

引用格式:张艳国,李擎,汪天生.基于IMU-LiDAR的负障碍检测方法[J].电光与控制,2019,26(8):106-110. ZHANG Y G, LI Q, WANG T S. A detection method of negative obstacles based on IMU-LiDAR[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(8):106-110.

基于IMU-LiDAR的负障碍检测方法

张艳国, 李 擎, 汪天生

(北京信息科技大学高动态导航技术北京市重点实验室,北京 100192)

摘要:针对16线激光雷达负障碍检测过程中,垂直分辨率低导致对负障碍检测和识别困难的问题,提出了一种基于IMU-LiDAR的负障碍检测方法。建立了激光点云数据的融合模型,有效利用历史点云数据与历史检测结果,获得较多的环境信息,提高了负障碍的检测精度。利用16线激光雷达与自研的惯性测量单元(IMU)传感器进行实验验证,结果表明能够实现激光雷达点云的融合,进一步提高激光雷达对负障碍的检测能力,并且以较低的硬件成本实现更加高级的环境感知能力,对无人驾驶等技术的研究具有实际应用价值。

关键词:激光雷达; IMU; 点云融合; 负障碍检测

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.08.020

A Detection Method of Negative Obstacles Based on IMU-LiDAR

ZHANG Yan-guo, LI Qing, WANG Tian-sheng

(Beijing Information Science Technology University, Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing 100192, China)

Abstract: To solve the problem that the vertical resolution is low when using 16-line LiDAR to realize negative obstacle detection, which leads to the difficulty of negative obstacle detection and recognition, a detection method of negative obstacle based on IMU-LiDAR is proposed. The method establishes a multi-frame LiDAR point cloud data fusion model, which can effectively use previous point cloud data and detection results to obtain more environmental information, and improve the detection accuracy of negative obstacles. The 16-line LiDAR and the self-developed IMU sensor are used to conduct the tests. The results demonstrate that the proposed method can achieve the multi-frame fusion of the LiDAR point cloud, and the detection ability of the LiDAR on negative obstacles can be further improved. A more advanced environment awareness is achieved with lower hardware costs, which shows that the method has practical application value for the study of driverless technology.

Key words: LiDAR; inertial measurement unit; point cloud fusion; negative obstacle detection

0 引言

近年来,无人车成为热门研究方向。负障碍检测是无人车研究中的一个重要组成部分,负障碍一般指坑、沟渠、陡峭的下坡这样的场景。由于负障碍位于车载传感器难以测量的地面下方^[1],因此负障碍检测目前仍具有很大挑战。

激光雷达在负障碍检测领域具有重要的地位和作

用,具有横向分辨率高、距离探测精度高和抗有源干扰能力强等优点;但是存在垂直分辨率低、扫描频率低、目标物检测精度低等缺点。所以在载体高速行驶、负障碍种类复杂多变环境中,单一的激光雷达不能实现有效的环境感知^[2]。

为了利用激光雷达实现更好的负障碍检测,一种方法是采用64线或128线激光雷达代替16线激光雷达,但是多线束激光雷达较高的价格使其很难普及;另一种方法是采用多激光雷达组合的方式获得密集点云。如刘家银等^[3]提出基于双32线激光雷达的环境感知方法,通过特殊的雷达安装方式,使车辆前向激光雷达点密度相比单纯的64线激光雷达点密度大幅提高;

收稿日期:2018-09-06

修回日期:2018-10-06

基金项目:国家自然科学基金(61471046)

作者简介:张艳国(1991—),男,河北石家庄人,硕士生,研究方向为导航、制导与控制。

SHANG 等^[4]提出基于多激光雷达的组合特征的障碍物检测方法,通过顶部 64 线激光雷达观测远处环境,侧面两个 32 线激光雷达利用密集的点云数据进行车辆前方障碍物检测。以上方法都能实现较好的环境感知,相比于单一多线束激光雷达节约了硬件成本,但是激光雷达的组合方式依然未能彻底解决昂贵的成本问题。

针对以上问题,本文提出一种以较低的硬件成本来提高负障碍检测精度的 IMU-LiDAR 点云融合方法。此方法通过惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)获得激光雷达的位姿信息,将历史点云数据和检测结果应用于当前帧下。相比于其他方法,IMU 与 16 线激光雷达组合的方式能够获得更密集的点云,从而提高负障碍的检测精度。该方法结构简单、计算方便,通过增加一个 IMU 的成本,使 16 线激光雷达实现较多线束激光雷达的功能,大大节约了总的硬件成本。实验验证结果表明,该基于 IMU 的激光雷达点云多帧融合方法切实可行,在无人驾驶、楼宇建模、军事行动等方面均具有重要的应用价值。

