

室外环境下的 UWB 基站自定位方法

王晓青, 李博予, 王宾飞, 张德育

(沈阳理工大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 应用超宽带 (ultra wide band, UWB) 技术实现精确定位需提前测定 UWB 基站的准确位置, 传统的人工基站位置测量方法耗时费力, 使得 UWB 定位技术难以在室外环境下进行多基站的大规模部署。为解决上述问题, 提出一种 UWB 基站的自定位方法, 通过提前约定安装时主基站与从基站高度差的方法, 自动估算各个基站的位置信息并建立空间坐标系。实验表明应用该方法测得的被测物体坐标在 x 和 y 轴方向的平均误差均小于 10 cm, 与传统方法基本一致, z 轴方向的平均误差小于 30 cm, 与传统方法相比虽然有所增大, 却有效降低了 UWB 基站在大范围室外环境下的布设难度, 同时也便于后期系统的更新维护。

关键词: UWB 技术; 基站自定位; 室外定位算法

中图分类号: TN925

文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1251.2025.02.005

Self-positioning Method for UWB Base Stations in Outdoor Environments

WANG Xiaoqing, LI Boyu, WANG Binfei, ZHANG Deyu

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: The application of ultra wide band (UWB) technology to achieve precise positioning necessitates the accurate position of UWB base stations to be determined in advance. Traditional manual base station position measurement methods are time-consuming and laborious, making it difficult for UWB positioning technology to deploy multiple base stations on a large scale in outdoor environments. To solve these problems, a self-positioning method for UWB base stations is proposed. By pre-agreeing on the height difference information between the master and slave base stations during installation, the position information of each base station can be automatically calculated and a spatial coordinate system can be established after power on. The experiment shows that the average error of the measured object coordinates in the x and y axis directions measured by this method is less than 10 cm, which is basically consistent with traditional methods. The average error in the z axis direction is less than 30 cm. Although the error in the z axis direction is increased compared with traditional methods, it effectively reduces the difficulty of deploying UWB base stations in large-scale outdoor environments, and also facilitates system updates and maintenance in the later stage.

Key words: ultra-wideband technology; UWB base self-positioning; outdoor positioning algorithm

收稿日期: 2024-01-05

基金项目: 辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(青年项目)(JYTQN2023058); 辽宁省科学技术计划项目(第二批“揭榜挂帅”科技攻关专项)(2022JH1/10800085); 沈阳理工大学科研启动支持项目(1010147001003)

作者简介: 王晓青(1990—), 女, 讲师, 博士。

边坡安全监测是道路安全监测系统的重要内容。道路边坡出现安全隐患,主要体现在坡面出现沉降、裂痕、位移乃至滑坡等,通过在边坡上安装具有位移监测功能的设备,监测关键位置的变化情况,及早发现出现安全隐患的路段,从而减少重大事故的发生。定位技术分为室内定位和室外定位两类,室内定位主要有 WiFi 定位技术^[1]、蓝牙定位技术^[2]、超声波定位技术^[3]和激光定位技术^[4]等,这些技术在户外大尺度监测场景下测量难度较大;室外定位主要有基于北斗^[5]或 GPS^[6]等方法,对环境信号强度要求比较高,且具有功耗大、成本高等特点。在边坡安全监测领域,有研究人员提出使用时域反射监测方法(time domain reflectometry, TDR)^[7],能够实现高精度的单点检测,但容易受环境影响。

超宽带(ultra wide band, UWB)定位技术^[8]常采用三边定位算法^[9],广泛应用于室内定位,但其具有低成本、低功耗、抗干扰性强、定位精度可达厘米级^[10]等优点,目前也逐渐被应用于室外定位。但若将 UWB 定位系统用于监测大范围的坡面形变,会受到地形和环境因素的干扰,需要依赖多个测量基站配合定位被测对象。基站位置的准确性会直接影响到三边定位算法对被测对象位置的解算精度。目前,基站的准确位置主要依靠人为提前安装并测量的方式^[11],且对基站布置的顺序、方位等环境要求较高,本文的研究旨在针对上述问题提出一种 UWB 基站的自定位算法,降低系统的布置难度。

