

自动驾驶汽车虚拟测试中的树木点云生成方法

唐维军, 徐 琨, 柳有权, 夏 悬

长安大学 信息工程学院, 西安 710064

摘 要: 自动驾驶汽车虚拟测试已成为自动驾驶或车路协同测试评价的一个重要手段, 三维激光雷达数据模拟生成是自动驾驶汽车虚拟测试中的重要任务之一, 目前多采用基于飞行时间原理的几何模型方法生成激光雷达三维点云数据, 该方法生成点云实时性较差。布告牌是虚拟场景中常采用的树木建模方法, 由于布告牌仅由两个矩形面片即八个三角形面片组成, 直接采用布告牌方法生成的三维点云数据难以反映树木的真实空间信息。针对上述问题, 提出了一种基于布告牌空间变换的快速树木三维点云生成方法。以布告牌的纹理图像为依据, 根据纹理透明度获取树木二维平面点云分布, 经二维树木点云的轮廓提取, 结合树木结构的先验知识进行旋转、随机偏移和尺度变换, 以更少的三角形面片数和更小的计算代价获得树木的三维点云数据。提出了一种空间直方图三维点云相似度评价方法, 将三维点云空间量化为若干个空间, 获得三维点云的投影空间直方图, 采用巴氏系数计算投影空间直方图相似度, 以投影空间直方图加权相似度作为点云相似度评价。实验结果表明, 基于布告牌空间变换方法和几何模型方法生成的云杉等三种树木的三维点云数据的平均相似度在90%以上, 且该方法生成树木点云的时间仅是几何模型法的1%, 因此布告牌空间变换树木三维点云生成方法快速且准确, 可以满足自动驾驶汽车虚拟测试的性能要求。

关键词: 自动驾驶汽车虚拟测试; 三维点云; 树木; 布告牌; 空间直方图

文献标志码: A **中图分类号:** TP391 **doi:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2012-0479

Method for Generating Three-Dimensional Point Cloud of Trees in Autonomous Vehicle Virtual Testing

TANG Weijun, XU Kun, LIU Youquan, XIA Xuan

School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract: Autonomous vehicle virtual testing has become an important method for autonomous driving or vehicle-road collaborative testing and evaluation. Virtual generation of LiDAR data is one of the most important tasks in autonomous vehicle virtual testing. At present, the geometric model method based on the time-of-flight principle is a common method to generate LiDAR 3D point cloud data, which may lead to poor performance for real-time generating point cloud. The billboard technology is often used to model trees in virtual scenes. Since the billboard is only composed of two rectangular meshes with eight triangles, the 3D point cloud data generated by the billboard directly can hardly reflect the real spatial information of trees. To solve the above problems, this paper proposes a fast 3D tree point cloud generation method based on the spatial transformation of the billboard. Based on the texture image of the billboard, the 2D point cloud of trees is obtained according to the texture transparency, and the boundary of the 2D tree point cloud is estimated. Combined with the prior knowledge of the tree structure, the rotation, random offset and scale transformation are carried out in turn. After the above operation, the 3D point cloud data of trees can be obtained with less triangle meshes and less computational cost. This paper also proposes a similarity evaluation method of the 3D point cloud based on spatial histogram. The 3D point cloud space is quantified into several subspaces, and the projection spatial histograms of the 3D point cloud are obtained, and the Bhattacharyya coefficient is adopted to calculate the similarity of two spatial histograms. The weighted similarity of projection spatial histogram is used as the evaluation of the point cloud similarity. The experimental results show that the average similarity between the 3D point cloud data of spruce and other three trees generated by the proposed method and by the geometric modeling methods is more than 90%. Compared with the geometric modeling methods, the

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1600800); 航天预研项目(030101)。

作者简介: 唐维军(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为虚拟现实技术, E-mail: eugene_twj@163.com; 徐琨(1974—), 女, 博士, 副教授, CCF 会员, 研究方向为计算机视觉、数字图像处理; 柳有权(1976—), 通信作者, 男, 博士, 教授, CCF 会员, 研究方向为计算机图形学、虚拟现实技术, E-mail: youquan@chd.edu.cn; 夏悬, 女, 硕士研究生。

收稿日期: 2020-12-28 **修回日期:** 2021-01-25 **文章编号:** 1002-8331(2021)11-0185-08

method only takes about one percent of the time to generate 3D tree point cloud. The 3D point cloud of trees generation method based on the spatial transformation of the billboard is fast and accurate and can meet the performance requirements of autonomous vehicle virtual testing.