1 方法总体结构

本文采用的是 Velodyne VLP-16 多线激光雷达,通过扫描获取扫描环境的点云坐标值,不同时刻获取的点云坐标值由采样时刻载体坐标系决定。要使不同时刻的点云用同一个坐标系表示,必须借助 IMU 获取载体的位姿变化,从而解算出不同时刻坐标系的转换矩阵,通过坐标值和转换矩阵,实现当前点云和历史点云的统一表示,实现多帧点云融合。

IMU-LiDAR 点云融合原理见图 1。

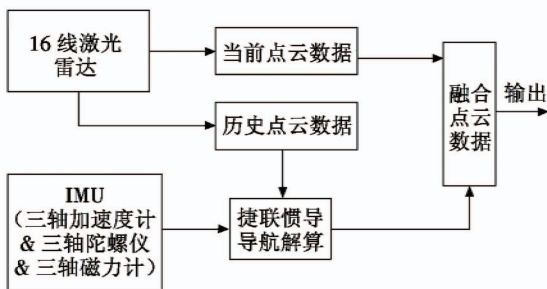


图 1 IMU-LiDAR 点云融合原理图

Fig.1 Schematic diagram of IMU-LiDAR point cloud fusion

16 线激光雷达扫描环境获取环境的点云信息,随着时间的推移,激光雷达随着载体的运动而发生位姿变化,所以每一帧的激光雷达的点云坐标系也会发生变化,但是每一帧的点云都是环境的扫描信息,要充分利用这些环境点云信息,就需要将历史点云信息经过坐标转换统一到当前点云坐标系下,通过捷联在激光雷达上的 IMU 检测激光雷达发生的位姿变化,经过捷联惯导导航解算,如图 2 所示,将历史点云坐标统一到

当前点云坐标系下,实现点云数据融合。

该方法采用捷联惯导,其原理结构如图 2 所示。

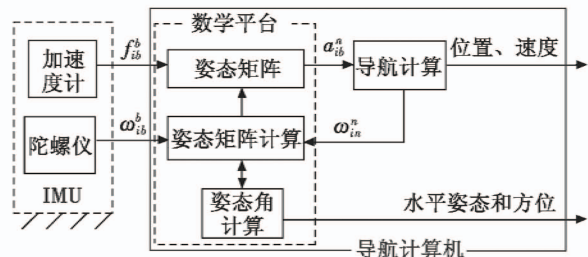


图 2 捷联惯导系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of strap-down inertial navigation system

2 实验条件

该方法主要用到的硬件为 16 线激光雷达和实验室自主研发的 IMU。16 线激光雷达发射 16 根扫描线,由内部旋转电机旋转,对环境形成感知。采用 IMU 跟踪激光雷达的姿态变化,将历史点云投影到当前坐标系下。

IMU 的主要参数和技术指标如表 1 所示,IMU 标准传感器的技术指标如表 2 所示。

表 1 IMU 主要参数和技术指标

Table 1 Main parameters and technical indexes of IMU

参数	技术指标
连续工作时间/h	≥1
工作电压/V	9 ± 0.45
功耗/W	≤3
静态精度/(°)	±0.5(横滚,俯仰), ±1(航向)
分辨率/(°)	0.05
输出频率/Hz	0.01 ~ 100

表 2 IMU 标准传感器的技术指标

Table 2 Technical indexes of IMU standard sensors

	加速度计	陀螺仪	磁传感器
测量范围	±10g	±100 (°)/s	±2 Cs
非线性	<0.2% of FS	<0.1% of FS	<0.2% of FS
随机漂移	±4 × 10 ⁻³ g	±9.2 (°)/h	±0.5 mGs
带宽/Hz	100	150	50

16 线激光雷达的主要参数和技术指标如表 3 所示。

表 3 激光雷达主要参数和技术指标

Table 3 Main parameters and technical indexes of LiDAR

参数	技术指标
激光线数	16
测量范围/m	~100
测量精度/cm	±3
垂直测量角度范围/(°)	30(-15 ~ +15)
垂直方向角度分辨率/(°)	2
水平方向测量角度范围/(°)	360
水平方向角度分辨率/(°)	0.1 ~ 0.4
测量频率/Hz	5 ~ 20