1 UWB 基站自定位算法

1.1 UWB 定位系统

在一个 UWB 立体定位系统中,需利用四个以上的 UWB 模块作为测量基站(简称“基站”)构建一个空间坐标系,位于坐标系中的被测 UWB 模块(简称“标签”)可通过无线通信的方式与各个基站进行通信,计算距离信息。定位场景如图 1 所示,4 个 UWB 基站分别为 A_0 、 A_1 、 A_2 和 A_3 ,其中基站 A_0 为主基站,其余为从基站,将基站 A_0 到 A_3 摆放在在标签 T_0 的四周。

传统的 UWB 基站布置方法需要先利用全站仪等定位设备人工测量好各个基站的准确位置,一般以主基站 A_0 作为坐标系原点建立空间坐标系。测量标签位置时,利用往返飞行时间(time of flight, TOF)^[12]计算出各个基站到标签的距离,用

三边定位算法解算出标签坐标。

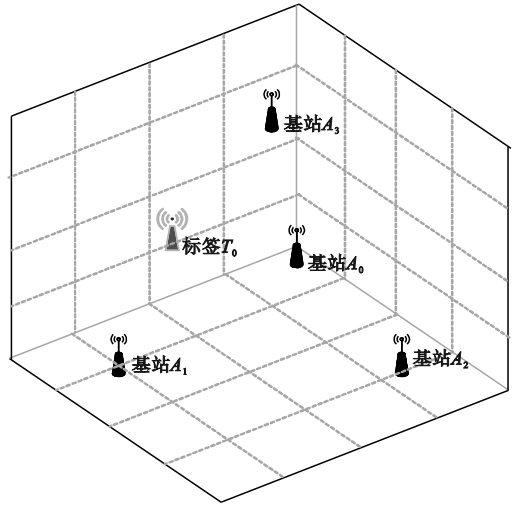


图1 UWB 定位场景

Fig.1 UWB positioning scene

1.2 基站自定位方法

室外边坡形变监测场景中,由于监测范围较大,需要布设大量基站和标签,人工测量众多基站的准确位置提高了系统部署的复杂度。同时,相比稳定的室内场景,基站位置可能受到野外环境影响而发生改变,人工重定位会使后续的系统维护成本增加。为此,本文提出一种基站自定位方法,通过提前约定安装时主基站与从基站的高度差,即可依靠基站之间的通信,自主解算并建立 UWB 测量系统的空间坐标系。本节将以 4 个 UWB 基站模块组成的测量系统为例,详细说明自定位流程。

基站的自定位方法由 UWB 基站模块下位机和电脑上位机配合完成。下位机在安装前先为每一个基站分配网络地址,对主机站 A_0 和其他从基站的地址加以区分。在安装过程中,约定包含主机站 A_0 在内的三个模块的底座高度一致,并与剩余一个模块的底座有一个高度差 D 。下位机使用 STM32 单片机控制,上电后可通过网络地址自行定位主机站 A_0 。基站模块上电后的工作流程如图 2 所示。UWB 基站模块两两通信后,可根据收发信息时间差及飞行时间法测量得到距离值,统一由主基站 A_0 通过无线串口发送给上位机。

上位机利用 A_0 传送的下位机测量值计算各个基站的三维坐标,具体三基站的位置关系如图 3 所示,约定主基站 A_0 为坐标系原点, A_0 、 A_1 、 A_2 三点所确定的平面为坐标系中的 xoy 平面, A_0A_1 所在直线为 x 轴, $A_0 \rightarrow A_1$ 为 x 轴正方向, A_2 所在的区域为 y 轴正半轴。基站坐标计算流程如下。

