

复杂多点进出型地下道路车辆定位与导航技术 应用测试研究

周以恒¹, 孙培翔², 张海城², 游克思²

[1.伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校, 美国, 香槟市 IL 61820; 2.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 针对复杂地下道路环境内缺乏有效交通引导、定位导航的问题, 分析探讨了现有室内定位技术的不足, 研究了适用于普通手机终端的地下车行定位与导航系统。通过开发适用于复杂地下环境的射频矩阵基站、定位与导航引擎, 结合普通智能手机终端, 实现了具有低延时、高精度和高可靠性的地下车行导航解决方案。同时, 于苏州中心开展了地下定位导航示范应用测试, 结果表明: 该系统能满足车辆在地下环境的定位与导航需求, 实现与手机导航 app 对接, 为驾驶人提供地上地下无缝衔接、稳定高效的一体化导航服务。

关键词: 城市地下道路; 交通引导; 地下定位; 地下导航

中图分类号: P258

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)07-0203-05

1 概 述

随着城市的发展, 人口加速聚集, 土地资源紧缺, 交通拥堵问题突出。鉴于高架道路系统存在着噪声大、尾气污染、割裂地块等问题, 未来地下道路在解决城市交通拥堵、释放城市发展空间、打造城市立体交通网络方面将发挥越来越重要的作用, 建设规模及数量将越来越多。

传统的单点进出型地下道路逐步向着多点进出、系统性、长大化、网络化方向发展。日益复杂的地下交通组织形态给驾驶人寻路带来新的挑战:

(1) 地下环境内 GNSS 信号缺失, 无法实现地上地下的一体化衔接。

传统导航依赖全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)以实现定位。GNSS 卫星信号使用的频段为微波频段, 其绕射和穿透能力弱, 不能穿透较厚的山体或混凝土结构体, 导致驾驶员无法在地下环境中获得准确的定位导航信息。

(2) 指路标志布置受限, 难以建立高效、清晰的标志系统^[1]。

地下道路内部缺乏参照物, 驾驶人对出入口的识别主要依赖交通标志系统。由于空间不足、侧墙遮挡以及光线不足等, 当前地下交通标志尺寸与版面布置受限、引导标志的可识别性存在一定问题。

收稿日期: 2021-10-15

作者简介: 周以恒(2000—), 女, 研究生, 从事GIS地理信息科学研究工作。

另外, 设计随意性导致当前城市地下道路的交通标志在外观、版面、色彩等方面五花八门, 缺乏统一标准、标志设置效果差、指路功能不足^[2]。

本研究针对上述不足, 研发了以普通手机终端为基础的地上地下一体化定位导航解决方案。开发了适用于复杂地下环境的射频矩阵基站、定位与导航引擎; 结合通用智能手机终端, 实现了具有低延时、高精度和高可靠性的地下车行定位导航服务。同时, 以苏州星港街隧道、苏州中心地下环路、地下车库为对象, 开展了测试研究, 对系统功能进行了验证。结果表明该系统定位精度、时延、可靠性均满足地下车行定位导航要求, 具有一定普适性及较高的推广应用价值。

地下道路对车辆定位的需求主要集中在实时定位、预告引导、停车诱导、智能辅助驾驶等方面。不同需求列表见表1。

(1) 实时定位

便于驾驶人能够及时获取当前所处位置, 结合地下道路的总体走向以及出入口分布状况, 进行驾驶路径规划和导航, 增强驾驶人在地下环境的寻路能力。

(2) 预告引导

通过定位导航服务, 在分合流段、出入口等复杂路段, 可有助于及时引导车辆分流, 提高行车安全; 在地下道路弯道、事故段等风险路段能起到交通状况预警作用, 避免追尾等事故发生。

(3) 停车诱导

地下车库联络道通常连接较多地块车库, 交通组

表1 地下道路环境定位需求表

关键功能描述	实时定位	出口预告引导	停车诱导	智能辅助驾驶
定位精度	1 m	1~10 m	1~10 m	0.1 m
定位时延	1 s	1~5 s	1~5 s	1 ms
定位模式	主动	主动	主动	主动
并发能力	道路车流量饱和值	道路车流量饱和值	道路车流量饱和值	道路车流量饱和值
其他设备要求	结合大众导航应用,不配置额外终端	结合大众导航应用,不配置额外终端	结合大众导航应用,不配置额外终端	结合大众导航应用,不配置额外终端

