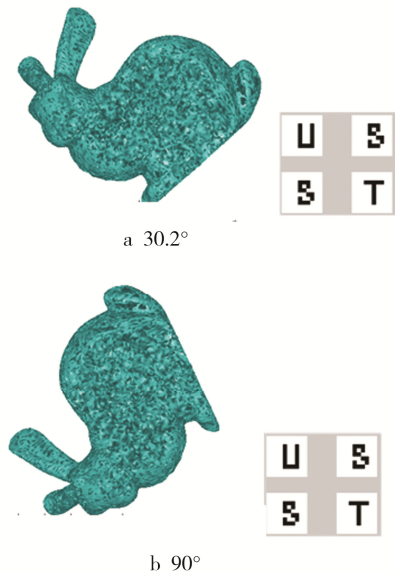


图 3 旋转攻击仿真实验
Fig.3 Rotation attack experiment

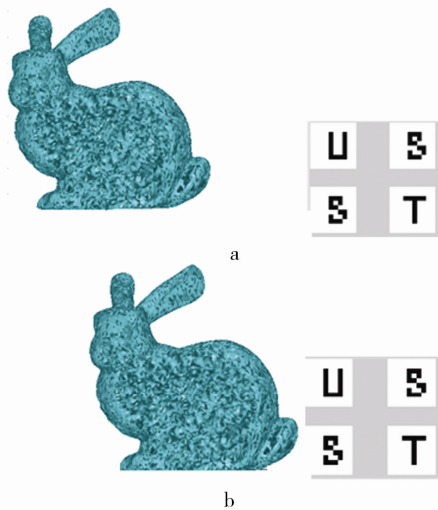


图 4 平移攻击仿真实验
Fig.4 Translation attack experiment

3) 重排序攻击。重排序攻击指通过对嵌入水印后的三维模型的顶点随机排序,来进行重排序攻击。嵌入水印前,对三维点云模型球面坐标下的的角度进行升序排列,该处理能有效地抵抗重排序攻击。因此,文中算法具有抵抗重排序攻击的能力。

4) 简化攻击。对嵌入多重水印后的模型进行简化攻击。简化后,三维点云模型所剩的顶点数(简



图 5 缩放攻击仿真实验
Fig.5 Scaling attack experiment

化率)分别为原模型的 95%, 90%, 实验结果见图 6。结果表明文中算法对抵抗简化攻击的能力需要进一步改进。

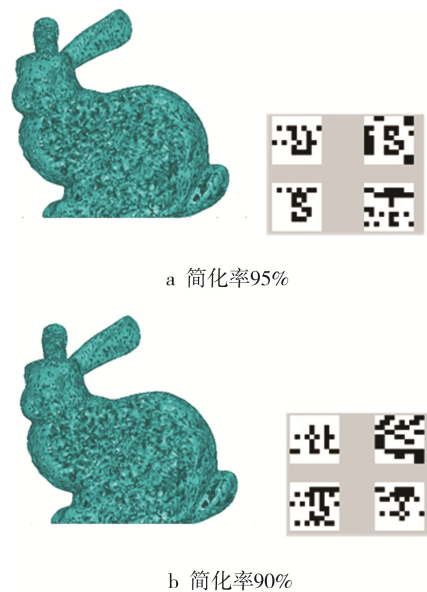


图 6 简化攻击仿真实验
Fig.6 Reduction attack experiment

根据相关性计算见式(10),将文中算法的鲁棒性与文献[15]提出的加密全息三维模型盲水印算法进行比较,结果见表 1。文中算法在噪音攻击、等比例缩放攻击实验中提取出水印的相关性系数即 corr 值,高于文献[15]算法提取出水印的 corr 值。corr 值越接近 1,水印鲁棒性越好,可见文中算法的鲁棒性优于文献[15]的算法。文中算法能够嵌入多重水印,水印之间不会发生相互碰撞。文中算法在水印的提取时,同样不需要原始模型的参与。

表 1 鲁棒性分析实验结果对比
Tab.1 Comparison of robust experimental results

攻击类型	corr 值				文献 [15]算 法值
	用户 1	用户 2	用户 3	用户 4	
噪声攻击 (10%)	1	1	1	1	0.9070
噪声攻击 (20%)	1	1	1	1	0.8357
噪声攻击 (强度 30%)	1	1	1	1	0.6684
0~360 度旋转攻击	1	1	1	1	1
任意平移攻击	1	1	1	1	1
缩小 4 倍	1	1	1	1	0.9000
放大 1.25 倍	1	1	1	1	0.9587
重排序攻击	1	1	1	1	1
简化 (95%)	0.6628	0.5380	0.8331	0.4481	0.4273
简化 (90%)	0.6127	0.2406	0.4905	0.4371	0.3730