3 数学模型

3.1 负障碍检测原理

图3所示为理想情况下的负障碍几何特性,图中, W 表示负障碍的宽度, h 表示激光雷达放置位置到地面的垂直距离, s 表示雷达前端到负障碍靠近车体这一侧的间距。

在激光雷达扫描障碍时,如果车体前方存在负障碍,那么扫描到地面的点与扫描到负障碍里的点距离变大,从图可以得出 $S_{p_1 p_2}$ 比 $S_{p_1' p_2'}$ 大, $S_{p_2 p_3}$ 则小于 $S_{p_2' p_3'}$, $S_{p_3 p_4}$;并且扫描点的高度值总会在某一处低于其他的高度值,如 p_2, p_3 低于 p_1, p_4 。

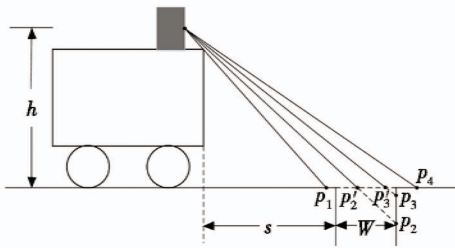


图3 典型负障碍的特征

Fig. 3 Characteristics of typical negative obstacles

$$p_1 p_2' = \tan(\arctan \frac{s}{h} + \theta_i) * h - s \quad (1)$$

目前常用的负障碍检测方法是间隔阈值分类法^[5],即将雷达扫描的点云数据投影到二维栅格地图中,按顺序求取相邻激光扫描线之间的径向间距 Δd ,用实际值 Δd 与理论扫描线间距阈值 Δd_0 比较,若实际径向间距值大于理论间距阈值,那么2个激光扫描点之间存在负障碍。图4为负障碍检测示意图。

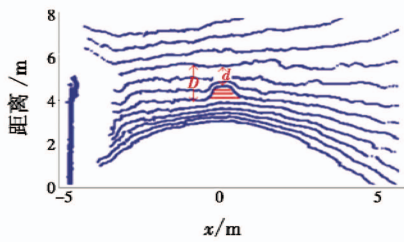


图4 负障碍检测

Fig. 4 Negative obstacle detection

若出现负障碍,扫描线之间的间距必然变大,由图4可知,其中的相邻4条扫描线之间的距离在有与没有负障碍的时候距离有变化, $D > d$,可以判断扫描区域存在负障碍。

激光雷达具有垂直分辨率低的特点,16线激光雷达的垂直分辨率为16,相邻2条垂直激光线之间的距离随着检测距离的增加而急剧增加,这就使得激光雷达无法感知2条激光线之间的环境,尤其对远方环境信

息丢失严重,导致负障碍检测准确率下降。通过IMU获得激光雷达的位姿信息,将历史点云数据和检测结果应用于当前帧下,提升激光雷达垂直分辨率。

3.2 坐标变换关系

激光雷达捷联在无人车载体上,随着无人车在三维空间中运动,这一运动可以拆分为刚体的1次旋转加1次平移。平移信息可以通过IMU的加速度计直接获取,利用平移向量就能表示刚体的平移,刚体的旋转表示方法较多,有旋转矩阵、四元数、欧拉角。

坐标系之间的变换关系可以描述为2个坐标系之间的旋转关系,再加上平移。如图5所示,前1帧的激光向量 p ,它的坐标为 p_c ,而在当前帧下,它的坐标为 p_w 。

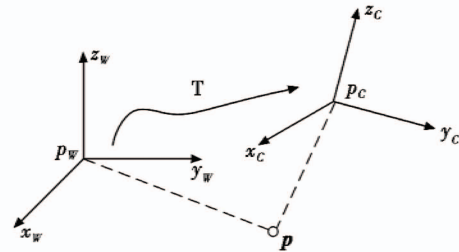


图5 坐标变换

Fig. 5 Coordinate transformation

由于方向余弦方程的计算量较大,工作效率很低,考虑到点云融合是连续的过程,因此采用四元数法实时解算姿态角^[6]。

3.2.1 四元数的矢量变换

四元数算法的基本原理是:一个坐标系变换到另一个坐标系,可以通过绕一个定义在参考坐标系中的矢量 u 的单次转动来实现^[7]。在载体系定义1个矢量 $r^b = xi + yj + zk$,设其在参考系中表示为 r^n ,则有 $r^n = q r^b q^*$,其中, $q = a + bi + cj + dk$, q^* 为共轭复数。

$$\begin{aligned} r^n &= q r^b q^* = \\ & (a + bi + cj + dk)(xi + yj + zk)(a - bi - cj - dk) = \\ & 0 + [(1 - 2(q_2^2 + q_3^2))x + 2(q_1 q_2 - q_0 q_3)y + \\ & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2)z]i + [2(q_1 q_2 + q_0 q_3)x + \\ & (1 - 2(q_1^2 + q_3^2))y + 2(q_2 q_3 - q_0 q_1)z]j + \\ & [2(q_1 q_3 - q_0 q_2)x + 2(q_2 q_3 + q_0 q_1)y + \\ & (1 - 2(q_1^2 + q_2^2))z]k \end{aligned} \quad (2)$$

