

审查

开放的访问

室内导航：发展现状和未来趋势

谢米和李*



摘要

本文综述了室内定位、定位和导航 (PLAN) 的现状和未来趋势。它涵盖了室内规划的需求、主要参与者、传感器和技术。除了惯性导航系统 (INS) 和全球导航卫星系统 (GNSS) 等导航传感器外，高清晰度地图 (高清地图)、光探测和测距 (激光雷达)、摄像机、第五代移动通信技术 (5G) 和物联网 (物联网) 信号等环境感知传感器正在成为重要的计划辅助传感器。在更先进的传感器、多平台/多设备/多传感器信息融合、自学习系统以及与人工智能、5G、物联网和边缘/雾计算的集成下，规划系统预计将更智能和鲁棒。

关键词：导航、室内定位、信息融合、无线定位、死亡计算、数据库匹配

项目简介

定位、定位和导航 (PLAN) 技术已在移动电话和无人驾驶系统等许多应用程序中被广泛地研究和成功地商业化。特别是，随着新的芯片级微机电系统 (MEMS) 传感器、定位大数据和人工智能 (人工智能) 技术的出现，以及公众兴趣和社会潜力的增加，室内规划技术正变得越来越重要。

室内导航的市场价值：社会效益和经济价值

全球室内规划市场预计将达到\$

28. 到2024年将增长20亿美元，以复合年增长率 (CAGR) 38.2% 的速度增长 (戈尔茨坦2019年)。室内计划不仅吸引了苹果和谷歌等消费者巨头的注意，也吸引了特斯拉和英伟达等自动驾驶玩家的注意。这是因为，因为

新兴的车辆应用 (例如，自动驾驶和连接车辆) 需要室内平面规划能力。与传统车辆相比，无人驾驶车辆面临着三个重要的问题：规划、环境感知和决策。在做出决策之前，车辆需要将自己规划到周围的环境中。因此，只有通过解决室内方案，才能实现完全自动驾驶和定位服务。

社会福利准确的计划可以服务于安全和医疗应用，并造福于特殊群体，如老年人、儿童和残疾人。同时，规划技术可以带来一系列定位服务，如移动服务 (MaaS)，增加出行便利和安全性，减少碳排放 (通过将自备车辆改为共享车辆)。此外，可靠的规划技术可以减少道路事故，其中94%是由人为失误造成的 (Singh2015)。

经济价值作为一个室内规划的需求者，自动驾驶技术预计将减少

到2030年，拥有车辆与共享车辆的比例为1: 1

(肖宁伯格出版社，2019年)。到2050年，自动驾驶汽车预计每年将节省8000亿美元

*通信：li29@ucalgary.ca

加拿大卡尔加里大学地质工程系，卡尔加里西北大学大道2500号，ABT2N1N4



©, 作者(s), 2021年。本文根据知识共享属性4.0国际许可授权，允许使用、共享、改编、分发和任何媒体或格式的复制，只要你给予适当的信用给原始作者(s)和来源，提供知识共享许可的链接，并表明是否做了更改。本文中的图片或其他第三方材料包含在文章的知识共享许可中，除非在材料的信用额度中另有说明。如果材料不包含在文章的知识共享许可中，并且法定法规不允许您的预期使用或超过允许的使用，您将需要直接获得版权持有人的许可。若要查看此许可证的副本，请访问<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>。

通过减少交通拥堵、事故、能源消耗和时间消耗（肖宁伯格，2019年）。巨大的社会和经济效益促进了自动驾驶和大众消费者市场对规划技术的需求。

从市场角度进行室内导航分类

平面图技术与市场需求高度相关。表1显示了几种典型的室内平面图应用程序的精度要求和成本。

一般来说，对于需要更高精度的应用，设施和设备成本相应地较高。在许多情况下（例如，大众市场情况），最低设备安装成本和设备成本是限制计划技术可扩展性的重要因素。

工业和建筑要求厘米甚至毫米级的平面图精度。例如，机器导向和变形分析的精度要求分别为1–5cm和1–5mm。相应的成本为\$1万级（施耐德，2010年）。

与工业和施工相比，自动驾驶的规划精度要求较低。然而，应用程序场景要大得多，也有更复杂的变化；此外，成本也更严格。这些因素增加了自动驾驶计划的挑战。汽车工程师协会将自动驾驶分为L0（无自动化）、L1（驾驶员辅助）、L2（部分自动化）、L3（条件自动化，当车辆出现紧急警报时要求驾驶员准备接管）、L4（高自动化，不需要任何用户干预，但仅限于特定的操作设计领域，如具有特定设施的区域和高清地图（高清地图）和L5（完全自动化）（SAE-Intiol2016）。在大多数情况下，自动驾驶汽车意味着L3及以上。距离L5商业用途仍有一定的距离（沃尔科特和Eustice2014）。一个重要的瓶颈是规划技术难以满足整个环境中的要求。

对自动驾驶的精度要求有各种不同的推导和定义。表2列出了其中的几个派生和定义。

表1典型室内平面图应用的精度要求和成本

应用程序	精度要求	成本
工业与建筑公司（施耐德公司，2010年）	厘米高度到毫米高度	\$1万级
自动驾驶汽车(巴斯纳亚克等人。2010；莱文森和Thrun2010；nhtsa2017；里德等人。2019年；机构2019年；斯蒂芬森，2016年；英伟达，2020年)	除米标高到厘米标高	\$1000级到\$10000级
室内制图(Cadena等人。 2016)	除米标高到厘米标高	\$1000级第一
反应者(兰塔科科等人。 2010)	水平高度，楼层高度\$1000层	
行人应用程序（道奇公司，2013年）	水平水平，地板高度	使用现有的消费类设备；基础设施
蜂窝式紧急事件（面心立方2015）	50m以内的80%	每1亿米的10级\$的高级部署成本 ² 水平面积 使用现有的蜂窝电话系统

表2自动驾驶精度要求的导数和定义

参考资料	自动驾驶汽车的精度要求分析
研究(巴斯纳亚克等人。 2010)	在V2X应用中，5m内、5m内、1.5m内、车道内、车道内的1.0m内
报告（nhtsa，2017年）	1.5m（1西格玛，68%），暂定用于安全应用的车道水平信息
研究(里德等人。 2019)	对于运行的乘用车，横向和纵向位置误差的界限分别为0.57m（0.20m95%）和1.40m（0.48m概率为0.95%），当地街道的界限均为0.29m（0.10m95%）
研究结果(莱文森和Thrun，2010年)	10厘米以内的厘米均方误差(MSE)对于公共道路非常准确
报告（代理机构，2019年）	自动驾驶的精度在水平20厘米以内，高度在2米以内
研究报告（斯蒂芬森出版社，2016年）	高级驾驶员辅助系统(ADAS)和自动驾驶应用中的主动车辆控制要求的精度高于0.1m
行业（英伟达，2020年）	目标是厘米级的目标

研究工作(巴斯纳亚克等人。2010年)显示了车辆到万物(V2X)中道路(5米以内)、车道(1.5米以内)和车道(1.0m以内)应用的精度要求。美国国家公路安全管理局(nhtsa2017)报告的车道安全应用信息暂定要求为1.5m(1σ , 概率为68%)。研究工作(里德等人。根据道路几何标准和车辆尺寸得出精度要求。对于乘用车操作, 横向和纵向位置误差的界限分别为0.57m(95%的概率为0.20m)和1.高速公路40米(95%概率0.48米), 当地街道上0.29米(95%概率0.10米)。相比之下, 研究工作(莱文森和Thrun2010)认为, 厘米定位精度(平均平方根(RMS)误差在10厘米以内)足以修建公共道路, 而报告(Agency2019)定义了自动驾驶的精度在水平在20厘米内, 高度在2米以内。与此同时, 研究工作(斯蒂芬森2016)报告, ADAS和主动驾驶应用中的主动车辆控制要求精度大于0.10万。除研究之外, 自动驾驶的目标由许多自动驾驶公司设定在厘米级(例如(Nvidia2020))。总而言之, 自动驾驶要求降低周到厘米级的平面图精度。当前的成本顺序为\$1000至\$10000(使用三维(三维)光检测和测距(激光雷达))。

对于室内制图, 评论论文(Cadena等人。2016年)表明, 10厘米内的精度足以满足二维(2D)同时定位和映射(SLAM)。室内地图通常用与自动驾驶相比, 在较小的区域移动较慢的车辆进行。室内测绘的短程二维激光雷达的成本为\$1000。

研究工作。2010)说明第一响应者要求平面1米和2米高度以内的室内平面图精度。第一反应者的成本是在\$的1000级。

对于大众市场应用, 很难找到平面精度要求。可接受的精度分类是1-5米高, 6-10米中等, 11米以上低(道奇2013)。垂直精度的要求通常是在地板水平上。对于此类应用, 使用现有的消费设备并降低基站部署成本非常重要。平均来说, 部署在100米的范围内²-区域成本约为\$10级。E-911蜂窝应急系统使用蜂窝信号, 对50m误差的精度要求为80%(面心立方2015)。

室内平面图应用的成本取决于所使用的传感器。下节将介绍主要的传感器和解决方案。

室内导航的主要参与者

各种研究人员和制造商从不同的角度研究室内规划问题。

表3列出了可以反映不同传感器的典型导航精度的选定研究工作, 而表4显示了来自工业领域的选定参与者。包括主传感器、报告的精度和传感器成本。

实际的计划性能与基础设施部署(如传感器类型和部署密度)、传感器等级、环境因素(如特征和区域大小的重要性)以及车辆动力学有关。

一般来说, 不同类型的传感器具有不同的原理、测量类型、平面算法、性能和成本。根据要求选择合适的传感器和方案方案非常重要。

最先进水平

为了实现对自动驾驶车辆的精确和健壮的计划, 需要多种类型的传感器和技术。图1显示了自动驾驶汽车中的部分计划传感器。本节总结了最先进的传感器和规划技术。

室内导航用传感器

传感器包括环境监测和感知传感器(例如高清地图、激光雷达、激光雷达、雷达检测和测距(雷达)、摄像机、WiFi/BLE、5G和低功耗广域网(LPWAN))以及导航传感器(例如惯性导航系统(INS)和GNSS)。介绍并比较了每个传感器的优点和挑战。

环境监测和意识传感器(导航系统的辅助传感器)

高清地图

自本世纪初以来, 车载路线图已成功商业化。此外, 谷歌和这里等公司已经为公共场所推出了室内地图。这些地图包含了道路、建筑和兴趣点(POI)信息, 并且通常有从米级到降米级的精度。这些地图的主要目的是帮助人们导航和执行位置服务应用程序。生成这些地图的主要方法是卫星图像、陆地移动地图和机载GNSS众包。

表4室内规划中的公司及产品

主传感器	本公司名称	性能	传感器的成本
摄像机	移动眼	除米标高到厘米标高	\$100级到\$10级
摄像机（基础设施）	维森市	厘米水平度及更高高度	\$10000层到\$1000层的一个特定区域(例如，一个公园批次)
激光雷达	气差	除米标高到厘米标高	\$10000级到\$1000级
激光雷达（基础设施）	生病	除米标高到厘米标高	特定区域的\$等级为10,000级
高清地图	请在此处	厘米水平度	价格昂贵。一支专业汽车团队工作几天来创造一个区域高清地图
惯性传感器（车辆）	合理定位，占行程距离的2%		在\$100至\$10级别的低成本IMU
惯性传感器（行人）TDK惯性感应器		占距离的4-8%，占距离的1%带固定设备	在\$100至\$10级别的低成本IMU
地角	三角针	除米标高到厘米标高	\$, 1000级
超行	解波波波	界水平	\$100级的锚用于覆盖100米处 ² 级别
超声波检查	大理石纹	界水平	\$100级的锚用于覆盖100米处 ² 级别
WiFi/电缆	思科股份股份有限公司	50%，每100年\$1000万基础设施部署成本为90%	m ² 水平面积
5G	华为	目前还没有商业规划系统	每个基站的等级均为\$1000至\$100级。覆盖范围从千米高度至100米以内

在过去的十年里，高清地图得到了广泛的关注。一个重要的原因是，传统的地图是为人设计的，而不是机器。因此，传统地图的准确性不能满足自动驾驶的要求。此外，传统的地图上没有包含足够的自动驾驶实时信息，这不仅需要车辆的信息，还需要外部设施的信息(Seif和Hu2016)。有了这些功能，高清地图不仅是一张地图，也是一个计划和环境感知的“传感器”。表5比较了传统的地图和高清地图。

高清地图是自动驾驶的关键。人们普遍认为，高清地图需要厘米级的精度和超高（厘米级或更高）的分辨率。因此，创建高清地图是一个挑战。当前高清地图的创建和更新取决于配备了高端激光雷达、摄像机、相机、雷达、GNSS和INS的专业车辆。例如，百度花了5天时间在北京使用百万美元的地图工具在一个公园制作高清地图（同步2018年）。这样的生成方法是昂贵的；而且，很难连续更新高清地图。

为了缓解更新问题，研究了基于车载相机的众包技术。如果正确使用数百万辆汽车的图像，这种方法可以减少额外数据收集的要求。然而，这项任务是极具挑战性的。首先，很难获得足够精确的可以用众包数据更新高清地图的计划解决方案。

此外，为了有效地在发生变化的区域更新高清地图，在传输、组织和处理大量众包数据方面存在挑战。例如，一小时的自动驾驶可能会收集1兆字节的数据(Seif和Hu2016)。使用WiFi传输一周的自动驾驶数据需要230天时间（机器设计2020）。因此，需要专用的机载计算芯片、高效通信和边缘计算。因此，众包高清地图需要来自汽车制造商、地图制造商、5G制造商和终端制造商的合作（阿宝三星2017）。