织复杂。通过融合车辆的实时位置与停车场空位信息,可以帮助车主在最短的时间找到车位,并提供最佳路径规划和引导,避免迷路绕路^[3]。

(4)智能辅助驾驶

隧道、地下车库等复杂地下空间是智能网联车、智能辅助驾驶车辆的重要应用环境。未来支持 mm 级或 cm 级的地下高精度定位技术,可以有效应用于车辆碰撞预警、信息预告、无人车路径规划等应用场景。

2 国内外研究现状

由于 GNSS 信号在地下环境下的严重衰减和多径效应,通用的定位技术(GPS、BDS 等)在室内或遮挡严重的密集环境中难以实现精准定位,这使得室内定位技术的发展备受关注。目前,全面支持智能手机的定位技术主要有以下几种^[4]:

(1)WiFi 指纹

由于 WiFi 在家庭、旅馆、咖啡馆、机场、商场等各类大型或小型建筑物内的高度普及,利用 WiFi 指纹定位无需额外部署硬件设备,对于解决室内定位的问题,有成本低、可行性强的特点。WiFi 指纹定位系统将待检测的室内区域进行网格划分,收集每个网格内的 Wi-Fi 信号强度信息来建立指纹库。提供定位服务时,根据移动端的实时信号强度,与已输入 WiFi 指纹数据库的网格信息相比对,来匹配测算位置信息,其准确性取决于已输入数据库的附近访问点的数量。

(2)蓝牙信标

蓝牙定位通过在区域内大规模铺设蓝牙信标,可采用邻近探测法、几何定位法等实现终端的位置计算。可基于普通手机终端,具有低功耗、低成本的特点,其定位精度取决于蓝牙信标的部署的密度。

(3)地磁

地磁技术的运用始于对特定室内场所地磁数据

的采集。定位时,通过手机端普遍集成的地磁传感器去收集室内的磁场数据,辨认室内环境里不同位置的磁场特征,从而匹配用户在空间中的相对位置。

(4)惯性导航

惯性导航基于已知的初始位置和姿态,测量载体在惯性坐标系的加速度和角度,将它们的时间上连续积分,并且变换到导航坐标系中,推算出载体在导航坐标系中的速度、航向和位置等信息。需要利用终端惯性传感器采集的运动数据,如加速度传感器、陀螺仪等测量物体的速度、方向、加速度等信息^[6]。

(5)蜂窝定位技术

运营商的蜂窝网络规模大、覆盖广,为蜂窝网络进行定位应用奠定了较好的基础^[7]。蜂窝定位包含以下几种主要方法,基站估算定位方法、时间测量定位方法、角度测量定位方法。未来,随着基于 5G 的 TDOA、AoA 等技术的标准化,蜂窝定位技术的精度有望进一步提高。

本研究对于实现地下道路的车行定位导航应用设定了两个前提条件:一是适合普通车辆,无需安装额外车载设备,基于现有的导航软件。二是满足地下道路车辆的不同速度的运动状态定位和导航精度要求一般范围在 20~100 km/h。

当以上几种室内定位方案应用于地下道路等地下车载导航定位场景时,均存在局限性。WiFi 的场景感知能力受 IOS、Android 等智能系统限制,难以满足车载导航所需要的低延迟、高精度、高可用场景需求。蓝牙信标对安装密度要求高,信号稳定性差,定位更新率慢、精度较低,且常采用电池供电,基本每 1~2 a 所有设备都需要更换一次。地磁定位存在静态情况下初定位难,且精度容易受金属和电子等物件的干扰,无法应用于停车场及地下定位导航。惯性导航由于导航信息经过积分而产生,定位误差随时间而增大,长期精度差,定位精度对惯性传感器依赖程度较高。蜂窝定位技术对于基站部署密度依赖性较高,目前隧道内主流的泄露电缆布设方式难以满足高速车行环境下定位精度的要求,且基于 5G 的定位技术等其他技术目前尚不成熟。此外,视觉、伪卫星等室内定位方法由于无法满足以上两大需求,均不适用于地下车行的定位导航。

3 地下道路定位与导航应用技术方案研究

3.1 总体方案

本方案通过在隧道内安装射频矩阵基站来提供

定位信号,结合集成了地下定位导航引擎的大众导航应用 APP,通过普通手机终端及蓝牙通讯,实现了地下道路环境中精准定位导航服务。基站体积小,不影响地下道路日常运行、对驾驶人视觉无干扰、后期维护便捷。