Key words: autonomous vehicle virtual testing; 3D point cloud; tree; billboard; spatial histogram

随着人工智能技术的不断发展,自动驾驶为解决交通拥堵、事故频发等问题提供了一种新途径,自动驾驶汽车测试成为自动驾驶的一个重要课题。传统的道路场地测试存在效率低、测试代价高、测试路况有限、场景环境气候单一、难以重复测试等不足^[1-2]。自动驾驶汽车虚拟测试具有效率高、安全、成本低、场景和交通流构建灵活等特点^[3-8],已经成为自动驾驶测试评价的重要手段。

激光雷达是自动驾驶中最重要的传感器之一,激光雷达三维点云蕴涵着丰富的空间位置信息,如空间各点之间相邻结构关系、被扫描物体表面的纹理细节等,极大地拓展了自动驾驶环境感知方法,三维激光雷达数据模拟生成是自动驾驶汽车虚拟测试中的重要任务。树木模型是虚拟交通场景中极具代表性的自然景观,具有种类繁多、外表形状千姿百态、拓扑结构复杂以及枝条纵横交错等特点,建立高效、真实性强的树木三维激光点云仍然是自动驾驶汽车虚拟测试的难点问题之一。

虚拟场景中树木建模的常用方法有基于三角面片的方法、数据驱动的方法、L系统等^[9-14],在实时环境中常用三角面片的方法,该方法主要包括基于布告牌的方法和基于几何模型的方法。基于几何模型的方法通过大量三角形面片构建树木几何结构,对于结构复杂的树木,生成点云的实时性难以保证。基于布告牌的方法通过两个矩形面片建模树木,三角形面片数量少,生成点云效率高。

本文将布告牌树木建模方法引入到树木的激光雷达三维点云生成中,提出了一种基于布告牌空间变换的快速树木三维点云生成方法。以布告牌的纹理图像为输入,根据纹理透明度获取树木二维平面点云分布,依据点云的法向量提取二维轮廓点云,并进行点云均匀化操作,利用树木结构的先验知识进行旋转、偏移和尺度变换,最终生成树木三维点云数据。为了验证本文方法的有效性,本文又提出了空间直方图三维点云相似度评价方法,最后,通过不同类型树木的三维点云数据验证了本文方法具有精度高、速度快的特点。本文方法为虚拟交通场景中大规模树木的三维点云快速生成提供了一种新的方法与思路。

1 相关工作

1.1 激光雷达三维点云模拟生成

激光雷达模拟生成的主要方法有基于物理模拟的

方法、基于数据驱动的方法、基于物体表面模型的方法。基于物理模拟的方法分别对场景数据、激光探测距离、大气传输特性以及噪声等关键要素建模,并通过坐标转换将激光探测距离转换为三维数据,实现激光雷达三维数据模拟。Michael等^[15]对盖格模式雪崩二极管(Geiger-mode Avalanche Photodiode Detectors, APD)三维成像进行模拟,该方法假设物体表面是朗伯散射体,应用光线追踪法获得成像景物到APD阵列的距离矩阵和反射率矩阵,并考虑太阳光、暗电流等因素的影响,给出激光雷达探测距离的方法,最终以图像的形式呈现点云数据的模拟结果。基于物理模拟的方法需要分别考虑发射器功率、大气环境、接收器性能、目标特性等因素影响,建立的物理模型可扩展性差^[16],特别是当场景中有植物、人体等非刚性物体时,为了保证点云数据的准确性一般采用多样本射线追踪方法或建立粒度更小的几何模型,但算法的实时性很难保证^[17]。基于数据驱动的方法主要从大量的场景激光雷达数据中学习获得激光雷达数据的分布信息。Browning等^[18]建立了一个包含射程返回和渗透率,同时考虑激光雷达射程的统计分布、噪声、混合像素效果的混合随机仿真模型。该模型能够有效地考虑场景的变化性,并能根据测量的大规模激光雷达数据完成模型的自动估计。Abhijeet等^[19]在野外环境中采集树、灌木的真实点云数据,在虚拟场景中通过三角形面片构建真实树、灌木的模型基元,以这些模型基元作为虚拟场景的输入数据,真实点云与模型场景位置对应得到填充场景数据,并将其作为真值,多次训练得到真实点云与模型基元的对应关系,最后输入测试的模型基元可模拟出点云数据。基于数据驱动的方法的难点在于真实数据的采集,真实数据的完整性决定模拟结果。

基于物体表面模型的方法通过三角形面片等方法构建物体表面模型,模拟激光雷达的飞行时间原理,采用光线追踪方法,计算出激光射线与物体表面模型的交点,获得场景中物体的点云数据。该方法可扩展性强、设计简单^[20-22]。Yue等^[21]在游戏中构建车辆等场景模型,并使用光线追踪技术计算光线与第一个击中的模型的交点产生LiDAR点云数据。Su等^[23]采用3D引擎OSG(Open Scene Graph)以树数据结构存储场景模型,根据激光雷达的位置、姿势、范围等信息查询区域的场景模型数据,通过渲染该区域获得点云信息。

1.2 激光雷达点云相似度评价

与传统的视频、图像等数据表示相比,三维激光点云具有非结构化、无序性、不完整的特点。在衡量三维点云数据间的差异时,要求三维点云数据的输入顺序不能影响结果。点云相似度评价的难点一方面在于在网格空间中很难使用欧氏距离等常用距离测度,另一方面在于评价两个点云所表示的相似度。目前,常使用两个点云的距离测度评价离散点云相似度。