激光雷达

激光雷达系统使用激光波来测量距离并生成点云（即，一组三维点）。该距离是通过测量光脉冲的飞行时间来计算的，而发射的激光器的方向则由陀螺仪跟踪。通过将测量的点云与存储在数据库中的云进行匹配，可以找到对象。

激光雷达是无人驾驶车辆和机器人的重要平面传感器。图2比较了照相机、激光雷达和雷达与平面图相关的性能。

其主要优点是其精度高，数据密度高。例如，弹性差HDL-64E激光雷达的测量范围超过120m，测量精度为1.5厘米（Isigma）（Glennie和Lichti2010）。观测可以水平覆盖360°，每秒220万点（动差2020）。这些特征

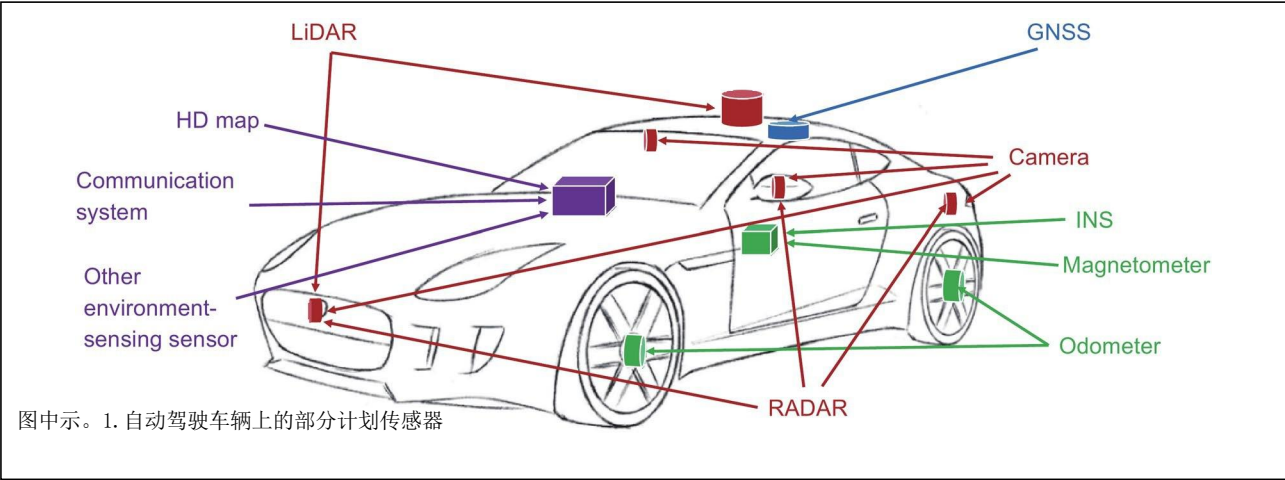
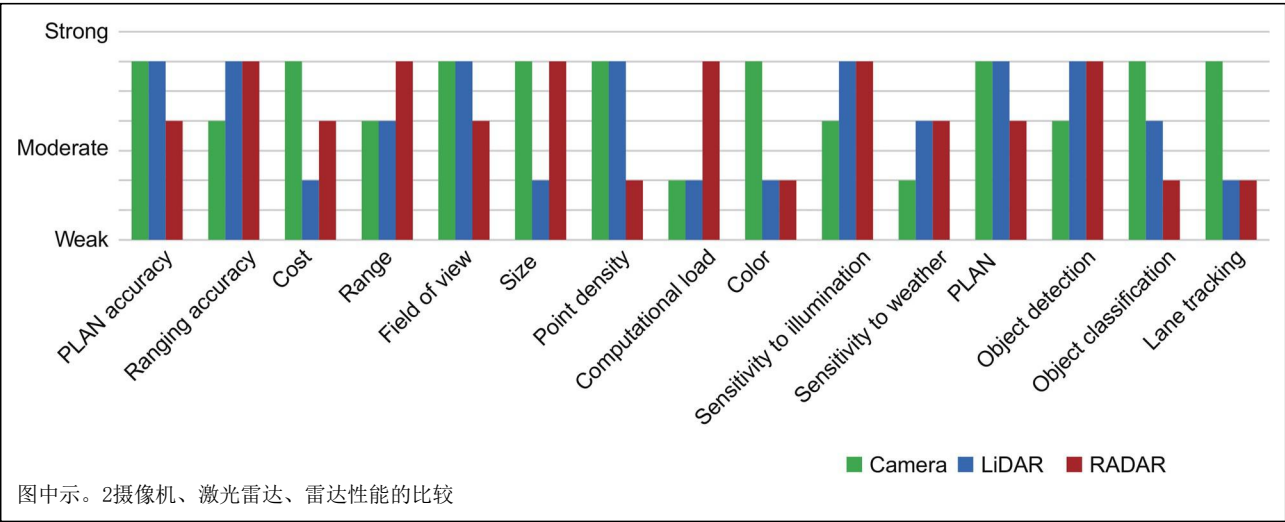


表5传统地图与高清地图的比较

使用时间	准确性	生成方法	“挑战性
传统地图（自2000年起） 汤姆，2020年；刘等人。2020年），道路水平面	米水平（汤姆，2020年；刘等人。2020年），道路水平面	卫星图像、陆地移动地图和机载GNSS众包	不具有显著性
高清地图（自2010年起）	厘米水平仪（Liu等人。2020），在车道水平线上的哪个位置	配备高端激光雷达、摄像头、GNSS和INS的专业汽车团队（2018年同步） 使用车载摄像机众包（2017）（延长）	精度、润滑和更新率要求高；数据和计算负载高



使激光雷达成为提供高清周围环境信息的强大候选者。

使用激光雷达的主要挑战是价格高和尺寸大。此外，目前的激光雷达系统也有一个

载波顶部的旋转机构，在其寿命范围内可能存在问题。一些制造商试图使用固态激光雷达来缓解这些问题。苹果公司

发布了一款新的iPadPro和激光雷达扫描仪, 这可能会为室内计划带来新的方向。

激光雷达测量用于平面图到二维或三维匹配。例如, 研究工作的人(德宝拉维罗内塞等人。和(沃尔科特和Eustice2017)分别将激光雷达的测量值与二维网格图和三维点云图相匹配。当周围环境特征与其他地方显著, 有区别时, 规划性能通常更好; 否则, 性能有限。激光雷达的测量性能将不受光线的影响, 但可能会受到天气条件的影响。

摄像机

摄像机通过收集和分析图像进行规划和感知。与激光雷达和雷达相比, 该相机的成本要低得多。此外, 该相机还具有丰富的特征信息和颜色信息等优点。此外, 照相机是一种被动传感技术, 它不发送信号, 因此在信号传播方面没有错误。此外, 目前的二维计算机视觉算法更加先进, 这也促进了相机的应用。

与激光雷达类似, 照相机取决于环境特征的重要性。此外, 该相机更容易受到天气和光照条件的影响。它的性能在更恶劣的条件下下降, 比如在黑暗、雨、雾和雪中。因此, 开发具有自清洗、更长的动态范围、更好的低光灵敏度和更高的近红外灵敏度的照相机传感器非常重要。此外, 原始照相机数据的数量也很大。自动驾驶汽车上的多个摄像头可以每分钟甚至每秒生成千兆字节级的原始数据。

一些平面图解决方案使用照相机, 而不是高端激光雷达, 来降低硬件成本。特斯拉的自动驾驶系统(特斯拉2020)。该系统包含许多摄像头, 包括三个前摄像头(宽、主、窄)、四个侧摄像头(前后)和一个后摄像头。为了确保计划在相机面临挑战的环境中的性能, 使用了雷达和超声波传感器。

两种主要的基于相机的规划方法是视觉测深/SLAM和图像匹配。对于前者, 研究工作(母动脉和Tardos2017)可以使用单目、立体和红绿蓝深(RGB-D)相机支持视觉SLAM。对于图像匹配, 可以使用道路标志、标志、杆和人工特征(如快速响应(QR)代码)。研究工作(格鲁耶等人。2016年)使用两台摄像头拍摄地面道路标记, 并将其与精确的道路标记地图相匹配。相比之下, 该研究的结果是有效的

(沃尔科特和Eustice2014)和(麦克马纳us等人。2013年)分别使用单目摄像机和立体摄像机的图像来匹配由配备有三维激光雷达扫描仪的测量车辆生成的三维点云图。

雷达

雷达在自动驾驶行业也受到了广泛的关注。与激光雷达类似, 雷达通过测量信号的往返时差来确定距离。不同之处在于, 雷达发射的是无线电波, 而不是激光波。与激光雷达相比, 该雷达通常有一个进一步的测量范围。例如, 博世LRRADA可达2.50米。此外, 雷达系统的价格已经下降到\$1000到

\$100。此外, 雷达系统是轻量级的, 这使得它们可以嵌入到汽车中。

另一方面, 雷达测量值的密度远低于激光雷达和照相机。因此, 雷达通常用于避障, 而不是作为计划的主要传感器。与激光雷达类似, 雷达的测量性能不受光的影响, 但可能受到天气条件的影响。

WiFi/电缆

WiFi和BLE是消费电子产品中应用最广泛的室内无线规划技术。常用的观察结果是RSSI, 而典型的定位精度是在米级。此外, 研究人员提取了高精度测量, 如CSI(哈尔佩等。), RTT(Ciurana等人。), 和AoA(Quuppa2020)。这些测量可用于米级甚至厘米级平面图。

WiFi系统的一个主要优点是它们可以使用现有的通信设施。相比之下, BLE则比较灵活且易于部署。为了满足未来的物联网(物联网)和精确的定位的要求, 最新的WiFi和BLE技术都增加了新的功能。表6列出了可增强PLAN的新的WiFi、BLE、5G和LPWAN功能。发布WiFiHaLow(WiFi-Allinge2020)和蓝牙远距离(蓝牙5)(蓝牙2017)以改善信号范围, 而发布WiFiRTT(IEEE802.11mc)(IEEE2020)和蓝牙测向(蓝牙5.1)(蓝牙2019)则可精确定位。

5g/磅万

5G因其高速、高可靠性、低通信延迟而受到广泛关注。与以前的蜂窝式技术相比, 5G已经定义了

表6可增强计划的新WiFi、BLE、5G和LPWAN功能

技术条件	新功能
无线网络网络	WiFiHaLow的长程、低功耗（WiFi联盟2020）；高精度的WiFirtt（IEEE802.11mc）（IEEE2020）BLE BT远程检测（BT5）（蓝牙2017）；蓝牙5.1高精度测向（蓝牙2019）
5G	更高的基站密度(安德鲁斯等人。2014年)，毫米波多输入多输出(MIMO)，大规模天线和波束形成(Witrisal等。)，设备到设备的通信(Zhang等。)，新的测量类型(delPeralRosado等人。2017)
磅湾	成本低，功耗低，范围长，新的测量类型。2020a)

三个应用类别（Restrepo2020），包括高可靠性低延迟通信（URLLC）（例如99.999%，500km/h高速运动下可靠性）和低延迟（例如毫秒级）、高数据速率（例如每秒千兆级峰值每秒10千兆比特）和强移动场景（例如，视频、增强现实、虚拟现实和远程办公）以及应用场景的大型（MMTC）机器类型通信（MMTC）。具有低成本、低功耗、数据率低的智能农业、物流、家庭、城市和环境监测）。

5G有很强的潜力来改变基于细胞的计划。首先，5G基站的覆盖范围可能会从公里缩小到数百米，甚至在100米以内(安德鲁斯等。2014)。基站的增加将增强信号的几何形状，并减轻非视线(NLoS)条件。其次，5G有了新的特性，包括mmWave多输入和多输出(MIMO)、大规模天线和波束形成。这些特性使得使用多路径信号来增强计划成为可能。2016)。第三，5G可以引入设备间的通信（张等。），这使合作计划成为可能。

同时，新出现的物联网信号和低功耗广域网（LPWAN，如朗格兰奇（LoRa）、窄带物联网（NB-IoT）、Sigfox和机器长期进化（LTE-M）具有远程、低成本、低功耗和大量连接等优点（Li等。2020a）。图3展示了5G和LPWAN信号的通信范围，并与其他无线技术进行了比较。

5G和LPWAN系统为室内和城市区域的广域定位提供了一种可能性。与5G类似，LPWAN系统不再需要在当前的PLAN系统中花费\$10级的额外通信模块。LPWAN信号与越来越多的智能家用电器兼容。这些节点将增加物联网网络和物联网网络的部署密度

从而提高了计划的性能。此外，添加新的测量类型是可行的，Leugner等。和AoA（Badawy等人。）进入5G和LPWAN基站。

由于基于5G和LPWAN的实际系统有限，现有的基于该方案的研究大多是基于理论分析和仿真数据。mmWave信号的标准已经很晚了，因此很难找到可以进行实验的硬件。根据基站部署密度，精度从100米到厘米级，以及所使用的测量类型。李调查等。提供了对5G和LPWAN标准化、计划技术、错误源和缓解措施的系统回顾。特别地，它通过终端设备相关错误、环境相关错误、基站相关错误、数据相关错误和数据相关错误来总结计划错误。在使用5G和LPWAN信号时，减轻这些错误源非常重要。

有基于其他类型环境信号的室内规划解决方案，如磁性（Kok和Solin2018），声学（Wang等。），《空气压力》（Li等人。可见光公司，2018年）（庄等。），和质量流（Li等人。2019a）。