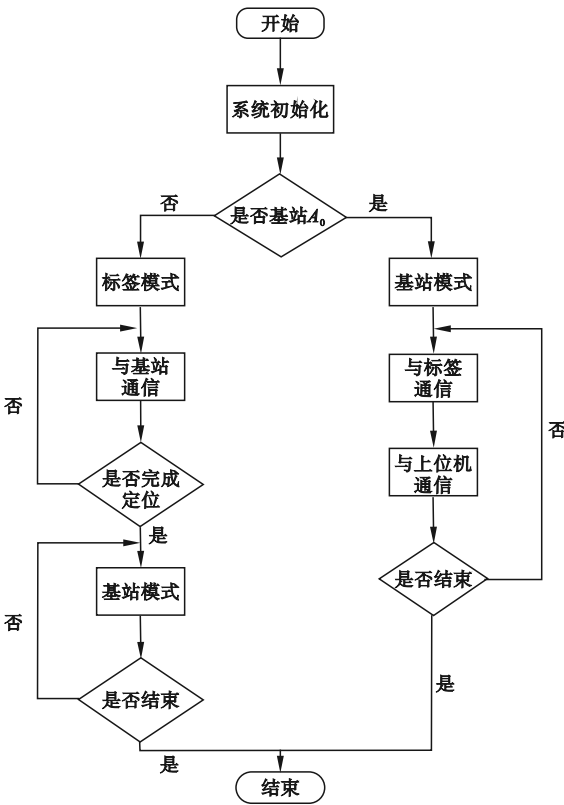


图2 基站模块上电后的工作流程

Fig. 2 Method flow for base station module

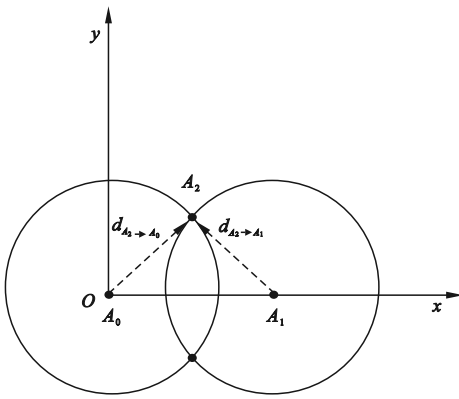


图3 A0、A1、A2 三基站位置关系

Fig. 3 The location relationship of base stations A0, A1 and A2

基站 A_0 和 A_1 通信后,得到 A_2 到 A_0 、 A_1 的距离 $d_{A_2 \rightarrow A_0}$ 和 $d_{A_2 \rightarrow A_1}$,由图3中的位置关系得方程组为

$$\begin{cases} x_2^2 + y_2^2 = d_{A_2 \rightarrow A_0}^2 \\ (x_2 - x_1)^2 + y_2^2 = d_{A_2 \rightarrow A_1}^2 \\ z_2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

解算上述方程组可以得到两个解,并根据 A_2 位于 y 轴正半轴的约定,得到唯一的 A_2 坐标。

4) 基站 A_3 的坐标 (x_3, y_3, z_3) : 基站 A_3 分别与基站 A_0 、 A_1 、 A_2 通信后,得到基站 A_3 到三个基站之间的距离 $d_{A_3 \rightarrow A_0}$ 、 $d_{A_3 \rightarrow A_1}$ 和 $d_{A_3 \rightarrow A_2}$,据此可以建立 A_3 空间坐标 (x_3, y_3, z_3) 的方程组为

$$\begin{cases} x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 = d_{A_3 \rightarrow A_0}^2 \\ (x_3 - x_1)^2 + y_3^2 + z_3^2 = d_{A_3 \rightarrow A_1}^2 \\ (x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + z_3^2 = d_{A_3 \rightarrow A_2}^2 \end{cases} \quad (3)$$

直接求解上述方程组得到多个解,难以确定 A_3 坐标,因此本文采用了一种近似求解的方法,将 A_3 的安装高度差 D 近似为 A_3 与 A_0 、 A_1 、 A_2 所在平面的距离,即 $z_3 \approx D$,将三维定位简化为求解基站 A_3 在平面 $A_0A_1A_2$ 投影的横纵坐标 (x_3, y_3) 的问题,四个基站的位置关系示意如图4所示,为了减少投影误差,在安装时尽量将基站 A_3 的投影位置放在 A_0 、 A_1 、 A_2 的中间。

