



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

基于RSSI序列特性的RFID多标签相对定位方法

何勇, 郭政鑫, 桂林卿, 盛碧云, 肖甫

引用本文

何勇, 郭政鑫, 桂林卿, 盛碧云, 肖甫. [基于RSSI序列特性的RFID多标签相对定位方法](#)[J]. 计算机科学, 2023, 50(11): 296-305.

HE Yong, GUO Zhengxin, GUI Linqing, SHENG Biyun, XIAO Fu. [RFID Multi-tag Relative Location Method Based on RSSI Sequence Features](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(11): 296-305.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于流量和文本指纹的两层物联网设备分类识别模型](#)

Two-layer IoT Device Classification Recognition Model Based on Traffic and Text Fingerprints

计算机科学, 2023, 50(8): 304-313. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220900145>

[对一个基于身份远程数据完整性验证方案的分析与改进](#)

Analysis and Improvement on Identity-based Remote Data Integrity Verification Scheme

计算机科学, 2023, 50(7): 302-307. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220600067>

[基于深度学习的超高频标签识别系统](#)

Tag Identification for UHF RFID Systems Based on Deep Learning

计算机科学, 2023, 50(6A): 220200151-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220200151>

[WiPasLoc:基于WiFi的被动式室内人员定位新方法](#)

WiPasLoc:A Novel Passive Indoor Human Localization Method Based on WiFi

计算机科学, 2022, 49(11): 259-265. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220500098>

[基于改进型灰狼算法的RFID网络规划](#)

Improved Grey Wolf Optimizer for RFID Network Planning

计算机科学, 2021, 48(1): 253-257. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.200200095>

基于 RSSI 序列特性的 RFID 多标签相对定位方法

何勇 郭政鑫 桂林卿 盛碧云 肖甫

南京邮电大学计算机学院、软件学院、网络空间安全学院 南京 210023

江苏省无线传感网高技术重点实验室 南京 210023

(2976832917@qq.com)

摘要 室内多目标的高精度定位技术是实现定制化智能服务的关键。当前,基于射频识别技术(Radio Frequency Identification,RFID)的室内定位技术因其成本低、易于部署和多目标感知等优势,受到了学术界和产业界的广泛关注。然而,传统的基于 RFID 的多目标相对定位系统需要使用多组接收天线进行数据收发,这导致系统的部署成本高昂,同时接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication,RSSI)序列还会出现数据中断的问题。为解决这些问题,提出了一种基于 RSSI 序列特性的 RFID 多标签相对定位方法。该方法首先采用匀速移动天线的方式来获取多目标标签的接收 RSSI 信号序列;然后,对接收 RSSI 数据进行预处理来填充缺失数据,并构建基于余弦相似度的序列相似度量表;最后,从多个组维度设计不同的标签分组算法,以实现 RFID 多标签的相对定位。通过对典型室内多组 RFID 标签阵列进行大量相对定位测试,实验结果表明,所提方法的 RFID 标签相对定位平均准确率超过 92%,对 5×5 的天线阵列平均定位计算时长小于 1s,相比其他工作计算效率提高了近 10 倍。

关键词: 相对定位;射频识别;接收信号强度指示;余弦相似度

中图法分类号 TP391

RFID Multi-tag Relative Location Method Based on RSSI Sequence Features

HE Yong, GUO Zhengxin, GUI Linqing, SHENG Biyun and XIAO Fu

1 School of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

2 Jiangsu High Technology Research Key Laboratory for Wireless Sensor Networks, Nanjing 210023, China

Abstract High-precision indoor multi-target localization technology is crucial for implementing customized intelligent services. Currently, indoor localization technology based on radio frequency identification(RFID) has received extensive attention from both academia and industry due to its advantages such as low cost, easy deployment, and multi-target sensing. However, traditional RFID-based multi-target relative localization systems require the use of multiple receiving antennas for data transmission and reception, leading to high deployment costs. Additionally, the received signal strength indication(RSSI) sequence also have data interruption. To address these problems, this paper proposes an RFID multi-tag relative localization method based on the features of RSSI sequence. This method first uses uniformly moving antennas to obtain the received RSSI signal sequences of multiple target tags. Then, the received RSSI sequence data is pre-processed to fill in missing data and construct a sequence similarity measurement table based on cosine similarity. Finally, this paper designs different tag grouping algorithms from multiple group dimensions to achieve relative localization of RFID multi-tags. Through a large number of relative localization tests on a typical indoor multi-group RFID tag array, experimental results show that the proposed method has an average accuracy of over 92% for RFID tag relative localization, and the average localization calculation time for a 5×5 antenna array is less than 1s. Compared with other relative localization works, the computational efficiency of this method is improved by nearly 10 times.

Keywords Relative location, Radio frequency identification, Received signal strength indication, Cosine similarity

到稿日期:2023-03-21 返修日期:2023-07-17

基金项目:国家杰出青年科学基金(62125203);国家自然科学基金(61932013);江苏省重点研发计划重大科技示范项目(BE2022798);南京邮电大学引进人才科研启动基金项目(自然科学 NY223041)

This work was supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China(62125203), National Natural Science Foundation of China(61932013), Key Research and Development Program of Jiangsu Province(BE2022798) and Natural Science Research Start-up Foundation of Recruiting Talents of Nanjing University of Posts and Telecommunications(NY223041).

通信作者:郭政鑫(guozhengxin_gzx@163.com)

1 引言

近年来,随着物联网技术的飞速发展,以目标位置为基础的室内应用服务的需求也日益增加。以日常生活中的智能仓储系统(Warehouse Management System, WMS)为例,随着物流行业的飞速发展,目前智能仓储系统在人们日常生活中发挥着不可替代的作用,且在未来拥有巨大的商业价值^[1]。对于智能仓储系统而言,仓储物体的定位问题是实现物品统计、货物调度以及物流分析的基础,是评估仓储系统智能化程度的重要指标。然而在实际仓储系统环境中,由于受到环境复杂多样、信号多径干扰以及定位技术成本等相关因素的影响,具体物体的定位工作成为目前仓储系统的痛点问题。

目前常见的室内定位技术包括基于Wi-Fi、基于蓝牙、基于红外线和基于射频识别技术(Radio Frequency Identification, RFID)的定位系统。其中,基于Wi-Fi技术的目标定位精度只有米级^[2],不适用于需要高精度追踪的物流仓储系统。蓝牙信号容易受到环境的干扰,导致定位精度低^[3]。而红外线技术通过光学传感器接受红外线进行定位^[4],导致不适用于存在非视距的仓储环境。与其他定位技术相比,RFID技术作为物联网短距离通信技术之一,主要适合应用于近距离物体识别、定位、测距等工作,同时由于其具有非接触式、成本低廉的特性,基于RFID的室内定位技术在众多室内定位方案中脱颖而出。

按照对标签位置的定位关系,基于RFID的室内定位技术可划分为相对定位和绝对定位。对于相对定位,其只需找出一群对象中目标对象的相对位置关系,无须获取其在物理空间内的真实坐标值。而绝对定位需要获得目标对象在现实空间坐标系下的精准坐标值。通常,绝对定位需要使用多根RFID天线对标签进行定位,其部署成本高昂,测量效率较低。而对于日常生活中的绝大多数场景而言,例如仓储环境下的物体跟踪定位,仅需要知道物体在空间中的相对关系,即可完成既定的检测任务和统计需求。因此本文着力于多标签的相对定位工作,提高标签定位效率。