导航和定位传感器

惯性导航系统

INS通过分别使用陀螺仪和加速度计的角速率和线性比力测量来推导运动状态。综述论文（El-谢伊米和优素福2020）总结了惯性传感器技术的最新技术和未来的趋势。INS传统上用于军事、航空航天和移动测量等专业应用。自21世纪以来，基于低成本基于MEMS的惯性传感器被引入陆地车辆规划（El-Sheimy和Niu2007a、b）。自从iPhone4发布以来，基于MEMS的惯性传感器已经成为智能手机的一个标准功能，并引入了新的应用，如基于陀螺的游戏和行人室内平面图。表7比较了移动地图和移动电话中典型惯性传感器性能。不同等级的惯性传感器具有不同的性能和成本。因此，

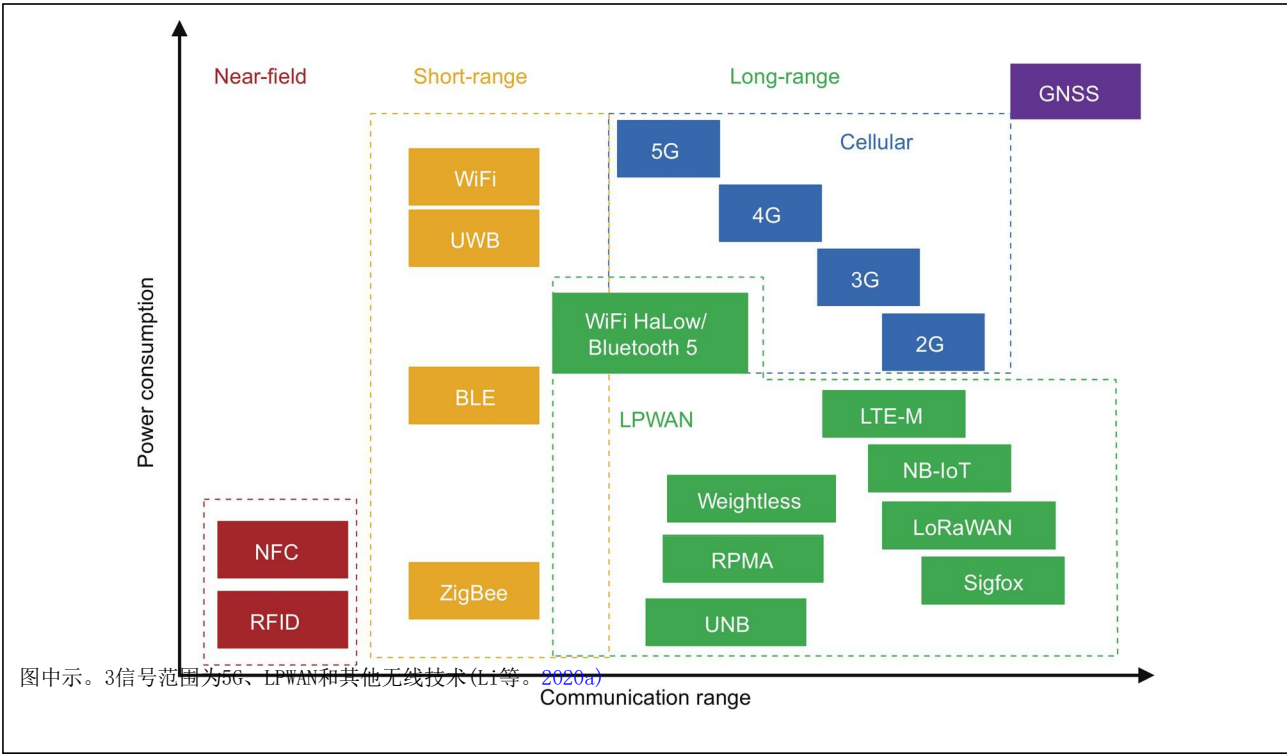


表7典型的活动量计和消费者级惯性传感器

各项目：	战术级（诺瓦特尔2020），通常用于移动地图	消费者级（TDK-InvenSense2020），通常用于消费电子产品
初始陀螺仪偏差	0.75 (°) /h	18,000 (°) /h
陀螺仪偏置于-40到+85° C	未提供	108000 (°) /h
陀螺仪刻度因子误差	0.03%	3%
加速度计的偏差	$1 \times 10^{-3} g$ ($g=9.80665m/s^2$)	$60 \times 10^{-3} g$
-40至+85° C	未提供	$180 \times 10^{-3} g$
加速度计比例因子误差	0.03%	3%
成本	\$, 1000级	\$10级

根据应用要求，选择一种合适类型的惯性传感器是很重要的。

INS可以提供自主的规划解决方案，这意味着它不需要接收外部信号或与外部环境的交互。当其他传感器的性能下降时，这种独立的特性使得在环境因素的影响下，它成为确保计划连续性和可靠性的有力候选者。基于INS的规划的一个重要误差源是传感器误差的存在，它会积累并导致漂移

计划解决方案。存在确定性的和随机的传感器误差。确定性误差（例如，偏差、尺度因子误差和确定性热漂移）的影响可以通过校准或在线估计来减轻（Li等。2015）。相比之下，随机传感器误差通常被建模为随机过程（例如，白噪声、随机游走和高斯-马尔可夫过程）(Maybeck1982)。随机模型的统计参数可以用功率谱密度分析、艾伦方差等方法来估计。，和小波方差(Radi等人。2019)。

全球导航卫星系统（作为初始化设定项）

GNSS使用卫星多延迟来定位接收器。它是使用最广泛、最商业化的规划技术之一。独立的GNSS和GNSS/INS集成是户外应用的主流计划解决方案。在自动驾驶中，GNSS从主PLAN传感器传输到第二机芯。主要原因是GNSS信号在城市和室内地区可能会退化。即便如此，高精度GNSS对于提供初始定位来减少其他传感器（如搜索空间和激光雷达）的计算负荷仍然很重要(莱文森等。2007)。

之前高精度专业人员和大众市场GNSS使用之间的界限很模糊。一个证据是高精度GNSS技术和大众市场芯片之间的集成。此外，最新的智能手机还能够提供高精度的GNSS测量值和计划解决方案。

表8列出了GNSS的GNSS定位技术。单点定位(SPP)和差分GNSS(DGNSS)是基于伪范围测量，而实时运动学(RTK)、精确点定位(PPP)和模糊分辨率PPP(PPP-AR)是基于载波相位测量。DGNSS和RTK是相对定位方法，通过对月球车和基础接收器的不同测量来减轻一些误差。相比之下，PPP和PPP-AR通过使用精确的卫星轨道校正、时钟校正和参数估计模型，在单个接收机上提供了精确的定位。它们通常需要几分钟才能收敛(Trimble2020)。

还有其他类型的平面传感器，如磁强计、里程表、UWB、超声波和假晶石。近年来，出现了相对较低的UWB和超声波传感器（例如（解波2020；2020）。这种传感器通常可以在30米的距离内提供下限测距精度。此外，苹果已经在iPhone11中构建了一个UWB模块，这可能为室内规划带来新的机会。总之，表9说明了现有规划传感器的原理、优缺点。

室内导航的技术与算法

平面图技术包括位置固定、死亡恢复(DR)、数据库匹配、多传感器融合和运动约束。图4展示了室内平面图技术。详情详见以下各小节。

位置固定技术

几何定位固定方法在过去的几十年里得到了广泛的应用，特别是在卫星定位和无线传感器网络领域。其基本原理是对距离和角度测量的几何计算。根据测量类型，位置固定方法包括基于范围定位（例如多角度定位、最小最大定位、质心定位、接近定位和双曲定位）、基于角度定位（例如多角度定位）和基于角度和范围定位（例如多角度定位）。图5显示了这些方法的基本原理。

基于范围的方法

设备的位置可以通过测量设备到至少三个已知位置的基站（或卫星）的距离来估计。最典型的方法是多定位（Guvenc和Chong2009），几何上是多球（三维定位）或圆（二维定位）的交点。此外，该方法也有几个简化版本。例如，最小-最大的方法(Will等。计算多个立方体或多个方块的交点，而质心法(Pivato等人。计算多个基站位置的加权平均值。此外，接近方法(Bshara等人。是通过使用最近的基站的位置来进行进一步的简化。同时，设备-基站范围的差异可以用来减轻设备分集和一些信号传播误差的影响(Kaune等。2011)。

对于定位位置，基站位置通常是手动设置或使用基站定位方法估计(Cheng等。2005)。将设备和基站之间的距离建模为路径损耗模型(PLM)，并估计参数(Li2006)。为了实现精确的测距，必须减少误差源的影响(如，电离层误差，

表8：GNSS定位技术

技术技术	准确性	测量方法	提高精度的方法
西班牙	表的液位	伪数据的范围	无任何类型的用户
地网	除米高度到米高度	伪数据的范围	差分的测量值
rtk	厘米水平度	载相	差分测量值，模糊性分辨率
每页数	除米标高到厘米标高	载相	精确的卫星轨道和时钟校正，浮动的模糊性
每参数	类似于RTK	载相	精确的卫星轨道和时钟校正，模糊的分辨率

表9平面图传感器的原理、优缺点

传感器	工作原理	产品优势	缺点
高清地图	使用详细的道路和基础设施数据为精确的定位和环境感知	高精度、高分辨率 丰富的环境和基础结构层	更新和精度要求高，精度要求高 发电和维护成本较高
激光雷达	利用红外光波测量直径，产生点云	测高精度密集点云 被用于消费设备中	高成本，大尺寸 使用寿命中的问题 依赖于特征的重要性 对光照的敏感度和对天气的依赖依赖于特征的重要性
摄像机	采集和分析图像以进行定位和感知的目的	低成本的成本 密集的点云与颜色的被动感知	测量密度较低，无法检测到标记
雷达	使用无线电波进行测距和对对象检测结果	低成本，准确的范围 小，用于汽车 消费设备支持的现有基础设施	RSS表示的精度低 无线信号固有的WiFi问题中的高功耗（例如，多路径、NLoS和变化）
WiFi/电缆	使用本地通信信号进行定位	消费设备支持的现有基础设施 新功能，如小型化基站和mmWaveMIMO	RSS表示的精度低 无线信号固有的问题当前基站密度较低
5G	使用下一代蜂窝电话信号进行定位	由物联网设备支持	RSS表示的精度低
磅湾	使用物联网信号进行定位	低成本的成本 低功耗，长期使用	无线信号所固有的问题
英寸数	测量角速率和线性比力，以推导出运动状态	独立存在的 短期内表现稳健 消费设备中的现成传感器处于全运动状态	相对导航解决方案，高端传感器成本高 低成本传感器出现重大错误
地角	使用卫星三边技术定位设备	全局绝对位置固定 聚合时的高精度（使用RTK/PPP） 消费设备支持 高精度测距仪 成本正在降低，并被用于消费类设备中	城市和室内信号退化 假装会被堵塞和恶搞 态度判断能力相对较弱 需要无线信号固有的额外基础设施问题
	UWB/超声波精确定位影响		

对流层误差、壁面效应和人体效应)。此外，还需要减少端设备因素（例如，设备多样性）的影响。

研究工作(Petovello2003)描述了基于范围的规划算法及其质量控制。与此同时，研究工作（兰利，1999年)提出了一个用于评估信号几何形状指数(即精度的稀释度)。强几何是精确范围定位的必要条件，而不是精确范围定位的充要条件，因为其他的误差源，如随机误差源。