将其写成矩阵形式

$$C = \begin{pmatrix} 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 1 - 2(q_1^2 + q_3^2) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{pmatrix} \quad (3)$$

即为四元数旋转矩阵。

用欧拉角直接表示四元数

$$\begin{cases} q_0 = \cos \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} + \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \\ q_1 = \cos \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} - \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \\ q_2 = \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} + \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \\ q_3 = \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} - \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \end{cases} \quad (4)$$

3.2.2 位姿转换矩阵

当载体运动时,不仅姿态发生改变,位置也会发生改变。当前时刻坐标系相对于前几帧时刻的坐标系可看成先旋转再平移。用四元数法已经求得旋转矩阵,此时平移变换就是用旋转转换后的坐标值减去当前时刻相对于之前时刻的坐标平移向量。

所以,前 1 帧 1 个点云坐标为 $R_1 = [x_1 \ y_1 \ z_1]^T$,在当前时刻坐标系下的坐标为 $R = [x \ y \ z]^T$,位置变化为 $B = [a \ b \ c]^T$ 。

$$R = CR_1 - B =$$

$$\begin{pmatrix} 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 1 - 2(q_1^2 + q_3^2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{pmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (5)$$

4 实验验证及结果分析

4.1 实验验证

本文采用实验室自主无人车搭载自研的 IMU 与 16 线激光雷达进行实验。实验具体参数:车速为 5 m/s,采样频率为 20 Hz。

无人车在车速为 5 m/s 的条件下,沿 x 轴进行直线运动,取 IMU 和激光雷达连续 5 个采样点,相邻 5 帧的采样数据如表 4 所示。

表 4 IMU 和激光雷达采样点

Table 4 Sampling points of IMU and LiDAR

采样点/ms	x 轴方向位移/mm	y 轴方向位移/mm	z 轴方向位移/mm	绕 x 轴转角/(°)	绕 y 轴转角/(°)	绕 z 轴转角/(°)
0	0	0	0	0	0	0
50	240	6	2	0.3	0.3	0.5
100	510	10	5	0.2	0	0
150	745	12	3	0.1	-0.3	-1
200	999	19	1	0	-0.5	0.8
250	1249	15	-2	-0.2	0.2	1.5

激光雷达的位置变化如图 6a 所示, x 轴方向的运动近似直线运动; y 轴方向的运动是在往 y 的正方向偏移; z 轴方向是在做上下跳动。

激光雷达的姿态变化如图 6b 所示,根据图像可知载体姿态角在发生微小变化。这是由于车载激光雷达在做直线运动,车身的震动会导致载体姿态角发生微小的变化。

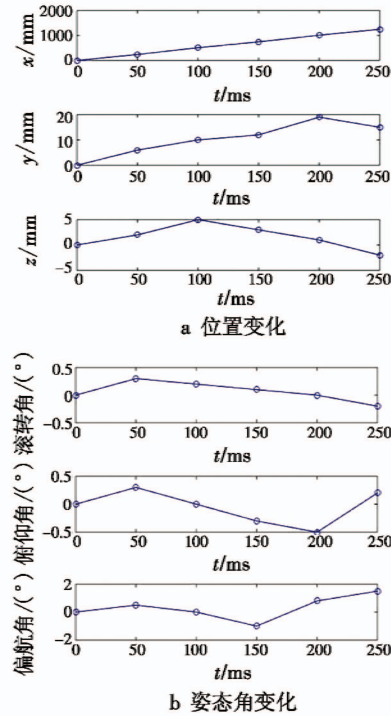


图 6 激光雷达位置和姿态角变化

Fig. 6 Position and attitude angle change of LiDAR

4.2 结果分析

实验针对野外环境中的负障碍进行检测,实验环境如图 7a 所示。实验采用当前帧和前 1 帧点云数据进行融合,根据 IMU 测量数据获得 x, y, z 轴位置变化分别为 50 mm, -4 mm, -3 mm;绕 x, y, z 轴旋转角度分别为 $-0.2^\circ, 0.7^\circ, 0.7^\circ$,实验结果如图 7 所示。

