

基于 ZigBee 的工地人员定位系统设计

林娅茹¹ 韩成浩^{1*}
LIN Yaru HAN Chenghao

摘要

针对工地环境复杂混乱,全面考虑成本消耗、定位准确性等因素的制约,文章提出了一套基于 ZigBee 技术的工地人员定位方案。由协调器节点、定位节点、参考节点和监控管理客户端中心等关键部分组成,目的是实时获取工地人员的位置信息。在节点定位算法模型方面,采用基于信号强度衰减模型的接收信号强度指示(RSSI)算法以及惯性数据分析,并加入卡尔曼滤波算法以降低累积误差,从而进一步提高工地人员定位的准确性。经过实验与分析,所设计的人员定位系统通过与传统的定位系统精度进行比较,将原有定位精度从 2 m 左右提高到精度 1 m 以下,改善了传统 ZigBee 定位受环境影响定位误差较大的问题,增强了定位系统的准确性。

关键词

工地定位; ZigBee; 无线通信; 惯性传感器; RSSI 算法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.05.008

0 引言

目前,许多传统建筑工地依然沿用人工巡检和纸质记录的方式来定位人员。这种做法不仅效率低,往往由于人为疏忽,容易造成各类安全隐患^[1]。

为解决上述问题,建筑工地越来越多地采用数字化和智能化的管理手段^[2]。针对工地环境复杂、人员定位精度不高且效率低的问题,传统的无线网络无法穿透墙面,而有线网络又不适应工地环境的需求,因此,采用新型的无线网络技术成为工地的迫切需求。随着网络技术的发展,以 ZigBee 为代表的无线传感器网络的应用领域不断扩大^[3]。目前,蓝牙、Wi-Fi、ZigBee、UWB 等无线网络技术被广泛使用^[4]。

ZigBee 定位技术,作为一种功耗低、成本低的无线通信技术,在物联网领域得到了广泛应用。近年来,随着定位技术的发展和应用场景的拓展,ZigBee 定位技术在国内外都取得了显著的发展。因此,本研究采用基于 ZigBee 的 RSSI 工地人员定位系统,并结合惯性传感器和卡尔曼滤波算法来提高定位的准确性^[5]。通过设计所需的硬件电路和软件程序,并使用 Python 工具对实验数据进行详细分析。

1 系统整体方案设计

1.1 系统组成及工作流程

1.1.1 系统构成

定位系统的核心组成包括 4 个关键部分。

(1) 参考节点。参考节点的主要功能是接收来自定位装置的信号,利用接收到的信号强度(RSSI)值来计算与定位目标之间的距离,并将这些数据传输至协调器。这些节点通常固定在工地的已知位置,为定位提供基准。

(2) 定位节点。定位节点是工地人员佩戴的设备,负责不断地向周围的参考节点发送定位请求信号,从而向监控管理客户端传递佩戴者的具体位置信息。

(3) 协调器节点。协调器在系统中扮演着数据中转站的角色,负责接收来自各个参考节点的数据,通过编码和打包后,将这些数据通过以太网发送至监控管理客户端。协调器是连接现场设备与监控管理客户端的关键环节。

(4) 监控管理客户端。监控管理客户端是系统的数据处理中心,负责接收协调器发送的参考节点与人员位置信息,通过内置的算法处理这些数据,计算出人员的精确位置。

1.1.2 系统工作流程

在工地的关键位置安装参考节点,因 ZigBee 通常用于近距离通信,且通信距离受建筑物遮挡影响较大,需大量布放参考节点才能保证系统的可靠性。当佩戴定位节点的工人在一定区域内移动时,定位节点会向附近的参考节点发出请求信号。参考节点接收到信号后,会将信号强度(RSSI)转换为距离值,并通过多跳网络传输方式,将距离信息逐级传递

1. 吉林建筑大学电气与计算机学院 吉林长春 130119

[基金项目] 吉林省发展和改革委员会产业技术与开发项目(2020C019-7)

