

室内激光雷达导航系统设计

史风栋¹, 刘文皓², 汪鑫³, 丁娟², 史屹君², 修春波¹

(1. 天津工业大学 工程教学实习训练中心, 天津 300387;
2. 天津中环创新科技有限公司, 天津 300190; 3. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308)

摘要: 小型无人机和移动机器人技术迅速发展, 对室内导航技术的要求越来越高, 针对当前室内导航精度不高、导航设备比较复杂的问题, 提出一种采用激光雷达定位和地磁传感器检测相结合的室内主动导航方法。该方法首先使用激光雷达扫描室内环境, 用采集到的数据拟合出室内地图, 根据目的地信息和室内的环境信息来规划行进的路线; 然后在行进中使用激光雷达连续地扫描得到数据与地图数据进行比较, 来确定所处的位置, 同时使用地磁传感器取得行驶的方向, 二者相结合判断是否在规划的路线上行驶, 及时地对出现的偏差进行纠正; 最后通过搜索 RFID 地标确定是否已经到达指定位置。仿真和实验的结果表明: 所设计的室内激光雷达导航系统结构简单、可靠性高, 能够较好地满足室内导航的要求。

关键词: 激光雷达; 室内导航; 地磁传感器; RFID

中图分类号: TP23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3570-06

Design of indoor laser radar navigation system

Shi Fengdong¹, Liu Wenhao², Wang Xin³, Ding Juan², Shi Yijun², Xiu Chunbo¹

(1. Engineering Teaching Training Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;
2. Tianjin Zhonghuan Innovation Science and Technology Co., LTD, Tianjin 300190, China;
3. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract: With the rapid development of micro aerial vehicle technology and mobile robots technology, the requirements for indoor navigation technology are becoming higher and higher, but navigation presence is low and equipment is relatively complex in indoor navigation system. To address this problem, an indoor active navigation method that combines laser radar positioning and geomagnetic sensors measurement was proposed. First, laser radar was used to scan the indoor environment, the map be constructed by collected data, the route be planed based on the destination information and the indoor environment information; and then the data which was obtained by laser radar continuously scanning environment was compared with the map data when the vehicle was traveling, the location was determined, direction of travel was obtained by geomagnetic sensor, whether the vehicle was on the right road was determined by the combination of position and direction of travel, the deviation will be corrected in time; last, whether arriving at designated location was determined by searching RFID

收稿日期: 2015-04-05; 修订日期: 2015-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(6120330); 天津市应用基础与前沿计划(14JCYBJC18900)

作者简介: 史风栋(1977-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事自动控制及流量检测方面的研究。Email:ss.sfd@163.com

landmarks. Simulation and experimental results show that the indoor laser radar navigation system is simple and the reliability is high, which meet the requirements of indoor navigation.

Key words: laser radar; indoor navigation; geomagnetic sensor; RFID

0 引言

室内导航技术是近些年来兴起的一个热点技术,它在工业生产和日常生活中都有非常重要的用途,例如:仓储车间中的无人驾驶货运小车、危险环境中的探测机器人、室内飞行的小型无人机等都需要借助室内导航技术来工作^[1-2]。随着 GPS 的不断发展和北斗卫星定位系统的进一步完善,导航系统在导航精度和降低成本上都有很大的提高,但是它们正常工作的前提是能够搜索到足够多的卫星信号,所以一般局限于室外,而室内的导航和定位技术远没有室外完善。目前室内导航技术主要包括室内 WIFI 定位、LBS 基站定位、惯性导航、基于摄像机的视觉导航和以环境磁场为基础的室内定位技术。这些方法都有各自的特点,也取得了不错的效果,但是由于方法自身存在的一些限制,需要进一步地改进和提高才能在实际中更好地应用,例如:室内 WIFI 定位技术是根据无线信号的强弱来实现定位的,需要预先安装无线传感器,并进行大量的测试,工作量大^[3];LBS 基站定位技术是基于运营商网络而获取移动终端用户的位置信息,方便快捷,但是定位精度差;惯性导航是利用加速度计与陀螺仪计算航程,推知当前位置和下一步目的,但随着航程的增长定位误差将不断累加,导致定位精度下降,而且设备比较复杂,成本较高^[4];视觉导航系统能够较好地采集前方障碍物的距离信息和运动信息,但运算量较大、容易受到环境的影响,且以被动导航为主^[5];以埋设磁轨道为基础的电磁导航技术简单实用,但铺设和施工的成本高,改造和维护困难^[6];IndoorAtlas 公司推出的以地磁场构建室内地图的方法还处于理论研究阶段,在技术实现上比较复杂,没有正式应用。