基于角度的方法

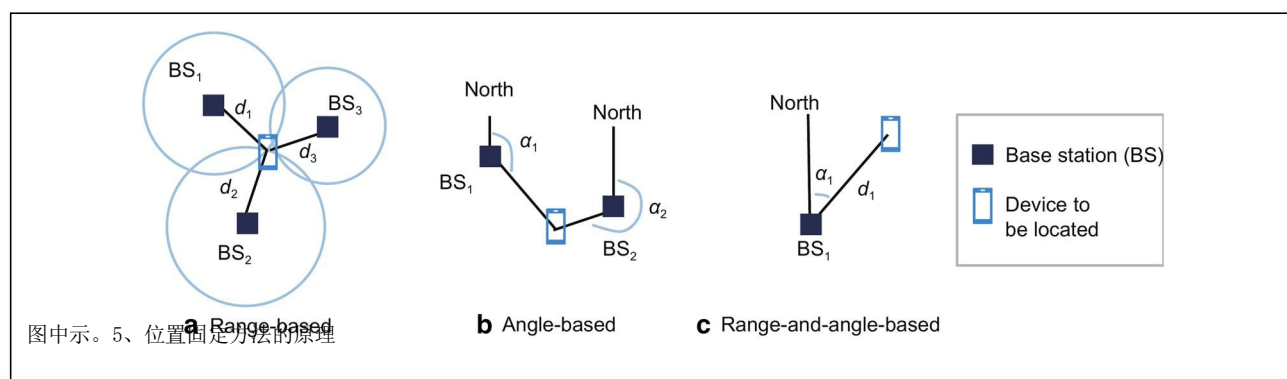
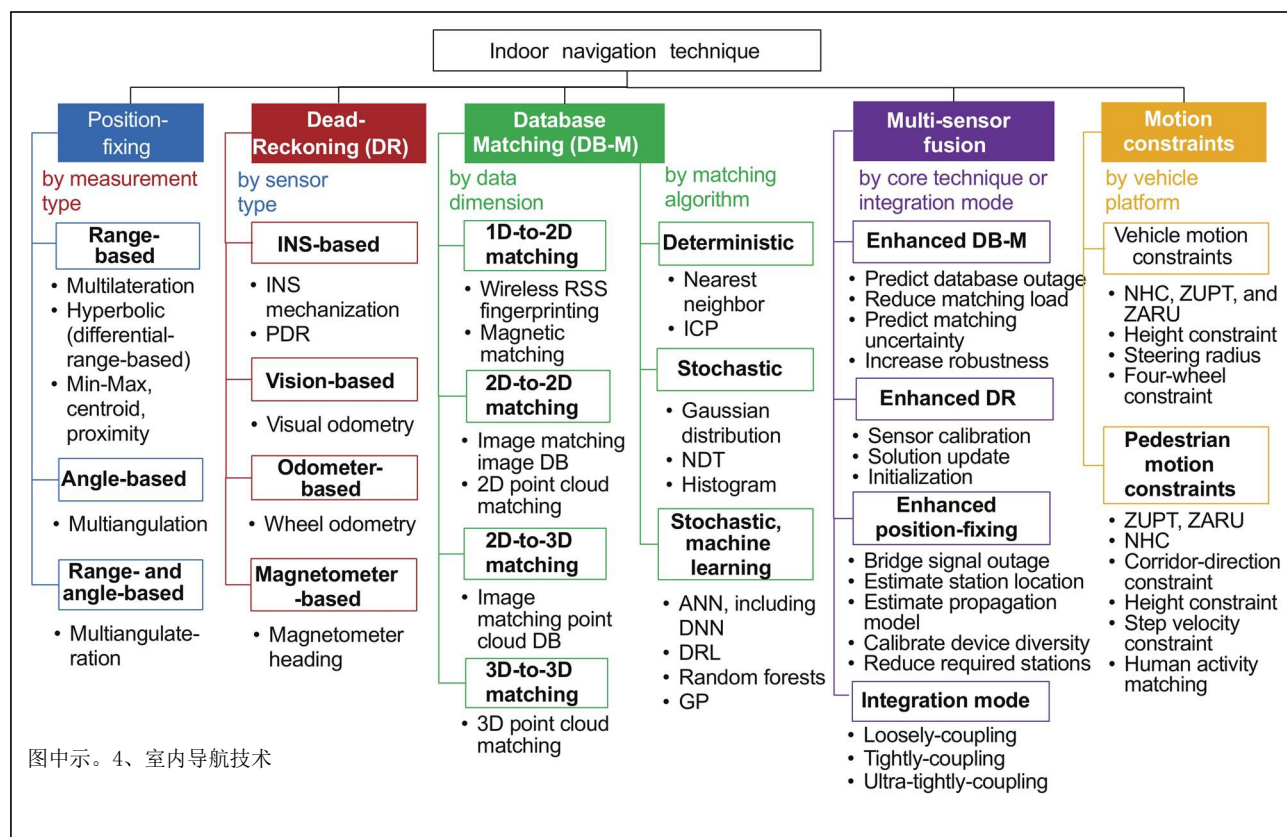
三角测量是一种典型的基于AoA的规划方法，通过使用多个已知位置的基站来计算设备位置(Bai等。2008)。当考虑到方向测量的不确定性时，来自两个基站的方向测量将相交于一个四边形。

研究工作(王和Ho2015)提供了三角测量方法的理论推导和性能分析。

基于角度的平面解决方案通常可以在小区域（例如30米乘30米）中提供高精度（例如，级）（Quuppa2020）。挑战是AoA系统需要特定的硬件（如天线阵列和相位检测机制）(Badawy等。)，这既复杂又昂贵。有一些低成本的基于角度的解决方案，比如使用来自多个方向天线的RSS测量(Li等。2020b)。然而，对于广域应用，角度测量和平面图的精度都显著下降。蓝牙5.1（蓝牙2019）增加了方向测量，这可以改变基于角度的平面图。

基于角度和范围的方法

多角度化是一种典型的基于角度和范围的规划方法，使用其方法计算设备位置



与具有已知位置的基站的相对方向和距离。该方法在工程测量中得到了广泛的应用。对于室内平面图，解决方案是将设备定位到安装有天花板的AoA基站（Quuppa2020）和已知的天花板高度。这种方法是可靠的，而且它减少了对基站数量的依赖性。然而，在广域应用中使用的成本很高。

一般来说，几何位置固定方法适合环境（如，户外和开放

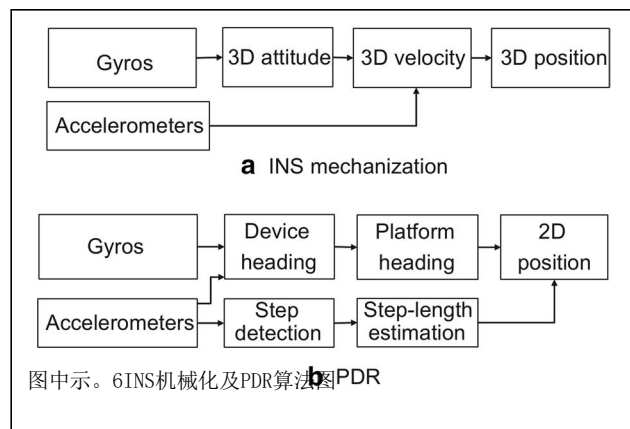
这可以被很好地建模和参数化。相比之下，由于存在多路径、NLoS条件和人体效应等错误源，因此在复杂的室内和城市地区使用这种方法更具有挑战性。李调查等。有对定位固定方法的错误来源的详细描述。通过定位固定技术本身，难以缓解设备、信号传播和基站相关的误差源。因此，通常要与其他PLAN技术进行集成，如DR和数据库匹配。

死计算技术

DR技术的基本原理是利用以前的导航状态以及角性运动和线性运动来推导出当前的导航状态。角性运动和线性运动可以通过测量传感器，如惯性传感器、照相机、磁力计和里程计来获得。其中，惯性传感器被最广泛地应用于DR。基于惯性传感器的主要DR算法：INS机械化和PDR。前者广泛应用于陆载车辆、机载和舰载规划的应用，而后者是一种常用的行人导航方法。图6显示了INS机械化和PDR算法的流程。INS可以提供三维导航结果，而PDR是一种二维导航方法。

INS机械化的工作是基于三维角速率和线性加速度的积分。(2004)。陀螺测量的角率用于连续跟踪传感器框架和导航框架之间的三维姿态。然后利用所获得的姿态将加速度计测量的比力转换为导航框架。然后，将重力向量添加到特定的力中，以获得导航框架中的设备的加速度。最后，综合一次和两次加速度，分别确定三维速度和位置。因此，剩余的陀螺仪和加速度计的一般偏差会分别导致与时间切割和时间平方成正比的位置误差。

相比之下，PDR算法(Li等人。通过使用前面的位置和最新的标题和步长来确定当前的二维位置。因此，它包括平台头估计、步长检测和步长估计。平台的标题通常是通过添加设备-平台的不对齐来计算的。进入设备标题，可以通过态度和标题参考系统(AHRS)算法进行跟踪(Li等。2015)。已检测到这些步骤



通过发现加速计和陀螺测量中的周期性特征(阿尔瓦雷斯等。而步长通常是通过训练一个包含步行相关参数(如腿长和步行频率)的模型来估计的(Shin等。2007)。

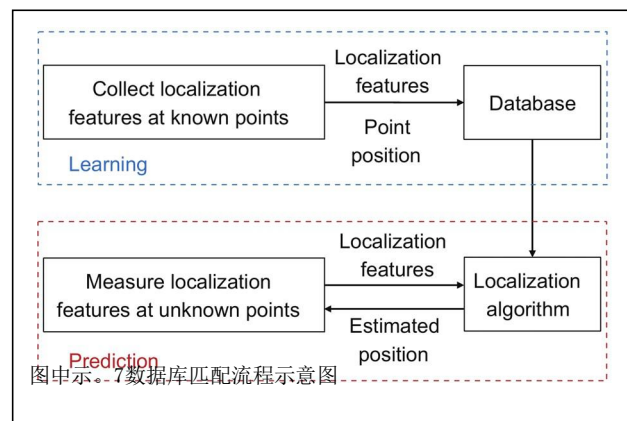
还有基于其他类型传感器的DR算法，如视觉测深(斯卡拉穆扎和弗伦多弗2011)和车轮测深(布伦克等。2018)。磁力计，等人。也用于标题的确定。

为了实现一个鲁棒的长期DR解决方案，有几个挑战，包括传感器错误的存在(Li等。)，设备和平台之间存在不对准角度(Pei等。)，以及对位置和标题初始化的要求。此外，数据的连续性对DR也非常重要。在一些应用中，有必要插值、平滑或重建数据是必要的。(2016)。

由于其具有独立的特点和强大的短期解决方案，DR已成为连续和无缝的室内外规划方案的核心技术。当其他计划技术有效时，它可以补充其他计划技术，或者桥接其信号中断和性能下降期。

数据库匹配技术

数据库匹配的原理是计算数据库中测量到的指纹与参考指纹之间的差值，并找到最接近的匹配值(Li等。2020a)。数据库匹配技术被用于处理来自各种传感器的数据，如照相机、激光雷达、无线传感器和磁强计。数据库匹配过程包括特征提取、数据库学习和预测等步骤。图7展示了这些流程。首先，从原始的传感器信号中提取出有价值的特征。然后，将多个参考点上的特征组合到



生成一个数据库。最后，将实时测量的特征与数据库中的特征进行了比较，以定位设备。

根据测量尺寸和数据库尺寸，数据库匹配算法可分为1维（测量）到2维（数据库）匹配、二维到二维匹配、二维到三维匹配和3维到三维匹配。在一维到二维的匹配中，实时特征测量可以表示为一个向量，而数据库是一个矩阵。这种匹配方法已被用于匹配无线RSS等特征。和磁性强度(Li等人。2018)。二维到二维匹配的例子是实时图像特征（例如，道路标记）和图像特征数据库（例如，道路标记图）的匹配（Gruyer等。，以及二维激光雷达点和网格地图的匹配(德宝拉维罗内塞等。2016)。相比之下，二维到三维的匹配是当前的热点。例如，它将图像与三维点云图相匹配(Wolcott和Eustice2014)。最后，三维到三维匹配的一个例子是匹配三维激光雷达测量和三维点云图(Wolcott和Eustice2017)。

根据预测算法，数据库映射算法可以分为确定性算法(如最近邻等。和迭代最近点(ICP)(切特维里科夫等人。和随机分布（如高斯分布）(Haeberlen等人。2004年)，正态分布变换(NDT)(Biber和Straßer2003)，直方图(Rusu等。，和以机器赚钱为基础的一个)。机器学习方法，如人工神经网络(ANN)（Li等。随机森林(Guo等人。2018年)，深度钢筋

学习(DRL)(Li等人。和高斯过程(GP)(Hahnel和Fox2006)也被应用。

随着机器学习技术的快速发展和现代平面应用的多样性，数据库匹配比几何方法受到了更多的关注。数据库匹配方法适用于难以建模或参数化的场景。另一方面，实时测量与数据库的不一致是数据库匹配的主要错误源。这种不一致可能是由于新环境的存在、不同的环境和其他因素造成的。李调查等。有一个关于数据库匹配的错误源的详细描述。

多传感器融合

传感器的多样性和冗余对于确保计划系统的高水平鲁棒性和安全性至关重要。这是因为各种传感器具有不同的功能。除了其主要功能外，每个传感器还具有至少一个辅助功能，以辅助其他传感器的计划。表10显示了不同传感器的主要和第二功能。

由于其不同的功能，不同的传感器提供了不同的类人感官。表11列出了人体不同感官对应的平面传感器。同样类型的类人传感器可以提供彼此的备份或增强。同时，不同类型的类人传感器也是互补的。因此，通过融合来自各种传感器的数据，可以实现额外的鲁棒性和安全性。

表10各传感器的主要和次要功能

传感器	主要功能	辅助功能
高清地图	精确的定位和环境感知	通过映射匹配激光雷达来约束定位解决方案
的基于点云定位	提供环境模型和约束条件	基于精确
摄像机	提供视觉测深法和视觉SLAM，或将图像与数据库相匹配	提供环境模型和约束条件
雷达	测距和目标检测	在充满挑战的照明条件下增强摄像头
英寸数	提供连续的独立的位置、速度和姿态	其他传感器的桥接断开，并辅助其他传感器的信号采集
磁力计	提供绝对的标题	通过磁性匹配来提供位置
里程表	提供绝对的速度和相对的距离	限制INS误差的漂移，以及桥接GNSS和视觉信号中断
压力	提供绝对高度	确定地面水平面，并限制INS高度误差的漂移
地角	提供绝对的位置、速度和时间	帮助初始化灾难R和数据库匹配
超行	提供绝对的位置	加强室内和城市地区的GNSS和INS
超声波检查	提供绝对的位置	在充满挑战的天气条件下加强导航功能
可见光	提供绝对的位置	可靠的里程碑更新
WiFi/电缆	提供绝对的位置	帮助初始化INS和数据库匹配
5G	提供绝对的位置	建模多路径环境

表11与人体不同感官对应的平面传感器

人类感应智能手机		车辆
眼睛	摄像机	激光雷达用照相机
耳朵	GNSS、WiFi、无线手	GNSS, 雷达、超声波、
机、UWB	(新的)、5G (未来 的)、麦克风	UWB、5G (未来)、麦 克风
移动方向	陀螺仪, 磁强仪	陀螺仪, 磁强仪
移动距离	加速度计	里程表、加速度计
内存	地图	高清地图, 地图