至协调器^[6]。协调器负责收集这些信息,并通过以太网将数据上传至监控管理客户端。监控管理客户端接收到来自协调器的数据后,会处理这些数据以计算出各个参考节点与定位人员之间的距离^[7]。这样,管理人员就能够实时监控工地人员的位置信息,确保工程进度和安全。定位系统结构图如图1所示,展示了从定位装置到监控管理客户端的数据流转和处理过程,形成了一个高效、实时的工地人员定位网络。

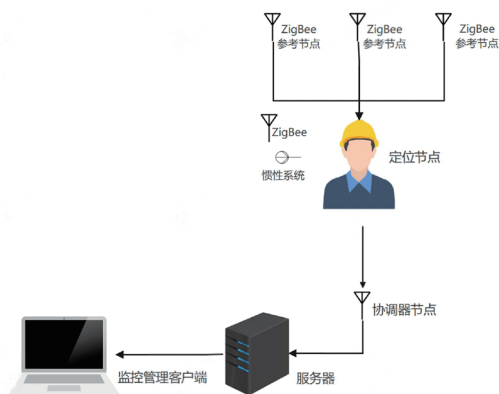


图1 定位系统结构图

1.2 系统硬件设计

系统选用 CC2530 芯片作为参考节点、定位节点和协调器节点的主控单元,其实物图如图2所示。



图2 芯片实物图

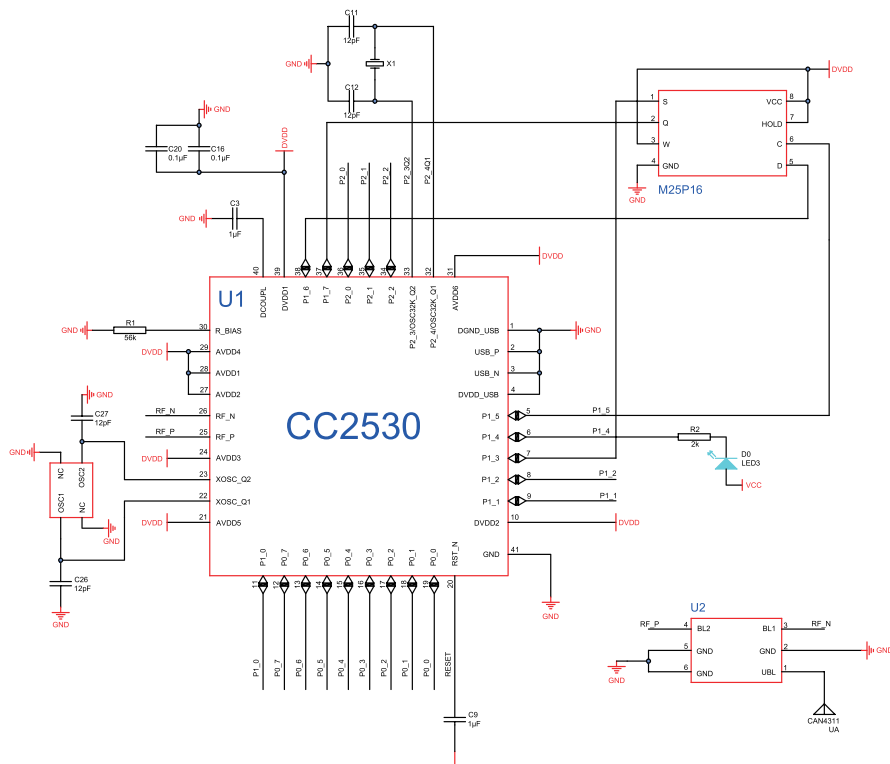


图3 电路原理图

CC2530 芯片因其强大的功能、易于开发和使用以及良好的成本效益,在无线传感网络和物联网应用中得到了广泛应用。因此,本设计选取 CC2530 为核心芯片,为使其正常工作,设计其外围电路如图3所示^[8]。