目前基于RFID的相对定位工作主要使用的信号特征包括:信号到达时间(Time of Arrival, TOA)、信号到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)、信号到达角(Angle of Arrival, AOA)以及接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)。基于TOA^[5]和TDOA^[6]的定位方法对时间测量的准确性要求较高,而RFID系统因系统的低通信率而无法准确地观测时间。基于AOA^[7]的定位方法需要同时部署多根天线或多个参考标签,测量成本较高。相比其他信号特征,基于RSSI序列的定位仅需读取读写器提供的接收信号强度信息,无须进行其他信号处理操作,且不需要高精度的时间校正操作,抗干扰能力强,更适合在实际复杂环境中使用。因此,本文利用RFID接收信号的RSSI序列来进行多标签的相对定位。

对于RFID多标签的相对定位工作而言,移动射频标签或读写器天线是实现相对定位的常用方法。此类方法通过移动标签或读写器天线来改变天线与标签的通信距离,进而使

无线射频信号产生变化以分析射频标签的相对位置,完成多标签的相对定位。Shangguan等^[8]于2013年提出了OTrack系统,该系统利用标签足够接近读写器时会引发读写器读取率变化这一特点,对传送带上的物体按先后顺序排序。Wang等^[9]于2020年提出了基于受影响区域重叠面积的相对定位方法HMO,该方法利用人在标签附近移动时引起RSS值的变化差异,重建标签的相对位置。以上两种基于RSS的相对定位系统都无法处理受遮挡或其他干扰因素影响的定位错误。因此,如何节省部署成本、提高相对定位准确率、节约计算时间是实现RFID多标签定位的难题。

为了解决这些问题,本文提出了一种基于RSSI序列特性的RFID多标签相对定位方法,该方法通过采用匀速移动天线的方式来获取多目标标签的原始接收RSSI信号序列。针对原始RSSI序列的数据中断、缺失问题,本文提出RSSI序列插值方法,并通过Savitzky-Golay滤波器来消除RSSI序列的噪声。为了衡量预处理后RSSI序列的波形相似度问题,本文提出了基于余弦相似度的RSSI序列相似度计算方法,并构建了相似度量表来提高系统的计算效率。最后,为了实现高精度的RFID多标签相对定位工作,本文针对不同分组目标设计了多种不同的标签分组算法来进行最终标签阵列的确定。大量的实验测试表明,本文提出的方法的RFID标签相对定位平均准确率超过92%,对5*5的天线阵列平均定位计算时长小于1s,相比其他相对定位工作计算效率提高了近10倍。

本文第2章对RFID相对定位的相关工作进行介绍;第3章介绍了RFID的定位系统组成原理,并提出RFID的RSSI序列所具有的3个特性;第4章详细说明了本文提出的基于余弦相似度的RFID相对定位方法的实现过程;第5章对本文提出的相对定位系统进行大量的实验测试和性能分析;最后总结全文。

2 RFID定位的相关工作

根据采用的信号特征,目前基于RFID的标签定位相关工作可以划分为基于信号相位的定位工作和基于接收信号强度指示RSSI的定位工作。

2.1 基于相位的RFID定位

无线射频接受信号的相位受载波波长和传输距离影响,通过研究接收信号相位的变化可以计算得到不同距离的反射信号周期,进而完成相关定位工作。Nikitin等^[10]分析肢体上附着的标签相位信息来跟踪3D空间中的身体运动,提取同一肢体上标签的相位特征并根据人体几何模型的肢体确定方向,重建身体姿势,利用Kalman滤波使得身体运动结果平滑。Tripicchio等^[11]提出了一种基于RFID相位差的移动机器人全球定位方法,构建了一个相位差模型和基于可读性的分类逻辑策略,并结合一个新型粒子滤波器定位算法来实现精度约为60cm的机器人轨迹追踪精度。BP-SVR^[12]针对RFID的相位差信息提出基于反向传播-支持向量回归模型,将标签信号强度和相位差作为特征输入,并结合神经网络的训练来提高数据维度,实现RFID标签的高精度定位。

TRL^[13]设计了一种基于相位图关联性的标签轨迹定位算法,利用后向散射信号的相位来衡量 RFID 系统阅读器与天线之间的线性相对距离,并采用动态时间规划算法来衡量相位曲线之间的相关性,以完成标签相对定位工作。TagSort^[14]利用 RFID 标签物理层的相位信息来实现不同标签阵列标签 ID 的相对定位,提出了新的相位信息滤波和峰值检测算法,实现了超过 95% 的精准相对标签定位结果。虽然基于 RFID 相位通常可以获取高精度的定位结果,但是在相对定位工作中,由于 RFID 系统的相关噪声和时变相偏都会导致接收信号的相位产生偏移,进而导致获取的相位信息失真,相邻位置标签差异性并不明显。同时,为了消除相位偏移,也需要增加系统的计算负荷,降低系统效率。相比之下,信号的 RSSI 特征会随着距离的增加呈现出衰减特性。虽然在绝对定位工作中,其精度低于相位信息,但是处于相同位置标签对应的 RSSI 序列会呈现出一致性变化趋势,更适合进行快速、高效的相对定位工作。

2.2 基于 RSSI 的 RFID 定位

基于 RFID 信号的 RSSI 定位技术可以分为绝对定位和相对定位两类定位任务^[15]。

对于绝对定位工作而言,其主要目的是获取标签位于空间中的位置,进而实现不同类别的标签定位以及轨迹追踪效果。Cruz 等^[16]利用 RFID 的 RSSI 数值来确定标签位置和对应的距离,其可以在长距离范围内实现平均定位误差为 0.43 m 的精度。文献^[17]对 RFID 标签进行重新设计,构造了一个具有极简电介质谐振器的标签硬件,以得到小规模衰减的 RSSI 序列,并推导出此信道环境下的 Cramer-Rao 下界,从而提高标签定位的精度。Cavur 等^[18]将 RSSI 信息用于地下矿井定位工作,提出了一种基于信号指纹的混合定位模型,在地下矿井中的定位精度可以达到 3.13 m。Liu 等^[19]利用 RFID 标签的 RSSI 信息来校正相位曲线,然后结合相位曲线的静止点来完成对天线轨迹位置的估计。RF-SLAM^[20]针对 RFID 系统的 RSSI 测量值使用图模型来解决同步定位和标签映射的问题,并集合多天线 MIMO 技术来实现机器人和 RFID 标签的三维位置定位,定位精度达到分米级别。随着深度学习技术的发展,利用轻量级的 RSSI 信息结合学习模型的定位工作得到了发展。文献^[21]将深度学习算法与传统定位技术相结合,使用不同位置天线波束对应的 RFID 相位和 RSSI 信息,构建对应位置识别学习模型,来完成不同环境下的标签定位工作。eDeepRFID-IPS^[22]对无缘 RFID 标签设备的 RSSI 信息使用深度学习算法,结合室内智能家居对象,从而可以更加实时精确地定位感知目标。

对于 RFID 的 RSSI 信号特征而言,虽然其在绝对定位精度上会低于高灵敏度的相位信息,但是在相对定位工作中,由于不需要获取标签在空间中的位置,仅需要获取不同标签之间的空间对应关系,这种 RSSI 的轻量化计算得到了研究人员的关注。ReLoc^[23]将 RSSI 和相位信息相结合,利用相位变化的最大似然估计完成标签阵列的横向定位,然后结合两天线倾斜的 RSSI 轮廓相互变化,进行水平位置的区分,其平均进度超过 93%。在最新的工作中,Gui 等^[24]利用了标签阵列

