

点渲染方式对量化点云主观质量的影响及算法优化

陈章¹, 尹宇杰^{1,2}, 冯芸², 万帅^{1,3}

(1. 西北工业大学电子信息学院, 710129, 西安; 2. 河海大学信息学部计算机与信息学院, 210024, 南京;

3. 皇家墨尔本理工大学工程学院, VIC3001, 澳大利亚墨尔本)

摘要: 为探究点渲染方式对量化点云主观质量的影响并优化渲染算法, 设计了不同基础几何体类型和渲染半径计算方式的点云主观质量评价实验。通过威尔科克森符号秩检验和双独立样本 T 检验, 分析了基础几何体类型和最近邻渲染算法对几何和属性量化失真点云主观质量的影响。实验结果表明: 基础几何体类型由于混叠程度不同而对主观质量影响不同, 基础几何体混叠面积越大则主观质量越低; 最近邻渲染算法对主观质量影响不显著, 该算法减少了点云渲染后空洞的产生, 却增大了混叠程度。在属性失真较小时, 最近邻渲染算法效果优于渲染半径固定算法; 在属性失真较大时, 则劣于渲染半径固定的算法。结合主观实验结果, 建立了混叠、空洞失真和基础几何体渲染半径的数学模型, 在几何量化采用八叉树剪枝的基础上, 通过空间相似性对模型参数进行简化并求解, 提出一种利用几何量化参数计算基础几何体渲染半径的算法。与最近邻渲染算法相比, 所提算法节省了 52% 的时间复杂度, 渲染点云峰值信噪比提升了 12.3%, 主观质量分数提升了 0.5。研究减少了计算资源, 提高了渲染效率, 可为渲染器的设计和优化提供参考。

关键词: 点云; 质量评价; 主观实验; 点渲染; 量化失真

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202404003 **文章编号:** 0253-987X(2024)04-0032-09

Impact of Point Rendering Methods on the Subjective Quality of Quantization Point Clouds and Algorithm Optimization

CHEN Zhang¹, YIN Yujie^{1,2}, FENG Yun², WAN Shuai^{1,3}

(1. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. College of Computer and Information Engineering, HoHai University, Nanjing 210024, China;

3. School of Engineering, Royal Melbourne Institute of Technology, Melbourne VIC3001, Australia)

Abstract: To investigate the impact of point rendering methods on the subjective quality of quantization point clouds and optimize the rendering algorithm, a subjective quality evaluation experiment is designed, considering different basic geometric types and calculation methods for rendering radius. The effects of the basic geometric types and nearest-neighbor rendering algorithm on the subjective quality of geometric and attribute quantization distortion are analyzed through the Wilcoxon signed-rank test and independent samples T -test. The experimental results show that the subjective quality is affected differently by the basic geometric types due to

收稿日期: 2023-06-02。 作者简介: 陈章(1995—), 男, 博士生; 万帅(通信作者), 女, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62171353); 国家自然科学基金资助项目(62101409)。

网络出版时间: 2023-09-21

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20230919.0846.002>

variations in the degree of overlap. A larger overlapping area of the basic geometric types shall result in lower subjective quality. The nearest-neighbor rendering algorithm does not have any significant impact on the subjective quality. This algorithm reduces the occurrence of holes in the rendered point cloud but increases the level of overlap. When the attribute distortion is minor, the nearest-neighbor rendering algorithm outperforms the fixed rendering radius method. However, when the attribute distortion is significant, it underperforms the fixed rendering radius method. Based on the subjective experimental results, a mathematical model is established to calculate the rendering radius of the basic geometric types, considering overlap and the distortion of holes. This model has employed geometric quantization with an octree pruning and simplified the model parameters using spatial similarity. An algorithm is proposed to calculate the rendering radius of the basic geometric types using geometric quantization parameters. Compared with the nearest-neighbor rendering algorithm, the proposed method reduces the time complexity by 52% and improves the peak signal-to-noise ratio of the rendered point cloud by 12.3%. Additionally, it enhances the subjective quality by 0.5 points. The research, featuring the reduction of computational resources and the improvement of rendering efficiency, can provide references for the design and optimization of renderers.