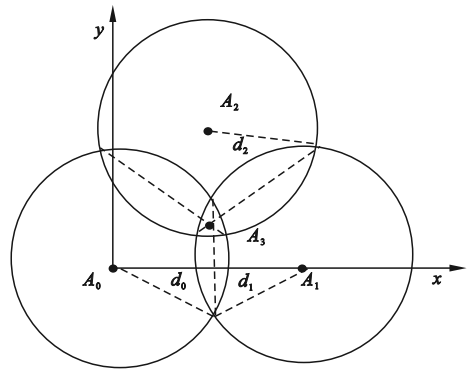


图4 四个基站的位置关系示意图

Fig. 4 The simplified location relationship of four base stations

图中的投影距离 d_0 、 d_1 、 d_2 与实际测量距离 $d_{A_3 \rightarrow A_0}$ 、 $d_{A_3 \rightarrow A_1}$ 和 $d_{A_3 \rightarrow A_2}$ 以及高度差 D 之间的关系为

$$\begin{cases} d_0^2 + D^2 = d_{A_3 \rightarrow A_0}^2 \\ d_1^2 + D^2 = d_{A_3 \rightarrow A_1}^2 \\ d_2^2 + D^2 = d_{A_3 \rightarrow A_2}^2 \end{cases} \quad (4)$$

由于 A_3 的投影位置是一个近似值,在实际测量中会出现如图4所示的三个圆不相交于一点的

1) 基站 A_0 的坐标: A_0 为坐标系原点,坐标为 $(0,0,0)$ 。

2) 基站 A_1 的坐标 (x_1, y_1, z_1) : A_0 和 A_1 利用 UWB 技术进行通信后,测量得到二者距离为 $d_{A_1 \rightarrow A_0}$,则基站 A_1 的坐标为

$$\begin{cases} x_1 = d_{A_1 \rightarrow A_0} \\ y_1 = 0 \\ z_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

3) 基站 A_2 的坐标 (x_2, y_2, z_2) : 基站 A_2 分别与

情况,由此引入一种基于相交法的三边定位算法^[13],该算法利用三圆两两相交形成的三条弦的交点估计基站 A_3 的位置,通过求解下述方程组得到 (x_3, y_3) 。

$$\begin{cases} x_3^2 + y_3^2 - (x_2 - x_3)^2 - (y_2 - y_3)^2 = d_0^2 - d_2^2 \\ (x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 - (x_2 - x_3)^2 - (y_2 - y_3)^2 = d_1^2 - d_2^2 \end{cases} \quad (5)$$

以上为 4 基站测量系统的自定位过程,在此基础上,若需要覆盖更大的测量范围,扩展多个基站,则后续基站均采可用 A_3 的位置解算方法进行定位。

1.3 基站自定位算法的人机交互软件设计

为本文提出的算法设计了上位机基站自定位算法的人机交互软件,利用 Python 语言和 PyQt5 编写,软件主界面主要包含坐标系数值显示区域、基站与标签三维坐标可视化显示区域、串口基本设置区域等,如图 5 所示。

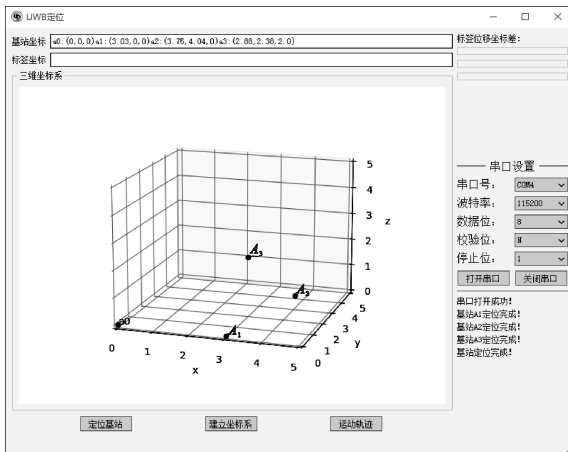


图 5 上位机人机交互软件主界面

Fig.5 Main interface of the upper computer

2 实验结果及分析

为验证本文提出的基站自定位算法的可靠性,设计如下三组实验。

2.1 基站自定位精度测试

实验搭建两组由 4 个基站组成的 UWB 测试系统,分别在 12 m^3 和 100 m^3 的测试范围内, A_3 与其他基站的安装高差设置为 2 m。利用激光测距仪测量并摆放好基站位置(实际坐标),对比按照本文提出的自定位方法解算获得的基站坐标,结果如表 1 所示,由表 1 可见基站自定位误差情况。

