

基于超宽带技术的地铁车站盲障人士定位方案^{*}

王 盼¹ 庄异凡¹ 刘志钢¹ 黄家骏²

(1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海;

2. 上海电气自动化集团有限公司, 200240, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 为确保视觉障碍人士(以下简称“盲障人士”)在地铁站内行走的安全,从盲障人士站内乘车的定位需求出发,对比各类定位技术后确定采用 UWB(超宽带)技术,研究基于 UWB 技术的地铁车站盲障人士定位方案。对多种 UWB 技术定位算法的优缺点进行对比,确定采用 TW-TOF(双向飞行时间测距)法和 TDOA(到达时间差)法作为 UWB 技术的定位算法,并在此基础上开展基站布设间距测试和信号刷新频率测试。测试结果表明:在保证 0.5 m 的定位精度条件下,最小定位单元的基站布设需保持 12 m 的横向间距和 10 m 的纵向间距;信号刷新频率设置为 1 Hz 较为适宜。

关键词 地铁车站;盲障人士;超宽带技术;人员定位;双向飞行时间测距法;到达时间差法

中图分类号 TN925; U29-39

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.007

Positioning Scheme for Visually Impaired and Blind Passengers in Metro Station Based on Ultra-wideband Technology

WANG Pan, ZHUANG Yifan, LIU Zhigang, HUANG Jiajun

Abstract In order to ensure the safety of visually impaired and blind passengers (hereinafter referred to as 'the blind passengers') walking in the metro station, based on their positioning needs of the blind passengers in the metro station, UWB (ultra-wideband) technology is selected after comparing various positioning technologies, and the positioning scheme for the blind passengers in metro station based on UWB technology is studied. The advantages and disadvantages of various positioning algorithms of UWB technology are compared, and TW-TOF (two-way time-of-flight ranging) method and TDOA (time difference of arrival) method are used as positioning algorithms of UWB technology. On this basis, the base station spacing test and signal refresh frequency test are carried out. The test results show that the base station layout of the mini-

mum positioning unit should keep 12 m transverse spacing and 10 m longitudinal spacing under the condition of ensuring 0.5 m positioning accuracy. It is appropriate to set the signal refresh frequency as 1 Hz.

Key words metro station; visually impaired and blind people; ultra-wideband technology; personnel positioning; two-way time-of-flight ranging; time difference of arrival method

First-author's address School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China

据推算,截止 2020 年底,我国约有 1 350 万视力残疾者。地铁作为我国城市客运交通的重要组成部分,在满足普通人群出行需求的同时,不应忽略视觉障碍人士(后文简称“盲障人士”)这个庞大且特殊的乘客群体。盲障人士因视力残疾而缺乏对空间位置信息的感知能力,独立完成一次地铁出行十分困难。另一方面,地铁车站内也易发生因位置信息缺失而无法顺利开展乘车服务的情况。为此,本文针对地铁站内盲障人士定位问题,开展基于 UWB(超宽带)技术的地铁车站盲障人士定位方案研究,本研究对提升地铁车站乘客服务水平、保障盲障人士地铁出行安全具有重要作用。

由于地铁站内诸多设施设备及建/构筑物(特别是多重墙壁)对卫星信号的遮挡,GNSS(全球导航卫星系统)存在定位误差大或无法定位的问题,并不适用于地铁车站。随着室内定位技术的不断进步,UWB 技术因具备抗干扰效果好、精度高及穿透力强等诸多优点,逐渐成为室内人员精准定位最有潜力的新技术之一^[1]。文献[2]设计了一种盲障乘客地铁辅助出行系统。文献[3]分析了 UWB 技术中定位基站数量等因素对定位精度的影响,提出

^{*} 国家自然科学基金面上项目(52072235);上海市青年科技英才扬帆计划项目(21YF1415800);2020 年上海高校市级重点课程建设项目(s202010001)

以 GDOP(几何精度因子)最小化为目标的基站布设优化方案。

本文从盲障人士在车站内的定位需求出发,结合地铁车站的特定环境,对比多个定位技术和定位算法方法,并设计定位测试及开展实地应用,以研究基于 UWB 技术的地铁车站盲障人士定位方案。

1 地铁车站盲障人士定位需求分析

盲障人士存在视力、色感等长期缺损问题,这些缺损与地铁车站复杂的室内环境相互作用后,一定程度上阻碍了盲障人士借助楼扶梯实现楼层转换的过程。另外,受楼梯和扶梯等外部环境因素的影响,盲障人士在上下楼扶梯时也容易发生跌倒等情况。因此,为了进一步保障自身安全,盲障人士倾向于使用垂直电梯(以下简称“垂梯”)这种专为轮椅乘坐者等行动不便人群设计的无障碍设施^[4]。