中每个标签反射信号的 RSSI 序列之间的相似关系,通过构建标签之间的皮尔森系数来进行标签分簇的扩簇和缩簇工作,进而实现阵列标签的相对定位。本文基于以上相关研究工作,深入研究天线阵列中不同标签所反射的 RSSI 序列信息,并对 RSSI 波形阵列构建余弦相似量表,且基于 RSSI 信号功率分布、中断数据位置点以及序列相似度这 3 个维度进行标签分组调整,设计了高效的分组算法,极大地提高了 RFID 标签阵列相对定位的效率。

3 基于 RSSI 的 RFID 定位系统

3.1 RFID 系统基本原理

RFID 射频感知系统主要由 3 部分构成,分别是 RFID 标签、读写器和天线,如图 1 所示。RFID 标签又由天线和芯片构成,内部天线用于接收和发射射频电磁波,芯片则用于解调天线接收到的电磁波信号。读写器主要负责采集标签返回的信息并进行相关处理。天线分为标签天线和读写器天线,主要用于接收和发射电磁波。

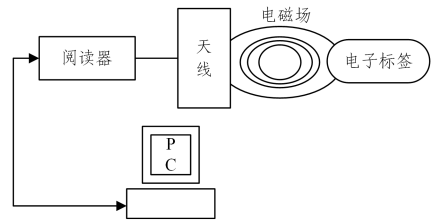


图 1 RFID 系统构成

Fig. 1 Composition of RFID system

RFID 系统采用反向散射的工作方式进行数据的收发工作,读写器与标签之间的通信链路分为前向链路和后向链路。在理想的自由空间中,前向链路中标签接收到的信号功率的计算式如式(1)所示:

$$P_{Tag_r} = P_{R_t} G_R G_{Tag} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1)$$

其中, P_{R_t} 表示读写器天线的发射功率, G_R 表示读写器天线增益, G_{Tag} 表示标签天线增益, λ 表示工作波长, d 表示读写器天线与标签天线之间的距离。

在反向链路中,读写器接收到的信号功率的计算式如式(2)所示:

$$P_{R_r} = P_{R_t} G_R^2 G_{Tag}^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^4 \quad (2)$$

3.2 RFID 标签相对定位特性

在 RFID 感知系统中,相对定位工作是目前应用最为广泛的使用场景。图 2 为 RFID 标签相对定位场景示意图,其中被贴附上 RFID 标签的物体被置于 XOY 构成的水平面上,RFID 天线沿着 X 轴的正方向移动并不断获取不同标签所反射回来的射频信号,通过阅读器进行解析可以提取到不同时刻标签反射信号的 RSSI 值。对 RFID 标签阵列模型所提取到的 RSSI 序列进行分析,其具有以下 3 个基本特性。

1) RSSI 序列同列相似性。在得到完整的数据序列后,可以发现,随着天线的运动,不同位置标签与天线之间的距离也会产生相应的变化。接收天线所获取到的 RSSI 值与天线和

标签之间的距离 d 和入射角 θ 相关,其对应关系为:

$$RSSI(d, \theta) = 40 \lg \left(\frac{\lambda}{4\pi * d} \right) + 10 \lg P_r + K + \delta(\theta) \quad (3)$$

其中, P_r 表示标签反射信号功率; K 为系统常数; λ 表示射频信号波长; d 表示标签与天线之间的距离; $\delta(\theta)$ 与接收天线和标签天线的方向增益相关,其与入射角 θ 成负相关。当接收天线靠近标签时,两者之间的距离 d 和入射角 θ 变小,对应的RSS值增大;相反,当接收天线远离标签时,RSSI值减小;当接收天线正对标签时,其RSSI功率值达到峰值。

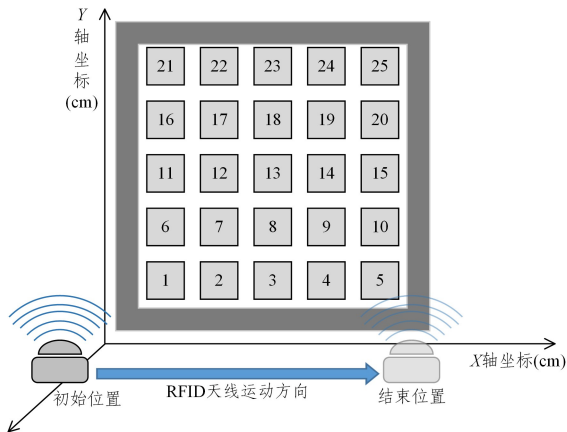


图2 RFID标签相对定位场景示意图

Fig. 2 Relative positioning scene of RFID tags

对于图2所示的RFID标签阵列,随着接收天线的运动,同列标签与接收天线的距离和入射角呈现一致性的变化关系,因此会呈现出相似的RSSI序列变化趋势。同时,随着阅读器接收天线的运动,不同列标签产生的对应波形会依次呈现波峰。图3(a)和图3(b)分别是对图2中第一列和第二列所有标签预处理后的RSSI序列图,可以看出同列标签波形和相邻列标签波形形态与以上描述内容一致。

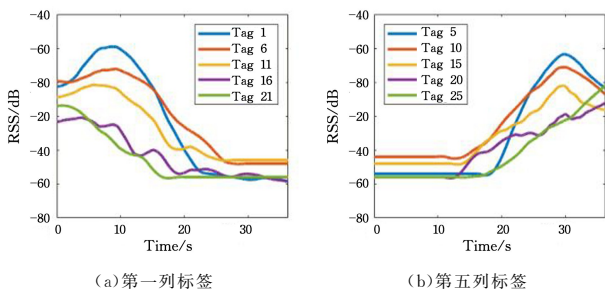


图3 不同RFID标签阵列对应同列RSS序列分布图

Fig. 3 Different RFID tag arrays correspond to the distribution of RSS sequences in the same column

2)RSSI序列功率衰减性。接收天线在移动的过程中,对于同列标签,其与接收天线之间的距离逐渐增大,且容易被前面的标签所阻隔,因此随着同列标签与接收天线之间距离的增大,RSSI功率分布会呈现逐列递减的现象,也就是RSSI功率衰减特征。图4给出了图2第二列和第四列所有标签反射RSSI序列功率值的分布图,可以看出,随着标签沿着列方向的增加,最后一列标签的RSSI功率值主要分布在 -60 dB左右,而第一列标签的RSSI功率值集中分布在 -45 dB左右,且标签越往后,对应的功率分布越集中。