实验结果表明,基站摆放距离越远,测试范围越大,基站自定位的误差越大。在相同的测试范围内,基站 A_1 到 A_3 的误差依次增大。由于 A_3 坐标的解算需要使用基站 A_1 和基站 A_2 的坐标,使得基站 A_1 、 A_2 的误差累积到基站 A_3 的坐标计算,导致基站 A_3 的坐标计算误差增大。

2.2 基站自定位算法对标签定位精度的影响测试

本实验测试基站自定位算法对标签定位精度的影响,使用同一组覆盖范围为 100 m^3 的 UWB 基站组成定位系统,摆放多个待测标签,分别利用自定位得到的基站坐标和人工测量得到的基站坐标解算标签坐标值,并与实际测量得到的标签坐标值进行对比,所得数据如表 2 所示。

实验结果表明,在采用人工测量基站位置的传统 UWB 定位系统中,对 7 个不同位置标签的定位结果(x 轴坐标和 y 轴坐标)与标签坐标真值之间的平均误差均为 5 cm, z 轴坐标平均误差为 19 cm; 采用本文提出的基站自定位算法的 UWB

表 1 基站自定位误差测试

Table 1 Base station self-positioning error test

测试范围/ m^3	基站名称	实际坐标/m	自定位坐标/m	误差/m
12	A_0	(0.00,0.00,0.00)	(0.00,0.00,0.00)	(0.00,0.00,0.00)
	A_1	(3.00,0.00,0.00)	(3.04,0.00,0.00)	(0.04,0.00,0.00)
	A_2	(3.70,4.00,0.00)	(3.75,4.04,0.00)	(0.05,0.04,0.00)
	A_3	(2.79,2.28,2.00)	(2.88,2.38,2.00)	(0.09,0.10,0.00)
100	A_0	(0.00,0.00,0.00)	(0.00,0.00,0.00)	(0.00,0.00,0.00)
	A_1	(9.36,0.00,0.00)	(9.27,0.00,0.00)	(-0.09,0.00,0.00)
	A_2	(8.79,9.93,0.00)	(8.83,9.86,0.00)	(0.04,-0.07,0.00)
	A_3	(2.68,6.07,2.00)	(2.55,5.91,2.00)	(-0.13,-0.16,0.00)

定位系统,统计7个不同位置标签的定位结果, x 轴坐标平均误差为7 cm, y 轴坐标平均误差为5 cm, z 轴坐标平均误差为27 cm。

由此可见,本文方法测量得到的被测标签位置信息在 x 轴和 y 轴方向与传统方法基本保持一

致,平均误差在10 cm以内,而 z 轴方向的测量误差较大,这是由于基站 A_3 坐标的解算过程中对其 z 轴位置进行了中心位置的近似,而实际摆放基站时难以保证 A_3 一定处于 $A_0 \sim A_2$ 包围平面的中心位置,导致 z 轴误差较大。

