

文章编号: 2095-4980(2015)04-0579-05

车载激光雷达三维点云重构与漫游方法

杨 浩^{1,2}, 游安清¹, 潘文武^{1,2}, 任树广², 唐 丹^{1,2}

(1.中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999; 2.绵阳天眼激光科技有限公司, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 针对车载激光雷达系统, 建立了由激光扫描仪数据、载车 GPS 数据、载车姿态数据进行激光点云解算与重构的数学模型, 得到道路及两侧景物的三维点云场景。根据载车行进轨迹, 用 OpenGL 三维引擎技术, 实现对道路两侧景物的三维漫游。研究将激光雷达应用于车辆和飞行器的防撞预警, 此技术具有快速、主动获取障碍物的高精确度三维坐标, 探测距离远, 受天气影响小的优势。为能见度低、障碍物较多情况下的车辆和飞行器的防撞提供了一个可行的技术途径。

关键词: 激光雷达; 点云; 三维漫游

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201504.0579

Reconstruction of 3D point cloud based on vehicle-borne LiDAR and research on roaming methods

YANG Hao^{1,2}, YOU Anqing¹, PAN Wenwu^{1,2}, REN Shuguang², TANG Dan^{1,2}

(1. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;

2. Mianyang Skyeye Laser Technologies Co., Ltd, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: For vehicle-borne Light Detection And Ranging(LiDAR), a mathematical model is built for the computation and reconstruction of laser point cloud with the scanning data, Global Positioning System(GPS) data and Inertial Measurement Unit(IMU) data. 3D point cloud of the road and the scenery on the both sides of the road is obtained. Then according to the trajectory of vehicle, 3D roaming for the scenery on the both sides of the road is realized by using OpenGL 3D engine technology. A collision warning technology is researched for applying in vehicle and aircraft by adopting the LiDAR system. LiDAR can obtain the target's high precision 3D coordinates in a quick and initiative way with a long detection distance, and can ignore the influence of night and weather. This technology provides a feasible technical way for vehicle and aircraft's collision avoidance in the environment of low visibility and multi-obstacle.

Key words: Light Detection And Ranging; point cloud; 3D roaming

车辆在夜间或雾霾天气行驶时, 由于能见度低, 车速较快, 不易发现前方障碍物和其他车辆, 导致车祸事故发生率大幅升高。据可靠统计, 每 1 万小时的飞行中, 直升机会发生 10 次左右的事故, 各类事故中, 因低空飞行时与地面障碍物(山丘、树木、电力线、电线杆等)碰撞引起的比例约占 35%^[1]。所以不管是车辆还是飞行器, 为了提高驾驶的安全性, 对行驶前方一定范围内障碍物的距离和分布情况进行实时监测和预警是非常必要的。

目前, 用于碰撞检测的距离传感器主要有: 超声波传感器、无源红外传感器、机器视觉传感器等。超声波测距法仅适用于近距离、低速状态下的防撞, 距离在 15 m~250 m 时测量误差较大, 高速行驶时会因为来不及反应而使得防撞失误率较高^[2]。无源红外传感器是基于测量物体所发射的热能来实现测量的, 因测距响应时间过长, 不适合在高速行驶的车辆和飞行器上应用^[3]。机器视觉对障碍物的识别能力较好, 根据图像坐标系与世界坐标系之间的几何映射关系测得障碍物的距离信息, 但是会因夜间或雾霾天气成像质量受限而无法使用。

三维激光雷达系统是近十几年来兴起的一项新技术, 具有非接触式、快速、主动获取目标表面高精度三维坐标数据的优势^[4-7], 适用于高速状态下的快速测距。它的探测距离远, 受天气影响小, 能有效克服低能见度的夜间和雾霾天气给成像带来的不利因素^[8-10]。本文主要研究将激光雷达系统应用于车辆和飞行器碰撞检测的方法。