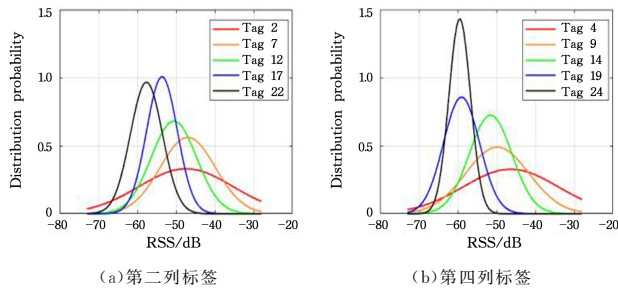


图4 同列标签RSSI功率分布图

Fig. 4 RSSI power distribution in the same column

3)RSSI序列中断位置连续性。RFID标签阵列不仅存在RSSI功率衰减特征,还存在数据中断位置连续性。随着阅读器接收天线的不断运动,接收天线与反射标签之间的射频信号入射角和距离关系也会发生改变,导致RSS序列会呈现出中断的现象。同时,对应中断数据的中间位置点也会出现连续性变化。图5分别给出了图2中第一、三、五列的首个标签所反射的射频信号RSSI序列,其中红色的点为RSSI序列中最长缺失部分的中点。可以看出,标签1一开始可以接收到数据,随着阅读器天线的运动,在25s以后出现中断数据;标签3和标签5随着天线逐渐向右运动,中断数据位置点依次轮流出现。

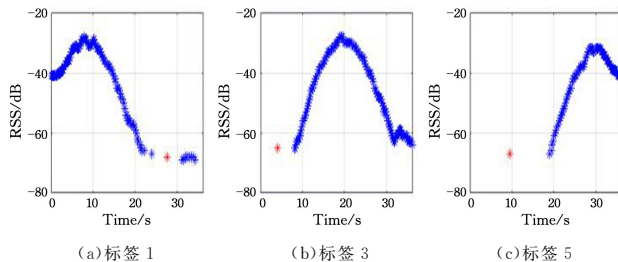


图5 不同列首张标签RSSI序列中断位置示意图(电子版为彩图)

Fig. 5 RSSI sequence break position of the first label of different columns

4 系统实现

RFID相对定位的工作中,首先需要对被定位的物体贴附上RFID标签,以便利用RFID阅读器来获取每个物体反射的接收信号强度信息。然后,通过采用阅读器对不同标签反射的射频信号信息进行解析,从而提取到不同标签对应的RSSI时间序列波形。最后,通过对RSSI序列波形进行特征提取和相似度分析来实现整个RFID标签的相对定位。RFID标签与接收天线的距离关系是动态变化的,因此其对应的RSSI值也会随着距离的变化而改变,通过分析RSSI值变化波动并构建标签与接收天线之间的距离关系,实现RFID标签的相对定位是本文的核心工作。

为了实现上述的RFID标签的相对定位工作,本文开发了基于RSSI序列波形余弦相似度的RFID多标签相对定位系统,系统框架如图6所示,该系统主要由4个模块构成,分别是数据采集模块、数据预处理模块、RSS序列相似度匹配模块和RFID标签定位模块。首先是数据采集模块,本系统通过移动RFID接收天线来动态获取标签反射信号的相关

信息,并提取到不同标签对应的 RSSI 序列;其次,通过数据预处理模块对由标签遮挡和反射夹角等问题导致的数据中断问题进行插值补全,并采用数据滤波对移动过程中产生的相关噪声进行消除;然后,通过 RSSI 序列相似度匹配模块来评估不同标签对应 RSS 序列之间的相似程度,构建两两标签之间的 RSSI 波形相似度表;最后,基于 RSSI 波形相似度和 RSSI 序列功率差异性特征,通过 RFID 标签定位模块来依次进行标签分组、异常组调整、X 轴组调整和 Y 轴组调整,实现最终的 RFID 标签相对定位工作。

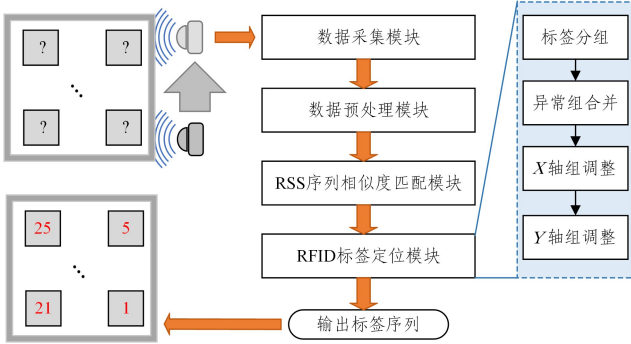


图 6 基于余弦相似度的 RFID 多标签相对定位系统框架

Fig. 6 RFID multi-tag relative positioning system framework based on cosine similarity

4.1 天线移动场景架构

4.1.1 数据缺失问题

在进行 RFID 标签的相对定位工作中,为了获取全部的标签信息,需要移动 RFID 天线。然而对于 RFID 标签而言,在位置移动过程中会存在标签之间相互遮挡的问题,导致采集到的标签存在数据“中断”的现象,因此无法获取完整的 RSSI 序列样本。图 7(a)和图 7(d)分别给出了图 2 中 RFID 天线运动后采集到的标签 1 和标签 5 的 RSSI 序列值,对于标签 1 而言,开始时可以成功采集到 RSSI 序列,随着天线朝着远离标签 1 的方向运动,对应接收到的 RSSI 序列功率值逐渐降低,最终因其他标签的阻隔而出现中断的现象。而对于标签 5 而言,则是开始时会出现中断现象,然后逐渐采集到 RSSI 序列,信号功率也随之增强。

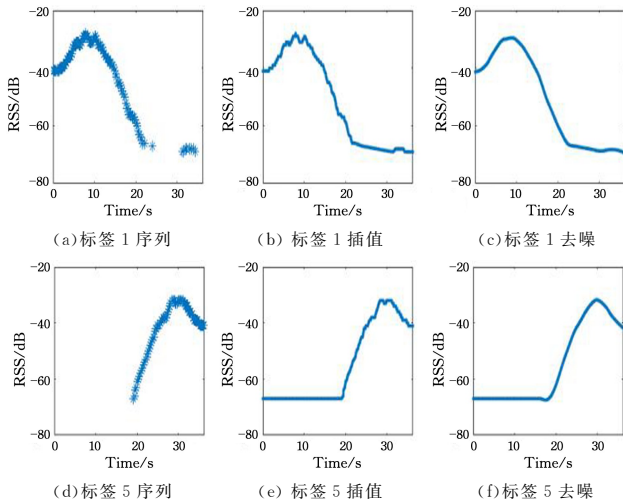


图 7 RFID 接收 RSSI 序列的数据预处理过程

Fig. 7 Data pretreatment process of RSSI sequence received by RFID

为了解决数据中断问题,从而更好地开展后续序列相似度匹配的工作,本小节首先对采集到的 RFID 序列进行数据插值处理,具体插值方法如下:首先找出 RSSI 序列中为 NaN 的所有元素位置,并进行标记;其次,当数据缺失序列 S_i 位于开始时间,则缺失序列 $S_i = S_1$, S_1 为首次有记录的 RSSI 值;然后,当数据缺失序列 S_i 位于结束时间,则缺失序列 $S_i = S_n$, S_n 为末次有记录的 RSSI 值;最后,当数据缺失序列 S_i 位于 RSS 序列的中间位置时,则通过 3 次样条插值来实现缺失数据的补全。图 7(b)和图 7(e)分别给出了对标签 1 和标签 5 进行插值补全的结果,可以看出最初出现数据缺失的地方已被充分补全。

4.1.2 数据噪声问题

在进行数据插值后,接收到的 RSSI 序列仍然会存在由接收天线抖动以及周围环境噪声等因素造成的无关干扰。为了消除 RSSI 序列中的无关干扰,同时结合 RSSI 序列为时序变化序列特性,本小节采用 Savitzky-Golay 滤波器来完成局部多项式最小二乘拟合的滤波方法,从而使插值后的 RSSI 序列更加平滑,其具体滤波方法为:

$$x_{k, \text{smooth}} = x_k = \frac{1}{H} \sum_{i=-w}^{+w} x_{k+i} h_i \quad (4)$$