在借助垂梯实现地铁区域楼层转换的过程中,盲障人士将面对无法获知垂梯位置、与其他乘客流

线冲突等风险,由此产生了站内乘车导航等服务需求。这些需求的满足,都需要建立在获取盲障人士准确位置的基础。在对盲障人士地铁乘车行为进行长期观察后,本文认为,盲障人士在地铁车站的行走轨迹主要包括空间高密度下的迂回轨迹、空间中低密度下直线轨迹两部分,因此,盲障人士在地铁站内的定位需求主要包括对这两部分行走轨迹的高精度定位。

2 车站内人员的定位技术及算法

2.1 定位技术选择

选取抗干扰性、穿透性、定位精度和成本共 4 项指标作为选取盲障人士站内定位技术的评判参数。如表 1 所示,采用打分法为目前常用的几种定位技术在地铁车站环境中的表现进行评分^[5]。由表 1 可知:UWB 技术的得分最高;跟其他定位技术相比,UWB 具有较为明显的优势。因此,本文选取该技术,用以辅助盲障人士在地铁车站内定位。

表 1 几种常用定位技术的性能得分对比

Tab.1 Comparison of performance scores of several common positioning technologies								
参数	全球卫星定位系统	Wi-Fi 定位技术	射频识别技术	Zigbee 无线定位技术	超声波技术	红外线技术	蓝牙技术	UWB 技术
抗干扰性	1	5	2	3	3	1	2	4
穿透性	1	3	3	4	1	1	3	5
定位精度	1	1	3	2	4	1	3	5
成本	1	1	2	3	5	2	3	3
合计	4	10	10	12	13	5	11	17

注:得分为“1”表示技术性能最差;得分为“2”表示技术性能较差;得分为“3”表示技术性能中等;得分为“4”表示技术性能较好;得分为“5”表示技术性能最好。

2.2 定位算法选择

采用 UWB 技术进行室内定位时,其定位算法主要有以下三类:

- 1) 基于时间测距的方法有 TOA(到达时间)法、TDOA(到达时间差)法、TW-TOF(双向飞行时间测距)法等;
- 2) 基于信号传播测距的方法有 RSSI(信号强度)法等;
- 3) 基于相位角测距的方法有信号 AOA(到达角度)法等。

如表 2 所示,选取多个常用定位算法进行优缺点对比^[5-6],最终选择 TW-TOF 法和 TDOA 法作为本文基于 UWB 技术的定位算法。

表 2 多个常用室内定位算法的优缺点对比

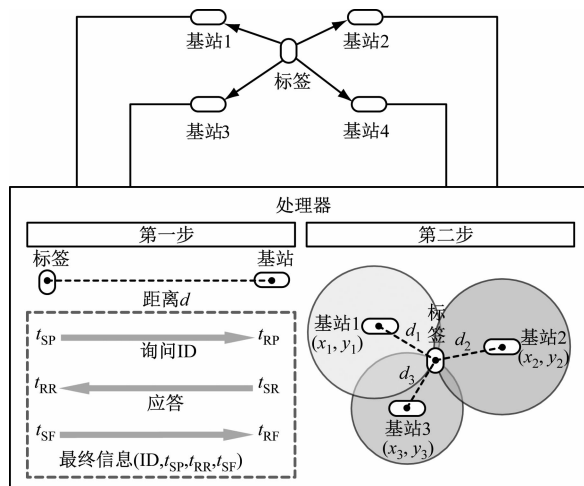
Tab.2 Comparison of advantages and disadvantages of multiple common indoor positioning algorithms		
算法	优点	缺点
TOA	视距条件下精度高	标签和基站需时钟同步
TDOA	精度高	基站间需时钟同步
RSSI	成本低	精度低
AOA	结构简单	易受干扰
TW-TOF	无需时钟同步	成本略高

以二维定位为例说明 UWB 技术的定位原理。如图 1 所示,其原理分两个步骤:

- 1) 第一步,借助 TW-TOF 法,利用标签与基站询问、应答及再确认等相关信息,计算定位标签与

定位基站的距离;