通过对室内导航特点和当前室内导航技术的分析,提出采用激光雷达扫描环境定位为主、地磁传感器检测行驶角度为辅的室内主动导航技术。激光雷达在室外的定位导航应用中有非常好的表现,地磁传感器在行驶角度测量方面比较成熟,将二者结合

并针对室内导航进行设计,将会取得较好的效果。下面以仓储车间的无人驾驶货运小车为例分析室内激光雷达导航系统的工作原理和过程。

1 室内激光雷达导航原理

激光雷达是传统雷达与激光技术相结合的产物,是以微波雷达原理为基础,将激光束作为探测信号。激光雷达工作时,首先发射机发射一束特定功率的激光束,经过大气传输辐射到目标表面上,反射的回波由接收装置接收,再对回波信号进行处理,提取有用的信息^[7]。通过测量反射和散射回波信号的时间间隔、频率变化、波束所指方向等就可以确定目标的距离、方位和速度等信息^[8-9]。

利用激光雷达实现室内导航的原理:首先使用激光雷达对室内的区域进行激光探测,得到周围障碍物距离探测点的相对坐标,然后构建以探测点为中心、以雷达扫描半径为最大区域的环境地图;最后在车辆行驶过程中连续使用激光雷达进行探测,得到以当前位置为中心的环境信息,与地图中的特征点对比后可以确定车辆在地图中所处的位置,从而达到导航的目的^[10-11]。

2 室内激光雷达导航系统

2.1 室内导航系统构建

室内激光导航技术是在分析室内定位和室内导航特点的基础上,将激光雷达技术从室外引入到室内的一种导航方法。针对仓储车间无人驾驶货运小车设计的激光雷达导航系统原理如图 1 所示。

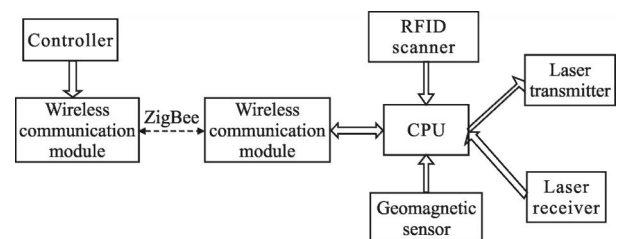


图 1 室内激光雷达导航系统原理框图

Fig.1 Schematic diagram of indoor laser radar navigation system

由微处理器控制激光发射器向四周发射激光束探测周围环境,同时接收反射回来的激光信号,经过信号分析得知周围的环境信息,据此规划出到达某一地点的行驶路线。在行进过程中使用地磁传感器测量前进的方向,并根据行进过程中得到的环境信息来确定是否在规划的路线上行驶,如果偏离,能及时地做出调整,最终到达目的地。RFID 阅读器不断地扫描周围是否有 RFID 路标,扫描到的路标中包含车辆行驶所需的关键点的位置信息,能辅助小车到达最终的目的地。试验用的无人驾驶小车如图 2 所示。



图 2 试验用的无人驾驶小车
Fig.2 Experimental unmanned car

2.2 激光雷达数据获取

激光雷达能以较高的频率扫描一个平面或空间内的环境信息,室内导航系统能够利用这些信息对运动物体进行实时定位^[2]。仓储车间的环境相对简单,物品摆放比较整齐,为了减少数据量和提高数据处理效率,采用单线激光雷达来进行扫描,使微处理器缩短数据处理时间。