其中, h_i/H 为序列的平滑系数,由原始 RSSI 序列经过最小二乘拟合求得; w 为 SG 滤波的窗口长度,本系统考虑到 RFID 的采样率为 100 Hz,因此对应滑窗长度 w 设置为 100。图 7(c)和图 7(f)分别给出了标签 1 和标签 5 经过数据插值和滤波后的 RSSI 序列,对比原始 RSSI 序列可以看出,滤波后填补了移动导致的缺失数据,同时也得到了平滑的数据序列。

4.2 RSSI 序列相似度匹配

在 RFID 标签相对定位的工作中,RFID 标签阵列所处的位置不同,其反射到接收天线的 RSS 序列波形也会呈现出与位置相关的特性。根据 3.2 节的特征 1)所述, RSSI 序列同列具有相似性。为了提取 RSSI 接收序列之间的波形相似度, Gui 等^[24]提出动态采用皮尔森系数来作为两组 RSSI 序列相似度的基准。虽然皮尔森系数可以用来分析两组向量之间的相关性,但是由于接收到的 RSSI 序列波形在形态上更接近于一个余弦函数周期,因此本文提出了基于余弦相似度的 RSSI 序列相似度度量方法,并预先构建了一个相似度量表,作为后续标签定位的基础,减少系统的计算负责度。

基于余弦相似度的 RSSI 序列相似度度量方法的核心是通过计算两组标签对应 RSSI 序列的夹角余弦值,来度量序列之间的相似程度,在获取相似度的基础上构建标签对应的相似度量表,具体步骤如下。

步骤 1 获取原始标签反射 RSSI 矩阵。一次 RFID 接收天线扫描得到所有标签的反射 RSS 序列集合为矩阵为 $\mathbf{R} = (RSS_1, \dots, RSS_n)^T$, 其中第 i 个标签接收到的 RSSI 序列记为 RSS_i , 序列长度为 T 。

步骤 2 计算标签对应的余弦相似系数。对于任意两组标签 tag_i 和 tag_j , 其对应的 RSSI 序列余弦相似系数计算式如式(5)所示:

$$\begin{aligned} \cos(i, j) &= \frac{RSS_i * RSS_j}{\|RSS_i\| \|RSS_j\|} \\ &= \frac{\sum_{t=1}^T (RSS_{i,t} * RSS_{j,t})}{\sqrt{\sum_{t=1}^T RSS_{i,t}^2} \times \sqrt{\sum_{t=1}^T RSS_{j,t}^2}} \end{aligned} \quad (5)$$

通过对比两个RSSI序列的夹角值的大小,来判断两个序列之间的相似度。当两个序列完全相似时,对应的夹角值趋于0度, $\cos(i, j) = 1$; 当两个序列对应方向完全相反时,对应的夹角值趋于90°, $\cos(i, j) = 0$ 。

步骤3 构建标签阵列相似度量表。为了快速分析不同标签之间的相似程度,并简化后续标签定位的计算量,本文基于步骤2的余弦相似系数计算方法,结合标签反射矩阵 \mathbf{R} ,构建了面向所有标签的相似度量表 $Table$,即:

$$Table(i, j) = \frac{\mathbf{R} * \mathbf{R}^T}{\|\mathbf{R}\| * \|\mathbf{R}^T\|} = \cos(i, j) \quad (6)$$

其中,相似度量表 $Table$ 的维度与标签个数相关,为 $n * n$ 。后续RFID标签定位工作只需要通过查表的方式即可获取任意两组标签之间的相似度系数。

4.3 RFID标签相对定位方法

在构建RFID标签阵列相似度量表的基础上,依次通过标签分组、异常组调整、X轴组调整和Y轴组调整4个步骤实现高精度阵列标签位置的相对定位工作。

4.3.1 标签分组

RFID阅读器在移动过程中会无规律地依次接收到各个标签反射的射频信号,并从中提取到射频信号的RSS值。为了可以直观地展示整个相对定位方法的标签序列调整效果,以图2所示的 5×5 的标签阵列为例,RFID接收到的标签数据流初始序列如图8所示,可以看出25个标签对应顺序在接收端以乱序呈现。

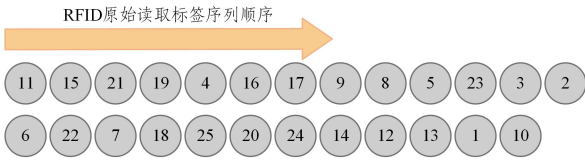


图8 接收原始标签阵列顺序

Fig.8 Order of receiving original tag array

为了能够对无序的标签阵列按照其所在空间位置进行准确的分组,首先要对所有标签的RSS序列进行一个初步的标签分组操作,以便对所有的RFID标签数据进行一个预分组。标签分组算法主要包括以下步骤:

1) 确定首个标签组元素。在进行分组的过程中,将RFID阅读器在运动过程中接收到的第一个标签反射的信号作为首个组元组。由于在实际场景中,不同标签组之间存在物体的大小不同或者标签之间相互干扰的问题,导致某些时刻会出现标签数据缺失,因此首个元素对应的标签也会产生不确定性。以图8为例,首个元素为标签11反射的信号,因此将标签11的数据作为首个分组的元素。

2) 按照RSSI序列波形相似度依次完成后续标签的分组。在确定组1的第一个元素后,依次按照标签序列顺序查找相似度量表,以获取当前标签和已分组标签之间的相似度值 $Table(i, j)$ 。当相似度值 $Table(i, j)$ 超过预定义相似度划分阈值 δ 时,即 $Table(i, j) > \delta$,则说明当前标签 j 已经存在分组,将标签 j 按照Y轴顺序依次插入;如果存在多个分组内标签与当前标签 j 的相似度值都超过阈值 δ ,则寻找多个分组内

相似度最大的标签,记为 $maxCos_k$, k 为最大值对应的组别,然后将标签 j 按照Y轴顺序插入第 k 组;当所有已分组标签与标签 j 的相似度都小于阈值 δ 时,即 $Table(i, j) < \delta$,则为标签 j 增加一个新组别。

图9给出了对图2的标签阵列进行标签分组的结果示意图,本章中将相似度划分阈值 δ 设置为0.93后,通过预分组算法按照标签对应RSSI序列相似度将原始乱序标签分为9个分组,实现了所有标签的预分组。

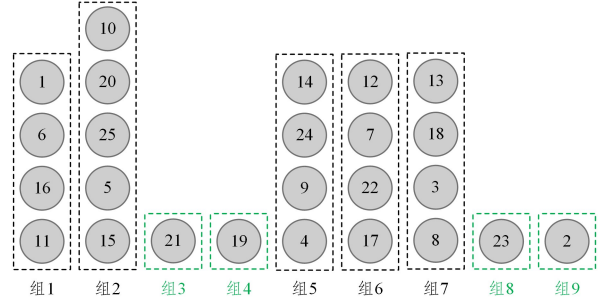


图9 初始标签分组结果图(电子版为彩图)