Keywords: point clouds; quality evaluation; subjective experiments; point-based rendering; quantization distortion

点云是三维空间中一系列具有空间坐标信息以及额外属性信息的点所组成的集合。随着数字技术与三维感知技术的高速发展,在面向人眼视觉感知的沉浸式新媒体应用中,表征三维物体或场景的点云数据已经得到广泛应用,如虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)、数字文化遗产以及3D视频会议等^[1-2]。随着点云相关技术的发展,如何提高用户的观看体验成为目前点云研究领域内的一个关键问题^[3]。不同于传统图像的呈现方式,点云在呈现过程中需要通过硬件和渲染算法进行辅助^[4]。其中,点渲染是一种广泛应用于计算机图形学中渲染点云的技术^[5-6]。与传统的基于三角形网格重建表面的渲染方式不同,点渲染则直接渲染出离散的点集,将每个点的颜色、透明度、法向量等信息映射到屏幕上。在点渲染中,图形对象以点的形式表示,而不是以面的形式表示,具有更好的可扩展性和动态性,能够更好地处理复杂的几何形状和大规模的点云数据^[7]。因此,针对点渲染方式对量化点云主观质量的研究,既有利于提高点渲染算法实际应用效率,又可以辅助点云编码器相关算法性能的优化。

近年来,国内外专家学者结合点渲染方式对点云的主观质量进行了广泛探索。瑞士联邦理工学院的 Alexiou 等探究了渲染过程中各种相关因素对点云主观质量的影响;文献[8]将无色点云在2D显示

器上以点渲染的方式呈现,探究了八叉树剪枝和高斯噪声两种失真对无色点云主观质量的影响,利用点对点距离计算客观质量,通过对比上述两种失真的主观质量分数,发现该客观指标对高斯噪声产生的失真评价更加准确;文献[9]对比了绝对类别评级和双刺激损伤评价法(double-stimulus impairment scale, DSIS)两种主观打分方式与点渲染失真程度的关系,结果显示 DSIS 打分方式与点渲染失真程度更接近;文献[10]将同一压缩失真点云在不同显示设备上点进行点渲染显示,实验结果显示2D显示屏和AR头戴式设备上渲染的失真点云得到的主观质量分数具有差异;文献[11]通过对失真点云进行网格重建,对比点渲染和经过表面重建点云的主观质量差异。葡萄牙里斯本理工大学的 Javaheri 等^[12]探究了不同点云编码方式和渲染显示方案对点云感知质量的影响,并在点渲染过程中,利用每个点在点云中空间距离最近的10个邻居点计算点渲染半径。实验结果显示,点渲染方式下,量化后的颜色失真会对几何失真产生屏蔽效应。上海交通大学的 Yang 等^[13]探究了点渲染方式下,八叉树失真、颜色噪声失真、几何噪声失真和缩放失真对主观质量的影响,并提出了一个包含上述失真类型的点云主观质量数据库 SJTU-PCQA^[14]。中国科学院大学的 Wu 等^[15]通过VR头戴式显示设备观察V-PCC压缩生成的失真点云,建立了一个包含17种压缩失

真的主观质量数据库 SIAT-PCQD^[16]。青岛大学的 Liu 等^[17]利用点渲染对彩色 3D 点云序列进行可视化,采用 DSIS 的打分方式评价主观质量,并根据渲染显示结果,提出了一种基于注意力机制和信息内容加权、结构相似性变体的新型客观点云质量评估模型。

然而,现有大多数工作在采用基础的点渲染时,未能考虑点渲染方式对主观质量的影响。对于基于点的渲染方式,影响人眼视觉质量的因素主要有 2 个:初始渲染的基础几何体类型和基础几何体的半径。基础几何体半径最为关键,半径过小渲染后点云会产生空洞现象,半径过大则会造成基础几何体的混叠。本文针对这一问题:首先,设计了 3 组不同点渲染方式的主观质量评价实验;其次,在对比了 3 组主观质量分数后,分析了不同几何体类型、最近邻计算半径算法对量化失真点云主观质量的影响;最后,结合上述主观实验结果和理论分析,建立了点渲染失真面积与基础几何体半径的模型,提出基于几何八叉树量化参数的点渲染优化算法。测试结果显示,本文算法相比于基于最近邻的算法渲染效果更佳,有利于提升量化点云的主客观质量。

1 点云主观质量评价实验

1.1 主观质量评价数据集构建

1.1.1 原始序列构建

选取 MPEG 点云数据库^[18]中的 9 个高质量静态序列,其中包含 5 个人物序列和 4 个物体序列。序列缩略图和详细信息分别如图 1 和表 1 所示。使用人物序列 basketball player 作为预实验的评价序列,其余 8 个序列用于最终实验结论分析。



图 1 点云序列缩略图
Fig. 1 Point cloud sequence thumbnail

表 1 点云序列详细信息
Table 1 Point cloud sequence details

序列	类别	点数	位宽/bit
basketball player	人物	2 925 514	11
longdress		857 966	10
soldier		1 089 091	10
dancer		2 592 758	11
boxer		3 493 085	12
house without roof	物体	4 848 745	12
frog		3 614 251	12
Egyptian mask		272 684	12
facade		4 061 755	11