收稿日期: 2014-06-16; 修回日期: 2014-08-23

1 车载激光雷达系统与点云重构

1.1 车载激光雷达系统

车载激光雷达系统由脉冲式激光扫描仪、GPS 接收机、惯性测量单元以及转动云台组成。扫描仪实现对场景的二维扫描,形成一条用距离和扫描角描述的离散点线。GPS 接收机给出载车的瞬时位置,惯性测量单元给出扫描仪在惯性坐标系中的瞬时姿态。转动云台载着扫描仪形成对前方场景的左右旋转覆盖,云台的转动和载车的行进共同给出对场景遍历的第三维。本研究所搭建的激光雷达系统如图 1 所示,其中云台固定于载车车顶;扫描仪、GPS 接收机、惯性测量单元共同固定于云台上,这样就避免在计算模型中引入云台的转角;车内控制系统实施对云台、扫描仪、GPS 接收机、惯性测量单元的同步控制和数据采集、记录、解算与显示输出。



Fig.1 Vehicle-borne light detection and ranging system and local coordinate system of laser scanner

图 1 车载激光雷达系统及扫描仪局部坐标定义

1.2 三维点云重构

为了利用系统中各设备/传感器的数据解算重构三维点云,必须定义 4 个坐标系:

1) 扫描仪局部坐标系。其原点在扫描仪转镜中心, x 轴指向扫描仪侧向, y 轴指向扫描仪激光窗口外法线方向, z 轴指向扫描仪尾端(即车顶)方向。如图 1 所示。

2) 系统瞬时地平坐标系。其原点在扫描仪转镜中心, x 轴指向系统瞬时位置处正东方向, y 轴指向正北方向, z 轴指天顶方向。

3) 全局坐标系。这是一个相对静止的坐标系,其原点和轴向可任意定义,只要相对地球表面不动就行,如可以指定它为载车未开动前所在位置处的初始地平坐标系。这样载车开动后,就会在这个相对地面静止的坐标系中形成一条轨迹,后面的所有点云都要解算到这个坐标系下统一表达。

4) 地固坐标系。这是一个大地测量学广泛使用的坐标系,其原点在地心, x, y, z 轴分别指向赤道圈与 0° 经线、 90° 经线的交点以及北极点。此坐标系与激光雷达系统本身并无直接关系,只是在点云重构解算过程中的一个中间过渡坐标系。

扫描仪局部坐标系相对系统瞬时地平坐标系间存在旋转关系,它由朝向角、俯仰角和横滚角 3 量刻画。这 3 个角由扫描仪背后的惯性测量单元给出。瞬时地平坐标系相对全局坐标系存在旋转和平移关系,平移量由 GPS 给出,旋转量由两坐标系时刻的惯性测量单元给出(地球表面不同地方的地平坐标系是不同的)。

扫描仪的瞬时输出为 (r, θ) (r 为每个激光脉冲所对应的景物测点的距离, θ 为扫到这个点时扫描仪转镜的角位置),载车未开动前系统的初始 GPS 位置为 $(\lambda_0, \varphi_0, H_0)$ (即经度、纬度、海拔),载车开动后系统的瞬时 GPS 位置为 (λ, φ, H) , 瞬时姿态为 (α, β, γ) (朝向、俯仰、横滚, 分别为绕 z, x, y 轴的转角)。有了上述这些量和前述 4 个坐标系后,三维点云的解算就可分 4 个步骤进行。

1) 由扫描仪输出的极坐标 (r, θ) 计算被测点 P 在扫描仪局部坐标系中的直角坐标 $P(x_1, y_1, z_1)$:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ r \sin \theta \\ -r \cos \theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

2) 扫描仪局部坐标系旋转到与系统瞬时地平坐标系平行。这时 P 点坐标表示为:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \mathbf{R}_z(\alpha) \mathbf{R}_x(-\beta) \mathbf{R}_y(-\gamma) \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

3) 将系统瞬时地平坐标系旋转、平移到地固坐标系。这时 P 点坐标表示为:

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix} = \mathbf{R}_z(-\lambda) \mathbf{R}_y(\varphi) \mathbf{R}_z(-90^\circ) \mathbf{R}_x(-90^\circ) \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中 (x_G, y_G, z_G) 为系统所处位置的瞬时地固直角坐标, 由该瞬时的 GPS 数据 (λ, φ, H) 计算, 计算方法在大地测量学的普通教材中可以找到, 在此不再赘述。