用于室外的激光雷达探测距离远,性能比较好,但成本很高,室内载物小车上使用的激光雷达在成本方面要适当降低。工厂仓储车间的面积一般不会很大,面积以 1 000 m² 左右的居多,从成本和实用角度出发在室内导航系统设计时采用探测半径最大为 15 m 的激光雷达。该激光雷达扫描频率 2 000 点/s、每秒扫描 2 周,即 0.5 s 扫描一个平面的数据为 1 000 个。

激光雷达的输出原始数据是以激光雷达为中心坐标系的极坐标数据点,如图 3 所示,激光雷达逆时针依次扫描,得到的数据用 (d_i, θ_i) 表示, d_i 为反射点到激光雷达中心的直线距离, θ_i 为反射点到激光雷达中心与起始扫描点之间的夹角,激光雷达扫描角分辨率为 0.36°,极坐标角度与采样点位置的关系为:

$$\theta_i = (i-1) * 0.36, i=1 \sim 1001$$

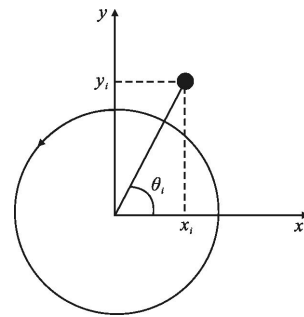


图 3 激光雷达测量模型
Fig.3 Measurement model of laser radar

激光雷达 360°扫描周围的环境,得到周围环境的信息,图 4 是激光雷达探测某仓储车间局部信息的示意图,经过激光束的发送和接收得到障碍物到雷达中心的距离。

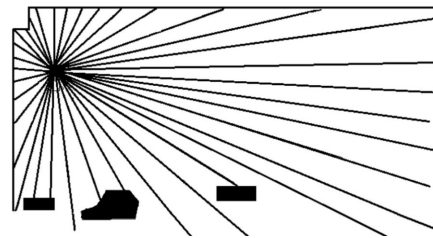


图 4 激光雷达探测示意图
Fig.4 Schematic diagram of laser radar detection

2.3 环境地图拟合

激光雷达扫描周围环境,得到环境中墙壁、货物等障碍物到激光雷达中心的距离数据,由这些数据组成离散的室内环境轮廓图,如图 5 所示。图中既有墙壁、货架等连续性较强的点,又有比较零散的货物的点,例如图 5 下方有三处零散放置的物体,左上角靠近墙角处也有零星的杂物,这些物体虽然连续性不是很强,但是在制作环境信息地图时要按照一个整体考虑,这样便于规划车辆行驶的路线。

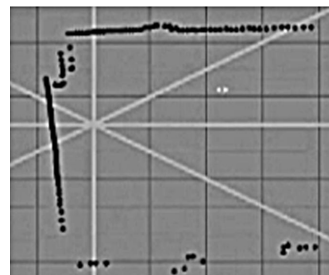


图 5 离散的室内环境轮廓图
Fig.5 Discrete outline of the indoor environment

要得到连续的环境信息,还需要对离散的数据进行差补等拟合算法的处理,常用的拟合算法有最小二乘法、最小绝对残差法和 Bisquare 方法。最小二乘法是通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配,利用最小二乘法可以简便地求得未知的数据,并使得这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小^[3]。按偏差平方和最小的原则选取拟合曲线,并且采取二项式方程为拟合曲线的方法称为最小二乘法拟合方法。最小二乘法原理的表达式为:

$$\min_{\varphi} \sum_{i=1}^m \delta_i^2 = \sum_{i=1}^m (\varphi(x_i) - y_i)^2$$

相对于最小绝对残差法和 Bisquare 方法最小二乘法更加简便,并能够满足室内环境的距离数据拟合的需求。局部环境的数据经过最小二乘法拟合后得到如图 6 所示的轮廓图。