车辆驶入地下道路后,手机捕获到射频信号,APP 自动判断进入地下环境,将定位信号从卫星信号切换至射频信号。驾驶员的智能手机终端通过计算与多个蓝牙射频矩阵基站的距离信息,实现自身位置运算、路线规划、行车导航等应用。同时,射频矩阵基站通过 WiFi 或 4G 信号与基站管理云服务平台连接,上传基站状态信息及车流信息等数据,为地下道路管理方提供设备设施的状态数据和其他应用支撑数据,如图 1。

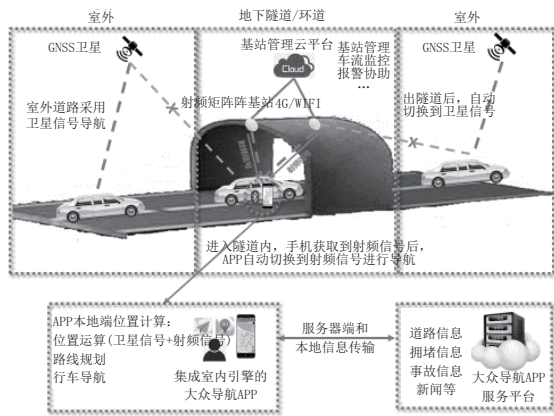


图 1 总体方案示意图

3.2 系统功能

本系统通过安装射频矩阵基站,利用蓝牙信号提供定位导航服务,支持大众手机和低成本蓝牙发射器。导航精度优于 GPS/BDS,延时小于 1 s,支持时速 20~100 km/h。在大型地下空间内,安装多个阵列基站可覆盖更大范围、提供更高精度的位置信息。单基站安装的高度超过 15 m 时,有效覆盖半径超过 20 m。同时,低功耗蓝牙(Bluetooth Low Energy, BLE)微基站理论上无并发用户数量限制。

本技术适用于长大隧道、地下环路、地下停车场等场景,提供地上地下无缝衔接的行车导航和路线规划服务。配套的管理平台可实现特种车辆监管、实时报警、智能运维、车流监控等管理功能。

4 应用测试研究

4.1 测试范围

测试范围如图 2 所示,为星港街隧道、苏州中心地下环路北环、苏州中心部分地下车库,全长约 2 500 m。测试路线自星港街隧道北洞口经由苏州中

心分流点至苏州中心北区地下环路,而后沿着北环地下道路从星港街隧道驶出。断面布置见图 3。

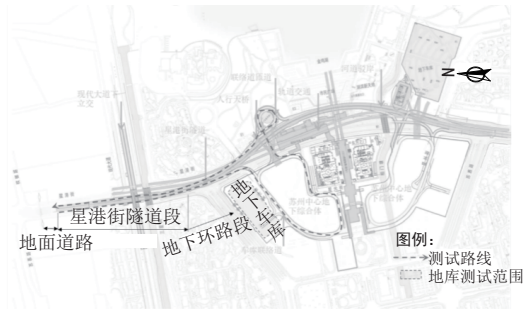


图 2 苏州中心示范点范围

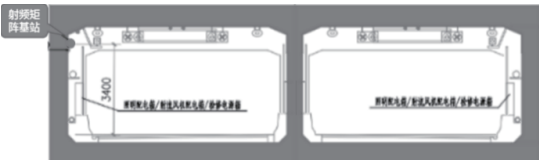


图 3 星港街隧道横断面布置图

4.2 测试目标

以星港街隧道、苏州中心地下环路及北区车库作为示范,在不干扰地下道路运营的基础上,布设安装定位基站,通过系统集成,打通与通用导航 APP 的联系,实现地上地下无缝衔接、地下车辆从高速隧道至低速车库全过程定位与导航验证。测试实施过程如图 4 所示。



图 4 测试实施示意图

4.3 测试方案

射频矩阵基站点位布置原则:一是最大范围程度考虑信号覆盖;二是满足隧道、地下环路、地下车库运行速度范围内,定位精度、信号连续性、稳定性要求;三是对正常行车无干扰;四是便于养护和维护等。

在星港街隧道、苏州中心地下环路,沿两侧间隔 20 m,离地 3.4 m,共布设射频定位基站 225 个;苏州中心北侧地下车库布设定位基站 40 处,定位基站周围无明显遮挡物。平面布置示意图 5,点位布置原则区域见表 2。