1.2.1 参考节点

参考节点除包含 CC2530 的核心组件之外,还包括 CC2592 天线放大器、电源稳压以及供电模块等关键部分。本文采用 LM1117 将输入的 5 V 电源电压通过稳压降压电路转换至 CC2531 芯片所需的稳定工作电压 3.3 V。LM1117 作为一种线性稳压元件,其调节输出电压的机制主要是通过调节内部功率晶体管的导通程度来完成的。

1.2.2 协调器节点

协调器作为 ZigBee 网络中的协调器,其采用了与参考节点相同的核心电路设计。鉴于该节点在 ZigBee 网络中扮演着连接服务器与网络的重要“角色”,需要具备接入互联网的能力。出于节点部署便捷性的考虑,本设计采纳了无线连接方案。在核心电路的基础上,增加了一个无线 Wi-Fi 转串口模块,并通过 UART 接口与之通信,以实现与 Wi-Fi 模块的连接。在 Wi-Fi 模块的选择上,本设计采用了 USR-Wi-Fi 232-D2 模块,以实现稳定的无线网络连接。

1.2.3 定位节点

定位节点位于人员随身携带头显上,定位节点头显的 SolidWorkds 三维图如图4所示。为提高定位精度,在定位节点中增加了惯性传感器。惯性传感器要求具备加速度传

感器、角速度传感器以及磁力计,要求惯性传感器具有物体运动姿态解算能力^[9]。在本设计中,使用的芯片为 MPU9250。



图4 定位节点头显三维设计图

2 系统关键技术分析

2.1 RSSI 测距算法

在 RSSI 定位技术中,未知节点通过分析接收到的信号强度推算信号在传播过程中的衰减量,同时利用构建的数学模型,将这种衰减量转换为具

体的距离值^[10]。RSSI 算法的计算公式为：

$$PL(d) = PL(d_0) - 10n \lg \frac{d}{d_0} - N_0 \quad (1)$$

式中： d 表示节点之间的距离； n 表示信号衰减指数，其中 $n=3$ （一般室内环境值）； d_0 表示参考距离，其中为便于公式的计算，本文将参考节点的测量距离设置为 1m； $PL(d)$ 表示距离发送节点 d 处的信号强度； N_0 均值为 0，标准差为 σ 的高斯随机噪声变量，本文忽略其对信号衰减的影响； $PL(d_0)$ 表示距离发送节点 d_0 处的信号强度。

设 A 为定位节点在距离参考节点为 1 m 时的接收信号强度，参考 RSSI 值 $A = -40$ dBm（在 1 m 处的 RSSI 值）。可以将公式（1）简化为：

$$RSSI(d) = A + 10n \lg(d) \quad (2)$$

式中： $RSSI(d)$ 表示定位节点在距离 d 处的信号强度值。

将 RSSI 值转化为距离的计算公式为：

$$d = 10^{\frac{RSSI(d)-A}{10n}} \quad (3)$$

2.2 惯性数据分析

在现实场景中，因多种因素的干扰，需在定位系统中集成惯性传感器模块，以辅助监测定位节点的位置，确保其位置数据的精确度。通过分析加速度的相关分量数据，可以计算出欧式距离来判断人员的运动状态^[11]，假设人员在 A 时刻的加速度在各个分量为 (X_A, Y_A, Z_A) ，则可以通过公式得到欧式距离：

$$D_{A+1} = \sqrt{(X_{A+1} - X_A)^2 + (Y_{A+1} - Y_A)^2 + (Z_{A+1} - Z_A)^2} \quad (4)$$

当 $D_{A+1} \in (0.3, 0.7)$ 即可认为人员迈步行走。

对定位节点所朝方向的解算需要用到磁力计的数据，其中磁力计需要通过以下校准方法进行校准后方能使用：

步骤 1：通过记录磁力计在方向分量上 X 、 Y 、 Z 的值，得到其中的最大值和最小值，记录各个轴的最大差值 X_B 、 Y_B 、 Z_B ，假设其中最大的差值数据为 Z_B ，将该分量的比例系数 Z_C 定为 1，同比缩放其他分量比例系数，计算公式分别为：

$$X_C = \frac{Z_B}{X_B} \quad (5)$$

$$Y_C = \frac{Z_B}{Y_B} \quad (6)$$

步骤 2：计算各个轴的补偿系数，计算公式为：

$$\begin{cases} X_E = X_C(0.5 \times X_B - X_{\max}) \\ Y_E = Y_C(0.5 \times Y_B - Y_{\max}) \\ Z_E = Z_C(0.5 \times Z_B - Z_{\max}) \end{cases} \quad (7)$$