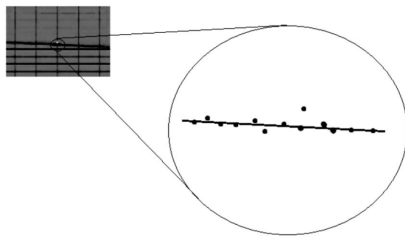


图 6 局部拟合后的轮廓图

Fig.6 Fitted local environmental outline

整体的环境信息是将拟合后的局部轮廓连接在一起得到的,图 7 是拟合后的周围环境轮廓图,这是实现室内导航的基础。

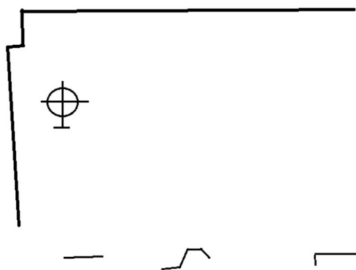


图 7 拟合后周围环境轮廓图

Fig.7 Fitted environmental outline

2.4 根据环境地图规划行驶路线

得到拟合后的环境地图之后,可以根据地图中的特征点和货运小车的目的地规划出行驶路线。路

线的规划不仅要考虑是否走得通,还要考虑是否适合货运小车载货后通行方便。综合以上因素考虑,在设计行驶路线时不能简单地采用距离最短的路径,而是选择靠近形状比较规则的障碍物(例如墙壁、货架等)进行设计,这样小车在行驶过程中的参照物相对固定,路线也比较规则,偏差距离更容易控制,行驶起来就会顺畅。货运小车的实际运动轨迹与理论上存在一定的差距,需要根据实际情况不断地修正,例如运动方向、运动速度、载货后的质量等,所以设计出的行进路线不能仅仅是一条线,而是以行进路线为中心线的行驶区域。

图 8 所示的行驶路线靠近环境的外轮廓,是充分考虑了货运小车的实际行驶的过程而设计出的,相比直线路线虽然路程稍长,但更容易平稳地行驶和绕开障碍物。规划中以 A 区域的 Start 为起始位置,在 B 区域进行装货操作,最终到达目的地 C。

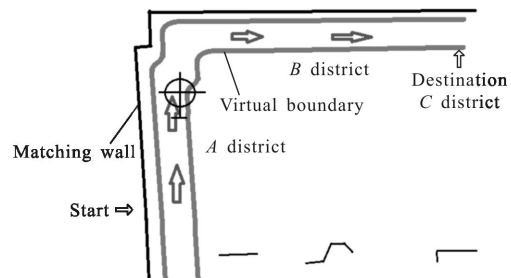


图 8 规划路线

Fig.8 Planned route

3 物料运输车的运动控制

3.1 地磁传感器运动角度测量

地磁传感器是采用法拉第电磁感应定律,利用被测物体在地磁场中的运动状态不同,通过感应地磁场的分布变化而指示被测物体的姿势和运动角度等信息的测量装置。地磁传感器能够测出轴方向上的地磁场强度,由三角公式可以计算出传感器量测轴与磁场方向之间的角度。利用地磁传感器可以制作电子指南针,在导航特别是盲区导航中有很重要的作用,在室内导航系统中使用地磁传感器来测量车辆的行驶角度,为车辆导航提供信息。

在系统中选用霍尼韦尔公司生产的 HMC5983 型高精度三轴磁场传感器,角度测量精度最高可达 1°,数据可由 IIC 或者 SPI 数字接口输出,方便快捷。使用

地磁传感器测量角度的原理与使用激光雷达测量角度的原理不同,使用两种方法测量可以实现结果的相互补充和参考,二者共同作用可以提高测量精度。

3.2 运输车实时定位与运动控制

货运小车的运动控制方案要与行进区域相适应,并能够根据载货情况调整运动速度和运动方向。货运小车是否在所设计的路线上行驶,当前的运动方向和速度是否满足在运动区域内行驶的条件,这些都要求实时知晓货运小车所处的位置,这就是主动导航中的实时定位。