4.4 评价指标测定与分析

为进一步定量评估定位的精度和适用性,本文选取了定位精度作为标准来评估可行性。定位精度

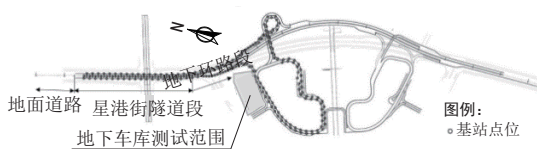


图5 平面布置图

表2 点位布置原则区域

	运行速度 / (km·h ⁻¹)	间距 / m
隧道	40~60	20~40
中心环路	20~40	20~40
地下车库	5~20	20~40

是评价室内定位技术性能最重要的指标,是指定位系统计算得到的终端位置信息与其真实位置之间的接近程度,通常用两者之间的欧式距离表征,测试区域导航示范见图6。

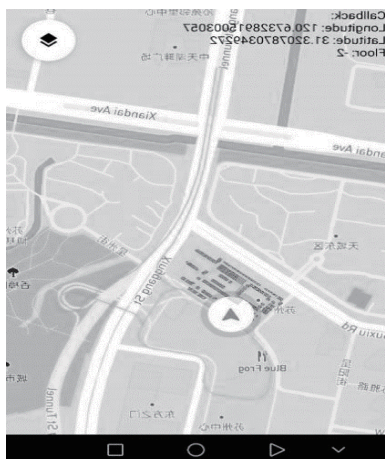


图6 测试区域导航示范

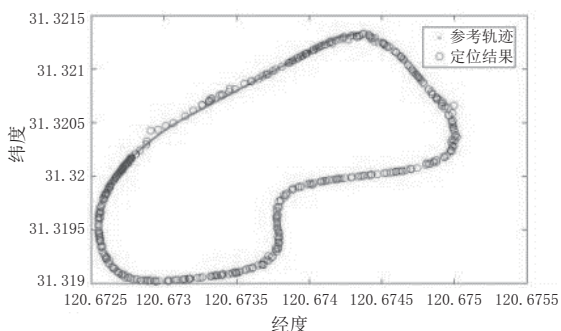
分别从隧内至室内、室外至室外、室内至室外、室外至室内四种不同行驶状况,开展了测试定位精度分析,定位导航测试航迹如图7所示,定位结果与参考航迹一致性较高。

同时按不同设计速度分别开展了定位精度的测评,在测试过程中采用车速进行验证,在20~80 km/h速度,手机导航功能均反应灵敏,定位平均误差可以达到m级(见表3),满足车行定位和导航精度要求。

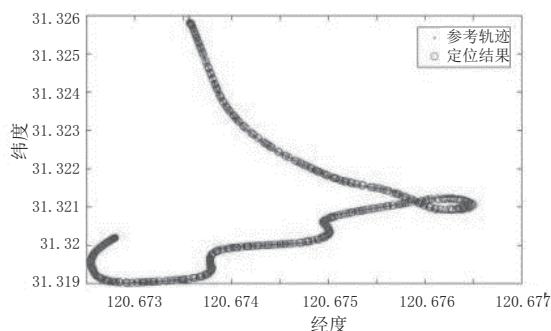
表3 定位误差统计

统计量	0~20 / (km·h ⁻¹) (0~5.6/ (m·s ⁻¹))	20~50 / (km·h ⁻¹) (5.6~13.9/ (m·s ⁻¹))	50~80 / (km·h ⁻¹) (13.9~22.2/ (m·s ⁻¹))	>80 / (km·h ⁻¹) (>22.2/ (m·s ⁻¹))
平均误差 / m	2.85	4.19	5.56	7.13
标准差 / m	1.13	2.16	2.41	3.00
方差 / m ²	1.28	4.68	5.83	8.99
中位数 / m	2.71	3.86	5.51	7.21
95% / m	5.04	8.63	9.57	11.73
最大值 / m	9.30	16.64	13.61	17.95
最小值 / m	0.59	0.74	0.75	0.76

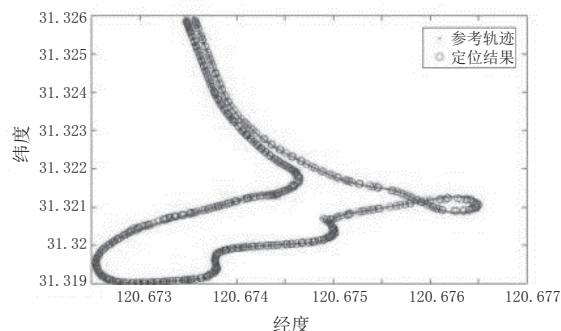
在设计运行速度区间内,不同定位场景下,定位精度均可达m级,定位时延小于1s。本试点项目按20~40 m间距安装定位基站,定位信号全面覆盖测试示范区域。车辆由地上驶入地下环境过程中,导航APP自动接收射频矩阵信号,无缝衔接地上导航,定位坐标未出现飘移、延迟等情况(见图8、图9、图10)。