Hausdorff距离是早期点云相似度计算的主要方法。Hausdorff距离需要计算一个点集中所有点与另一点集所有点之间的距离。对于三维点云数据集,计算代价非常大。Zhang等^[24]提出了一种用于测量3D模型和3D点云之间的部分相似度的快速方法,部分相似度定义为模型的加权表面积与从模型到点云的加权单侧Hausdorff距离之比。Zhang等^[25]提出了一种基于扩散搜索方法的Hausdorff距离的精确计算方法,该方法不需要扫描每个点,将当前断点记录为下一个内部循环的扩散中心,可以显著提高计算效率。Zhang同时提出了稀疏点集和密集点集两种不同的距离计算方法,大大降低了距离计算的时间复杂度。

Chamfer距离^[26]通过测量两幅图像平均最近平方距离表示两幅图像的相似度。EMD(Earth Mover Distance)^[27]最早应用于图像检索,通过计算从一幅图像转化为另一幅图像的代价来度量两幅图像的相似度,代价越小,两幅图像相似度越大。Fan等^[28]和Huang等^[29]分别将这两个距离测度作为损失函数使得生成的点云与原始点云趋于最小。Dahlia等^[30]提出一种深度学习的方法,通过计算一个点云的点与该点云表面的采样点之间的EMD和Chamfer距离,使用深度学习网络估计从点到底层连续表面的这两个距离函数。

Geodesic距离^[31]是另一种距离测度,它提供了不受变形影响的度量,以及依赖于点云向量描述符之间距离的度量。

2 基于布告牌空间变换的快速树木三维点云生成方法

几何建模所得树木的三角形面片数目多,需要反复计算激光与三角形面片的交点,生成整棵树的三维点云数据通常需要数秒,难以满足虚拟测试系统的实时性要求。布告牌仅通过两个矩形面片(8个三角形面片)对目标进行建模,三角形面片数较少。因此,本文使用布告牌建立树木的三维模型。图1给出了使用布告牌,采用光线追踪技术^[32]直接生成的三维点云数据。

由图可知,直接使用布告牌生成的三维点云数据缺少树木的三维空间信息,误差很大。针对这一不足,本



图1 直接使用布告牌的树木点云

文提出了一种基于布告牌空间变换的快速树木三维点云生成方法,方法框架示意图如图2所示。

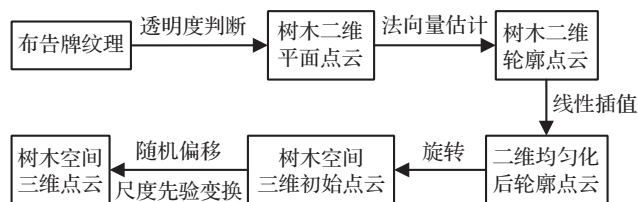


图2 本文点云生成方法框架图

该方法分二维轮廓点云生成和空间三维点云生成两部分。首先根据树木纹理的透明度获得树木的二维平面点云数据,采用法向量估计法提取树木的二维平面点云的轮廓,并对得到的轮廓点云均匀化,均匀化后的二维轮廓点云进行旋转得到三维初始点云,最后根据树木结构的先验知识,进行随机偏移和尺度先验变换获得最终的树木空间三维点云。

2.1 二维轮廓点云生成

设前景树木透明度 $\theta=1$,背景透明度 $\theta=0$,布告牌的纹理图像大小为 $pixel_w \times pixel_h$,布告牌两个矩形面片的纹理一致,共有8个三角形面片。遍历纹理图像,依据式(1)计算激光束与布告牌交点的像素坐标。

$$\begin{cases} pixel_x = UV_x \times pixel_w \\ pixel_y = UV_y \times pixel_h \end{cases} \quad (1)$$

其中, $pixel_x$ 、 $pixel_y$ 为纹理的像素坐标, UV_x 、 UV_y 为纹理坐标。若像素点透明度为1,则将该点的空间信息加入到二维点云集合中,否则忽略该点。

点云内部点的邻域点分布具有相对均匀性,而轮廓点的邻域点分布不具有均匀性,如图3(a)、(b)所示。本文将点云中点的法向量方向作为点云轮廓点的判断依据。通过点云中任意一点 P 的 K 邻域构造邻域微切平面,将微切平面的法线定义为 P 点的法向量。点云轮廓点提取算法描述如下:

采用八叉树 K 近邻搜索算法构成点云每一点 P_i 的 K 邻域点 $N_j(j=0,1,\dots,k)$,将其作为组成 P_i 的邻域参考点集 X ,得到该点集的最小二乘微切平面 F ;点集 X 中的各点向微切平面 F 投影,投影点集记为 X' ,投影点