1.1.2 失真点云生成

失真点云序列采用基于几何的点云压缩标准 (geometry-based point cloud compression, G-PCC)^[19]对原始点云量化生成。G-PCC 能够分别对几何和属性设置不同的量化参数,产生不同的失真等级。量化参数的设置参考通用测试条件 (common test conditions, CTC)^[20],几何量化包含无损、R02 和 R05 这 3 个等级,属性量化包含 R01、R03 和 R05 这 3 个等级,因此每个点云序列共有 9 种不同的量化失真组合,如表 2 所示。G-PCC 编码软件版本为 Test Model Category 13 version 14.0(TMC13v14.0)。其中,几何编码采用八叉树编码方式,属性编码采用预测方式。

表 2 点云序列量化参数
Table 2 Quantization parameters of point cloud sequence

位宽/bit	几何量化参数			属性量化参数		
	无损	R05	R02	R05	R03	R01
12	1	1/2	1/32	28	40	51
11	1	3/4	1/16	28	40	51
10	1	7/8	1/8	28	40	51

1.2 可视化平台及子实验设计

为探究点渲染方式对主观质量的影响,将点云采用 3 种不同点渲染方式显示,每种点渲染方式对

应一组子实验。子实验渲染参数如表 3 所示。

表 3 子实验渲染参数

Table 3 Sub-experimental rendering parameters

子实验编号	基础几何体类型	基础几何体半径
1	圆形	见式(1)
2	立方体	见式(1)
3	圆形	1.0

假设点云中第 i 个点的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, 2, \dots, M$, 最近的 N 个点的坐标为 (x_i^n, y_i^n, z_i^n) , $n = 1, 2, \dots, N$, 则第 i 个基础几何的渲染半径 r_i 为

$$r_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \| (x_i^n, y_i^n, z_i^n) - (x_i, y_i, z_i) \|^2} \quad (1)$$

式中: $N=10$ 。

主观实验的显示设备主要参数如表 4 所示。环境设置参考电视主观质量评价标准^[21-22]中的建议。测试背景 RGB(红、绿、蓝)三通道颜色值为 [128, 128, 128]。评分期间,受试者与屏幕的位置固定,受试者可以通过鼠标对点云序列进行自由旋转以做到全方位观测,受试者评分时间不做限制。实验实施环境如图 2 所示。

表 4 显示设备主要参数

Table 4 Display main parameter table

参数	内容
屏幕	三星,对角直径 65×25.4 mm (1 英寸=25.4 mm),2D
分辨率	3 842×2 160
刷新率	30 Hz
视场角	广视角
色域	100%RGB,BT. 709

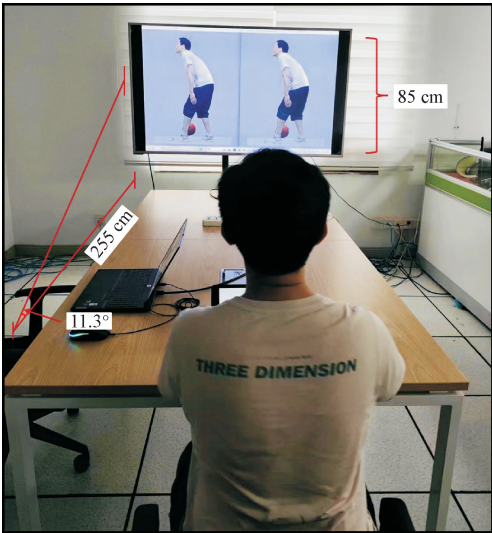


图 2 实验实施环境

Fig. 2 Experiment implementation environment

1.3 主观质量评价流程

1.3.1 实验打分方法

打分方式采用 DSIS 打分方式^[21],原始无失真点云序列置于屏幕左边,量化失真点云序列置于屏幕右边。实验评分采取五级评分制^[22],如表 5 所示。受试者同时观察原始参考点云和量化失真点云,依据原始参考点云序列对量化失真点云序列进行五级评分。参考点云序列作为隐藏参考出现在量化失真的测试点云序列位置,即要求受试者对每个点云模型的参考点云序列进行一次五级质量评分。在进行数据分析时,计算每个测试点云序列和其对应的隐藏参考之间的差异平均主观分数(differential mean opinion score,DMOS)。

表 5 五级评分制

Table 5 Five-level grading scale

评分等级	失真级别
5	失真不可察觉
4	失真可察觉,但几乎不影响观看体验
3	失真微弱影响观看体验
2	失真严重影响观看体验
1	失真非常严重影响观看体验

1.3.2 实验受试者筛选

主观质量评价过程中邀请了 11 名受试者参与。受试者年龄在 20~40 岁之间,其中 10 人为高校学生,1 人为点云视频领域的研究学者。受试者均通过 Snellen 和 Ishihara 视力表^[23]检测,并在正式主观实验之前对实验受试者进行相关的实验指导和预实验演练。