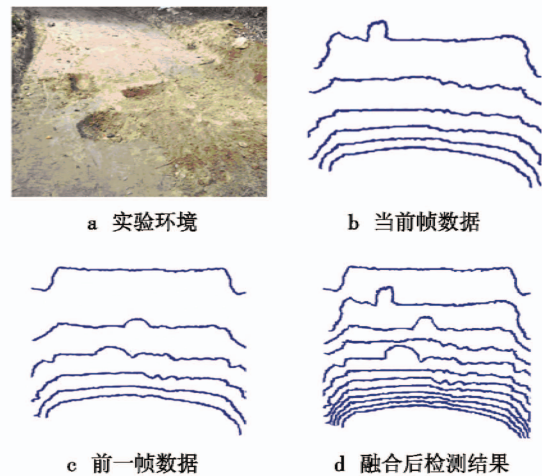


图 7 激光雷达点云融合负障碍检测结果

Fig. 7 Negative obstacle detection results based on LiDAR point cloud fusion

对当前帧点云进行处理,获得负障碍的检测结果如图 7b 中蓝色线条所示,只检测出 1 个负障碍。对前一帧点云进行处理,结果如图 7c 所示,检测出 2 个负障碍。利用 IMU 将前一帧历史点云数据投影到当前坐标系,获得两帧数据的融合,如图 7d 所示,检测出 3 个负障碍,检测出行驶道路中的所有负障碍。

通过上述实验结果图可以看出,IMU-LiDAR 点云融合方法可以在时间和空间维度实现多帧点云数据的融合,充分利用了过去和现在的信息,相比于融合前的检测方法,提高了对负障碍的检测精度。

5 结束语

本文针对激光雷达在负障碍检测过程中,点云数据稀疏导致对负障碍检测和跟踪困难的问题,提出了一种基于 IMU-LiDAR 点云融合方法。该方法应用 IMU 获得激光雷达的位姿变化,采用四元数法求出历史帧点云数据到当前帧的位置坐标转换矩阵,将历史点云数据投影到当前坐标系下,获得密集点云。实验验证结果表明,本文方法能够实现激光雷达点云多帧融合,以较低的硬件成本实现复杂激光雷达的功能,能够提高负障碍的检测精度,对激光雷达环境感知的研究具有实际应用价值。

参考文献

- (上接第 105 页)
- [4] 何杰. 机载红外搜索跟踪系统研究与仿真实现[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
 - [5] 王辉,周振彪,于劲松,等. 红外搜索跟踪系统的半实物仿真系统设计[J]. 计算机测量与控制,2012,20(6):1672-1675.
 - [6] 杨旭,何江宁,陈洪亮,等. 一种机载红外搜索跟踪系统多目标跟踪精度测试系统设计[J]. 电光与控制,2017,24(4):80-84.
 - [7] 吴学铭,王海晏,寇添,等. 红外搜索跟踪系统测试[J]. 红外与激光工程,2017,46(5):0504003-1-0504003-7.
 - [8] 陈冲,高晓光,郑景嵩. 基于层次化的机载红外搜索跟踪系统仿真[J]. 火力与指挥控制,2010,35(10):19-23.
 - [9] 石永山,张尊伟. 红外搜索与跟踪系统发展综述[J]. 光电技术应用,2016,31(4):11-14.
 - [10] 孙科峰,高教波,王军,等. 基于时间序列面阵场景的机载红外搜索跟踪仪仿真系统:中国,CN201510518313.0 [P]. 2017-10-17.
 - [11] 王志刚,付欣,尚举邦. 基于 Vega 的红外目标成像仿真研究[J]. 光电技术应用,2013,28(3):73-76.
 - [12] 王领,于雷,寇添,等. 机载红外搜索跟踪系统探测性能评测标定[J]. 国防科技大学学报,2015,37(5):192-198.
 - [1] 宁火明. 未知环境中移动机器人异常检测及负高度障碍检测[D]. 长沙:中南大学,2007.
 - [2] 赵一鸣,李艳华,商雅楠,等. 激光雷达的应用及发展趋势[J]. 遥测遥控,2014,35(5):4-22.
 - [3] 刘家银,唐振民,王安东,等. 基于多激光雷达与组合特征的非结构化环境负障碍物检测[J]. 机器人,2017,39(5):638-651.
 - [4] SHANG E K, AN X J, WU T, et al. LiDAR based negative obstacle detection for field autonomous land vehicles[J]. Journal of Field Robotics, 2015, 33(5):591-617.
 - [5] SHANG E K, AN X J, LI J, et al. A novel setup method of 3D LiDAR for negative obstacle detection in field environment[C]//IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2014:1436-1441.
 - [6] 蒋钰,湛海云,岑汝平. 基于四元数的四旋翼飞行器姿态解算算法[J]. 制造业自动化,2015,37(23):77-80.
 - [7] SERBAN R, WANG S K, LO M W, et al. Halo orbit mission correction maneuvers using optimal control[J]. Automatica, 2002, 38(4):571-583.