

UWB 局域室内定位技术研究

向明, 冯小江, 李鹏

(中通服咨询设计研究院有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要 在智能化时代背景下, 室内定位技术已经成为现代生活中不可或缺的一部分。在众多室内定位技术中, 超宽带 (Ultra-Wideband, 简称 UWB) 技术因其高精度和稳定性而备受关注, UWB 技术通过发送和接收纳秒级的极窄脉冲来实现数据传输, 具有极高的时间分辨率和多径分辨能力, 在室内定位领域具有广泛的应用前景。因此, 本文将对以 UWB 为基础的室内定位关键技术进行深入分析, 以期能够为相关领域的研究提供有益参考。

关键词 UWB 技术; 室内定位技术; 坐标系技术; 传感器技术; 导航定位技术

中图分类号: TN926

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)07-0001-03

UWB 技术是一种无线通信技术, 可以精确计算出两者之间的距离, 通过多个接收端 (或发射端) 的距离测量, 可以进一步确定目标物体的三维空间位置。UWB 室内定位技术具有多项优势, 比如定位精度高、抗干扰能力强以及数据传输速率高等, 多个领域都有广泛的应用前景, 如智能制造、智能仓储、智慧医疗等。在物联网、大数据和人工智能等技术不断发展的推动下, UWB 室内定位技术将迎来更广阔的应用前景, 所以需要明确其关键技术的应用, 从而更好地发挥出技术优势。

1 UWB 概述

UWB 即超宽带, 是指信号带宽大于 500 MHz 或者是信号带宽与中心频率之比大于 25% 的无线通信技术, 与传统的窄带和宽带通信技术相比, UWB 技术利用了极宽的频带范围来传输数据, 因此具有许多独特的优势。在 UWB 通信中, 信息是通过发送和接收纳秒级的极窄脉冲来传输的, 极窄脉冲具有极高的时间分辨率, 使得 UWB 技术能够在时间域上进行精确的测量和定位, 同时由于脉冲宽度极窄, UWB 信号在频域上占据了极宽的带宽, 从而具有极高的数据传输速率和抗干扰能力。由于带宽极宽, UWB 技术能够提供高达数百 Mbps 甚至 Gbps 的数据传输速率, 使得 UWB 技术非常适合用于传输大量数据, 如高清视频、大容量文件等; UWB 信号具有极高的时间分辨率, 因此可以通过测量信号传播时间来精确计算距离, 使得 UWB 技术在室内定位、物联网、智能交通等领域具有广泛的应用前景。此外, UWB 信号的传输距离相对较短, 通常在几十米范围内, 使得 UWB 设备在传输数据时可以降低发射功率, 从而减少能耗, 同时由于 UWB 信号采用脉冲方式传输, 其占空比极低, 进一步降低了功耗^[1]。

2 以 UWB 为基础的室内定位关键技术

2.1 系统架构

系统主要由 UWB 信号发射器、UWB 信号接收器、微处理器和上位机组成, 其中 UWB 信号发射器负责发送定位信号, UWB 信号接收器负责接收定位信号, 并将接收到的信号传输给微处理器进行处理, 微处理器通过算法计算出目标物体的位置信息, 并将结果发送给上位机进行显示和分析。

1. 硬件设计。选用高性能的 UWB 发射器芯片, 如 Decawave 公司的 DW1000 芯片, 该芯片具有高精度、低功耗、小型化等优点, 适用于室内定位系统的需求; 发射器电路主要包括电源电路、时钟电路、天线匹配电路等, 电源电路为芯片提供稳定的工作电压, 时钟电路提供精确的时钟信号, 确保 UWB 信号的稳定性; 天线匹配电路则用于优化信号的发射效率; 天线是 UWB 信号发射的关键部件, 采用小型化、宽频带的微带天线, 该天线具有体积小、重量轻、易于集成等优点, 同时能够满足 UWB 信号的发射需求。

接收器同样选用 DW1000 芯片, 以实现与发射器的高度匹配和优异的接收性能; 接收器天线同样采用微带天线设计, 以确保高效接收 UWB 信号。微处理器选用高性能的微处理器芯片, 如 STM32 系列, 该芯片具有丰富的外设接口和强大的处理能力, 能够满足室内定位系统对数据处理的传输需求; 上位机采用 PC 或智能手机等设备, 通过串口通信或无线通信与微处理器进行数据传输, 上位机软件需具备实时显示定位结果、轨迹追踪、数据分析等功能^[2]。