Fig.9 Results of initial label grouping

4.3.2 异常组调整

在进行标签初步分组后可以发现,图9中存在绿色标注的异常分组,其主要原因是,虽然对于同列标签而言其RSSI信号趋势会呈现一致性变化,但是信号会随着列数的增加而衰减,从而增加很多的系统噪声,导致部分标签相似度小于系统定义的相似度阈值 δ ,进而将其分到新增组组别里。为了对初步标签分组的结果进行进一步调整,减少异常组的出现,需要开展异常组调整方法。异常组调整的具体算法步骤如下:

1) 异常组的确定。首先需要确认预分组内异常组的位置,对于标签阵列而言,通常阵列标签是均匀分布的,标签数据划分到异常组会导致整个标签阵列的元素个数呈现出不平衡的分布。因此,可搜寻组内元素个数异常的分组,将其识别为异常组别。 Tag_N 为标签个数, $Group_N$ 为预分组数, $Group_E$ 为对应分组内标签元素个数,当分组内元素个数满足:

$$Group_E < \lfloor \frac{Tag_N}{Group_N} \rfloor \quad (7)$$

则将当前分组划分为异常组别。

2) 异常组别元素合并。当检索到异常组后,对异常组别的元素依次出栈进行元素判定,通过4.2节中构建的相似度量表,查找异常组内每个标签反射RSSI序列与正常组内所有标签元素的相似度值并计算其均值,作为当前标签与每个正常组之间的特征 Sim_K :

$$Sim_K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Table_K(i, l) \quad (8)$$

其中,异常组内标签的位置为 l ,正常分组的个数为 K 。然后通过查找 $Max(Sim_K)$ 所对应的组号 K ,将当前异常组的标签序列划分到第 K 个正常组内。依次将当前异常组的标签序列进行出栈,并与正常组进行标签合并,直到异常组元素全部出栈终止。

3) 异常组别剪枝。当一个异常组内标签元素全部出栈,则将当前组别从所有预分组内删除,达到组别剪枝的效果。

4) 循环搜索异常组别的个数。当对一个异常组内的所有标签元素进行合并和剪枝后, 循环依次执行步骤 1)~4), 直到当前分组内没有异常组别的存在, 则终止异常组调整的过程。图 10 给出了对图 9 中的异常组别进行调整的结果, 可以看出, 异常组里的标签元素基本上都被合并到正常组别中。

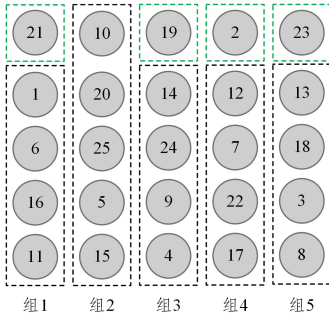


图 10 异常组调整结果图

Fig. 10 Results of abnormal group adjustment

4.3.3 X 轴组调整

在进行异常组调整的步骤后, 每个标签都被划分到对应的组别中, 然而每个组别的顺序和组内的次序都是乱的, 因此需要从 X 轴和 Y 轴两个维度对标签组进行顺序的调整。由 3.2 节中的特征 3) 可知, RSSI 序列红色缺失位置点出现的顺序可以作为标签分组处于 X 轴位置的依据。基于此, 本文设计了基于最长中断序列位置中心点的 X 轴组调整算法, 算法的主要流程如下: 首先, 通过计算各个分组内标签 RSSI 序列的功率分布, 依照功率分布由大至小的次序选取, 将功率最大的 3 个标签作为候选标签; 其次, 分别计算每组 3 个候选标签的最长中断序列, 并获取中断序列对应的中心点位置 B_c ; 然后, 判断中心点位置所处的区间, 假设整个 RSSI 序列的长度为 L , 如果 $B_c > L$, 则按照 B_c 升序的方式来对分组进行排列, 得到分组集合 $Group^+$, 如果 $B_c < L$, 则按照 B_c 降序的方式来对分组进行排列, 得到分组集合 $Group^-$; 最后, 对两个分组 $Group^+$ 与 $Group^-$ 进行合并, 得到 X 轴分组调整的结果。

图 11 给出了对图 10 进行 X 轴调整后的结果, 其中红色框体为分组改动的部分, 可以看出经过 X 轴方法的分组调整, 5 个分组在 X 轴方向上的数据得到了递增性的调整。但是, 在 Y 轴方向上标签数据分布依然呈乱序, 需要进一步做 Y 轴方向上的标签定位工作。

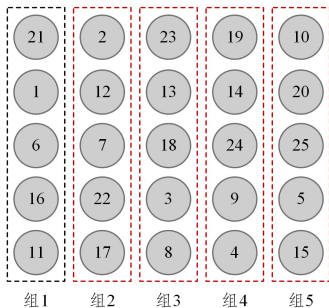


图 11 X 轴组调整结果图(电子版为彩图)

Fig. 11 Results of X-axis group adjustment

4.3.4 Y 轴组调整

RFID 标签相对定位工作的最后一步就是对确定好 X 轴

方向的分组进行每个组别内部具体位置的调整, 也就是对 Y 轴组标签数据进行调整。由 3.2 节中的特征 2) 可知, 对于同列标签所反射的 RSSI 序列, 其主要存在 RSSI 功率衰减特性。同时随着标签在列组中的位置越往后, 对应被前列标签所阻隔的概率越大, 同时提取到的 RSSI 序列波形也更容易参杂环境噪声, 导致波形出现紊乱, 与同列其他标签提取到的波形相似度也逐次降低。因此, 在 Y 轴组调整工作中, 本文主要参考了 RSSI 功率值、中断序列位置和序列波形相似度 3 个指标。

1) 针对 RSSI 功率值, 提取同列每个标签前 10% 的 RSSI 序列最大功率值, 并计算对应的功率均值作为 RSSI 功率值的特征, 记为 P_d 。

2) 针对中断序列位置, 选取同列每个标签对应 RSSI 序列最长数据中断序列片段, 并计算最长中断数据片段的位置作为标签中断序列位置的特征, 记为 Loc 。

3) 针对序列波形相似度, 可以通过查找 4.2 节所定义的 RSSI 序列相似度量表来获取当前标签与同列其他标签对应 RSSI 序列的相似度, 并计算对应的相似度均值作为波形相似度特征, 记为 Sim 。

4) 对 RSSI 功率值 P_d 、中断序列位置 Loc 和序列波形相似度 Sim 这 3 个指标进行加权求和, 得到同列每个标签的位置坐标特征。按照位置坐标特征降序的方式对同列标签进行 Y 轴组调整。指标加权求和的方法如式 (9) 所示:

$$\arg \max_{(\alpha, \beta, \gamma)} \{\alpha * P_d + \beta * Loc + \gamma * Sim\} \quad (9)$$

其中, α, β, γ 分别是 RSS 功率值 P_d 、中断序列位置 Loc 和序列波形相似度 Sim 这 3 个指标的权重, 在本文的系统中将 (α, β, γ) 分别设置为 $(0.1, 0.2, 0.7)$ 可以达到最优的相对定位结果。

图 12 给出了通过 Y 轴调整后的最终结果图。通过一系列 RFID 标签相对定位算法后, 最终 RFID 标签阵列相对定位结果与图 2 的标签阵列完全一致, 说明本文方法可以实现高精度的 RFID 阵列标签定位任务。