1.3.3 实验指导及预实验

为确保主观质量评价的准确性,所有受试者在进行实验前均进行实验指导及预实验。实验指导包含以下内容:点云相关概念以及主观质量评价要求介绍,点云失真种类、失真类型和点云渲染的相关介绍,正式实验与预实验等实验流程介绍,实验环境与设备使用说明,实验评分规则方式介绍。在正式实验之前,为确保受试者熟悉正式实验的操作过程,采用 basketball player 序列进行演练,失真类型、渲染类型、显示方式、评分方式等均与正式实验相同,预实验评分结果不记录在实验数据之内。

1.3.4 正式实验要求

正式实验包含上述 3 个子实验,每组子实验在主观评价过程中测试序列顺序随机,以免序列排序对主观质量的干扰。受试者每持续评价 30 min 强制休息 5~10 min,以避免受试者因为长时间观察产生视觉疲劳,从而影响对失真程度的判断。正式实

验过程中,总点云序列数目为 240 个(8 个初始序列 × (9 组失真+1 组无失真) × 3 种渲染方式),受试者人数为 11,最终获得平均意见分数(mean opinion score,MOS)为 2 640 个。

2 主观质量评价结果与分析

2.1 受试者可靠性分析及 DMOS 计算

依据 ITU-R BT. 500-13^[22] 附件 1 中 2.3 小节推荐的受试者可靠性分析方法,剔除异常受试者数据。经验证筛查,本次主观质量评价 3 个子实验中均无异常受试者数据。

为剔除量化失真点云序列 MOS 值中原始点云的隐藏参考,将点云 MOS 值转化为 DMOS 值,做到“隐藏参删除(hidden reference removal,HR)”。DMOS 的计算参考 ITU-TP. 913^[20] 中的方法。DMOS 值计算方法为

$$d_{ij} = \begin{cases} -m_{tj_{\text{ref}}} + m_{tj} + 5, & m_{tj_{\text{ref}}} \geq m_{tj} \\ \frac{7(-m_{tj_{\text{ref}}} + m_{tj} + 5)}{2 + (-m_{tj_{\text{ref}}} + m_{tj} + 5)}, & m_{tj_{\text{ref}}} < m_{tj} \end{cases} \quad (2)$$

式中: t 为受试者; j 为测试点云序列; j_{ref} 为 j 对应的原始参考点云序列; m_{tj} 为 t 对 j 的 MOS 分值, $m_{tj_{\text{ref}}}$ 为 t 对 j_{ref} 的 MOS 分值; d_{ij} 为 j 与 j_{ref} 之间的质量分数差异,即 DMOS 值。子实验的 DMOS 均值如表 6 所示。

表 6 点云主观质量评价 DMOS 均值
Table 6 Point cloud subjective quality assessment DMOS distribution

实验 编号	几何量化 等级	DMOS 均值		
		R05	R03	R01
1	无损	4.96	4.48	3.03
	R05	4.93	4.36	2.97
	R02	2.94	2.38	1.88
2	无损	4.94	4.53	3.28
	R05	4.89	4.37	3.12
	R02	3.03	2.51	1.99
3	无损	4.83	4.56	3.46
	R05	4.51	4.18	3.30
	R02	2.27	2.22	2.14

2.2 几何体类型对主观质量的影响

为探究几何体类型对主观质量的影响,对子实验 1 和子实验 2 的主观质量评价分数进行统计检验。采用威尔科克森符号秩检验^[24]和双独立样本 T 检验^[25]分别对两组实验数据的中值和均值分布进行检验。为满足双独立样本 T 检验方差齐次性的先验条件,采用莱文检验验证样本组方差齐次

性。各检验的零假设和备择假设如表 7 所示。

表 7 原假设与备择假设 Table 7 Null hypothesis and alternative hypothesis		
检验方法	原假设	备择假设
威尔科克森符号秩检验	两样本分布 中值相同	两样本分布 中值不同
莱文检验	两样本来自方差 相同的分布	两样本来自方差 不同的分布
双独立样本 T 检验	两样本分布 均值相同	两样本分布 均值不同

检测结果显示:子实验 1 和子实验 2 的威尔科克森符号秩检验 P 值为 0.000 065,莱文检验 P 值为 0.762,双独立样本 T 检验 P 值为 0.69。子实验 1 和 2 莱文检验 P 值大于 0.05,因此各个样本组均满足双独立样本 T 检验的方差齐次性条件。由于威尔科克森符号秩检验的 P 值小于 0.05,因此子实验 1 和子实验 2 在总体分布上存在显著性差异。渲染几何体类型对主观质量存在影响。