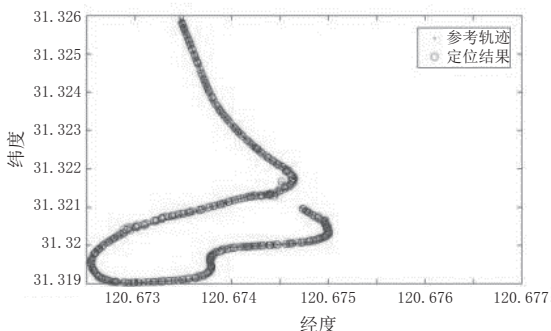
(a)室内至室内



(b)室内至室外



(c)室外至室外



(d)室外至室内

图7 定位导航测试轨迹

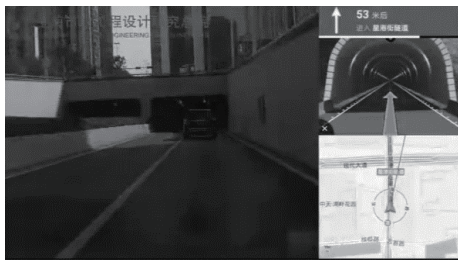


图 8 星港街隧道北洞口导航效果示意图

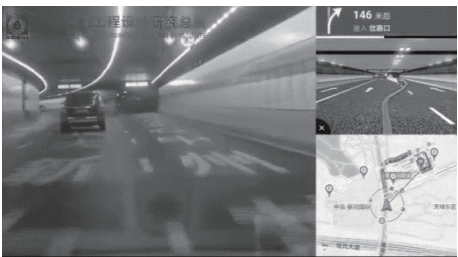


图 9 星港街隧道、地下环路分流点导航示意图

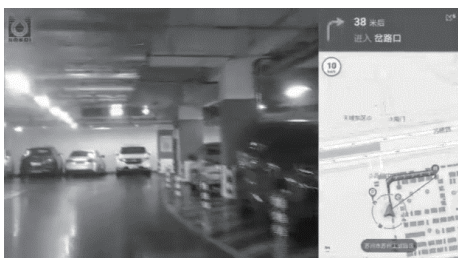


图 10 苏州中心地下车库导航示意图

5 结 论

(1)通过客观比较国内外现有室内定位技术,分析不同方案在地下路网中的适用性与局限性,本文提出了无需安装额外车载设备和适应高速运动状态的两大目标。综合考虑多点进出型地下道路寻路问题,制定了以大众导航 App 为基础,基于射频矩阵基站的地上地下一体化定位导航解决方案。

(2)射频矩阵基站的安装过程快速便捷,便于养

护,不影响地下道路日常运行;点位设置隐蔽,对正常行车视线无干扰;20~40 m 的布置间距可以满足信号稳定、无覆盖盲区要求,实现设计运行速度区间内的稳定、连续导航。

(3)基于 RSSI 测距的射频矩阵基站定位导航解决方案,由移动客户端计算并确定位置信息,最大程度上保障了用户的信息安全;精度优于室外 GPS/BDS 导航,延迟小于 1 s。在 20~100 km/h 速度区间内,行驶车速和手机性能均不影响定位导航的灵敏度及准确率。

(4)理论分析及实际测试结果表明:本方案对于实现地上地下一体化车行导航切实可行,后续拟进一步开展不同点位间距下定位性能及多手段融合定位的相关研究,以期进一步提高该地下车行定位导航解决方案的经济性、可靠性、先进性。

参考文献:

- [1] 俞明健.城市地下道路设计理论与实践[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [2] T/CECS 626—2019,城市地下道路交通标志和标线设置标准[S].
- [3] 中国移动通信集团有限公司.2020 室内定位白皮书[R].北京:中国移动通信集团有限公司,2020.
- [4] 裴凌,刘东辉,钱久超.室内定位技术与应用综述[J].导航定位与授时,2017,4(3):1-10.
- [5] 杨超超,陈建辉,刘德亮,等.室内无线定位原理与技术研究综述[J].战术导弹技术,2019,198(6):105-113.
- [6] 中兴通讯股份有限公司.5G 室内融合定位白皮书[R].北京:中兴通讯股份有限公司,2020.
- [7] 上海市市政工程设计研究总院.星港街隧道与苏州中心地下环路定位导航技术应用验证项目研究报告[R].上海:上海市市政工程设计研究总院,2020.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com