决策体的来说, 处理位置定位和数据库匹配方法, 信号或特征的丢失会导致计划解决方案中的中断。此外, 模型和数据库参数中的更改可能会降低PLAN的性能。为了缓解这些问题, 可以使用DR技术 (El-Sheimy和Niu2007a、b)。此外, 使用其他技术可以通过更先进的基站位置估计来增强位置固定 (程等。 , 传播模型估计 (Seco和Jimenez2017), 以及设备多样性校准 (He等。 2018)。此外, 所需的基站的数量也可以减少。 2020b)。另一方面, 定位固定和数据库匹配技术可以为DR提供初始化和定期更新 (Shin2005), 这反过来校准传感器, 抑制DR结果的漂移。

数据库匹配也可以通过其他技术来增强。例如, 固定位置的方法可以用于减少数据库匹配的搜索空间。 , 预测未访问区域的数据库 (Li等人。 , 并预测了数据库匹配结果的不确定性。 2019e)。此外, 还可以通过整合位置定位和数据库匹配技术来实现更健壮的计划解决方案 (Kodippili和Dias2010)。

从集成模式的角度来看, 集成分为三个层次。第一级是松散耦合 (Shin2005), 它融合了来自不同传感器的计划解决方案。第二个层次是紧密耦合的。 , 融合各种传感器测量, 以获得计划解决方案。第三层是超紧耦合, 它使用一些传感器的数据或结果来提高其他传感器的性能。

运动约束条件

运动约束被用来从算法的角度来增强计划的解决方案, 而不是增加额外的传感器。这种约束对于负担不起的低成本计划系统特别有用

额外的硬件成本。对于陆基车辆, 当车辆以足够的速度移动时, 非完整的约束条件 (NHC) 可以显著提高航向和位置的精度 (牛等。 , 而零速度 UPdaTe (ZUPT) 和零角率

更新 (ZARU, 也称为零集成迎头率 (ZIHR)) 在车辆准静态时分别提供零速度和零角率约束 (Shin2005)。当车辆以低速移动时, 可以施加转向约束 (牛等。 2010)。此外, 还有其他的约束, 如高度约束 (Godha和Cannon2007) 和四轮约束 (布伦克等。 2018)。

关于行人导航, ZUPT (Foxlin2005) 和ZARU (Li等人。是最常用的方法。此外, NHC和步长速度约束 (庄等。 2015年) 已被申请。此外, 在室内环境中, 约束, 如走廊方向约束 (阿卜杜勒拉希姆等。 , 高度约束 (Abdulrahim等人。 , 以及人类活动的约束 (Whou等。有助于增强计划解决方案。

用例

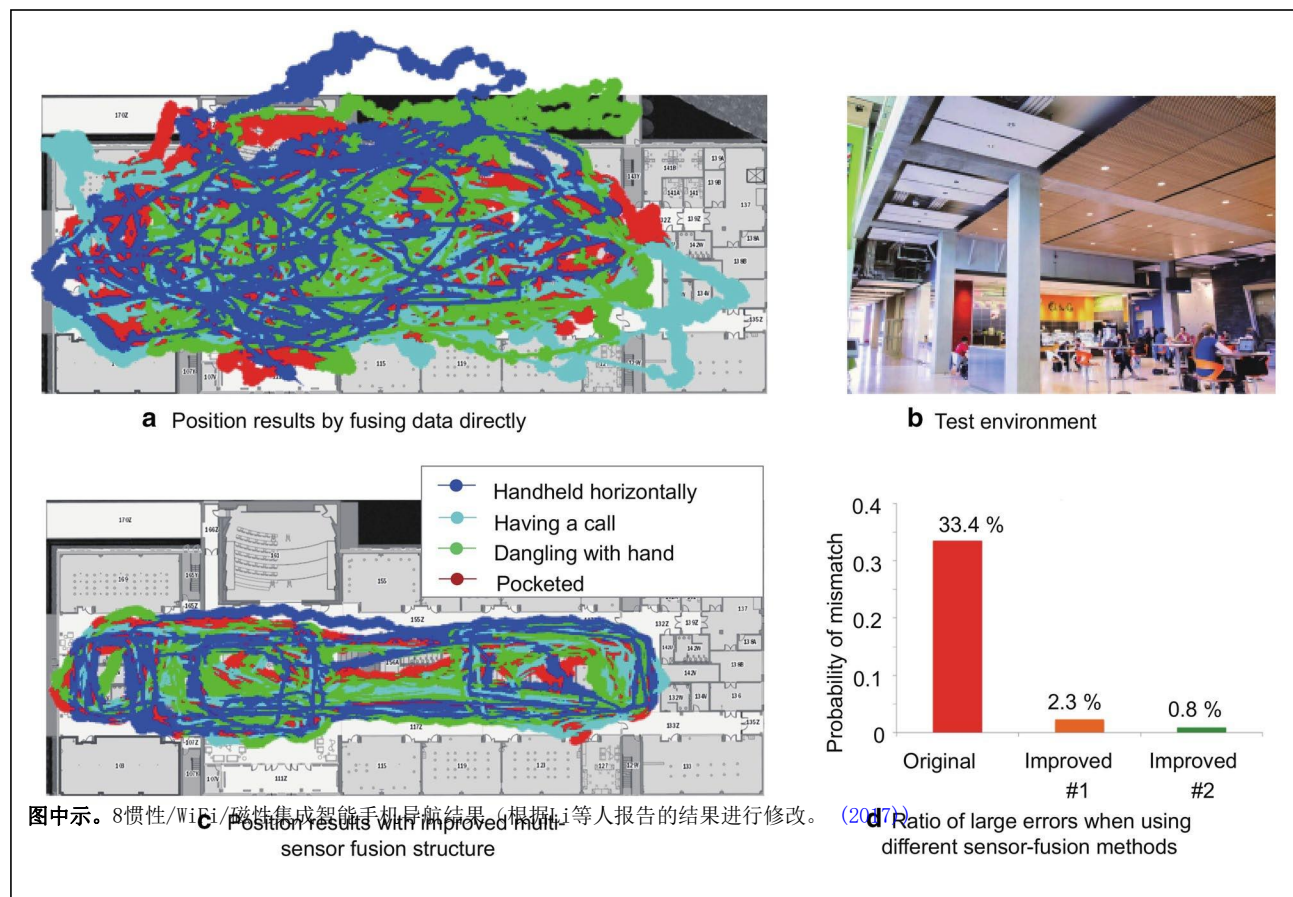
基于多传感器的室内导航已经被应用于各种应用, 如行人、车辆、机器人、动物和运动。本章介绍了一些示例。我们展示了我们以前的三个室内导航案例。二手车辆平台包括智能手机、无人机和机器人。

智能手机

这个案例使用了一个增强的信息融合结构来改善智能手机的导航 (Li等。 2017)。该实验使用内置的惯性传感器、WiFi和磁力计。结合PDR、WiFi数据库匹配和磁匹配的优点, 提出了一种多级质量控制机制。基于传感器的相互作用, 提出了一些质量控制方法。例如, 无线定位结果被用于限制磁匹配的搜索范围, 以减少计算负载和失匹配率。

用户携带着一部手机, 在一座现代化的办公楼 (120米乘60米) 里导航了近一个小时。这款智能手机经历了多种运动模式, 包括水平手持、手悬空、打电话, 以及在裤口袋里。

该位置的结果如图所示。8. 7A当直接将来自PDR、WiFi和磁性的数据融合到卡尔曼滤波器中时, 结果会出现很大的位置误差。大位置误差比 (大于15m) 达到33.4%。这样的解决方案对于用户导航还不够可靠。通过使用改进后的方法



多源融合后, 大误差比降低到0.8%。该用例表明了传感器交互作用和鲁棒多传感器融合的重要性。

无人机系统

这个用例集成了一个低成本的IMU、一个气压计、一个质量流量传感器和用于室内无人机导航的超声波传感器(Li等。2019a)。来自质量流传感器的正向速度以及横向速度和垂直NHC可用于三维速度更新。

图9显示了测试方案和选定的结果。室内飞行测试在20米乘20米的区域进行, 四旋翼无人机配备了InvenSenseMPU6000IMU、霍尼韦尔HMC5983磁强计三联仪、TEMS5611气压表、传感器SFM3000质量流量传感器和火星超声波信标。另外, 四个超声波信标安装在4根静态水准柱上, 高4米。

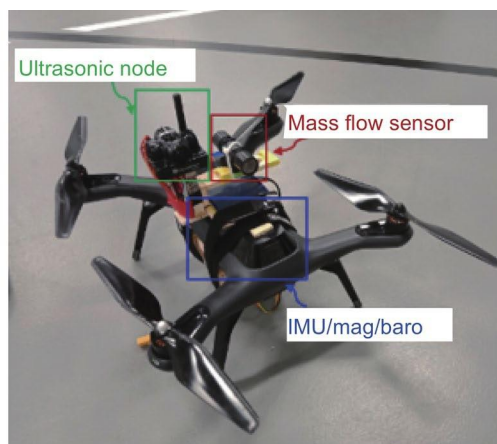
当使用超声波范围时, 该系统实现了一个连续和平稳的导航解决方案,

其导航精度大约为一厘米到十米级。然而, 在超声波信号中断时, 分别导航5、10、15、20、30和60s时, 平均精度下降到0.2、0.6、1.0、1.0、1.3、1.8和4.3m。

机器人技术

该用例集成了一个光电二极管和一个凸轮时代的室内机器人导航(庄等。2019)。图10显示了测试平台和选择的结果。试验区域的尺寸为5m乘5m乘2.84m, 其中5个CreeT6发光二极管(LED)均匀地安装在天花板上作为光信标。实验中使用的接收器包含一个OPT101光电二极管和一个智能手机的前摄像头。该接收器被安装在一个在1.25米高度的移动机器人上。

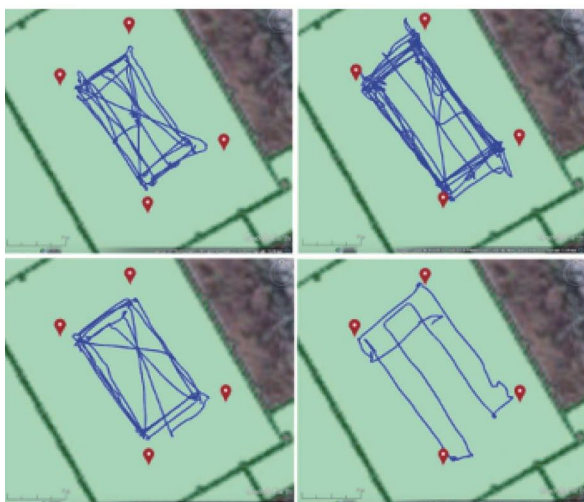
现场测试结果表明, 该系统在动态测试中提供了一种三维定位平均精度为15.6cm的半实时定位解决方案。当使用更多的传感器时, 该精度有望进一步提高。



a Application platform (indoor drone)