2. 软件设计。该平台将基于 UWB 技术, 通过收集和处理 UWB 信号数据, 实现高精度的室内定位功能, 软件平台将分为数据采集层、数据处理层、定位算法

层和用户界面层四个主要部分。数据采集层主要负责从UWB硬件设备中收集原始信号数据,为了实现高效、准确的数据采集,采用多线程技术,同时与UWB硬件设备进行通信,实时接收并存储信号数据,并设计数据校验机制,以确保数据的完整性和准确性。数据处理层主要负责对采集到的原始信号数据进行预处理和分析,对原始数据进行滤波和去噪处理,以消除异常值和噪声干扰,并对数据进行特征提取,提取出与定位相关的关键信息,如信号到达时间、信号强度等,之后将处理后的数据传递给定位算法层进行进一步处理。定位算法层是软件平台的核心部分,负责根据处理后的数据计算出目标物体的位置信息,采用基于到达时间差(TDOA)的定位算法,通过比较不同接收器接收到信号的时间差来计算目标物体的位置,为了提高定位精度和稳定性,可以引入卡尔曼滤波等优化算法对定位结果进行平滑处理。用户界面层主要负责与用户进行交互,展示定位结果和提供相关操作接口,设计直观、易用的图形化界面,实时显示目标物体的位置信息和运动轨迹,并提供丰富的操作接口,如设置定位参数、查看历史数据等,以满足用户的不同需求^[3]。

2.2 关键技术

1. 坐标系技术。坐标系是描述空间中点位置的一种数学工具,通过设定原点和坐标轴来定义一个空间中的任意一点。在UWB室内定位系统中,坐标系的建立需要选取合适的原点,并确定X、Y、Z三个坐标轴的方向,原点通常选取在室内空间的某一固定点,如墙角或某一固定设备的位置,坐标轴的方向则根据实际需求进行确定,以确保定位的准确性和便捷性。在实际应用中,需要将不同坐标系下的位置信息进行转换,比如当需要将UWB定位系统获取的位置信息与其他传感器(如IMU、激光雷达等)获取的数据进行融合时,就需要进行坐标系之间的转换,坐标系转换方法包括旋转矩阵法、四元数法等,能够实现不同坐标系之间的精确转换,从而提高室内定位的精度和稳定性。在UWB室内定位系统中,定位算法是实现高精度定位的关键,算法通常基于信号到达时间差(TDOA)、信号到达角度(AOA)或信号飞行时间(TOF)等原理,通过测量UWB信号在空间中的传播时间来计算目标物体的位置,被广泛应用于将测量数据转换为目标物体的实际位置坐标。在室内定位系统中,轨迹追踪和地图构建是两个重要的应用场景,通过实时记录目标物体的位置信息,可以生成其运动轨迹,并进行后续的数据分析和挖掘,同时利用位置信息还可以构建室内地图,

为用户提供更加直观的导航和定位服务,坐标系技术主要被用于将位置信息转换为地图上的具体坐标点,从而实现轨迹的绘制和地图的构建^[4]。

2. 传感器技术。UWB信号收发器负责发送和接收UWB信号,通过测量信号传播时间或信号强度等参数来确定目标物体的位置,UWB信号收发器具有高带宽、低功耗、抗干扰能力强等特点,能够实现厘米级的定位精度;在UWB室内定位系统中,通常需要布置多个UWB信号收发器,以覆盖整个定位区域,收发器通过无线方式与中央处理单元进行通信,实时传输测量数据,中央处理单元根据数据计算出目标物体的位置信息。惯性测量单元是一种集成了加速度计、陀螺仪等传感器的设备,用于测量和记录物体的加速度、角速度等运动参数,在室内定位中,惯性测量单元可以提供连续的运动数据,与UWB信号收发器相互配合,提高定位精度和稳定性;惯性测量单元的工作原理是基于牛顿第二定律和科里奥利力原理,通过测量加速度和角速度来推算物体的运动状态,数据可以与UWB定位数据进行融合,修正定位误差,提高系统的鲁棒性。

3. 导航定位技术。导航定位技术是指通过特定的方法和算法,确定目标物体在室内环境中的准确位置,并为其规划出到达目的地的最优路径,在UWB室内定位系统中,导航定位技术依赖于UWB信号的高精度测量和多传感器数据的融合处理,以实现厘米级的定位精度和流畅的导航体验。UWB信号具有极高的时间分辨率,通过测量信号从发射端到接收端的传播时间,可以精确计算出两者之间的距离,在室内环境中通过布置多个UWB信号发射器,并测量目标物体比如智能手机、标签等与发射器之间的距离,可以准确确定目标物体的三维位置。基于测量得到的距离信息,可以采用多边定位算法来计算目标物体的位置,算法通过多个已知位置的UWB信号发射器和目标物体之间的距离关系构建方程组,并求解该方程组得到目标物体的坐标,多边定位算法的关键在于确保测量的准确性,减少定位误差,确定目标物体的实时位置后,导航定位技术则可以为目标物体规划出到达目的地的最优路径,比如可以采用路径搜索算法(如A*算法、Dijkstra算法等)寻找从起点到终点的最优路径,算法会根据地图中的信息,计算出一条避开障碍物、距离最短或时间最短的路径^[5]。

4. 无线定位算法。最小二乘法是一种数学优化技术,通过最小化误差的平方和来寻找数据的最佳函数匹配,在室内定位中最小二乘法通常用于处理从多个基站接收到的信号强度或时间差信息,以估计目标的