2) 第二步,在获取已知的标签与各基站距离,以及各基站坐标信息的基础上,利用 TDOA 法解算定位标签的位置坐标^[7],最终得到盲障人士的位置信息。



注:ID——身份标识号; t_{SP} ——标签发出轮询信息的时刻; t_{RP} ——基站收到轮询信息的时刻; t_{SR} ——基站发送回复信息的时刻; t_{RR} ——标签收到回复信息的时刻; t_{SF} ——标签发出 t_{SP} 、 t_{SR} 的时刻; t_{RF} ——基站收到 t_{SP} 、 t_{SR} 的时刻; d_1 ——标签与基站 1 的距离; d_2 ——标签与基站 2 的距离; d_3 ——标签与基站 3 的距离; (x_1, y_1) ——基站 1 的二维坐标; (x_2, y_2) ——基站 2 的二维坐标; (x_3, y_3) ——基站 3 的二维坐标。

图 1 UWB 技术定位原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of UWB technology positioning

3 UWB 技术测试

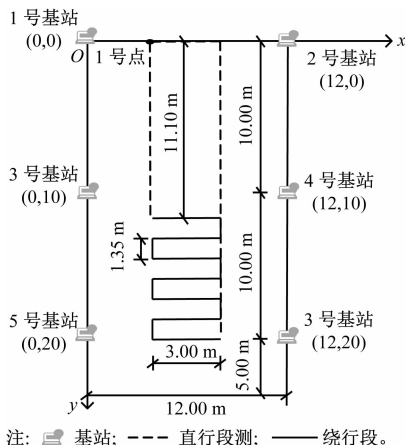
3.1 测试概况

3.1.1 测试环境

在长 25 m、宽 12 m 的测试场地中布设障碍物,以模拟地铁站的复杂环境并展开测试。测试基站和标签的频段范围为 6.1 ~ 6.9 GHz,发射功率谱密度为 -41.3 dBm/MHz,其接收灵敏度 ≤ -90 dBm。如图 2 所示,测试轨迹由直行段和绕行段组成,分别模拟直行轨迹和迂回轨迹。

3.1.2 测试过程

文献[8]测试得到残障人士在地铁站内的移动速度大约为 0.32 ~ 0.87 m/s,本研究选取 0.50 m/s 和 1.00 m/s 两种速度分别模拟站内盲障人士“慢速行走”、“快速行走”两种移动模式。设置 1 号点为步行测试的起点和终点。测试人员头部佩戴装有



注:■ 基站;--- 直行段测;—— 绕行段。

图 2 测试环境示意图

Fig. 2 Diagram of test environment

UWB 定位标签的帽子,将按逆时针方向沿直线段和绕行段行进返回至 1 号点视为 1 圈测试。每次测试要求测试人员行走 7 圈,取第 2 圈至第 6 圈的稳定数据作为有效数据。一次测试结束后,在确保测试员充分休息后方可进入下一次测试。

3.1.3 精度计算

如图 2 所示,以 1 号基站所在位置为坐标原点构建平面迪卡尔坐标系。选取距离均方根 D 来评估测试的定位精度^[1,9],其计算式为:

$$D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - X_i)^2 + (y_i - Y_i)^2]} \quad (1)$$

式中:

n ——定位标签在被定位期间的读数数量;

x_i, y_i ——分别为 i 时刻测试人员基于 UWB 的定位的横坐标、纵坐标,由 UWB 处理器输出;

X_i, Y_i ——分别为 i 时刻测试人员实际位置的横坐标、纵坐标。

设 L_{i-1} 为测试人员在 $i-1$ 至 i 时刻运动产生的路程,该变量近似为运动时间的函数,其计算式为:

$$L_{i-1} = v(t_i - t_{i-1}) \quad (2)$$

式中:

t_i, t_{i-1} ——分别为 i 时刻、 $i-1$ 时刻的时间;

v ——测试人员的速度,本文取常量。

进而可计算得到 X_i, Y_i ,其计算式为:

$$\begin{cases} X_i = X_{i-1} + L_{i-1} \cos \theta_{i-1} \\ Y_i = Y_{i-1} + L_{i-1} \sin \theta_{i-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中:

X_{i-1}, Y_{i-1} ——分别为测试人员在 $i-1$ 时刻所处实际位置的横、纵坐标;

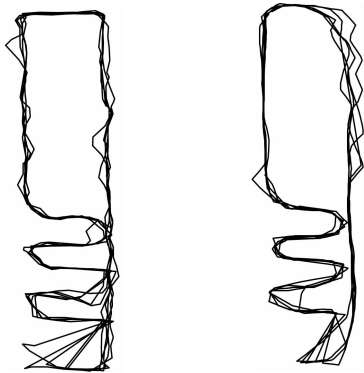
θ_{i-1} ——测试员在 $i-1$ 至 i 时刻运动产生的位

移与 x 轴正方向的夹角。

3.2 基站布设间距测试

测试时设计了两种基站布设方案:方案一为打开 1 号、2 号、5 号及 6 号基站;方案二为打开全部 6 个基站。各基站的架设高度均为 2.5 m,其二维坐标见图 2。在这两种不同的基站布设方案下,测试人员分别以 0.5 m/s 和 1.0 m/s 两种速度工况沿既定的测试路线行走,测试行走过程的定位精度。