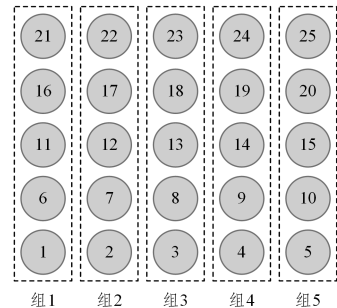


图 12 Y 轴组调整结果图

Fig. 12 Results of Y-axis group adjustment

5 实验与分析

5.1 实验设置与场景布置

为了对本文提出的基于余弦相似度的 RFID 多标签相对定位方法的性能进行综合测试, 开展了以下多种不同的对比实验。实验设备如图 13 所示, 本文使用一台基于 Impinj Indy R2000 芯片的 RFID 读写器, 该读写器可用于 865~868 MHz 以及 902~928 MHz 两个频段的射频系统, 可通过 RS-232 串口和 TCP/IP 两种方式与操作系统连接。读写器天线为 RDA-

9w258L 线极化天线,该天线的增益为 9 dB,使用的标签为 Alien 9662 标签,该标签的工作频率范围为 860~960 MHz,标签的尺寸为 17mm×70mm,外观尺寸为 21.2mm×73.5mm,被贴附在尺寸为 35mm×35mm×75mm 的牛皮纸盒上。



图 13 实验设备

Fig. 13 Experimental installation

图 14 给出了进行 RFID 相对定位的实验场景,测试实验在一个封闭的纸盒内进行,纸盒内布置有标签阵列,天线在距离纸盒 10cm 的一侧以 5cm/s 的速度匀速直线移动。定义放置物品的平面为 XOY 平面,原点 O 为读写器天线初始位置, X 轴沿着读写器天线的移动方向, Y 轴垂直于 X 轴。读写器天线从起始位置出发沿着 X 轴正方向移动,在移动过程中,读写器天线持续与标签通信,当读写器天线移动到终止位置时,天线停止移动,同时结束与标签的通信。

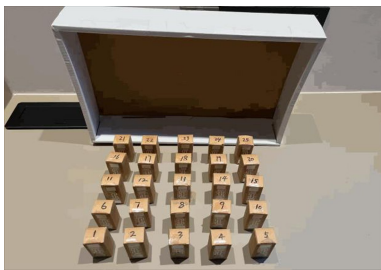


图 14 实验场景

Fig. 14 Experimental scene

5.2 系统性能分析

为了对本文方法进行综合性能测试,主要应用两个性能指标来评估系统性能,分别是标签相对定位准确率和定位计算时间。相对定位准确率主要取决于标签定位结果与标签准确位置是否相吻合,即标签的 X 轴和 Y 轴的相对位置是否正确。定位计算时间则是进行一次相对定位所需要的计算时间长度。后续用这两个指标来综合评估系统性能。

1) 相似度算法对比

对 RFID 多标签相对定位工作而言, RSSI 序列相似度评估是进行相对定位的基础。为了测试不同序列相似度计算方法对相对定位结果的影响,对 5 种经典序列相似度算法进行测试,分别是皮尔森系数、欧氏距离、均方误差、动态时间规划和余弦相似度。分别针对 5×5 标签阵列的 RSSI 序列采用以上 5 种相似度算法开展 10 次相关测试,测试得到的定位正确率分布如图 15 的线箱图所示。由图 15 可以看出,本文采用余弦相似度得到的定位精度结果高于其余 4 种相似度算法,图中红色三角形所代表的平均定位准确率也最高,可达到 95%。结果表明,相较于其他相似度计算方法,余弦相似度计算方法可以更好地刻画 RSSI 序列波形形态,有着更好的识别效果。

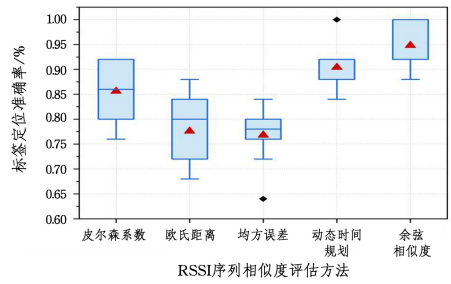
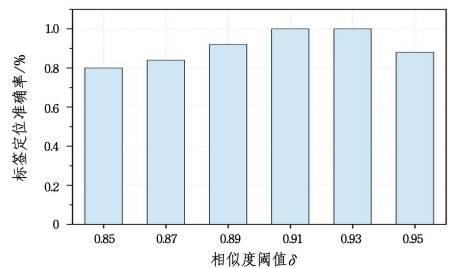


图 15 不同相似度算法对应的定位准确率图(电子版为彩图)

Fig. 15 Positioning accuracy corresponding to different similarity algorithms

2) 相似度阈值 δ 的影响

在相对定位工作中,标签预分组是定位工作的起始。其中,对于不同组的划分提出了阈值 δ 来进行是否分组的判断。图 16 给出了采用不同的阈值 δ 所得到的标签定位准确率,可以看出,当相似度阈值 δ 过小时,会导致预分组错误,进而使后续的标签调整工作产生误差,定位准确率降低;当相似度阈值过大时,也会导致预分组时产生过多的误差分组,使精度略微下降,同时增加了计算时耗。因此对于本文而言,采用相似度阈值 δ 为 0.93 或者 0.91 可以达到最优的定位结果。

图 16 阈值 δ 对应的定位准确率图Fig. 16 Positioning accuracy corresponding to threshold δ

3) 天线阵列的影响

为了测试本文提出的多标签相对定位方法对不同标签组数量的定位结果,分别针对 3×3、4×4 和 5×5 这 3 种形式的标签阵列(对应的标签数分别为 9、16 和 25)进行了实验。对不同的标签阵列分别进行了 10 次标签定位测试,具体测试结果如图 17 所示。可以看出,随着定位标签数量的增多,系统对多标签的相对定位准确率会略有下降,对 3×3 和 4×4 的标签阵列相对定位的准确率基本可以达到 100%,当增加到 5×5 的标签阵列时,多标签定位精度超过 92%。

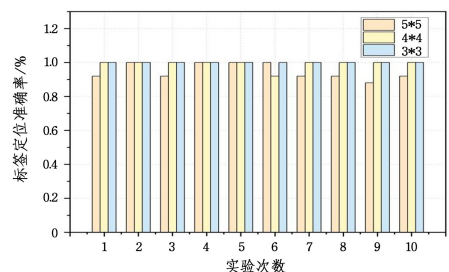


图 17 不同标签阵列的定位正确率图

Fig. 17 Positioning accuracy of different tag arrays

4) Y 轴组调整的系数权重 (α, β, γ)

在进行 Y 轴组标签顺序调整的过程中,本文对标签组功

率、数据序列中断位置和 RSSI 序列相似度 3 个特征进行加权,进而提取标签对应的 Y 轴坐标位置。由于在定位过程中,3 组特征所对应的比重各不相同,因此本文测试了多组相关权重 (α, β, γ) 组合,结果如图 18 所示。可以看出,当单独使用某一类特征值时,难以得到很好的分类效果。当多个特征进行组合时,标签定位精度有所上升。在本文的实验场景中,当权重值 (α, β, γ) 为 $(0.1, 0.1, 0.8)$ 或 $(0.1, 0.2, 0.7)$ 时,对 5×5 多标签阵列的定位精度可以达到 100%。

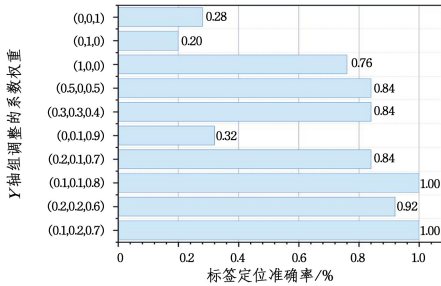


图 18 (α, β, γ) 的定位正确率图

Fig. 18 Positioning accuracy of (α, β, γ)