图 3 为各个量化失真类别下,子实验 2 和子实验 1 主观质量分数差值的箱式图,图中纵坐标 $d_{2,1}$ 计算式为

$$d_{2,1} = d_2 - d_1 \quad (3)$$

式中: d_1 、 d_2 分别为子实验 1 和子实验 2 计算得到的 DMOS 值。

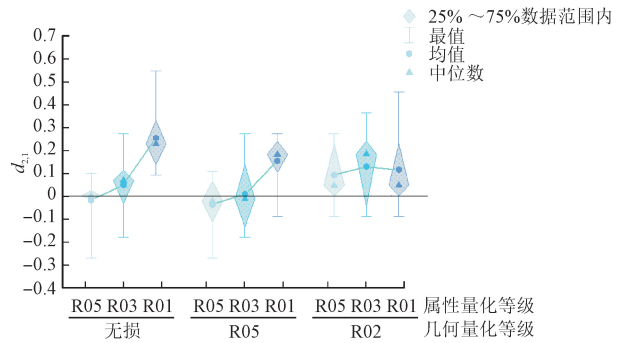


图 3 子实验 2 和子实验 1 主观质量差值箱式图
Fig. 3 Sub-experiment 2 and sub-experiment 1 subjective quality difference compartment plots

从图 3 可知,对于各量化失真类别,整体 $d_{2,1}$ 均值高于 0,即子实验 2 的主观质量优于子实验 1。同时,在相同几何量化失真下,当属性量化失真增大时, $d_{2,1}$ 呈现上升趋势,子实验 2 的渲染优于子实验 1 的情况在主观质量上更加显著。虽然两组子实验在渲染过程中每个基础几何体的渲染半径相同,但是立方体的半径对应立方体对角线的一半。所以,

在相同的观察视角下,圆形渲染产生的混叠面积会大于立方体,即圆形产生的几何和属性畸变大于立方体,如图4所示。

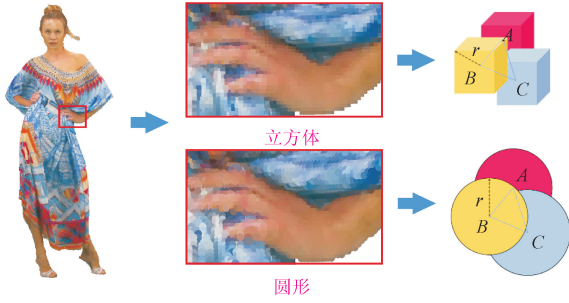


图4 圆形与立方体最近邻点渲染比较

Fig. 4 Comparison of circle and cube nearest neighbour rendering

2.3 最近邻渲染对主观质量的影响

为探究最近邻渲染方式对主观质量的影响,对子实验1和子实验3的主观质量评价分数进行统计检验。与2.2节中使用的统计方法相同,采用威尔科克森符号秩检验和双独立样本 T 检验分别对两组实验数据的中值和均值进行检验。各个检验的零假设和备择假设见表7。

检测结果显示:子实验1和子实验3的威尔科克森符号秩检验 P 值为0.354,莱文检验 P 值为0.892,双独立样本 T 检验 P 值为0.841。子实验1和子实验3莱文检验 P 值大于0.05,因此样本组均满足双独立样本 T 检验的方差齐次性条件。又因为威尔科克森符号秩检验和双独立样本 T 检验的 P 值均大于0.05,因此子实验1和子实验3在总体分布上无显著性差异。基于最近邻计算渲染半径的算法并没有因为减少空洞现象而提升量化点云的主观质量。

图5为各个量化失真类别下,子实验1和子实验3的主观质量分数差值,图中纵坐标 $d_{1,3}$ 计算式为

$$d_{1,3} = d_1 - d_3 \quad (4)$$

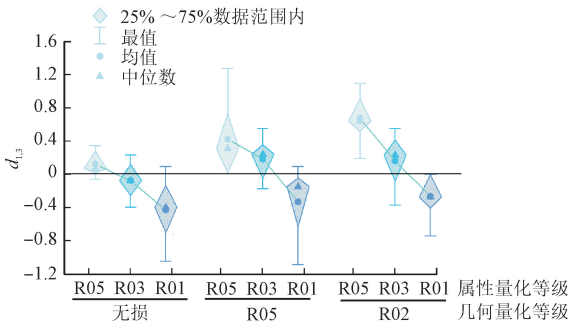


图5 子实验1和子实验3主观质量差值箱式图

Fig. 5 Sub-experiment 1 and sub-experiment 3 subjective quality difference compartment plots