4) 将地固坐标系旋转、平移到全局坐标系(即载车初始位置处的地平坐标系), 得到 P 点在全局坐标系下的表达:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{R}_x(90^\circ) \mathbf{R}_z(90^\circ) \mathbf{R}_y(-\varphi) \mathbf{R}_z(\lambda) \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{0G} \\ y_{0G} \\ z_{0G} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中 (x_{0G}, y_{0G}, z_{0G}) 为载车初始位置处的地固直角坐标, 由 $(\lambda_0, \varphi_0, H_0)$ 求得, 计算方法与上一步中 (x_G, y_G, z_G) 相同。

以上就是根据扫描仪数据、GPS 数据、IMU 数据重构三维点云的数学过程, 其中涉及的 3 个坐标旋转矩阵展开式如下:

$$\mathbf{R}_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c & s \\ 0 & -s & c \end{pmatrix}; \quad \mathbf{R}_y(\theta) = \begin{pmatrix} c & 0 & -s \\ 0 & 1 & 0 \\ s & 0 & c \end{pmatrix}; \quad \mathbf{R}_z(\theta) = \begin{pmatrix} c & s & 0 \\ -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中 s, c 分别表示 $\sin \theta, \cos \theta$ 。

1.3 三维场景漫游

解算完三维点云后, 还要以直观、动态的方式呈现给用户。考虑到要在二维屏幕上展现三维场景, 选择采用广泛使用的 OpenGL 三维引擎技术进行漫游软件开发, 并使用 VC6.0 为开发平台。点云包含了所有目标点的三维坐标信息, 数据量较大, 仅 8 km 长的实验路段, 扫描获取的数据就有 220 MB 左右。把所有的点云都加载到软件中, 会占用大量的内存空间, 导致漫游速度缓慢, 无法保证点云漫游的实时性和流畅性。为解决这一问题, 采取了 2 项措施: 一是抽稀点云, 在综合考虑视觉要求和计算机内存的情况下, 用户可对点云进行 1~10 倍的抽稀; 二是分段加载点云, 防撞检测只需要明确当前位置一定范围内的障碍物分布情况, 距离较远的点云没有必要加载, 从而节省了大量的内存空间, 减少了三维点云场景的实时渲染量。

图 2 为软件的运行界面截图, 软件可以运行于实时重构和事后点云漫游回放 2 种模式, 并且可以选择/设置视觉效果, 如三维透视图、俯视图、漫游视图、伪彩色、深度渐变色、缩小/放大/旋转、坐标轴、网格线、视点、视角等多种模式或参数, 尽量以直观明了的方式显示三维点云, 展现三维场景。

2 车载扫描试验与结果分析

根据前面所设计的方法, 搭建了如图 1 所示的激光雷达实物试验系统。其中扫描激光选择对雾霾穿透性较强

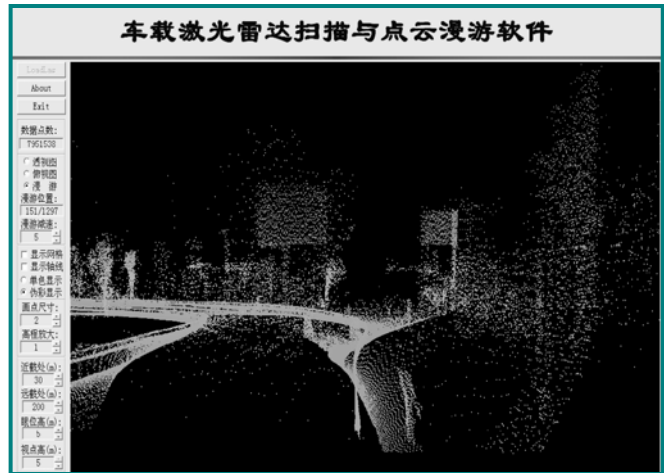


Fig.2 Interface of point cloud roaming software

图2 三维激光点云场景漫游软件界面

的 1 064 nm 红外光, 扫描仪的重复频率为 10 kHz, GPS 精确度为 15 cm, IMU 精确度为 0.02°, 云台方位转速为 80 °/s, 转动范围为载车行进方向正前方的 $\pm 10^\circ$, 折合转动频率为 2 Hz, 载车行进速度 20 km/h。试验选取 2 段不同特点的公路进行测试。试验得到 las 格式的激光点云文件和自定义格式的 trk 文件(载车行进轨迹文件, 用于漫游回放)。图 3 是其中一个试验得到的路边景物激光点云与载车行进轨迹。