4 结语

文中提出了一种三维点云模型高鲁棒性多重盲水印算法。利用 CDMA 技术对多个用户的水印信息进行编码,避免了不同水印之间的相互碰撞。每个用户的 Walsh 码与嵌入的水印信息都是不同的,能够保证每个用户都能独立的嵌入和提取自己的水印信息,水印的安全性也高。将水印嵌入到小波变换域中,有利于保证水印的不可见性。文中所提出的算法在实时性上仍然有改进的空间,如采用多线程技术加快运算速度。

参考文献:

- [1] 杨志疆,叶阿勇. 多重水印嵌入的 DWT-SVD 音频公开水印算法[J]. 系统仿真技术, 2014, 10(1): 27—31.
YANG Zhi-jiang, YE A-yong. An Audio Public Watermarking Algorithm Based on Multiple Watermarks Embedding in DWT-SVD Domain[J]. System Simulation Technology, 2014, 10(1): 27—31.
- [2] 谢斌,肖玲玲,吴君钦. 一种抗剪切的 DWT 域多重音频数字水印算法[J]. 电子技术应用, 2010, 36(4): 138—140.
XIE Bin, XIAO Ling-ling, WU Jun-qin. A Multiple Audio Watermarking Algorithm Based on DWT Against Cropping[J]. Information Security, 2010, 36(4): 138—140.
- [3] 谢斌,任克强,吴君钦. 一种基于 HVS 的静态多重水印算法[J]. 通信技术, 2009, 42(12): 81—83.
XIE Bin, REN Ke-qiang, WU Jun-qin. A Static Multiple Watermarking Algorithm Based on HVS[J]. Communications Technology, 2009, 42(12): 81—83.
- [4] LU C, LIAO H. Multipurpose Watermarking for Image Authentication and Protection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(10): 1579—1592.
- [5] WONG P, AU O, YEUNG Y. A Novels Blind Multiple Watermarking Techniques for Images[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2003, 13(8): 813—830.
- [6] 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): 199—222.
TANG Bin, KANG Bao-sheng, WANG Guo-dong, et al. Dual Digital Blind Watermark Algorithm Based on Three-dimensional Mesh Model[J]. Computer Engineering, 2012, 38(6): 199—222.
- [7] 冯小青,潘志庚,李黎. 面向 3D 网格模型的多重数字水印算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(1): 17—23.
FENG Xiao-qing, PAN Zhi-geng, LI Li. A Multi Watermarking Method for 3D Meshes[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(1): 17—23.
- [8] 胡奇,翟郎,段锦. 基于 DCT 的战机 3D 模型多重水印算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2014, 32(2): 211—216.
HU Qi, ZHAI Lang, DUAN Jin. Multiple Watermark Algorithm on Fighter's 3D Model Based on DCT[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2014, 32(2): 211—216.
- [9] 时娟. Walsh-Hadamard 变换及其在信源编码中的应用[J]. 甘肃科学学报, 2005, 17(2): 38—40.
SHI Juan. Walsh-Hadamard Transformation and Its Application in Source Coding[I]. Journal of Gansu Science, 2005, 17(2): 38—40.
- [10] 张帆,刘亚丽,苏育挺,等. 数字图像多重水印及容量分析[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(6): 1325—1328.
ZHANG Fan, LIU Ya-li, SU Yu-ting, et al. Multiple Watermarking and Capacity Analysis of Digital Image[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(6): 1325—1328.
- [11] 彭德云,王嘉祯,王素贞,等. 基于 CDMA 的多重数字水印[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(11): 30—32.
PENG De-yun, WANG Jia-zhen, WANG Su-zhen, et al. CDMA Based Multiple Digital Watermarking[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(11): 30—32.
- [12] GONZALEZ R C, WOODS R E, MASTERS B R. Digital Image Processing, Third Edition[J]. Journal of Biomedical Optics, 2009, 14(2): 331—333.
- [13] 商静静,孙刘杰,王文举,等. 基于离散余弦变换的三维点云模型全息盲水印[J]. 包装工程, 2015, 36(13): 111—114.
SHANG Jing-jing, SUN Liu-jie, WANG Wen-ju, et al. Holographic Digital Blind Watermark Algorithm for 3D Point Cloud Model Based on Discrete Cosine Transform[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(13): 111—114.
- [14] RUCKLIDGE W J. Efficiently Locating Objects Using the Hausdorff Distance[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 24(3): 251—270.
- [15] 秦杨,孙刘杰,王文举,等. 基于小波变换的加密全息三维模型盲水印[J]. 光学技术, 2015, 41(4): 351—359.
QIN Yang, SUN Liu-jie, WANG Wen-ju, et al. Blind Watermarking Scheme for 3D Models Based on Encrypted Holograph and Discrete Wavelet Transform[J]. Optical Technique, 2015, 41(4): 351—359.