5) 算法运行效率

对于相对定位工作而言,除了考虑到定位的精度以外,还需要对定位性能进行对比分析。图 19 给出了本文方法与 Gui 等^[24]提出的目前最优的多标签相对定位工作所需算法的计算时长的对比结果,由图中可以看出,Gui 等提出的方法平均用时在 9 s 左右,而本文提出的方法仅需要 1 s 左右即可完成标签定位工作,计算效率提高了约 10 倍。本文方法效率大幅提升的主要原因在于:首先,本文在 RSSI 序列相似度计算时预构建了相似度量表,后续仅通过查表即可获取相似度值,而 Gui 等的方法则在循环分组的过程中需要重复计算不同序列之间的相似度;其次,本文在进行组别调整时,是先找出异常组组别然后对其进行二次分组来完成初步组别分类工作,而 Gui 等的方法则是不断执行扩组和缩组的操作,从而达到标签分组的平衡。

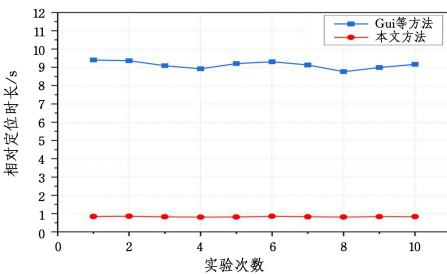


图 19 时间效率对比图

Fig. 19 Comparison of time efficiencies

结束语 本文提出了一种基于 RSSI 序列特性的 RFID 多标签相对定位方法。该方法使用移动 RFID 天线来获取封闭区域内标签阵列的 RSSI 时间序列,并基于接收 RSSI 序列的 3 种相关特性,即 RSSI 序列同列相似性、功率衰减性和位置中断性,提出了面向 RSSI 序列的余弦相似评估指标,结合多种不同的序列组别调整算法,实现了 RFID 多标签相对定位功能。结合大量的对比实验,结果表明本文提出的方法既可以实现高精度的标签定位效果,同时还可以高效完成多标签定位工作。在未来的工作中,将进一步考虑对不规则标签

阵列分布的定位效果,以及尝试开展三维空间内的多标签相对定位研究。

参考文献

- [1] LIN Y S, LI Q S, LU P H, et al. Shelf and AGV Path Cooperative Optimization Algorithm Used in Intelligent Warehousing [J]. Journal of Software, 2020, 31(9): 2770-2784.
- [2] CHO Y, JI M, LEE Y, et al. WiFi AP position estimation using contribution from heterogeneous mobile devices [C] // Proceedings of the 2012 IEEE /ION Position, Location and Navigation Symposium. IEEE, 2012: 562-567.
- [3] PHUTCHAROEN K, CHAMCHOY M, SUPANAKOON P. Accuracy study of indoor positioning with bluetooth low energy beacons [C] // 2020 Joint International Conference on Digital Arts, Media and Technology with ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (ECTI DAMT & NCON). IEEE, 2020: 24-27.
- [4] YELKOVAN Y, GÜNEREN H, AKGÖZ A, et al. Infrared beacon based sub-meter indoor localization [C] // 2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). IEEE, 2014: 1427-1430.
- [5] SHARP I, YU K. Indoor TOA error measurement, modeling, and analysis [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(9): 2129-2144.
- [6] QIAO T, ZHANG Y, LIU H. Nonlinear expectation maximization estimator for TDOA localization [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 637-640.
- [7] PAGES-ZAMORA A, VIDAL J, BROOKS D H. Closed-form solution for positioning based on angle of arrival measurements [C] // The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. IEEE, 2002, 4: 1522-1526.
- [8] SHANGGUAN L F, LI Z J, YANG Z, et al. OTrack: Order tracking for luggage in mobile RFID systems [C] // 2013 Proceedings IEEE INFOCOM. IEEE, 2013: 3066-3074.
- [9] WANG G, QIAN C, SHANGGUAN L, et al. HMO: Ordering RFID tags with static devices in mobile environments [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 19(1): 74-89.
- [10] NIKITIN P V, MARTINEZ R, RAMAMURTHY S, et al. Phase based spatial identification of UHF RFID tags [C] // 2010 IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID 2010). IEEE, 2010: 102-109.
- [11] TRIPICCHIO P, UNETTI M, D'AVELLA S, et al. A synthetic aperture UHF RFID localization method by phase unwrapping and hyperbolic intersection [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2021, 19(2): 933-945.
- [12] MO L, ZHU Y, ZHANG D. Uhf RFID indoor localization algorithm based on BP-SVR [J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2022, 6: 385-393.
- [13] CHEN K, MA Y, LIU H, et al. Trajectory-Robust RFID Relative Localization Based on Phase Profile Correlation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 72: 1-13.
- [14] LAI J, LUO C, WU J, et al. TagSort: Accurate relative localization exploring RFID phase spectrum matching for Internet of

- Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 7(1): 389-399.
- [15] WANG C Y, XIE L, ZHAO Y C, et al. Survey on RFID-based Battery-less Sensing[J]. Journal of Software, 2021, 33(1): 297-323.
- [16] CRUZ R D, PEDRASA J R. RSSI-based Localization in an Emulated Active RFID System[C]// 2019 IEEE 10th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference(IEMCON). IEEE, 2019: 771-778.
- [17] EL-ABSI M, ZHENG F, ABUELHAIJA A, et al. Indoor large-scale MIMO-based RSSI localization with low-complexity RFID infrastructure[J]. Sensors, 2020, 20(14): 3933.
- [18] CAVUR M, DEMIR E. RSSI-based hybrid algorithm for real-time tracking in underground mining by using RFID technology [J]. Physical Communication, 2022, 55: 101863.
- [19] LIU Z, FU Z, LI T, et al. A Phase and RSSI-Based Method for Indoor Localization Using Passive RFID System With Mobile Platform[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2022, 6: 544-551.
- [20] WU C, GONG Z, TAO B, et al. RF-SLAM: UHF-RFID based Simultaneous Tags Mapping and Robot Localization Algorithm for Smart Warehouse Position Service[J/OL]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10058595>.
- [21] PATEL S J, ZAWODNIOK M J. 3D Localization of RFID Antenna Tags Using Convolutional Neural Networks [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-11.
- [22] ALSINGLAWI B, RABIE K. eDeepRFID-IPS: Enhanced RFID Indoor Positioning with Deep Learning for Internet of Things [C]// Proceedings of the 37th International Conference on Advanced Information Networking and Applications(AINA-2023). Cham: Springer International Publishing, 2023: 149-158.
- [23] LI C, TANGHE E, PLETS D, et al. ReLoc: Hybrid RSSI-and phase-based relative UHF-RFID tag localization with COTS devices[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10): 8613-8627.
- [24] GUI L, XU S, XIAO F, et al. Non-line-of-sight localization of passive UHF RFID tags in smart storage systems [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 21(10): 3731-3743.



HE Yong, born in 1998, postgraduate. His main research interests include RFID and mobile computing.



GUO Zhengxin, born in 1993, Ph.D, lecturer. His main research interests include wireless sensing, mobile computing and Internet of Things.

(责任编辑:李亚辉)