步骤 3：根据定位节点的角度做倾角补偿得到方向，根据公式计算为：

$$\theta = \arctan \left[\frac{Y \times \cos \alpha + Z \times \sin \alpha}{X \times \cos \beta + Y \times \sin \beta - Z \times \sin \beta \times \cos \beta} \right] \quad (8)$$

式中： α 为定位节点的横滚角； β 为定位节点的俯仰角。

2.3 卡尔曼滤波算法

由于实际环境中多种因素的干扰，使得通过 RSSI 测距方式得到的 RSSI 值有很大波动性^[12]。同时惯性数据的误差会不断累积，导致积分漂移现象的出现，给后续的定位带来了较大的误差^[13]。本设计应用卡尔曼滤波器对 RSSI 的定位数据和惯性数据进行预测和更新，得到更为精确的定位结果^[14]。其中，卡尔曼滤波程序流程图如图 5 所示。

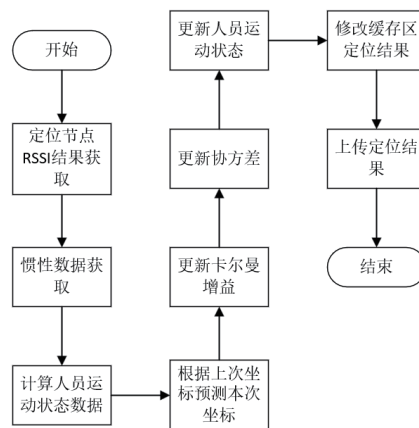


图 5 卡尔曼滤波程序流程图

卡尔曼滤波器需要建立一个状态转移方程和一个测量方程^[15]。

状态预测方程为：

$$x_t = Fx_t + Au_t + W_t \quad (9)$$

式中： x_t 表示 t 时刻预测的 RSSI 值； F 表示状态转移矩阵，取 1； A 表示控制矩阵，取 0； u_t 表示控制输入变量； W_t 表示过程噪声。测量方程为：

$$z_t = Hx_t + v \quad (10)$$

式中： z_t 表示 t 时刻测量的 RSSI 值； H 表示观察矩阵； v 表示测量噪声。

预测阶段：

根据上一时刻 $(t-1)$ 的状态变量进行预测，得到 t 时刻的先验估计值，公式为：

$$x_{t|t-1} = Fx_{t-1} \quad (11)$$

根据上一时刻 $(t-1)$ 的估计协方差进行预测，得到 t 时刻的先验估计协方差，公式为：

$$P_{t|t-1} = FP_{t-1}F^T + Q \quad (12)$$

式中： Q 表示过程噪声协方差矩阵。

更新阶段：

使用测量噪声协方差矩阵和先验状态估计的不确定性协

方差矩阵 $P_{t|t-1}$, 计算卡尔曼增益 K_t , 公式为:

$$K_t = P_{t|t-1} H^T (H P_{t|t-1} H^T + R)^{-1} \quad (13)$$

使用卡尔曼增益 K_t 将预测估计值与实际测量值结合, 得到当前时刻的后验状态估计值 $x_{t|t}$ 和 $P_{t|t}$, 公式分别为:

$$x_{t|t} = x_{t|t-1} + K_t (Z_t - H x_{t|t-1}) \quad (14)$$

$$P_{t|t} = (I - K_t H) P_{t|t-1} \quad (15)$$

最终将使用后验状态估计值 $x_{t|t}$ 来更新当前位置 P_t 的估计值。

3 实验结果分析

本次实验的开展地点为一个 $6\text{ m} \times 8\text{ m}$ 的空教室及对应 2 m 宽的走廊, 两区域内有墙壁, 模拟工地多房间环境。实验所需的硬件设施包括一台搭载 Windows 系统并安装 Visual Studio 2019 的笔记本电脑、若干个参考节点、若干个定位节点、一个协调器节点以及相应的配套电池。