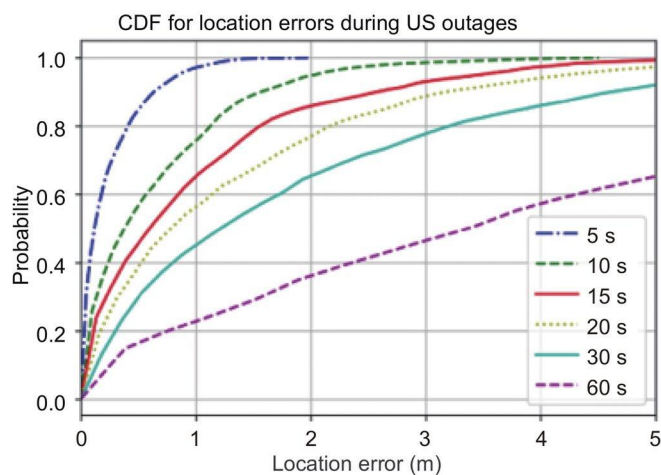


b Test scenario



图中示。9INS/气压表、质量流量/超声波综合导航（根据Li等人报告的结果进行修改。(2019a)）

c Horizontal navigation solution when ultrasonic data was used



d Location errors during ultrasound signal outages

未来的发展趋势

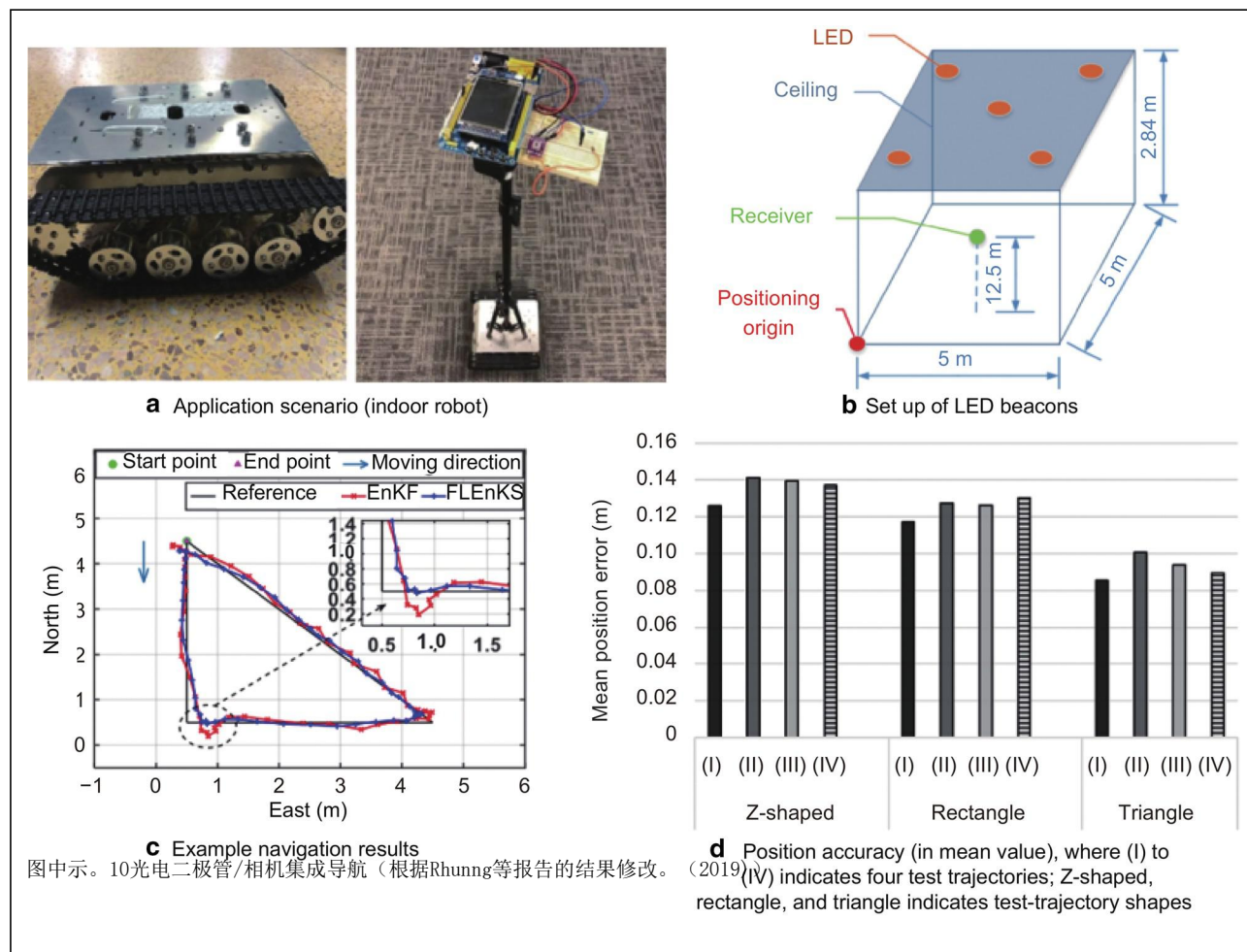
本节总结了室内规划的未来趋势，包括传感器的改进、传感器的使用、多平台、多设备和多传感器信息融合、自学习算法和系统的开发、与5G/物联网/边缘计算的集成，以及在室内规划中使用高清地图。

传感器的改进

表12说明了传感器的未来趋势。激光雷达、雷达、惯性传感器、GNSS和UWB等传感器正在开发中

朝着低成本和小型的方向发展，以促进其商业化。对于高清地图来说，降低维护成本和增加更新频率是关键。该相机可以进一步提高其物理性能，如自清洁、更大的动态范围、更强的低光灵敏度和更强的近红外灵敏度。

预计新的无线基础设施功能(如5G、LPWAN、无线无线、无线无线、无线RTT、蓝牙远程和蓝牙定位)和新传感器(如UWB、激光雷达、深度相机和高精度GNSS)将为计划社会带来新的方向和机遇。



多平台、多设备、多传感器信息融合

规划系统将发展为实现多个平台、多个设备和多个传感器的集成。图11为多平台集成平面图的示意图。

随着低成本小型化卫星和低地轨道(Leo)卫星技术的发展, 利用Leo卫星提供天基导航信号已经变得可行。该研究论文(Cluzel等人。使用Leo卫星来增强物联网信号的覆盖范围。此外, 该论文(王等人。分析了来自Leo卫星的导航信号。除了天载平台外, 还有机载和地下平面图平台。例如, 研究论文(Sallouha等人。2018年)利用无人机作为基站来加强规划。

协作计划也是一个未来的发展方向。研究内容在(张等人。回顾了5G合作定位技术, 并指出

协同定位可能是5G网络的一个重要特征。在未来的几年里, 大型设备、密集的基站和设备间通信的特性可以使精确的协同定位成为可能。除了多个设备之外, 在同一人体或车辆上还可能存在多个设备(例如, 智能手机、智能手表和物联网设备)。来自这些设备的信息也可以用于增强计划。

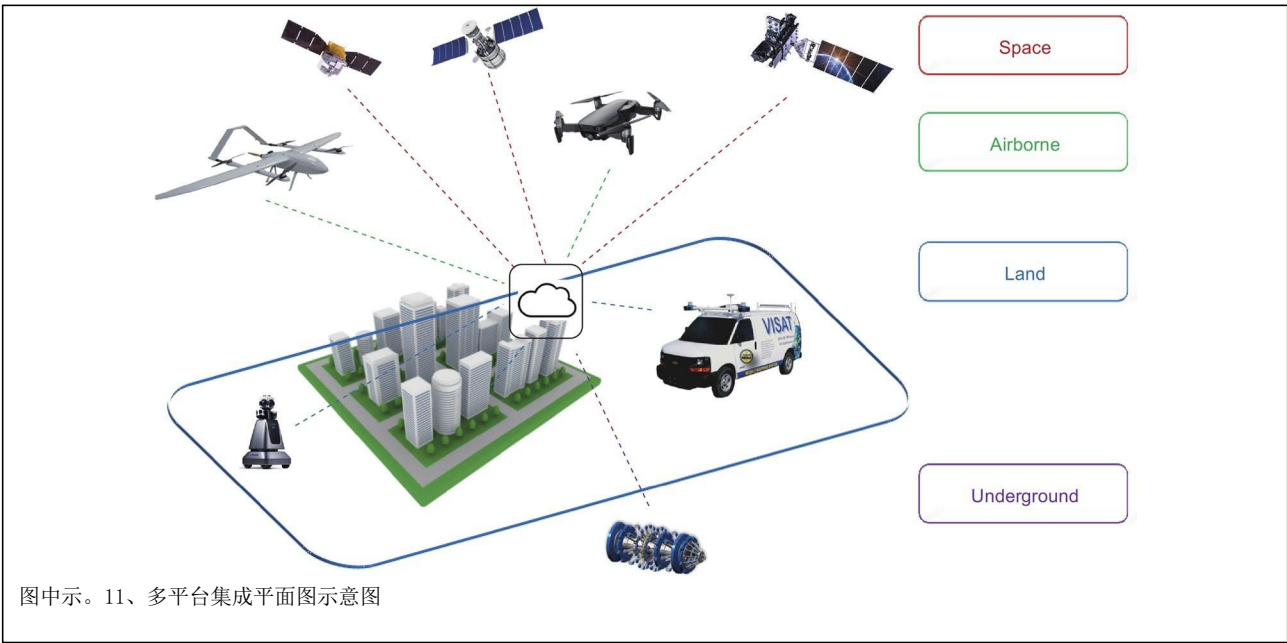
自学习算法和系统

人工智能

随着物联网和基于位置的服务的普及, 更复杂和更新的规划方案将会出现。如果是这样, 则需要自学习计划算法和系统。已经在各种规划模块中使用人工智能技术, 如初始化、传感器集成模式转换和参数调整。研究论文。使用ANN来生成

表12平面图传感器的未来趋势

传感器	未来的发展趋势
高清地图	降低了维护成本（例如，通过众包来实现） 提高了更新的频率
激光雷达	成本更低，尺寸更小 更范围
摄像机	提高了物理性能（如，自清洗、动态范围改进、低光灵敏度更强和近红外灵敏度更强）
雷达	降低了成本 提高了测量密度
WiFi/电缆	工作范围更长，功耗也更低 新的范围和方向测量值
5G	密度和更小型的基站 多路径辅助定位；协同定位，新的范围和方向测量
磅湾	基站密度较高 新的范围和方向测量值
英寸数	降低传感器错误
地角	多频、多系统 尺寸较小，功耗也较小
UWB/超声波	降低了成本 低成本系统的范围



平面解决方案直接从惯性传感器数据，而研究工作(李等。使用DRL从另一个角度执行无线定位。在未来，将会有大量的数据

满足人工智能的要求。同时，随着人工智能算法、计算能力和通信能力的进一步发展

计划和人工智能之间的集成将变得更加紧密。

数据众包（例如，协作位置）

来自众多消费电子产品和传感器网络的数据将使众包（例如，定位）成为现实。正如高清地图小节中提到的，众包技术可以从根本上改变地图和高清地图的生成的模式。此外，使用众包数据可以提高计划的性能。例如，在地图可用性和感知范围的团队中，众包数据比自我的汽车包含更全面的信息。另一方面，正如在书中所指出的那样，如何从众包的大数据中选择最有价值的数据库来更新数据库仍然是一项挑战。在没有人工干预和缺乏评估参考的情况下，软件很难自动评估数据的可靠性。

与5G、物联网和边缘/雾计算的集成

如5G小节所述，5G和物联网技术的开发正在改变计划。新功能（如密集的小型化基站、毫米波MIMO和机间通信）可直接增强平面图。此外，5G/物联网和边缘/雾计算的结合将带来新的规划机会。边缘/雾计算允许数据处理尽可能接近源，以更快的速度实现计划数据处理，减少延迟，并提供总体更好的结果。综述论文（Oteafy和哈桑宁，2018年）和（Shi等人。分别提供了边缘计算和雾计算的详细概述。这种技术可以能够改变高清地图和计划上的现有操作模式。通过使用SLAM和人工智能技术，您可以在线修复或优化高清地图。

室内导航用高清地图

高清地图将从户外扩展到室内。汽车、地图、5G和消费设备制造商之间的合作已经显示了其重要性（2017）。高清地图的高精度和丰富的信息使其成为一个有价值的室内平面图传感器，甚至是一个连接人、车辆和环境的平台。室内外计划可能需要不同的高清地图元素。因此，可以根据不同的场景开发不同的高清地图。与户外类似，室内高清地图的标准化将非常重要，但具有挑战性。

试验结论

本文首先回顾了室内导航的市场价值，包括社会效益和经济价值，然后从标记的角度和主要参与者进行分类。然后，它比较了最先进的传感器，包括导航传感器和环境感知（作为辅助导航传感器），以及技术，包括位置固定、死亡计算、数据库匹配、多传感器融合和运动约束。最后，指出了传感器的改进、多传感器、多设备和多传感器信息融合的使用、自学习算法和系统的开发、与5G/物联网/边缘计算的集成，以及高清地图的未来趋势。

作者的贡献

东北设计了文章的结构、一般内容、结构和写作部分。YL协助总结和撰写手稿。两位作者都已经阅读并批准了最终的手稿。

作者的信息

纳泽·埃尔·谢米是卡尔加里大学地质工程系的教授。他是加拿大工程师学会和美国导航学会的研究员，也是加拿大地质学多传感器系统的一级研究主席。他的研究专长包括地质学多传感器系统、GPS/INS集成和移动映射系统。他也是专业定位公司的创始人和首席执行官。他出版了两本书、6个章节，在学术期刊、会议和研讨会上发表了450多篇论文，并获得了30多项论文奖项。他指导并毕业了60多名硕士和博士学位。D. A学生们。他获得了许多国家和国际奖项，包括ASTech“阿尔伯塔省技术的领导能力”奖，以及阿尔伯塔省专业工程师、地质学家和地质物理学家协会(APEGGA)的教育卓越奖。

李你是卡尔加里大学的高级研究员。他获得了博士学位。D. 2016年获武汉大学和卡尔加里大学的学士学位，2020年被选为国家青年人才项目。他的研究重点集中在无处不在的物联网本地化上。他主持了四个国家研究项目，并与人共同发表了70多篇学术论文，拥有20多项专利。他曾担任《IEEE传感器杂志》的副编辑，也是IAG无人驾驶系统和ISPRS移动地图工作组委员会成员。他获得了四个最佳论文奖，并赢得了EvAAL国际室内本地化比赛。