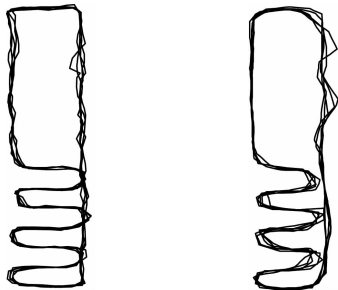
提取数据绘制得到方案一、方案二不同速度工况下的测试轨迹如图 3 及图 4 所示,可以看出方案二的测试轨迹更贴合测试人员的实际运动轨迹。



a) 行走速度为 0.5 m/s b) 行走速度为 1.0 m/s

图 3 方案一两种速度工况下测试人员的定位轨迹

Fig.3 Test personnel positioning trajectory under two speed conditions in Scheme I



a) 行走速度为 0.5 m/s b) 行走速度为 1.0 m/s

图 4 方案二两种速度工况下测试人员的定位轨迹

Fig.4 Test personnel positioning trajectory under two speed conditions in Scheme II

经计算,两个测试方案的定位精度如表 3 所示,方案二在 0.5 m/s 和 1.0 m/s 速度工况下的定位精度值均在 0.50 m 范围内,可满足盲障人士对定位精度的要求。因此,最小定位单元的基站布设需横向间距 12 m、纵向间距 10 m。

3.3 定位信号刷新频率测试

在方案二基站布设间距的基础上,为了找出既能满足定位精度要求又能降低功耗的定位信号刷新频率,选取 1 Hz、5 Hz、10 Hz 及 20 Hz 4 种定位信

号刷新频率,计算这 4 种刷新频率下测试人员分别以 0.5 m/s、1.0 m/s 两种速度工况沿测试路线行走时的定位精度,其计算结果如表 4 所示。

表 3 两种测试方案下不同行走速度的定位精度

Tab.3 Positioning accuracy of different walking speeds in two test schemes

测试方案	测试区段	$D_{0.5}/\text{m}$	$D_{1.0}/\text{m}$
方案一	直行段	0.31	0.91
	绕行段	0.56	0.79
方案二	直行段	0.24	0.45
	绕行段	0.28	0.50

注: $D_{0.5}$ ——行走速度为 0.5 m/s 时的定位精度; $D_{1.0}$ ——行走速度为 1.0 m/s 时的定位精度。

表 4 两种速度工况下 4 种定位信号刷新频率的定位精度

Tab.4 Positioning accuracy of four positioning signal refresh frequencies under two speed conditions

刷新频率	测试区段	$D_{0.5}/\text{m}$	$D_{1.0}/\text{m}$
1 Hz	直行段	0.24	0.45
	绕行段	0.28	0.51
5 Hz	直行段	0.24	0.46
	绕行段	0.29	0.52
10 Hz	直行段	0.25	0.46
	绕行段	0.27	0.50
20 Hz	直行段	0.28	0.45
	绕行段	0.29	0.46

进一步计算刷新频率由 1 Hz 分别增大至 5 Hz、10 Hz 及 20 Hz 时所产生的相对误差和平均相对误差,结果如表 5 所示。

表 5 两种速度工况下增大定位信号刷新频率产生的相对定位误差与平均相对定位误差

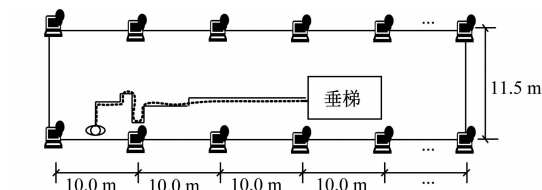
Tab.5 Relative positioning errors and average relative positioning errors caused by increasing the refresh frequency of positioning signal under two speed conditions

频率变化情况	测试区段	相对定位误差/%		平均相对定位误差/%
		$D_{0.5}$	$D_{1.0}$	
从 1 Hz 增大到 5 Hz	直行段	0.00	2.22	1.94
	绕行段	3.57	1.96	
从 1 Hz 增大到 10 Hz	直行段	4.17	2.22	0.21
	绕行段	-3.57	-1.96	
从 1 Hz 增大到 20 Hz	直行段	16.67	0.00	2.61
	绕行段	3.57	-9.80	