表2 标签定位误差对比

Table 2 Comparison of label positioning errors

测量方法	标签坐标真值/m	标签坐标值/m	误差/m	平均误差/m
人工测量	(3.40,3.39,0.50)	(3.33,3.34,0.67)	(0.07,0.05,0.17)	(0.05,0.05,0.19)
	(5.40,6.79,0.78)	(5.34,6.73,0.63)	(0.06,0.06,0.15)	
	(1.04,0.79,0.91)	(0.93,0.68,0.76)	(0.11,0.11,0.15)	
	(4.99,1.59,1.10)	(4.93,1.53,0.70)	(0.06,0.06,0.40)	
	(9.19,1.19,1.19)	(9.18,1.18,0.99)	(0.01,0.01,0.20)	
	(7.59,4.99,0.80)	(7.54,5.01,0.66)	(0.05,0.02,0.14)	
	(9.00,9.00,1.25)	(8.98,8.93,1.13)	(0.02,0.07,0.12)	
基站自定位	(7.90,4.40,0.89)	(7.99,4.40,0.54)	(0.09,0.04,0.35)	(0.07,0.05,0.27)
	(5.25,2.19,1.39)	(5.35,2.19,1.16)	(0.10,0.00,0.23)	
	(10.17,6.78,1.13)	(10.06,6.72,0.93)	(0.11,0.06,0.20)	
	(3.20,2.19,1.26)	(3.12,2.06,0.92)	(0.08,0.13,0.34)	
	(6.78,0.79,0.75)	(6.75,0.68,0.52)	(0.03,0.11,0.23)	
	(8.19,4.64,1.24)	(8.07,4.63,0.94)	(0.12,0.01,0.30)	
	(3.79,2.19,0.75)	(3.72,2.23,0.47)	(0.07,0.04,0.28)	

2.3 基站与标签部署位置对定位精度的影响测试

对于UWB定位系统而言,理想的部署方式为基站分散部署在标签的周围。实际在边坡测试时,受到地形限制,可能出现基站只能集中部署在边坡对面一侧的情况,因此,本节通过试验探究非理想的基站与标签摆放位置对于标签定位精度的影响。

模拟搭建的非理想环境的试验场景如图6所示,测试系统包括4个基站和3个标签,标签位于被测坡面上,基站全部部署在被测坡面对面一侧,经过人工实测,4个基站坐标分别为(0.00,0.00,0.00)、(10.00,0.00,0.00)、(5.00,5.00,0.00)和(5.00,2.00,5.00)。本文将重点测试标签在 y 轴方向上的定位精度受到的影响。

试验将3个标签分散放置在坡底的不同位置,初始实际坐标分别为(2.50,4.00,0.00)、(5.00,4.00,0.00)、(7.50,4.00,0.00)。人为将标签从坡底逐渐移动至坡顶,并保持标签的 x 轴坐标不变, y 轴坐标随着移动逐渐增大,标签 y 轴坐标的测量误差与其实际位置之间的关系如图7所示。



图6 非理想环境的试验场景

Fig. 6 Experimental scenario in a non ideal environment

由图7可知:在初始测量时,由于标签位于基站的包围圈内部, y 轴坐标的测量值误差较小,均在 ± 0.1 m以内;随着标签逐渐远离基站,误差逐渐增大,误差范围尚在 ± 0.3 m以内;当 y 轴实际坐标在10 m以上时, y 轴坐标的误差陡然增大,此时已经很难准确测量到标签位置。本试验给出了室外非理想的基站与标签相对位置关系对标签位置测量精度的影响,可为后续的误差补偿算法提供理论依据。

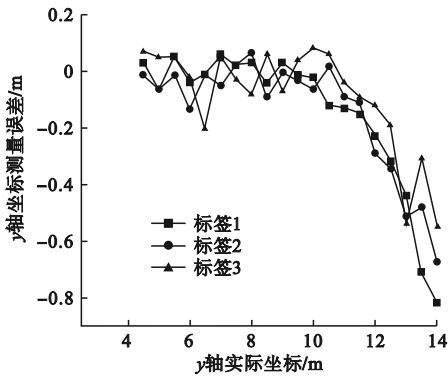


图 7 y 轴误差

Fig. 7 y-axis error

3 结论

本文设计了一套 UWB 基站快速自定位算法,只需提前约定安装时主基站与从基站的高度差信息,即可自动解算出基站坐标,解决了使用 UWB 技术在边坡部署大范围形变监测系统时,需要人工测量大量基站位置的问题。定位精度试验表明,相比人工定位基站的传统方法,应用本文方法搭建的 UWB 测量系统,在 100 m^3 的范围内测量得到的 UWB 标签坐标,在 z 轴方向的平均误差增加了 8 cm ,在 x 和 y 轴方向的平均误差与传统方法基本一致,均小于 10 cm 。本文提出的基站自定位方法在保证精度的前提下,可以有效降低在室外大规模布设 UWB 测试系统时的复杂度,为基于 UWB 技术搭建坡面形变测试系统奠定了基础。