从图5可以看出,相同几何量化失真时,随着属性量化参数的增大, $d_{1,3}$ 呈现下降趋势,且 $d_{1,3}$ 均值会从大于0转变成小于0的情况。在属性量化参数为51时,子实验3的主观质量分数显著高于子实验1。基于最近邻的点渲染算法是利用空间中点的密度信息自适应计算基础几何体的渲染半径,从而减少几何量化产生的空洞。但是,由于基础几何体渲染半径增大,在这一过程中人眼对于属性质量的感知更加敏感,渲染结果上与属性量化失真相关性高。因此,当属性量化失真较小时,子实验1中人眼感知的质量会高于子实验3中,反之结果相同。

3 量化点云点渲染算法优化

3.1 面向八叉树量化的点渲染优化

通过主观实验的分析可知,量化点云的主观质量在点渲染过程中受基础几何体半径产生的混叠和空洞影响。2.2节的实验结果表明,在不产生空洞的前提下,较小的基础几何体可以减少点云渲染过程中的混叠,从而减小几何和属性上的畸变,提高点云的主观质量。此外,2.3节的实验结果显示,基于最近邻的点渲染算法可以有效减少空洞的产生,并在属性量化较低的情况下表现出良好的效果。然而,当属性量化增大时,混叠引起的失真会降低点云的主观质量。因此,为了优化量化点云的主观质量,应当在设置基础几何体半径时避免产生空洞,并尽可能减少混叠现象的发生。

以基础几何体采用圆形渲染为例,假设当前点云中点的几何坐标为 (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, 2, \dots, M$,每个点对应的渲染半径为 r_i ,整个点云渲染产生的空洞面积为 S_1 (如图6中的蓝色区域所示),整个点云渲染产生的混叠面积为 S_2 (如图6中的绿色区域所示),则最优的人眼感知质量下,渲染半径满足

$$\min S_2(r_1, r_2, \dots, r_i); \quad \text{s. t. } S_1(r_1, r_2, \dots, r_i) = 0 \quad (5)$$

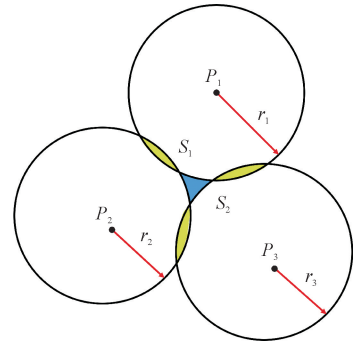


图6 点渲染空洞和混叠产生过程示意

Fig. 6 A diagram of the process of creating point-rendering hole and blending

由于 G-PCC 几何量化过程是对八叉树结构的剪枝,则点量化前的坐标 (x_i, y_i, z_i) 与量化后的坐标 $(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i)$ 的对应关系为

$$\begin{cases} \hat{x}_i = \left\lfloor \frac{x_i}{2^{Q_{\text{gem}}}} \right\rfloor 2^{Q_{\text{gem}}} + 2^{Q_{\text{gem}}-1} \\ \hat{y}_i = \left\lfloor \frac{y_i}{2^{Q_{\text{gem}}}} \right\rfloor 2^{Q_{\text{gem}}} + 2^{Q_{\text{gem}}-1} \\ \hat{z}_i = \left\lfloor \frac{z_i}{2^{Q_{\text{gem}}}} \right\rfloor 2^{Q_{\text{gem}}} + 2^{Q_{\text{gem}}-1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: Q_{gem} 为几何量化参数; $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整运算。

在渲染过程中, S_1 由点云中每个点和其空间最近邻点决定。八叉树剪枝后,点云中的点在空间中的最近邻距离近似。因此,全点云中量化后的点与其最近邻的平均距离 d 近似为

$$d \approx \left(\left\lfloor \frac{x_i}{2^{Q_{\text{gem}}}} + 1 \right\rfloor 2^{Q_{\text{gem}}} + 2^{Q_{\text{gem}}-1} \right) - \left(\left\lfloor \frac{x_i}{2^{Q_{\text{gem}}}} \right\rfloor 2^{Q_{\text{gem}}} + 2^{Q_{\text{gem}}-1} \right) = 2^{Q_{\text{gem}}} \quad (7)$$