货运小车的车载激光雷达在行驶过程中连续探测,取得数据后与环境地图对比,可以得到在地图中的相对位置;用地磁传感器可以测量出车辆行驶的角度,由于行驶速度和时间也可以测得,所以能够得到与之前所处地点的相对位置;二者结合就可以得到比较准确的位置。根据位置的变化和车辆行驶角度能够判断出该车是否能够在所设计的路线上正常行驶,如果有偏差,使用 PID 运动控制方法来调节小车的运动速度和运动方向,使之在正确的区域上行驶。图 9 是货运小车根据 PID 理论的运动控制示意图,展示了运动方向的调节过程。

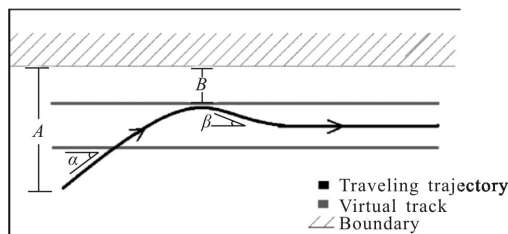


图 9 PID 运动控制示意图

Fig.9 Schematic of motion control based on PID

3.3 RFID 地标信息获取

在室内导航系统中使用 RFID 电子标签作为地标,地标中包含重要的位置信息,可能与货运小车的前进方向相关,也可能是指示最终目的地的信息。RFID(无线射频识别技术)是一种非接触式的信息自动获取技术,利用无线电信号空间耦合原理自动获取电子标签的信息,操作快捷方便,适合各种恶劣环境下的信息采集。

室内导航系统中的 RFID 电子地标用来存储货物的仓储位置、车辆指定停放的位置和在某些地点的方向指示等信息。车辆在行驶中使用车载 RFID 阅

读者不断扫描周围的电子地标,由于阅读器的扫描范围有限(约为 0.3 m),所以当扫描到目的地的地标时就可以认为已经到达了目的地。RFID 电子地标的作用是辅助激光雷达进行室内导航的工作。

4 系统软件设计

室内导航系统的软件部分主要包括:室内地图构建、激光雷达测距定位、地磁传感器测量角度、RFID 地标读取和车辆行驶控制等部分,并能够通过 ZigBee 无线传输模块与控制端进行信息交互,具体的流程如图 10 所示。

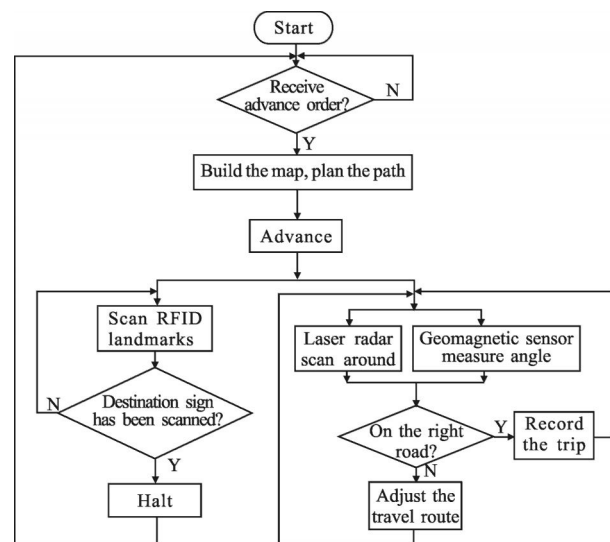


图 10 系统软件流程图

Fig.10 Flow chart of the system software

激光雷达数据获取与处理部分是导航系统的核心部分,数据处理的工作量比较大,所以采用处理速度快和处理能力较强的 32 位微处理器为硬件核心,保证系统良好地运行。

5 结论

室内导航技术相对于室外以卫星定位为基础导航技术还不是很成熟,各种原理的导航方法仍然在研究当中,对比目前正在研究或使用中的导航方法,以激光雷达为核心的导航方法是将在室外定位导航中成熟应用的激光雷达导航方法移植到室内,在小型化和设备成本上进行有针对性地设计,使之在室内环境扫描、地图构建和室内定位方面有比较好的