教室内部区域进行规定路线的标记, 测试人员按照标记路线进行移动, 部分测试数据记录如表 1 所示。

表 1 部分测试数据记录表

理想 x 坐标	理想 y 坐标	误差 x 坐标	误差 y 坐标	定位误差
0	3	0.53	3.53	0.75
0.30	3.29	0.96	3.96	0.95
1.11	4.03	1.55	4.46	0.62
3.33	5.60	2.74	5.00	0.84
4.34	5.94	4.93	6.52	0.83
5.86	5.89	5.67	5.70	0.27
6.67	5.60	6.18	5.11	0.69
7.37	5.20	7.00	4.83	0.52
8.58	4.29	9.15	4.86	0.80
9.60	3.38	9.81	3.59	0.30
10	3	10.12	3.12	0.17

从表 1 中可以看出, 本定位系统的误差与传统 RSSI 定位数据相比, 由 2 m 左右下降至 1 m 以内, 满足定位需求, 利用 Python 进行坐标建立后, 绘制的散点图如图 6 所示。

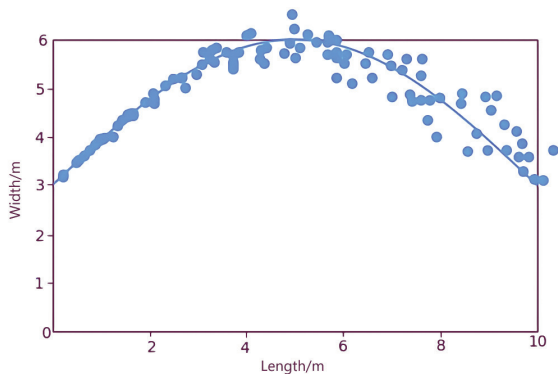


图 6 Python 散点图

4 结论

通过对 ZigBee 的工地定位系统的设计, 基于 CC2530 作为节点主控单元, 构建无线传感网络, 提高信号传输效率^[16]。同时利用卡尔曼滤波算法将基于 RSSI 的定位数据与惯性传感器计算数据进行融合, 实现了对工地人员的实时监控, 并将误差均值减小到 1 m 以内, 提高定位精度。基于以上实验, 得出以下结论:

(1) ZigBee 技术适用于工地定位系统, 能够提供稳定的无线通信, 满足定位的需求。

(2) 通过卡尔曼滤波算法融合 RSSI 和惯性传感器数据, 能够显著提高定位精度, 将误差均值减小到可接受范围内。

(3) 系统表现出良好的稳定性和可靠性, 能够在不同的工地环境和条件下持续工作。

(4) 与其他定位技术相比, 基于 ZigBee 的定位系统具有较低的成本, 适合大规模部署。

综上所述, 基于 ZigBee 的工地定位系统设计验证了其在实际应用中的可行性和实用性, 为工地安全管理提供了一种有效的技术手段。

参考文献:

- [1] 高翔. 智慧工地管理系统研究与设计 [D]. 石家庄: 河北经贸大学, 2024.
- [2] NI P C. Construction safety management report for high-rise buildings[J].Baltic journal of real estate economics and construction management,2022,10(1):16-25.
- [3] 夏书娟, 苗曙光, 李晨晨, 等. 基于 ZigBee 的井下巷道人员定位系统 [J]. 洛阳理工学院学报 (自然科学版), 2023, 33(4): 64-69.
- [4] 石小红, 梁珍珍, 李亚娇, 等. 基于 ZigBee 网络环境的井下人员定位算法改进 [J]. 陕西煤炭, 2024,43(2):86-90.
- [5] 张智超, 李新娥, 顾攀, 等. 基于 ZigBee 混合滤波 RSSI 的室内定位算法 [J]. 传感器与微系统, 2023,42(5):126-129.
- [6] WEI Z, ZHOU Z P. A combined filtering method for zigbee indoor distance measurement[J]. Sensors, 2024, 24(10): 3164.
- [7] 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.
- [8] SWAPNA P, ARUNA B, VINUTHA G, et al. Datadog with zigbee wireless communication network protocol for an internal implementation in an educational institution[J]. International journal of innovative technology and exploring engineering (IJITEE), 2024,13(9):5-8.
- [9] NG G, GOUDA A, ANDRYSEK J. Quantifying asymmetric gait pattern changes using a hidden markov model similarity measure (HMM-SM) on inertial sensor signals[J].Sensors, 2024, 24(19):6431.