令所有点的渲染半径相同,即

$$r_1 = r_2 = r_3 = \cdots = r_M \quad (8)$$

此时,空洞可视为由点云中每个点与其 26 个邻居点产生,则满足 $S_1 = 0$ 约束条件的渲染半径为

$$2r_M \geq \sqrt{3}d \quad (9)$$

结合式(7)、(8)可知,满足 $\min S_2$ 的渲染半径为

$$r_M = \frac{\sqrt{3}}{2}d = \sqrt{3}2^{Q_{\text{gem}}-1} \quad (10)$$

所提算法在二维屏幕上的渲染示意如图 7 所示。

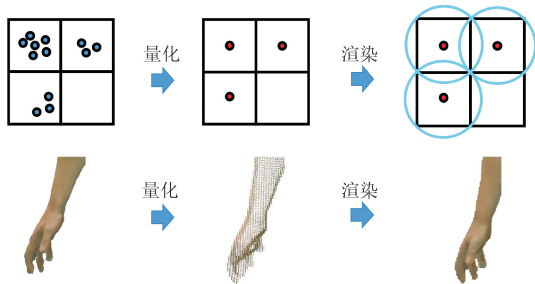


图 7 所提算法的点渲染过程示意

Fig. 7 Diagram of the proposed method point rendering process

3.2 优化算法性能测试结果

本文以渲染图像峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR)、主观质量分数和渲染时间复杂度这 3 种指标评价所提算法性能。其中,渲染图像 PSNR 的计算是先将点云渲染后投影到包围盒的 6 个平面上,再计算 6 个图像 PSNR 的均值。

将所提算法与最近邻渲染算法进行对比,评价指标为

$$\Delta I_{\text{PSNR}} = \frac{I_{\text{PSNR, proposed}} - I_{\text{PSNR, NNR}}}{I_{\text{PSNR, NNR}}} \quad (11)$$

$$\Delta I_{\text{DMOS}} = I_{\text{DMOS, proposed}} - I_{\text{DMOS, NNR}} \quad (12)$$

$$\Delta T = \frac{T_{\text{proposed}} - T_{\text{NNR}}}{T_{\text{NNR}}} \quad (13)$$

式中: I_{PSNR} 、 I_{DMOS} 分别代表 PSNR、DMOS 值; T 代表渲染时间复杂度;下标 proposed、NNR 分别代表本文算法、最近邻渲染算法。

表 8 展示了所提算法与基于最近邻的点渲染算法^[12]的比较结果。

表 8 最近邻渲染算法与所提算法性能对比结果

Table 8 The performance comparison results between the nearest neighbor rendering algorithm and the proposed algorithm

测试序列	$\Delta I_{\text{PSNR}}/\%$	ΔI_{DMOS}	$\Delta T/\%$
basketball player	11.5	0.7	-37
longdress	12.5	0.5	-43
loot	13.7	0.5	-51
redandblack	13.4	0.6	-42
head	8.9	0.5	-75
soldier	13.7	0.7	-50
dancer	14.6	0.6	-47
boxer	11.9	0.6	-73
house without roof	11.4	0.4	-71
frog	11.3	0.5	-63
Egyptian mask	10.7	0.4	-33
facade	13.4	0.4	-42
平均值	12.3	0.5	-52

从表 8 可以看出,与最近邻渲染算法相比,所提算法渲染质量提升了 12.3%,主观质量分数提升了 0.5,时间复杂度显著减少,降低了 52%。这是因为所提算法在对量化后的点云渲染时仅利用几何量化参数计算渲染半径,减少了对量化点云中每个点的遍历和寻找每个点最近 10 个邻居点的过程。

同时,图 8 展示了所提算法与最近邻渲染算法在不同量化参数下的主观效果对比。由结果可知,相比于最近邻渲染算法,所提算法根据几何量化参数计算渲染半径,减少了基础几何体间的混叠,从而使渲染后的点云在细节表达上效果更好。



图8 最近邻渲染算法与所提算法的主观效果对比

Fig. 8 Comparison of the subjective effects between the nearest neighbor rendering algorithm and the proposed algorithm

4 结 论

本文通过设计不同点渲染方式的点云主观质量评价实验,分析了不同点渲染类型和最近邻渲染方式对量化点云主观质量的影响。研究结果表明:点渲染类型会因为基础几何体产生的混叠程度不同而影响主观质量;最近邻渲染的质量分数与属性量化失真相关性更高,在属性失真严重时,渲染效果更差。实验结果显示,点渲染中基础几何体半径的合理设置是提升量化点云主观质量的关键因素,需要在不产生空洞时减少混叠。

结合主观实验结果,本文在理论分析的基础上,建立了点渲染半径和渲染失真面积的优化模型。通过结合八叉树量化后的空间相似性,将多模型参数简化为单一参数并求解,提出一种利用几何量化参数计算基础几何体半径的渲染算法。相比基于最近邻计算渲染半径的算法,所提算法减少了空间最近的搜索过程,时间复杂度降低了 52%。同时,因

为减少了渲染过程中基础几何体的混叠程度,所以所提算法 PSNR 提升了 12.3%,并且主观实验结果反映人眼感知质量更高。

参考文献:

- [1] 李厚强,李礼,李竹. 点云编码综述 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(1): 4-9.
LI Houqiang, LI Li, LI Zhu. A review of point cloud compression [J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(1): 4-9.
- [2] FAN Y, ZHANG Z, SUN W, et al. A no-reference quality assessment metric for point cloud based on captured video sequences [C]//IEEE 24th International Workshop on Multimedia Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 1-5.
- [3] LI Zhu, LIU Shan, DUFAUX F, et al. Guest editorial introduction to the special issue on recent advances in point cloud processing and compression [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2021, 31(12): 4555-4560.
- [4] 徐异凌,杨琦,杨开发,等. 点云质量评价挑战与关键技术研究 [J]. 中国传媒大学学报(自然科学版), 2021, 28(5): 11-21.
XU Yiling, YANG Qi, YANG Kaifa, et al. Challenges and key technologies of point cloud quality assessment [J]. Journal of Communication University of China Science and Technology, 2021, 28(5): 11-21.
- [5] KIVI P, MAKITALO M, ZADNIL J, et al. Real-time rendering of point clouds with photorealistic effects: a survey [J]. IEEE Access, 2022, 10: 13151-13173.
- [6] KOPANAS G, PHILIP J, LEIMKÜHLER T, et al. Point-based neural rendering with per-view optimization [J]. Computer Graphics Forum, 2021, 40(4): 29-43.
- [7] BUI G, LE T, MORAGO B, et al. Point-based rendering enhancement via deep learning [J]. The Visual Computer, 2018, 34(6): 829-841.
- [8] ALEXIOUS E, UPENIK E, EBRAHIMI T. Towards subjective quality assessment of point cloud imaging in augmented reality [C]//IEEE 19th International Workshop on Multimedia Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-6.
- [9] ALEXIOUS E, EBRAHIMI T. On the performance of metrics to predict quality in point cloud representations [C]// Proceedings of SPIE. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2017: 10396.
- [10] ALEXIOU E, EBRAHIMI T. Impact of visualisation strategy for subjective quality assessment of point

- clouds [C]//2018 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 1-6.
- [11] ALEXIOU E, EBRAHIMI T, BERNARDO M V, et al. Point cloud subjective evaluation methodology based on 2D rendering [C]//2018 Tenth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 1-6.
- [12] JAVAHERI A, BRITES C, PEREIRA F, et al. Point cloud rendering after coding: impacts on subjective and objective quality [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2020, 23: 4049-4064.
- [13] YANG Qi, CHEN Hao, MA Zhan, et al. Predicting the perceptual quality of point cloud: a 3D-to-2D projection-based exploration [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2021, 23: 3877-3891.
- [14] YANG Qi. Shanghai Jiao Tong university subjective point cloud quality assessment (SJTU-PCQA) database [DB/OL]. [2023-05-20] <https://smt.sjtu.edu.cn/database/point-cloud-subjective-assessment-database>.
- [15] WU Xijun, ZHANG Yun, FAN Chunling, et al. Subjective quality database and objective study of compressed point clouds with 6DoF head-mounted display [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2021, 31(12): 4630-4644.
- [16] WU X, ZHANG Y, FAN C, et al. SIAT-PCQD: subjective point cloud quality database with 6d of head-mounted display [EB/OL]. [2023-05-01] <https://iee-dataport.org/documents/siat-pcqd-subjective-point-cloud-quality-database-6dof-head-mounted-display>.
- [17] LIU Qi, SU Honglei, DUANMU Zhengfang, et al. Perceptual quality assessment of colored 3D point clouds [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2023, 29(8): 3642-3655.
- [18] MPEG-3DG. MPEG static object and scenes datasets [DB/OL]. [2023-05-20]. http://mpegfs.intevry.fr/MPEG/PCC/DataSets/pointCloud/CfP/datasets/Static_Objects_and_Scenes/.
- [19] SCHWARZ S, PREDA M, BARONCINI V, et al. Emerging MPEG standards for point cloud compression [J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2019, 9(1): 133-148.
- [20] MPEG-3DG. Common test conditions for G-PCC [EB/OL]. (2023-05-01) [2023-06-04]. https://dms.mpeg.expert/doc_end_user/.
- [21] ITU. Subjective video quality assessment methods for multimedia applications: ITU-T P. 9210 [R]. Geneva, Switzerland: ITU, 2016.
- [22] ITU. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures: ITU-R BT. 500 [R]. Geneva, Switzerland: ITU, 2012: 500-513.
- [23] JANOWSKI L, PINSON M. The accuracy of subjects in a quality experiment: a theoretical subject model [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2015, 17(12): 2210-2224.
- [24] GOLENKO D, AMPILOV O. Unknown signal detection based on Wilcoxon signed-rank test [C]// Proceedings of 2016 International Conference on Engineering and Telecommunication. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 72-75.
- [25] 吴鑫菊. 面向六自由度虚拟现实的点云视觉质量评价方法 [D]. 广东深圳: 中国科学院深圳先进技术研究院, 2021.

(编辑 陶晴)