由表5可知:当行走速度为0.5 m/s时,刷新频率从1 Hz变化到10 Hz,直行段的定位精度增大了4.17%。刷新频率从1 Hz增大至5 Hz、10 Hz及20 Hz,其产生的平均相对定位误差分别增加了1.94%、0.21%及2.61%。由此可得到结论:相较于其他3种刷新频率,采用1 Hz作为刷新频率,既能满足定位需求又能减少能源消耗,故选取1 Hz作为定位信号刷新频率的设定值。

4 案例应用

以绍兴市某地铁站的岛式站台为例说明基于UWB技术的地铁车站盲障人士定位方案。该站台长度为120.0 m、宽度为11.5 m,垂梯位置布置如图5所示。由于盲障人士上下车的车厢位置未知,故在站台层采取了全覆盖布设方式并进行测试。测试所需的设备费用共计13.02万元,共设26个基站(设备成本为5 000元/个)及1个标签(200元/个)。在保证基站横间距、纵间距的基础上,选取合适位置安装基站,并将定位信号刷新频率设为1 Hz。



注:——盲障测试者的实际轨迹;---盲障测试者的定位轨迹。

图5 绍兴市某地铁站站台层基站布设示意

Fig.5 Layout diagram of base stations on the platform floor of a metro station in Shaoxing city

为验证该定位方案的有效性,随机邀请了一位盲障人士参加测试,得到该盲障人士佩戴UWB定位标签乘坐垂梯至站台后的实际轨迹及定位轨迹,如图5所示。由图5可知:定位轨迹与实际轨迹基本重合;计算得到该段运动过程的定位精度为0.24 m,可满足地铁车站盲障人士定位精度要求。

5 结语

为保障盲障人士在地铁站内的乘车安全,本文从盲障人士的定位需求出发,选择UWB技术并选用TW-TOF、TDOA定位算法,实现了地铁车站盲障人士的精准定位。在保证定位精度不低于0.5 m的前提下,本文测试得到基于UWB技术的地铁车站盲障人士定位方案为:基站间隔的最小定位尺寸

应为横向间距12 m、纵向间距10 m;定位信号的刷新频率采用1 Hz。该测试方案可满足盲障人士的定位精度要求,能切实保障盲障人士在地铁站内的出行安全。后续将基于全生命周期的经济性问题对该方案开展更为深入的研究。

参考文献

- [1] 刘公绪,史凌峰.室内定位技术的测试与评估标准综述[J].导航定位学报,2019,7(2):1.
LIU Gongxu, SHI Lingfeng. Review of testing and evaluation standards for indoor positioning technology[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2019, 7(2): 1.
- [2] 刘源.视障乘客地铁辅助出行系统的设计与开发[D].南京:南京理工大学,2020.
LIU Yuan. Design and development of subway auxiliary travel system for visually impaired passengers[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [3] 王川阳.UWB定位方法及构型优化研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
WANG Chuanyang. Study on UWB positioning method and configuration optimization[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [4] 王通.基于Wi-Fi探针的地铁站内乘客路径辨识[D].上海:上海工程技术大学,2020.
WANG Tong. Passenger path identification in subway stations based on Wi-Fi probe[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2020.
- [5] 周刚.基于UWB定位的变电站作业安全监控技术研究[J].中国安全生产科学技术,2016,12(8):125.
ZHOU Gang. Study on power substation operation safety monitoring technology based on UWB location[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(8): 125.
- [6] 王慧强,高凯旋,吕宏武.高精度室内定位研究评述及未来演进展望[J].通信学报,2021,42(7):198.
WANG Huiqiang, GAO Kaixuan, LYU Hongwu. Survey of high-precision localization and the prospect of future evolution[J]. Journal on Communications, 2021, 42(7): 198.
- [7] 牛群峰,曹一帆,王莉,等.基于TW-TOF的UWB室内定位技术与优化算法研究[J].自动化与仪表,2018,33(1):5.
NIU Qunfeng, CAO Yifan, WANG Li, et al. Study of UWB indoor positioning technology and optimization algorithm based on TW-TOF[J]. Automation & Instrumentation, 2018, 33(1): 5.
- [8] JIANG C S, ZHENG S Z, YUAN F, et al. Experimental assessment on the moving capabilities of mobility-impaired disabled[J]. Safety Science, 2012, 50(4): 974.
- [9] MAALEK R, SADEGHPOUR F. Accuracy assessment of ultra-wide band technology in locating dynamic resources in indoor scenarios[J]. Automation in Construction, 2016, 63:12.

(收稿日期:2022-03-29)