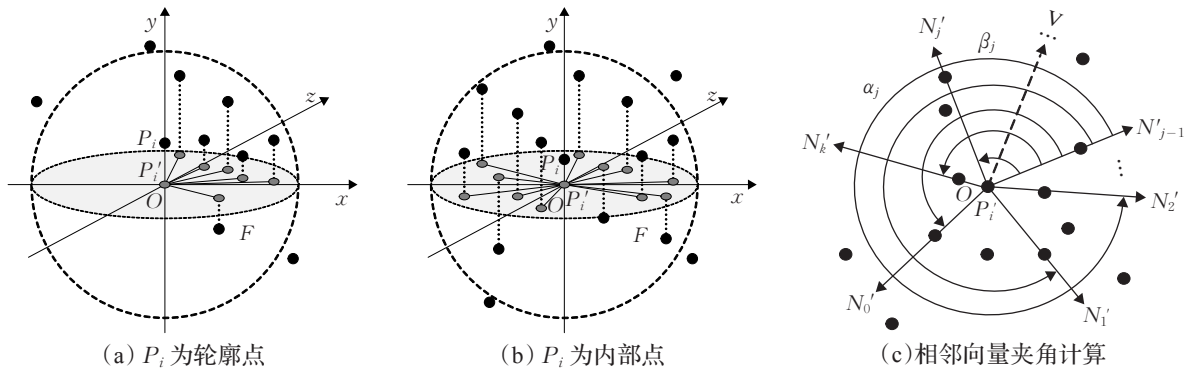


图3 轮廓点提取示意图

记为 N'_j , P_i 的投影点 P'_i 与其最近邻点投影点构成的向量记为 $P'_i N'_k$, 与其他点构成的向量记为 $P'_i N'_j$ ($j=0, 1, \dots, k-1$); $P'_i N'_k$ 与微切平面法向量的叉积为 V , 分别求取 $P'_i N'_j$ 与 $P'_i N'_k$ 的夹角 α_j 以及 $P'_i N'_j$ 与 V 的夹角 β_j , 如图 3(c) 所示; 若 $\beta_j > \pi/2$, 则 $\alpha_j = 2\pi - \alpha_j$; 对所有的 α_j 进行升序排序, 并添加 0 和 2π 两个极值角度, 得到角序列 $(0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k, 2\pi)$; 计算角序列相邻夹角差 $L_k = \alpha_{i+1} - \alpha_i$, 若相邻夹角差最大值 L_{\max} 大于角度阈值, 则 P_i 是轮廓点。

在生成二维平面点云时, 激光雷达扫描的水平分辨率不高或者纹理透明度计算存在误差, 会导致点云缺失, 因此, 在生成二维轮廓点云后, 本文使用线性插值的方法进行轮廓点云均匀化, 设置相邻点云距离阈值, 在大于阈值的点云之间插入点云, 将小于阈值的点云删除。

2.2 空间三维点云生成

设虚拟激光雷达发射的激光束的垂直分辨率为 ϕ , 水平分辨率为 φ 。以二维点云平面的对角线交点为旋转中心点, 绕 Y 轴分别顺时针、逆时针分步旋转 90° , 每步旋转角度为 θ , $\theta \in [-\varphi/2, \varphi/2]$, 如图 4 所示。

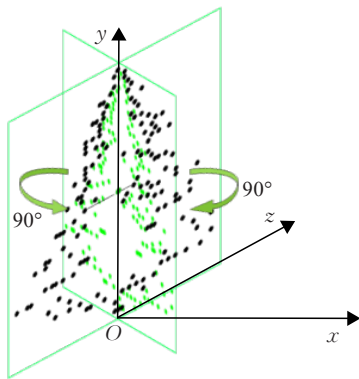


图4 旋转示意图

真实环境中大气、激光雷达硬件等影响, 三维点云存在噪声或偏差。若仅仅通过旋转二维轮廓点云获得

三维点云, 会使点云数据过于整齐, 与真实情况不符。

因此, 在旋转过程中, 对点云数据进行随机偏移操作, 偏移操作通过绕 X 和 Y 轴旋转实现。本文采用逆变换法^[33]产生随机旋转角度, 该方法使用均匀分布的随机数生成服从指定分布的随机数。

通过实验获得云杉、针叶树、悬铃木三种树木的最优偏移随机分布及最优参数, 具体参数如表 1 所示。

表1 树木点云偏移量最优分布及参数

树木类型	最优分布	概率密度函数	最优参数
云杉	高斯分布	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}\right)$	$\mu=2, \sigma=50$
针叶树	泊松分布	$\frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$	$\lambda=20$
悬铃木	二项分布	$\binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$	$n=2, p=0.1$

在真实场景中, 树干表面有凹陷, 树叶会向内卷缩, 这两种情况都会对真实激光点云产生影响。为模拟这些影响, 本文进一步提出引入树木结构先验知识的点云尺度变换。依据每种树木的树冠和树干高度信息, 在树冠部分和树干部分的 X 方向和 Z 方向进行等比例随机尺度变换。