参考文献 (References):

[1] 朱正伟,蒋威,张贵玲,等. 基于 RSSI 的室内 WiFi 定位算法[J]. 计算机工程与设计,2020,41(10):2958-2962.
ZHU Z W,JIANG W,ZHANG G L,et al. Indoor WiFi location algorithm based on RSSI[J]. Computer Engineering and Design,2020,41(10):2958-2962. (in Chinese)

[2] 邓诗凡,蒋伟,杨俊杰,等. 蓝牙到达角室内定位抗干扰优化研究[J]. 导航定位学报,2022,10(6):75-80.
DENG S F,JIANG W,YANG J J,et al. Anti-jamming optimization of bluetooth angle of arrival indoor positioning[J]. Journal of Navigation and Positioning,2022,10(6):75-80. (in Chinese)

[3] 韩丙辰,马引群,李平. 基于超声波的室内定位技术研究[J]. 山西大同大学学报(自然科学版),2017,33(6):21-24.
HAN B C,MA Y Q,LI P. Research on indoor positioning technology based on ultrasonic[J]. Journal of Shanxi Datong University(Natural Science Edition),2017,33(6):21-24. (in Chinese)

[4] 张保,张安思,梁国强,等. 激光雷达室内定位技术研究及应用综述[J]. 激光杂志,2023,44(3):1-9.
ZHANG B,ZHANG A S,LIANG G Q,et al. Review of lidar indoor positioning technology research and application[J]. Laser Journal,2023,44(3):1-9. (in Chinese)

[5] 金耀,周又眉,张贺,等. 北斗+5G 融合定位技术研究及应用进展[J]. 全球定位系统,2023,48(4):12-18.
JIN Y,ZHOU Y M,ZHANG H,et al. Research and application progress of BeiDou+5G fusion positioning technology[J]. GNSS World of China,2023,48(4):12-18. (in Chinese)

[6] WANG D,HUANG G W,DU Y,et al. Stability analysis of reference station and compensation for monitoring stations in GNSS landslide monitoring[J]. Satellite Navigation,2023,4(1):29.

[7] 陈云敏,陈赓,陈仁朋,等. 滑坡监测 TDR 技术的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(16):2748-2755.
CHEN Y M,CHEN Y,CHEN R P,et al. Testing study on applications of time domain reflectometry to slope monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(16):2748-2755. (in Chinese)

[8] ANVESHKUMAR N,GANDHI A S,DHASARATHAN V. Cognitive radio paradigm and recent trends of antenna systems in the UWB 3.1-10.6GHz[J]. Wireless Networks,2020,26(5):3257-3274.

[9] 沈铨君. 特殊环境条件下基于 UWB 的定位技术研究[D]. 西安:西京学院,2021.

[10] 张家僮,王洪源. 基于 UWB 技术的小车自动跟随系统的研究[J]. 沈阳理工大学学报,2020,39(4):76-81.
ZHANG J T,WANG H Y. Research on trolley tracking and positioning system based on UWB technology[J]. Journal of Shenyang Ligong University,2020,39(4):76-81. (in Chinese)

[11] MARTINELLI A,DOLFI M,MOROSI S,et al. Ultra-wide band positioning in sport:how the relative height between the transmitting and the receiving antenna affects the system performance[J]. International Journal of Wireless Information Networks,2020,27(1):18-29.

[12] BABA A I,WU F,AHMED T. A naive time of flight ranging scheme for wireless sensor networks[J]. International Journal of Communication Networks and Distributed Systems,2020,25(4):347-365.

[13] 周阳,孙昊,李丽娜. 一种改进的三边定位算法[J]. 辽宁科技学院学报,2021,23(2):1-3.
ZHOU Y,SUN H,LI L N. An improved trilateral positioning algorithm[J]. Journal of Liaoning Institute of Science and Technology,2021,23(2):1-3. (in Chinese)

(责任编辑:和晓军)