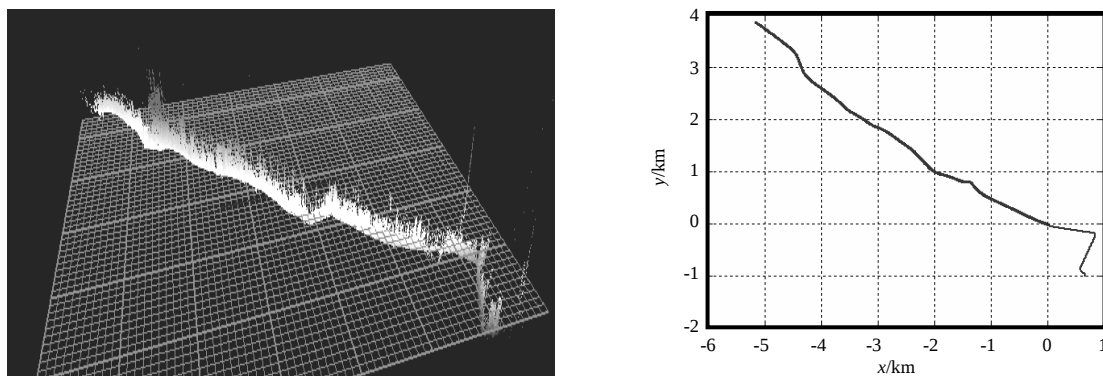


Fig.3 Laser point cloud of the roadside scenery and the trajectory of the carrier vehicle

图 3 路边景物三维激光点云与载车行进轨迹

通过采用 OpenGL 技术, 在一台“Intel Core2 双核 CPU E6550, 主频 2.33 GHz, 内存 3.25 GB”的计算机上, 可以对由 800 万个点组成的点云图实现 25 Hz 的流畅漫游。图 4 是 2 幅通过回放展示的漫游视图截图, 从图中可以比较容易地看出路边树木、电塔、灯杆、护栏、隧道壁、架空电线等景物, 而且系统能给出这些对象的三维坐标(或距离信息), 这是自动驾驶与防撞控制的重要输入参数, 正是本系统的潜在应用领域。

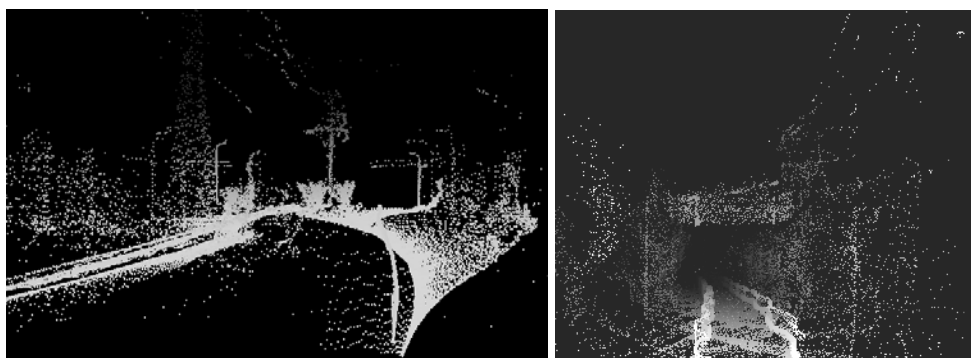


Fig.4 3D point cloud roaming of LiDAR

图 4 激光雷达三维点云漫游

不过, 目前搭建的试验系统只是一个原理验证装置, 很多地方都不完善, 包括激光脉冲的扫描频率、云台的转动速度、景物的实时自动分类与判读、点云实体化等。在可视化的场景上表现为细长电线、地面小尺度坑凹和碎石障碍等呈现得不是很明显。所以, 还要在增加点云密度和线/面拟合方面做更多的工作, 如此才能将此项技术真正用于自动防撞领域。