综上所述, 本文的三维点云空间变换如式(2)所示:

$$P = M \cdot (R_y \cdot (P_0 - C) + C) \quad (2)$$

其中, $P = (x, y, z)^T$ 为最终生成的树木三维点云坐标, $P_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$ 为原始点云坐标, $C = (x_c, y_c, z_c)^T$ 为二维平面点云的对角线交点坐标, R_y 为绕 Y 轴旋转矩阵, M 为偏移尺度变换矩阵, 且:

$$M = Q_a \cdot (R_x R_y \cdot (Q_s S)) =$$

$$Q_a \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 \\ \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ \cos \theta_1 \sin \theta_2 & -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \end{bmatrix} Q_s \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & s_z \end{bmatrix}$$

其中, θ_1 、 θ_2 分别为绕 X 轴和 Y 轴的旋转角度, S 为缩放矩阵, s_x 、 s_z 分别为 X 、 Z 方向上的缩放比例, Q_a 、 Q_s 分别为偏移、尺度变换的条件系数矩阵, 根据树木的树冠和树干的先验知识, Q_a 、 Q_s 分别为:

$$Q_a = \begin{cases} (R_x R_y \cdot (Q_s S))^{-1}, P_{0_x}, P_{0_z} = w_{\text{crown}} \\ E, P_{0_x}, P_{0_z} \neq w_{\text{crown}} \end{cases} \quad (3)$$

$$Q_s = \begin{cases} E, P_{0_y} \leq h_{\text{stem}} \\ S^{-1}, P_{0_y} > h_{\text{stem}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, E 为单位矩阵, w_{crown} 为二维平面点云轮廓的最大宽度, h_{stem} 为树木点云的树干高度。

3 空间直方图点云相似度评价方法

三维激光点云具有非结构化、无序性、不完整的特点, 树木点云每一局部区域都有唯一的分布特征, 这种分布特性不仅需要通过每一子空间内的点云数目反映, 还应通过点云的空间位置信息反映。相对于通过 Hausdorff 等距离评价点云相似度的方法, 空间直方图点云相似度评价方法考虑了点云的空间位置信息, 更能反映点云分布的相似度。且避免了计算一个点集中所有点与另一点集所有点之间的距离, 计算代价更小。因此, 本文提出了空间直方图的点云相似度评价方法。

三维点云空间量化为若干子空间, 即进行空间栅格化, 并将栅格化点云分别向 XOY 、 XOZ 、 YOZ 三个平面进行投影, 统计三个投影平面的空间直方图。

设二元映射 $I: x \rightarrow v$, $x = [x, y]^T$ 为投影栅格的坐标, v 为该栅格内的点云数目, 点云的二阶空间直方图为:

$$h = \langle n_b, u_b, \Sigma_b \rangle, b = 1, 2, \dots, B \quad (5)$$

其中, n_b 为第 b 个栅格内的点云数目, u_b 、 Σ_b 分别为第 b 个栅格内投影点云的坐标均值向量和协方差矩阵, B 为投影栅格总数。

两个点云空间直方图 $h = \langle n_b, u_b, \Sigma_b \rangle$ 和 $h' = \langle n'_b, u'_b, \Sigma'_b \rangle$ 的相似度 $\rho(h, h')$ 依据如式(6)计算:

$$\rho(h, h') = \sum_{b=1}^B \varphi_b \rho_n(n_b, n'_b) \quad (6)$$

$$\varphi_b = \eta \exp \left[-\frac{1}{2} (\mu_b - \mu'_b)^T (\Sigma_b^{-1} + (\Sigma'_b)^{-1}) (\mu_b - \mu'_b) \right] \quad (7)$$

其中, η 为高斯归一化常数。本文采用巴氏系数计算 $\rho_n(n_b, n'_b)$, 如式(8)所示:

$$\rho_n(n_b, n'_b) = \frac{\sqrt{n_b n'_b}}{\sqrt{\left(\sum_{j=1}^B n_j \right) \left(\sum_{j=1}^B n'_j \right)}} \quad (8)$$

最后, 将三个投影平面的空间直方图相似度的加权和作为两个点云的相似程度测度。

4 实验结果及分析

本文在 Unity3D 平台采用 C# 编程实现, 实验平台软硬件配置为 i5-6550 CPU@3.2 GHz, 16 GB, Windows10 操作系统。虚拟激光雷达射线数目 64 线, 最大距离

200 m, 水平分辨率 0.25° , 垂直分辨率 0.4° , 垂直视野 26.9° , 水平视野 360° 。为验证本文方法的有效性, 分别采用几何模型方法^[34]和本文布告牌空间变换方法生成云杉、针叶树、悬铃木三种类型的树木点云, 将几何模型方法生成的树木点云作为参考基准点云, 几何建模树木的渲染结果作为布告牌的纹理贴图。