表现。另外,使用地磁传感器测量运动角度与行驶速度测量配合进行辅助定位,提高室内定位的精度。

以仓储车间的无人驾驶货运小车为例设计的室内激光雷达导航系统能够较好地完成实际生产中室内导航和运动控制的任务,说明设计的导航系统稳定性好、实用性强,有利于室内主动导航。该系统可以针对不同的应用进行适当地调整和修改,满足不同环境下导航的需求,有很好的示范作用。

参考文献:

- [1] How J P, Bethke B, Frank A, et al. Real-time indoor autonomous vehicle test environment [J]. *IEEE Controls System Magazine*, 2008, 28(2): 51-64.
- [2] Wang Fei, Cui Jinqiang, Chen Benmei, et al. A comprehensive UAV indoor navigation system based on vision optical flow and laser fast SLAM[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(11): 1889-1900.
- [3] Tu Yankai. Key parameter computation of WiFi indoor positioning [J]. *Information Technology*, 2013 (11): 23-25. (in Chinese)
涂岩恺. 无限局域网室内定位关键参数计算 [J]. 信息技术, 2013(11): 23-25.
- [4] Hang Yijun, Liu Jianye, Li Rongbing, et al. Mems IMU/Ladar interated navigation method based on mixed feature match[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35 (9): 2583-2592. (in Chinese)
杭义军, 刘建业, 李荣冰, 等. 基于混合特征匹配的微惯性/激光雷达组合导航方法 [J]. 航空学报, 2014, 35(9): 2583-2592.
- [5] Kong Tianheng, Fang Zhou, Li Ping. Indoor integrated navigation of micro aerial vehicle based on radar-scanner and inertial navigation system [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 11(5): 607-613. (in Chinese)
孔天恒, 方舟, 李平. 基于雷达-扫描器/惯性导航系统的微小型无人机室内组合导航 [J]. 控制理论与应用, 2014, 11(5): 607-613.
- [6] Liu Yuan, Zhang Wenbin, Liu Xueyang, et al. Study on electromagnetic navigation intelligent vehicle detection and control system [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2012, 31(4): 63-66. (in Chinese)
刘源, 张文斌, 刘雪扬, 等. 电磁导航智能车检测和控制系统的研究[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(4): 63-66.
- [7] Liu Bin, Zhang Jun, Lu Min, et al. Reaearch progress of laser radar applications [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(2): 117-122. (in Chinese)
刘斌, 张军, 鲁敏, 等. 激光雷达应用技术研究进展[J]. 激光与红外, 2015, 45(2): 117-122.
- [8] Qu Xinghua, Zhi Guangtao, Zhang Fumin, et al. Improvement of resolution of frequency modulated continuous wave laser ranging system by signal splicing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 40-47. (in Chinese)
曲兴华, 职广涛, 张福民, 等. 利用信号拼接提高调频连续波激光测距系统的分辨率 [J]. 光学 精密工程, 2015, 23 (1): 40-47.
- [9] Kang Wenyun, Song Xiaoquan, Wei Zhen. Weak signal detecting method of laser ranging for space target in daytime [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3026-3029. (in Chinese)
康文运, 宋小全, 韦震. 白天空间目标激光测距微弱信号探测方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 3026-3029.
- [10] Li Mi, Song Yingsong, Yu Jing, et al. High precision laser pulse distance measuring technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1469-1473. (in Chinese)
李密, 宋影松, 虞静, 等. 高精度激光脉冲测距技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1469-1473.
- [11] Qu Hengkuo, Zhang Qingyuan, Ruan Youtian. Laser radar based on scanning image tracking [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 242-247. (in Chinese)
屈恒阔, 张清源, 阮友田. 扫描成像跟踪激光雷达[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 242-247.
- [12] Bailey T, Durrant-Whyte H F. Simultaneous localization and mapping(SLAM):Part II[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2006, 13(3): 108-127.
- [13] Liu Changjie, Liu Hongwei, Guo Yin, et al. Train speed measurement system based on the scanning laser rader [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 285-290. (in Chinese)
刘常杰, 刘洪伟, 郭寅, 等. 基于扫描激光雷达的列车速度测量系统[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 285-290.