3 结论

本文介绍了一个车载激光雷达系统的原理、组成、点云解算、软件设计以及实景扫描试验等内容, 给出了由扫描仪和惯导数据进行三维点云重构的数学模型, 展示了用 OpenGL 技术呈现的实景三维点云等试验结果, 指出了系统存在的点云密度不够和点云离散性等不足之处, 为下一步工作指出了改进方向。所介绍的技术对于实现道路车辆和山间飞机的自动驾驶与防撞有现实的意义, 拟将本技术发展应用于这些领域, 降低驾驶或飞行事故率。

参考文献:

- [1] 徐燕国. 直升机防撞雷达关键技术及发展趋势[J]. 现代雷达, 2011,33(2):9-12. (XU Yanguo. Key technologies and development trends of helicopter collision avoidance radar[J]. Modern Radar, 2011,33(2):9-12.)

- [2] 华强. 激光-超声-单片机组合汽车防撞系统[J]. 惠州大学学报:自然科学版, 2001,21(4):28-32. (HUA Qiang. The design of a composed vehicles anti-collision equipment controlled by SCC[J]. Journal of Huizhou University:Natural Science Edition, 2001,21(4):28-32.)
- [3] 卢漪. 装甲车辆防撞预警系统设计[J]. 设计应用, 2012(7):65-70. (LU Yi. The design of armored vehicle collision warning system[J]. Design & Application, 2012(7):65-70.)
- [4] 张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2007. (ZAHNG Xiaohong. Theories and Methods of Airborne Lidar Measurement Technology[M]. Wuhan,China:Wuhan University Press, 2007.)
- [5] 黎荆梅,周梅,李传荣. 阵列推扫式机载激光雷达三维点云解算方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2013,28(6):1033-1038. (LI Jingmei,ZHOU Mei,LI Chuanrong. Research on points position cloud calculation method of airborne linear array push-broom LiDAR[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013,28(6):1033-1038.)
- [6] 郭英,卢秀山,王冬. 建筑物立面激光点云的定位[J]. 测绘科学技术学报, 2006,23(1):59-61. (GUO Ying,LU Xiushan, WANG Dong. Positioning of LS dot-cloud of building-side[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2006,23(1): 59-61.)
- [7] 邹晓亮. 车载测量系统数据处理若干关键技术研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2011. (ZOU Xiaoliang. Research on key techniques of data processing from mobile mapping system for land vehicle[D]. Zhengzhou,China:Information Engineering University, 2011.)
- [8] 戴彬,钟若飞,胡竞. 基于车载激光扫描数据的城市地物三维重建研究[J]. 首都师范大学学报:自然科学版, 2011,32(3):89-96. (DAI Bin,ZHONG Ruofeng,HU Jing. Research on 3D reconstruction of urban features from data based on vehicle-borne laser scanning[J]. Journal of Capital Normal University:Natural Science Edition, 2011,32(3):89-96.)
- [9] 李婕,钟若飞,赵文吉. 车载激光点云海量数据的管理与快速显示[J]. 系统仿真学报, 2008(S1):33-35,39. (LI Jie, ZHONG Ruofeng,ZHAO Wenji. Car laser point clouds of data management and rapid display[J]. Journal of System Simulation, 2008(S1):33-35,39.)
- [10] 魏征. 车载 LiDAR 点云中建筑物的自动识别与立面几何重建[D]. 武汉:武汉大学, 2012. (WEI Zheng. Automated extraction of buildings and facades reconstruction from mobile LiDAR point clouds[D]. Wuhan,China:Wuhan University, 2012.)

作者简介:



杨 浩(1988-),男,重庆市人,硕士,主要研究方向为激光雷达成像技术.email:yhao1234567890@126.com.

游安清(1975-),男,武汉市人,博士,副研究员,主要研究方向为图像处理与计算机视觉技术.

潘文武(1975-),男,四川省遂宁市人,硕士,主要研究方向为激光雷达成像技术.

任树广(1981-),男,黑龙江省鹤岗市人,学士,工程师,主要研究方向为激光雷达数据处理与分析.

唐 丹(1963-),男,安徽省凤阳县人,研究员,主要研究方向为激光雷达成像技术.