资金

这项工作得到了加拿大研究主席项目的支持(GrantNo. rt691875)。

数据和材料的可用性

数据共享不适用于本文，因为本文中没有生成或分析用于任何数据集。

相互竞争的利益

作者宣称，他们没有相互竞争的利益。

收到：2020年11月3日接受：2021年2月9日

Published online: 03 May 2021

参考文献

- 阿卜杜勒拉希姆, 隐藏着, C., 摩尔, t., 和希尔, C. A. (2010). 协助 MEMS IMU 与大楼前往室内行人导航. *2010 年无处不在的定位室内导航和定位服务*. 赫尔辛基: IEEE.
- 阿卜杜勒拉希姆, 隐藏着, C., 摩尔, t., 和希尔, C. A. (2012). 对鞋装室内行人导航使用约束条件. *航海杂志*, 65 (1), 15-28.
- 阿样, S. (2017). 宝马, 这里和手机眼团队为自动驾驶高清图的来源. 网: <http://www.2017/02/21/bmw-here-and-mobileye-team-up-to-crowd-sourcing-hd-maps-for-self-driving/#6f04e0577cb3> Accessed, 2020 年 4 月 28 日.
- 代理机构, E. G. A. (2019). 报告道路使用者的需求和要求. 网: http://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Report_on_User_Needs_and_Requirements_Road.pdf. 已于 2020 年 4 月 28 日访问.
- 阿尔瓦雷斯, 华盛顿州医学博士., 冈萨雷斯, R. C. A., 洛佩兹, A., 和阿尔瓦雷斯, J. C. A. (2006). 来自可磨损加速度计装置的步长估计器的比较. *IEEE 医学与生物工程国际年会*. 5964-5967. IEEE: 纽约.
- 安德鲁斯, J. G., 布齐, S., 崔, W., 汉利, S., 五, 洛扎诺, A., 宋楚瑜, A. A. C. AK 和 K. (2014). 5G 将是什么? *IEEE 通信选择领域杂志*, 32 (6), 1065-1082.
- 巴多, A., 卡塔布, 特林切罗, D., 傅, T. E., & 穆罕默德, A. (2014). 一个简单的 AoA 估计方案. 阿夏: 1409. 5744.
- 白, L., 彭, C. Y., 和比斯瓦斯, S. (2008). 从两个 ULAs 估计的 DOA 的协会. *IEEE 仪器和测量学报*, 57 (6), 1094-1101. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.915122>.
- 巴斯纳亚克, 威廉姆斯, 阿尔维斯, P. 和拉卡佩尔, G. J. G. A. W. (2010). GNSS 驱动器可以是 V2X 吗? *GPS 世界*, 21 (10), 35-43.
- Biber, P., & Straßer, W. (2003). 正态分布变换: 一种激光扫描匹配的新方法. 论文集 2003 年 IEEE/RSJ 智能机器人和系统国际会议 (IROS) (pp. 2743-2748). IEEE: 拉斯维加斯, 内华达州.
- 请使用蓝牙技术. (2017). 探索蓝牙 5-走距离. 网: <http://www.bluetooth.com/blog/exploring-bluetooth-5-going-the-distance/>. 已于 2020 年 4 月 28 日访问.
- 请使用蓝牙技术. (2019). 蓝牙 5.1 查找方向. <https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2019/05/BTAsia/1145-NORDIC-Bluetooth-Asia-2019Bluetooth-5.1-Direction-Finding-Theory-and-Practice-v0.pdf> Accessed, 2020 年 4 月 28 日.
- 布罗萨德, 先生, 巴罗, 邦纳贝尔, S. (2020). ATIMU 的死亡计算. *《IEEE 智能车辆交易报》*, 5 (4), 585-595. <https://doi.org/10.1109/TIV.2020.2980758>.
- 布伦克, 沃尔格姆斯, 弗雷和高特林. (2018). 里程测量 2.0: 一个基于滑动自适应 EIF 的四轮里程测量模型的停车. *IEEE 智能车辆交易报*, 4 (1), 114-126.
- 巴拉, 硕士, 奥格纳, 古斯塔夫森, 范比森. (2011). 使用 HMM 滤波器和单元 ID 测量的鲁棒跟踪. *《IEEE 车辆技术学报》*, 60 (3), 1016-1024.
- 镭含量, C., 卡隆, 卡里洛, 拉蒂夫, 斯卡拉穆扎, D., 尼拉, J., 等人. (2016). 同时定位和映射的过去、现在和未来: 走向稳健的感知时代. *《IEEE 机器人学报》*, 32 (6), 1309-1332.
- 陈先生, C., 赵, P., 卢, C. A. 十., 王, w., 马卡姆, A., & 三角心, A. A. (2020). 基于深度学习的行人惯性导航: 方法、数据集和设备推理. *IEEE 物联网杂志*, 7 (5), 4431-4441.
- Y 成, C., 查瓦斯, 拉马卡, A., & 克拉姆, J. (2005). 都市规模无线网络定位的精确特性定位. 在 *第三届移动系统、应用程序和服务国际会议的论文集* 中, *MobiSys2005* (页. 233-245). 华盛顿州西雅图: IEEE.
- 切特维里科夫先生, D., 毒子, D., 斯特帕诺夫, D., & 克塞克石油工业股份有限公司, P. (2002). 修剪后的迭代最近点算法. *基于服务机器人的用户交互所支持的对象识别*. 545-548. IEEE: 魁北克市, QC.
- 丘拉纳, 巴塞罗阿罗约和伊兹基尔多. (2007). 一种带有 IEEE802.11 数据帧的测距系统. *2007 年 IEEE 无线电和无线电研讨会* (页. 133-136). 长滩, 加州: IEEE.
- 克鲁泽尔, 弗兰克, 拉德齐克, 卡扎伦斯, 德文, M., 鲍多因, C., & 米雷斯库, D. A. (2018). 3GPP NB-IoT 覆盖扩展使用 Leosatelite 精英. *IEEE 车辆技术会议* (页. 1-5). 波尔图.
- 德宝拉·维罗内斯, L., 圭凡特, J., 脸颊, F. A. A., 奥利维拉·桑托斯, T., 穆兹, F., 德·阿吉亚尔, E., 等人. (2016). 一种在大规模和复杂的环境中使用自动驾驶汽车的轻而精确的定位系统. *2016 第 19 届智能交通系统国际会议 (ITSC)* (pp. 520-525). 里约热内卢.
- 解波波数. (2020). DWM1000 模块. 网: <http://www.wave.com/product/dwm1000-module/>. 已于 2020 年 4 月 28 日访问.
- 罗萨多, J. A., 拉马拉夫斯, 洛佩兹·萨尔塞多, J. A., & 格拉纳多斯节. (2017). 蜂窝移动无线电定位方法的调查: 从 1G 到 5G. *IEEE 通信调查教程*, 20 (2), 1124-1148.
- 道奇, D. (2013). 室内定位初创公司, 创新室内定位. https://dondodge.typepad.com/the_next_big_thing/2013/06/indoor-location-startups-innovating-indoor-positioning.html. 已于 2020 年 4 月 28 日访问.
- 埃尔谢米, N., 牛, X. (2007a). 对导航通信系统的承诺. 在 *GNSS 内部*, 2 (2), 46-56.
- 埃尔谢米, N., 牛, X. (2007b). 对导航通信系统的承诺. 在 *GNSS 内部*, 2 (2), 26-56.
- 埃尔谢米, N., 侯, h., 和牛, X. (2007). 利用艾伦方差对惯性传感器的分析和建模. *IEEE 仪器和测量交易记录*, 57 (1), 140-149.
- 埃尔谢米, N., 尤素福. (2020). 导航应用的惯性传感器技术: 最新技术和未来趋势. *卫星导航*, 1 (1), 2.
- 面心立方. (2015). 面心立方 15-9. <https://ecfsapi.fcc.gov/file/60001025925.pdf>. 访问 2020 年 4 月 28 日.
- 福克斯林, E. (2005). 在鞋上安装的惯性传感器的行人跟踪. *IEEE 计算机图形和应用程序*, 25 (6), 38-46.
- 高、Z、葛、M、李、Y、潘、Y、陈、Q、张、H. (2020). 多传感器建模辅助 BDS 三频精确定位及初步评估. *信息融合*, 55, 184-198.
- 格布雷, 埃格齐亚伯尔, 博士, 埃尔卡姆, G. 大卫·鲍威尔, 帕金森, B. W. (2006). 磁场域下磁力计的校准. *航空航天工程杂志*, 19 (2), 87-102.
- 格尼, C., & 利氏, D. A. J. R. S. (2010). 对 HDL64ES2 的静态校准和分析. 遥感器, 2 (6), 1610-1624.
- 戈达, 加衣. E. A. (2007). GPS/MEMSINS 城市导航综合系统. *GPS 解决方案*, 11 (3), 193-203.
- 戈尔德斯坦. (2019). 全球室内定位和室内导航 (IPIN) 市场展望, 2024 年. 网: <http://www.teinresearch.com/report/global-indoor-positioning-and-indoor-navigation-ipin-market-outlook-2024-global-opportunity-and-demand-analysis-market-forecast-2016-2024>. 已于 2020 年 4 月 28 日访问.
- 格耶鲁博士, 贝尔鲁西和雷维劳德, M. (2016). 从地图数据和道路标记检测中得到准确的横向位置. *具有应用程序的专家系统*, 43, 1-8.
- 郭, 十, 安萨里, N, 李, 李, H. (2018). 通过融合基于随机森林的一组指纹来进行室内定位. *IEEE 物联网杂志*, 5 (6), 4686-4698.
- 古文克, 我, 和冲, C. C. A. (2009). 对基于 TOA 的无线定位和 NLOS 缓解技术的调查. *IEEE 通信调查教程*, 11 (3), 107-124.
- 海伯伦公司, A., 弗兰纳里, E., 拉德, A. A. 先生, 鲁迪斯, A., 瓦拉奇公司, D. A. 美国, 和 Kavraki, 洛杉矶. (2004). 在大规模的 802.11 无线网络上进行实际的鲁棒定位. *第十届移动计算与网络国际会议论文集*. 70-84). 宾夕法尼亚州费城: IEEE.
- 哈内尔, B. F. AD., & 狐狸的, D. A. (2006). 基于信号强度的位置估计的高斯过程. 在 *机器人技术的发展过程中: 科学和系统*. 宾夕法尼亚州费城: IEEE.
- 哈培素, D., 胡, A., & 所有的, D. A. (2011). 工具版本: 正在收集 802.11n 跟踪与信道状态信息. *ACM SIGCOMM 计算机通信评论*, 41 (1), 53-53.
- 他, 陈, 陈. H. G., 余, 刘. (2018). SLAC: 无校准的计数器指纹融合, 用于室内定位. *《IEEE 移动计算学报》*, 17 (5), 1176-1189.
- 伊碧, A., 斯坦珀, 阿尔丁格, H., 纽豪森, 舒恩舍, 施利普辛, 萨利宁, 萨利宁和诺尔, A. A. (2013). 转向在停车场自动驾驶: 使用环境嵌入式激光雷达传感器进行车辆定位和跟踪. *2013 年 IEEE 智能车辆研讨会 (IV)* (页. 829-834). 黄金海岸: IEEE.
- 伊比希, 胡本, S., 迈克尔, M., 凯斯滕, R., 和舒勒, F. (2015). 通过嵌入在停车场的多摄像头监控系统进行任意对象定位和跟踪. *在视频监控和*