4.1 相似度评价有效性实验

首先使用几何模型法生成棕榈、红木、松树三种不同树木模型及相应点云, 如图5所示。

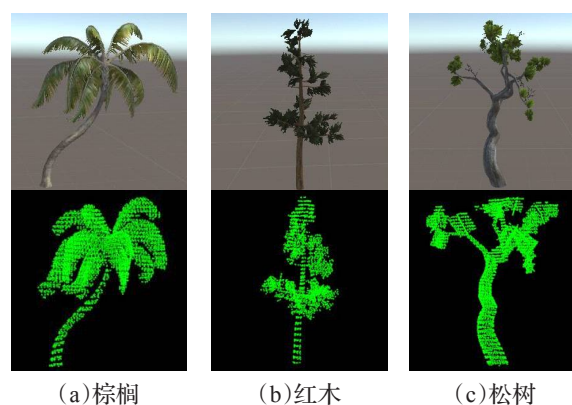


图5 不同树木的模型与点云

计算棕榈、红木、松树三种树木点云两两之间的 Hausdorff 距离和本文的空间直方图相似度, 数据如表2所示。Hausdorff 距离越大则两个点云之间差异越大, 空间直方图相似度越小, 两个点云差异越大。由表2可知, 使用 Hausdorff 距离和空间直方图相似度评价方法, 均可得到棕榈和红木的相似度最高, 棕榈和松树的相似度最低的结论。

表2 不同树木点云之间的相似度比较

评价方法	棕榈- 红木	棕榈- 松树	棕榈- 棕榈	红木- 松树	红木- 红木	松树- 松树
Hausdorff距离	1.846 9	5.865 7	0	5.614 1	0	0
本文评价方法	0.567 1	0.494 1	1	0.520 5	1	1

表3给出了不同量化参数, 使用本文评价方法得到的几何模型树木三维点云间的两两相似度。随着投影栅格数目的增加, 不同树种间的相似度均迅速减小, 投影栅格数为 20×20 以上时相似度在 0.5 以下, 而同种树木在不同投影栅格数的相似度始终为 1。

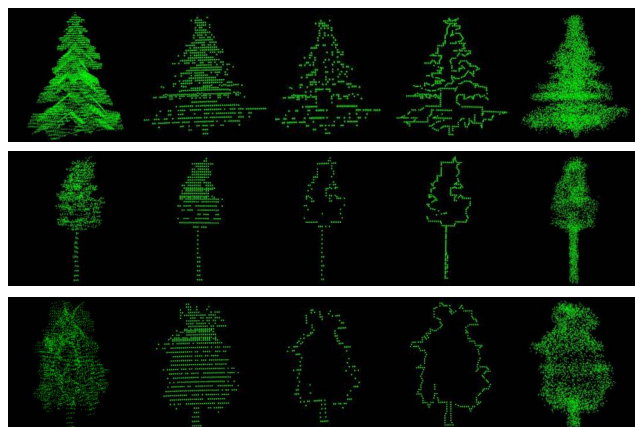
表3 不同树木点云之间的空间直方图相似度

不同树木	5×5	10×10	20×20	30×30	40×40
棕榈-红木	0.780 0	0.660 6	0.567 1	0.524 4	0.482 7
棕榈-松树	0.741 6	0.601 5	0.494 1	0.448 4	0.416 3
棕榈-棕榈	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
红木-松树	0.741 6	0.621 4	0.520 5	0.469 4	0.437 7
红木-红木	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
松树-松树	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0

进一步实验统计棕榈、红木、松树三种树木两两之间相似度评价的时间,本文方法和Hausdorff距离计算相似度的平均时间分别为0.513 s和0.847 s。综上所述,本文提出的空间直方图点云相似度评价方法有效且更快。

4.2 点云生成方法准确性实验

在获取布告牌建模树木的二维平面点云时,保持虚拟车辆的虚拟激光雷达中心点的 Z 轴坐标值和布告牌建模树木中心点的 Z 轴坐标值相同,防止受布告牌模型中另一矩形面片影响,产生噪声点。几何模型法及本文方法生成云杉、针叶木、悬铃木点云结果如图6所示。从图6(a)和(e)可知,本文方法生成的点云在视觉上与几何模型方法生成的点云结构相似。



(a)几何模 (b)二维平 (c)二维 (d)均匀化 (e)本文方
型生成的 面点云 轮廓点 后二维轮 法生成的
点云 廓点云 点云

图6 本文方法点云生成结果

(第一至第三行的树木分别为云杉、针叶树、悬铃木)

采用本文的相似度评价方法进行相似度评价,表4给出了在不同量化参数下的计算结果。从表中可知,本文方法生成的点云和几何模型法生成点云的平均相似度在90%以上,说明两个树木点云在三个投影平面内的分布均很相似,本文点云生成方法具有较高的准确性。

表4 本文方法与几何模型生成点云的相似度

树木类型	5×5	10×10	20×20	30×30	40×40
云杉	0.976 1	0.959 0	0.927 5	0.904 7	0.888 4
针叶树	0.973 6	0.947 5	0.917 6	0.881 0	0.861 5
悬铃木	0.965 5	0.935 8	0.906 5	0.877 9	0.842 1

表5给出了投影栅格数为20×20时,本文方法中使用法向量轮廓提取、二维轮廓点云均匀化、三维点云随机偏移、三维点云尺度先验变换生成的树木点云与几何模型法生成点云的相似度。