位置。最小二乘法通过构造目标函数，该函数表示观测值与估计值之间的残差平方和，通过最小化该目标函数，可以得到位置参数的估计值。在 UWB 室内定位系统中，最小二乘法通常与测距技术结合使用，通过测量目标节点与多个基站之间的距离，然后利用最小二乘法对这些距离进行处理，以估计目标节点的位置。小二乘法的优点是计算简单、易于实现，但是当观测值中存在较大的误差或异常值时，最小二乘法的定位精度可能会受到影响。

Taylor 算法是一种基于泰勒级数展开的迭代定位算法，适用于处理非线性方程组。在室内定位中，Taylor 算法通过迭代计算来逼近目标节点的真实位置。Taylor 算法从一个初始估计位置开始，通过计算残差（即观测值与估计值之间的差异）和雅可比矩阵（表示残差对位置参数的偏导数），来更新位置估计值，该过程反复进行，直到满足一定的收敛条件为止。在 UWB 室内定位系统中，Taylor 算法通常用于处理基于时间差或到达角度的定位问题，通过迭代计算，可以逐步逼近目标节点的真实位置。Taylor 算法的优点是具有较高的定位精度和收敛性，但是性能受到初始估计位置的影响较大，如果初始位置选择不当，可能导致算法收敛到错误的位置，且 Taylor 算法的计算复杂度相对较高，需要较多的迭代次数才能达到收敛，为此，在选择定位算法时需要根据具体的应用场景和需求进行权衡。

3 以 UWB 为基础的室内定位仿真

3.1 定位仿真

为了模拟真实的室内环境，构建了一个 10×10 m 的二维仿真场景，其中布置了 4 个 UWB 基站，分别位于场景的四个角落，仿真中使用的 UWB 信号频率为 6.5 GHz，信号带宽为 500 MHz，目标物体在场景中随机移动，并通过 UWB 信号与基站进行通信。

在仿真过程中，初始化阶段设置仿真场景大小、基站位置、目标物体初始位置等参数；模拟 UWB 信号从目标物体发送到基站的过程，考虑信号衰减、多径效应等因素；基于 UWB 信号的传播时间，计算目标物体与各基站之间的距离；采用多边定位算法，根据测量得到的距离信息估计目标物体的位置；记录每一时刻的目标物体真实位置与估计位置。

通过仿真实验，获得了目标物体在仿真场景中的真实轨迹与估计轨迹。表 1 展示了部分仿真数据，包括目标物体的真实位置 (x_{true} , y_{true}) 和估计位置 (x_{est} , y_{est})。

表 1 仿真结果

时间 (s)	x_{true} (m)	y_{true} (m)	x_{est} (m)	y_{est} (m)
0	1.0	1.0	0.98	0.96
1	1.5	2.0	1.53	2.04
2	2.0	3.0	2.02	3.05
...
10	8.0	8.0	7.95	8.03

3.2 精度分析

为了评估定位精度，采用了均方根误差 (RMSE) 作为评价指标。根据仿真数据计算了 RMSE 值，以评估定位精度。表 2 展示了不同时间段内的 RMSE 值。

表 2 定位精度

序号	时间段 (s)	RMSE (m)
1	0 ~ 2	0.06
2	2 ~ 4	0.05
3	4 ~ 6	0.07
4	6 ~ 8	0.06
5	8 ~ 10	0.05
6	全程	0.06

从表 2 中可以看出，在整个仿真过程中，定位精度保持在厘米级，RMSE 值均小于 0.07 m，说明基于 UWB 的室内定位系统在本次仿真实验中表现出了较高的定位精度。

4 结束语

UWB 技术以其独特的优势和广泛的应用前景，成为无线通信领域的重要研究方向，无论是在商场导航、智能制造，还是在紧急救援等领域，UWB 技术都将发挥重要作用，但是任何技术都有其局限性，UWB 技术也不例外，在实际应用中，仍需面对信号干扰、成本、兼容性等挑战，所以在掌握关键技术的基础上，未来需要进一步加强技术创新，最大程度发挥出 UWB 技术在室内定位领域的价值。

参考文献:

- [1] 石峻旭.UWB 室内定位算法与锚节点部署研究[D].成都:西南交通大学,2022.
- [2] 刘文,赵旭,李连鹏,等.基于 TL-LFL 的 UWB 室内定位算法[J].仪表技术与传感器,2022(11):82-87.
- [3] 黄江,赵玲峰,吴清玲.基于 UWB 室内定位地下停车系统研究[J].中国宽带,2022,18(12):58-60.
- [4] 牛魁明.UWB 室内定位技术现状与应用展望[J].数字化用户,2022,28(28):134-135,139.
- [5] 曹露露,张朝旭,于欣怡,等.基于 UWB 室内定位系统应用与研究[J].工业控制计算机,2022,35(01):72-74.