- 运输成像应用2015(pp页. 94070G). 旧金山, 加州: 国际光学和光子学学会。
- 我。(2020)。IEEE802.11TM无线局域网。http://www.ieee802.org/11/. 已于2020年4月28日访问。
- 考恩, R., 霍斯特, J., 和科赫, W. (2011). 对传感器网络中TDOA定位的精度分析。第14届信息融合国际会议。1-8。美国, 伊利诺斯州, 芝加哥。
- 金姆, K., 阿格拉瓦尔, V., 高纳德, 我, 盖利, R. 美国贝内特公司。L. (2016). 基于无线惯性传感器的人体运动采集集中缺少样本恢复。《IEEE神经网络和康复工程学报》, 24 (11), 1191-1198。https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2532121.
- 科迪皮利, N. S., 和迪亚斯, D. (2010). 整合指纹识别和三叶化技术, 以改善室内定位。2010年第七届无线和光通信网络国际会议。科伦坡: IEEE。
- 郭角和索林。(2018). 利用高斯过程映射的三维可伸缩磁场SLAM。2018年第21届信息融合(融合)国际会议(pp. 1353-1360). 剑桥。
- 兰利, 先生。(1999)。稀释的精度。GPS世界, 1 (1), 1-5。
- 勒格纳, 佩尔卡, 赫布鲁克, H. (2016). 有线和无线同步技术与时钟漂移补偿技术的比较。2016年第13届定位、导航和通信研讨会(WPNC) (页. 1-4)。例如: 不来梅。
- 莱文森, 蒙特莫洛, 斯伦。(2007). 在城市环境中, 基于地图的精确车辆定位。在《机器人学, 科学与系统》中。1)。佐治亚州亚特兰大市: IEEE。
- 莱文森, 瑟伦, S. (2010). 使用概率地图在城市环境中进行稳健的车辆定位。2010年IEEE机器人与自动化国际会议 (页. 4372-4378)。安克雷奇, 好K。
- 李安德华, X号。(2006)。基于RSS的位置估计与未知的路径损失模型。《IEEE无线通信事务报》, 5 (12), 3626-3633。https://doi.org/10.1109/TWC.2006.256985。
- 李, 李, 乔治, 牛, 李, 李, 李和谢米, N. (2015). 消费者便携式设备中MEMS陀螺仪的自动校准。IEEE传感器杂志, 15 (7), 4062-4072。
- 李, Y, 庄, Y, 张, p, 兰, h, 牛, X, 和N. (2017). 一种改进的室内导航用惯性/wifi/磁聚变结构。信息融合, 34, 101-119。
- 李, Y, 高, Z, 何, Z, 张, 陈, 谢米, N. (2018). 多传感器多层地板三维定位, 具有强大的地板检测功能。IEEE访问中心, 6, 76689-76699。
- 李, Y., 扎兰, S., 庄, Y., 高, Z, Z., 罗, Y. R., 他, Z., 等人。(2019a)。IMU/mag网络计/气压计/质量流量传感器集成了室内四旋翼无人机定位, 具有强大的速度更新。遥感器, 11 (7), 838。https://doi.org/10.3390/rs11070838.
- 李, Y., 高, Z, Z., 他, Z., 庄, Y., 雷达, a., 陈, R. 新西兰州, 和埃尔谢米, 纽约州。(2019b)。基于机器学习的无线指纹不确定性预测。传感器, 19 (2), 324。
- 李, Y, 胡, 十, 庄, Y, 高, 张, P, 和谢米, N. (2019c)。深度强化学习(DRL): 无监督无线定位的另一个视角。IEEE物联网杂志。
- 李, Y, 何, Z, 庄, Y, 高, Z, Z., 蔡英文, G. 他和裴, 李. (2019d)。通过众包和机器学习的整合, 实现强大的本地化。在移动地图技术国际会议上发表。中国, 深圳。
- 李, 利, 何, Z, 高, Z, 庄, Y, 石, C, 北. (2019)。基于众包的定位: 指纹精度指标增强无线/磁/惯性集成方法。IEEE物联网杂志, 6 (2), 3585-3600。
- 李, Y, 庄, Y, 胡, 十, 高, Z, Z, 胡, J, 陈, L, 何, 裴, 李, 陈, K. W., 王, M. 南, 牛, X. J., 陈, R. 汤普森, 加奇奇, F. 和谢米, N. (2020a)。位置启用物联网(LE物联网): 对定位技术特征、错误源和缓解措施的调查。IEEE物联网杂志。
- 李, Y., 燕, K. 李, 他, Z., 李, Y. 问: 高, Z, Z., 裴, L., 等人。(2020)。使用来自单个无线接入点的RSS进行成本效益高的本地化。IEEE交易记录关于仪器和测量, 69 (5), 1860-1870年。https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2922752.
- 林, H., 孔, L. C., 侯先生, J. C., 和罗, H. (2006). 零配置, 鲁棒的室内定位: 理论和实验。在诉讼程序中, IEEE信息通网站, 2006年。第25届IEEE计算机通信国际会议。巴塞罗那: IEEE。
- 林, Y, 高, F, 泰, T, 高, W. L, 刘, T. B., 吴, W., 等人。(2018)。使用单目视觉惯性聚变的自主航空导航。野外机器人学杂志, 35 (1), 23-51。
- 刘, R., 王, J., 和张, B. (2020)。自动驾驶的高清地图: 概述和分析。航海杂志, 73 (2), 324-341。
- 机器设计。(2020)。5G在自动驾驶汽车技术中的重要作用。网网: //w二战期间。machinedesign.com/mechanical运动系统/article/21837614/5gs- important- role- in- autonomous- car- technologyAccessed, 2020年4月28日。
- 精神的。(2020)。室内导航系统操作手册。https://marvelmind.com/pics/marvelmind_navigation_system_manual.pdfAccessed, 2020年4月28日。
- 梅贝克市, P. S. (1982)。随机模型、估计和控制。伦敦: 学术出版社。
- 麦克斯纳斯, C., 丘吉尔, 纳皮尔, A., 戴维斯大学, B., & 纽曼出版社。(2013)。在城市尺度上, 基于视觉的姿态估计的干扰抑制。2013年IEEE机器人与自动化国际会议 (页. 3762-3769)。IEEE: 卡尔斯鲁厄。
- 阿尔塔和塔尔多斯, J. D. A (2017)。球体大满贯2: 一个用于单目、立体声和RGB相机的开源大满贯系统。《IEEE《机器人学报》, 33 (5), 1255-1262。
- 不的。(2017)。联邦机动车辆安全标准: V2V通信系统。联邦公报, 82 (8), 3854-4019。
- 牛, X, 张, h., 蒋, K. W., 和埃尔谢米, N. (2010)。利用陆地车辆转向约束, 改进了地理定位系统的航向估计。ISPRS-国际摄影测量档案, 遥感空间信息科学, 38 (1), 1-5。
- 牛, 李, Y, 匡, 张. (2019)。行人导航用双脚安装式IMU的数据融合。IEEE传感器杂志, 19 (12), 4577-4584。
- 诺瓦特, H. (2020)。国际m: https://docs.novatel.com/OEM7/Content/Technical Specs IMU/FSAS Overview.htm. 已于2020年4月28日访问。
- 英伟达属。(2020)。驾驶实验室: 本地化如何帮助车辆找到他们的道路。https://news.developer.nvidia.com/drive- labs- how- localization- helps- vehicle- find- direction. 已于2020年4月28日访问。
- 奥特菲, S. M. A., & 哈桑尼因, H. S. (2018)。雾中的物联网: 以数据为中心的物联网开发的路线图。IEEE通信杂志, 56 (3), 157-163。
- 裴, 李, 刘, D., 邹, D., 李福科乔, R., 陈, Y., 和他, Z. (2018)。基于最优航向估计的多维粒子滤波器的室内定位。IEEE访问系统, 6, 49705-49720。https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2868792.
- 佩托维洛先生。(2003)。实时集成战术级IMU和GPS, 以实现高精度的定位和导航。卡尔加里: 卡尔加里大学。
- 皮瓦托, 帕洛波利, 法典, 和佩特里, 博士。(2011)。基于RSS的质心定位算法在室内环境中的精度。IEEE仪器和测量交易记录, 60 (10), 3451-3460。
- 波根汉斯, 萨尔谢德。斯蒂勒。(2018)。对城市地区高清路线图的精确定位。2018年IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议(IROS) (页. 2167-2174)。马德里。
- 古帕岛。(2020)。产品和技术。http://quuppa.com/technology/. 已于2020年4月28日访问。
- 半径, A., 巴卡利, g, 格里尔, 南, 埃尔谢米, 北, 塞赛, A. A. B., & 莫利纳里, R. (2019)。一种基于多信号小波方差的惯性传感器随机误差建模框架。IEEE《仪器和测量学报》, 68 (12), 4924-4936。
- 兰塔科科, 亨德尔, 弗雷德霍尔姆, M. 和马斯滕·埃克洛夫, F. (2010)。本地化和跟踪技术的用户需求: 对任务特定需求和约束条件的调查。2010年室内定位和室内导航国际会议 (页. 1-9)。苏黎世。
- 里德, T. G. AR., 胡茨, S. E., 坎马拉塔, R., 米尔斯, G., 阿加瓦尔, S., 沃拉, A., 和潘迪, G. (2019)。自动驾驶车辆的本地化要求。arXiv: 1906.01061。
- 雷斯特雷波, J. (2020)。世界无线电5G路线图: 未来的挑战和机遇。网网: //w二战期间。itu.int/en/TTUR/研讨会/rrs/RRS17美洲/Documents/Forum/1_ITU%20Joaquin%20Restrepo.pdf. 已于2020年4月28日访问。

- 鲁索, R. B., 布洛多, N., 马顿, Z. C., & 比茨, M. (2008). 使用持久的特征直方图对齐点云视图. *2008年IEEE/RSJ智能机器人和系统国际会议* (页. 3384–3391). 好: 不错.
- SAE国际股份股份有限公司. (2016). 道路机动车驾驶自动化系统相关术语的分类和定义. https://www.sae.org/standards/content/j3016_201609/. 已于2020年4月28日访问.
- 萨卢哈, H., 阿扎里, M., 基门托和波林. (2018). 空中锚在城市环境中可靠的基于RSS的户外定位. *IEEE无线通信*, 7 (3), 376–379.
- 斯卡拉穆扎和弗劳登弗. (2011). 视觉测量. *IEEE机器人与自动化杂志*, 18 (4), 80–92.
- 施耐德, O. (2010). 地下施工定位和导航要求. *室内定位和室内导航国际会议*. 1–4. 苏黎世.
- 肖宁伯格. (2019). 汽车数字转换模型和现有数据访问模型对生态名称的影响. <https://www.fiaregion1.com/wp-content/uploads/2019/03/The-Automotive-Digital-Transformation-Full-study.pdf>. 已于2020年4月28日访问.
- 塞科和希门尼斯. R. (2017). 无线定位网的自动校准可使用快速定位算法工作. *2017年室内定位和室内导航国际会议* (页. 1–8). 札幌.
- 赛义夫, H. G., & 胡涛, X. (2016). 自动驾驶-高清地图是汽车行业的关键挑战. *工程部*, 2 (2), 159–162.
- 石、曹、张、Q、李、Y、徐. (2016). 边缘计算: 视觉和挑战. *IEEE物联网杂志*, 3 (5), 637–646.
- 小腿, E. H. (2005). 低成本惯性导航的估计技术. 卡尔加里: 卡尔加里大学.
- 申, 南赫尔, 朴, c.g., 金, J. W., Hong李. (2007). 基于低成本MEMS惯性传感器的自适应步长估计算法. 在*2007年IEEE传感器应用研讨会*的论文集中. 加州圣地亚哥: IEEE.
- 辛格, 美国国务院统计局. (2015). 全国机动车事故原因调查调查车祸关键原因. <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/public/视图出版/812115>. 已于2020年4月28日访问.
- 斯蒂芬森, S. (2016). *汽车用GNSS的高精度应用*. 诺丁汉姆: 诺丁汉大学.
- 已同步. (2018). 自动驾驶的高清制图的黄金时代. 用于自动驾驶的 <https://medium.com/syncedreview/the-golden-age-of-hd-mapping>. 已于2020年4月28日访问.
- TDK直觉. (2020). MPU9250九轴 (陀螺加速度计罗盘) MEMS运动跟踪设备. <https://invensense.tdk.com/product/motion-tracking/9轴/mpu9250/>. 已于2020年4月28日访问.
- 特斯拉公司. (2020). 自动驾驶仪. 网: w二战期间.tesla.com/autopilot. 已于2020年4月28日访问.
- 蒂曼, 施威科夫斯基, F., 和维特菲尔德, C. (2015). 基于GNSS拒绝环境下无人机导航的UWB室内定位系统的设计. *2015年室内定位与室内导航国际会议* (IPIN) (页. 1–7). IEEE: 卡尔加里.
- 泰特顿博士, 韦斯顿, J.L. (2004). *捆绑式惯性导航技术*. i集.
- 汤姆·汤姆. (2020). 通过高清图和ADASIS扩展自动驾驶车辆的愿景. http://download.tomtom.com/open/banners/Elektrobit_TomTom_whitepaper.pdf. 已于2020年4月28日访问.
- 修剪. (2020). 可修剪的RTX. https://positioningservices.trimble.com/services/rtx/?gclidCjwKCAjwnIrlBRAWIwA6GpwNY78s-u6pUzELeIu_elfoum063LmR2Qhf72Q9pM-L-NXyJjomWCX6BoCE5YqAvD-BwE. 已于2020年4月28日访问.
- 血管, D., 库马尔, 美国, 和卡塔比, D. A. (2016). 使用单个WiFi接入点进行外国级定位. *第13届USENIX网络系统设计与实现研讨会* (页. 165–178). USENIX协会: 圣克拉拉.
- 弹性差. (2020). HDL64E高清实时3D激光雷达. <https://velodynelidar.com/products/hdl64e/>. 已于2020年4月28日访问.
- 王, L., 陈, R. Z., 李, D. R., 张, G., 沈, X., 余, B. G., 等人. (2018). 罗家1A卫星对狮子座导航信号增强系统的初步评估. *传感器 (瑞士)*, 18 (11), 3919.
- 王, 何. J. I. T. O. W. C. A. (2015). 基于传感器网络的三维AOA定位渐近有效封闭估计器. *《IEEE无线通信学报》*, 14 (12), 6524–6535.
- 王, Y., 李, 郑, 赵. (2017). 阿拉伯语: 一种移动设备异步的室内定位系统. *2017年室内定位和室内导航国际会议* (页. 1–8). 札幌.
- WiFi联盟. (2020). 低功耗, 远程WiFi. 网: w哇哇.wi-fi.org/discover, 你好. 已于2020年4月28日访问.
- 威尔, H., 希勒布兰特, T., 元, Y., 玉斌, Z. 和凯斯, M. (2012). 成员度最小最大定位算法. *2012年无处不在的定位、室内导航和基于定位的服务 (UPINLBS)* (pp. 1–10). IEEE: 赫尔辛基.
- 威特里萨尔, K., 迈斯纳, P., 莱廷格, E., 沈, Y., 古斯塔夫森, 塔夫维森, F. 等. (2016). 辅助生活的高精度定位: 5G系统将把多路径通道从敌人转到朋友. *IEEE信号处理杂志*, 33 (2), 59–70.
- 沃尔科特, R. 尤斯蒂斯, R. M. (2014). 激光雷达地图上的视觉定位. *2014年IEEE/RSJ智能机器人和系统国际会议*. 176–183. 伊利诺伊州: 芝加哥.
- 沃尔科特, R. 尤斯蒂斯, R. M. (2017). 使用多分辨率高斯混合图的稳健激光雷达定位. *国际机器人研究杂志*, 36 (3), 292–319.
- 张国、韩国、孙, 蜀等. (2017). 室内环境中基于定位的基于路径丢失的指纹定位方法. IEEE访问网站, 5, 13756–13769.
- 张, P., 路, J., 王, Y., 和王, Q. (2017). 在5G网络中的合作定位: 一个调查. *ICT特快*, 3 (1), 27–32.
- 周, B., 李, Q., 毛, Q., 图, W. 和张, X. (2015). 使用智能手机进行的基于活动序列的室内行人定位. *《IEEE人机系统学报》*, 45 (5), 562–574.
- 庄, Y., 兰, H., 李, Y., 和埃尔斯米, N. (2015). 基于室内行人导航手持设备的PDR/INS/WiFi集成. *微机*, 6 (6), 793–812.
- 庄、杨、李、齐、李、谢、北. (2016). 基于智能手机的室内定位与蓝牙低能量信标. *传感器*, 16 (5), 596.
- 庄, Y., 王, Q., 李, Y., 高, Z., 周, B. P., Qi, L., N., 等人. (2019). 利用固定延迟集成卡尔曼平滑度, 实现光二极管和相机的可见光定位. *遥感器*, 11 (11), 1387.

出版商的笔记

施普林格自然在酒吧的地图的管辖权主张和机构附属保持中立。