实验数据表明,在法向量提取的二维轮廓基础上进行三维旋转获得的点云与几何模型法生成点云的相似

表5 本文方法分步操作生成点云与几何模型点云的相似度

操作 序号	操作	云杉	针叶树	悬铃木
1	法向量轮廓提取+旋转	0.838 0	0.813 2	0.807 4
2	操作1+二维轮廓点云均匀化	0.857 3	0.832 9	0.828 5
3	操作2+随机偏移	0.899 0	0.896 5	0.890 2
4	操作3+尺度先验变换	0.927 5	0.917 6	0.906 5

度平均在0.819左右,相似度较低。在此基础上,分步使用轮廓点云均匀化、随机偏移和尺度先验变换,三种树木的点云相似度均有提高,相似度平均值最终达到0.917左右,提高近10%。

4.3 点云生成方法时间效率实验

表6给出了分别使用本文方法和几何模型法,生成云杉、针叶树、悬铃木三种树木的单条射线射出生成点云的平均生成时间和整棵树木点云平均生成时间。

表6 点云生成时间统计数据

生成方法	三角形面片 平均个数	单条射线点云 平均生成时间/ms	整棵树木点云 平均生成时间/s
几何模型法	8 820	0.30	7.199 2
本文方法	8	0.21	0.071 9

在单条激光射线点云生成中,几何模型三角形面片数目相对较多,点云生成时间相对比本文方法略多。在整棵树木点云生成中,几何模型法需旋转激光雷达车360°获得树木三维点云数据,点云平均生成时间为7.199 2 s。而本文方法旋转布告牌建模树木的二维轮廓点云,通过随机偏移、尺度先验变换,得到整棵树木的三维点云数据。布告牌三角形面片个数少,大大减少了激光雷达射线与三角形面片计算交点的次数。同时,旋转操作避免了频繁通过光线追踪法计算多条激光射线与三角形面片的交点,点云平均生成时间为0.071 9 s,仅为几何模型法的1%。

在虚拟测试场景中,将本文方法生成的树木点云通过动态加载和实时生成两种方式加载到场景中,图7给出了在30 s内生成16棵树木点云的平均帧率变化

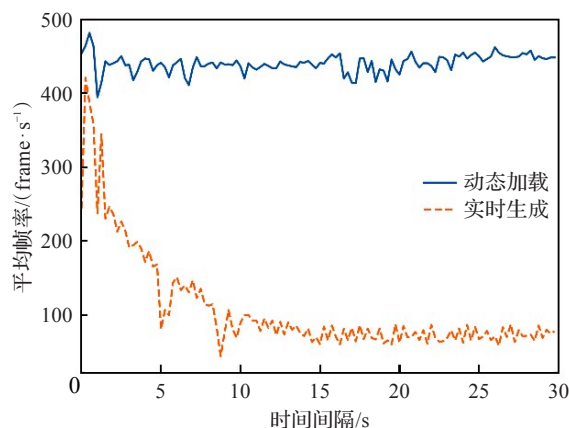


图7 点云生成平均帧率变化

线。实验中每秒统计4次平均帧率值,共统计120次。可以看出,随着时间的增长,实时生成点云方式的平均帧率随之降低,最终在78 frame/s左右,而动态加载方式的平均帧率一直稳定在400 frame/s以上。在虚拟测试应用场景中,动态加载方式不需要实时计算激光射线与三角形面片的交点,这种方式可以更加稳定、可靠地加载三维点云数据并显示。

5 结束语

本文提出了一种基于布告牌空间变换的快速树木点云生成方法。选取几何建模树木的渲染结果作为布告牌模型的纹理,根据纹理透明度获取二维平面点云,结合树木结构的先验知识,经过轮廓提取、均匀化、旋转、随机偏移及尺度先验变换等操作,以更少的三角形面片数和更小的计算代价获得树木的三维点云数据。

为评价本文方法生成点云的准确性,本文提出一种空间直方图的三维点云相似度评价方法,分别统计树木点云在 XOY 、 XOZ 、 YOZ 三个投影平面内点云的二阶空间直方图,采用巴氏系数计算空间直方图相似度。该评价方法能够反映点云分布的相似度且更加高效。

通过实验验证,相对于几何模型法,本文方法在单条激光射线点云生成和整棵树木点云生成的时间上都有了较大幅度的提高,在虚拟测试场景中通过动态加载点云的方法,点云生成平均帧率稳定、可靠。

参考文献:

- [1] HUANG W, WEN D, GENG J, et al. Task-specific performance evaluation of UGVs: case studies at the IVFC[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(5): 1969-1979.
- [2] WANG F Y, WANG X, LI L, et al. Digital and construction of a digital vehicle proving ground[C]//Intelligent Vehicles Symposium, Columbus, 2003: 533-536.
- [3] ZHANG B, ZHAO P X, CHEN H, et al. Research progress on scene-based virtual test of autonomous driving vehicles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(6): 1-19.
- [4] CHAO Q W, JIN X G, HUANG H W, et al. Force-based heterogeneous traffic simulation for autonomous vehicle testing[C]//International Conference on Robotics and Automation(ICRA), Montreal, 2019: 8298-8304.
- [5] CHAO Q W, DENG Z G, XIAO Y X, et al. Dictionary-based fidelity measure for virtual traffic[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2020, 26(3): 1490-1501.
- [6] CHAO Q W, DENG Z G, REN J P, et al. Realistic data-driven traffic flow animation using texture synthesis[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2018, 24(2): 1167-1178.
- [7] CHAO Q W, DENG Z G, JIN X G. Vehicle-pedestrian interaction for mixed traffic simulation[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2015, 26(3/4): 405-412.
- [8] SHEN J J, JIN X G. Detailed traffic animation for urban road networks[J]. Graphical Models, 2012, 74(5): 265-282.
- [9] MALHEIROS M, WALTER M A. A hybrid geometry and billboard-based model for trees[C]//Games and Digital Entertainment, Salvador, 2011: 1-7.
- [10] YANG Y H, WANG R. Realistic modeling and rendering of trees: a survey[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30(2): 191-216.
- [11] RECHE A, MARTIN I, DRETTAKIS G. Volumetric reconstruction and interactive rendering of trees from photographs[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 720-727.
- [12] XIE D H, WANG X Y, QI J B, et al. Reconstruction of single tree with leaves based on terrestrial LiDAR point cloud data[J]. Remote Sensing, 2018, 10: 686-703.
- [13] WANG Y T, WANG L Y, DENG Z G, et al. Sketch-based shape-preserving tree animations[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2018, 29(3/4): 1-12.
- [14] WANG Y T, XUE X W, JIN X G, et al. Creative virtual tree modeling through hierarchical topology-preserving blending[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2017, 23(12): 2521-2534.
- [15] MICHAEL E, DANIEL G. Simulation of 3D laser radar systems[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2005, 15(1): 37-60.
- [16] WU L J, LI L, REN X M. 3D imaging simulation of APD arrays laser radar system based on Geiger mode[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2180-2186.
- [17] GOODIN C, KALA R, CARRRILLO A, et al. Sensor modeling for the virtual autonomous navigation environment[C]//8th IEEE Conference on Sensors, Christchurch, 2009: 1588-1592.
- [18] BROWNING B, DESCHAUD J, PRASSER D, et al. 3D mapping for high-fidelity unmanned ground vehicle lidar simulation[J]. International Journal of Robotics Research, 2012, 31(12): 1349-1376.
- [19] ABHIJEET T, CETIN M, ALONZO K. Off-road lidar simulation with data-driven terrain primitives[C]//Conference on Robotics and Automation, Brisbane, 2018: 7470-7477.
- [20] ALEXEY D, GERMAN R, FELIPE C. CARLA: an open urban driving simulator[C]//Conference on Robot Learning,

- Mountain View, 2017: 1-16.
- [21] YUE X Y, WU B C, SANJIT A, et al. A LiDAR point cloud generator: from a virtual world to autonomous driving[C]//International Conference on Multimedia Retrieval, Yokohama, 2018: 458-465.
- [22] ALI A. The development of a 3D LADAR simulator based on a fast target impulse response generation approach[J]. 3D Research, 2017, 31: 1-16.
- [23] SU H, WANG R, CHEN K X, et al. A simulation method for LIDAR of autonomous cars[C]//Conference Series Earth and Environmental Science, Wuhan, 2019, 34: 1-9.
- [24] ZHANG Z L, LI J H, LI X, et al. A fast method for measuring the similarity between 3D model and 3D point cloud[C]//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Prague, 2016: 725-728.
- [25] ZHANG D J, ZOU L, CHEN Y L, et al. Efficient and accurate Hausdorff distance computation based on diffusion search[J]. IEEE Access, 2017, 6: 1350-1361.
- [26] BARBARA Z, FLUSSER J. Image registration methods: a survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11): 977-1000.
- [27] RUBNER Y, TOMASI C, GUIBAS L. The earth mover's distance as a metric for image retrieval[J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 40(2): 99-121.
- [28] FAN H, SU H, GUIBAS L. A point set generation network for 3D object reconstruction from a single image[C]//Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Honolulu, 2017: 1-12.
- [29] HUANG Z T, YU Y K, XU J W, et al. PF-Net: point fractal network for 3D point cloud completion[C]//Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, 2020: 1-11.
- [30] DAHLIA U, YIZHAK B, MICHAEL L. DPDist: comparing point clouds using deep point cloud distance[C]//Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, 2020: 1-19.
- [31] BRONSTEIN A M, BRONSTEIN M M, GUIBAS L J, et al. Shape Google: geometric words and expressions for invariant shape retrieval[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(1): 1-22.
- [32] BINYAHIB R, PETERKA T, LARSEN M, et al. A scalable hybrid scheme for ray-casting of unstructured volume data[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2018, 14(8): 1-15.
- [33] 王丙参, 魏艳华, 张云. 利用反函数及变换抽样法生成随机数[J]. 重庆文理学院学报(自然科学版), 2011, 30(5): 9-11.
- [34] WEBER J, PENN J. Creation and rendering of realistic trees[C]//Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques. New York: ACM, 1995: 119-128.