融合多重注意力机制的图像篡改检测与识别方法

李 帅¹ 吴宗胜² 薛 茹¹ 马毓洋¹ 泽仁玉珍¹
LI Shuai WU Zongsheng XUE Ru MA Yuyang Zeren Yuzhen

摘 要

随着数字图像处理技术的飞速发展,图像篡改成为威胁信息安全和真实性的严重问题之一。而现有的图像篡改检测方法大多只针对单一篡改方式进行检测,或仅能定位篡改区域,无法有效识别篡改的具体类型,进而限制了其在实际应用场景中的泛化能力。对此,提出了一种融合多重注意力机制的图像篡改检测与识别方法,旨在提高对多种篡改方式的检测精度与泛化能力。通过引入通道注意力机制和空间注意力机制,增强模型在提取和表达图像特征时的局部和全局感知能力。通道注意力机制有助于捕捉图像中不同通道之间的相关性,提升对篡改信息的精细化检测;而空间注意力机制则增强了模型对图像不同位置间关联的理解,进一步提高了对篡改区域的定位精度。最终在 NIST16、Columbia 和 CASIA 三个公开数据集上进行测试, F_1 值分别取得 41.7%、45.2% 和 34.1% 的成绩。通过观察与现有的检测方法对比以及可视化检测结果证明,所提方法具备较强的泛化性,且能够同时检测和识别多种篡改手段。

关键词

图像篡改;篡改定位;注意力机制;Transformer

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.05.009

0 引言

随着数字媒体的广泛传播,图像作为信息传递的重要媒介,在新闻报道、信息安全、社交媒体等领域中占据了关键地位。然而,随着图像编辑技术和生成技术的快速发展,图像篡改变得更为简单且隐蔽,给社会带来了巨大的信任危机。尤其是在司法鉴定和信息安全等领域,图像的真实性和完整性更为重要。

因此,图像篡改检测与识别技术逐渐成为一个研究热点。有效地检测图像篡改并识别篡改类型,不仅是保障信息可信度的重要手段,也是打击虚假信息传播的技术基础。

目前,大多数图像篡改检测方法在性能上仍存在一定的局限性。许多研究只针对特定类型的篡改(如拼接、复制粘贴等)进行检测,缺乏对多种篡改方式的泛化能力。此外,现有方法通常只能定位出篡改区域,但对篡改类型的区分能力不足。鉴于篡改手段的多样性和复杂性,如何设计出一种既能精确检测篡改区域,又能准确识别篡改类型的通用模型,成为该领域的重要挑战。

为了解决这些问题,本文提出了一种融合通道注意力机

1. 西藏民族大学信息工程学院 陕西咸阳 712000

2. 咸阳师范学院计算机学院 陕西咸阳 712000

[基金项目] 西藏自治区自然科学基金重点项目
(XZ202301ZR0042G)

[10] 彭铎,谢堃,刘明硕.基于改进 RSSI 测距的 WSN 机动目标跟踪算法[J].物联网技术,2024,14(8):41-45.

[11] 王龙旭.基于数据融合技术的室内定位系统研究[D].长春:吉林建筑大学,2017.

[12] 刘博,李卓,刘伟,等.基于改进麻雀搜索算法优化的 RSSI 定位[J].传感器与微系统,2024,43(9):127-130.

[13] 韩世杰.基于无线传感技术的多维度定位系统研究与设计[D].长春:吉林建筑大学,2023.

[14] 李婷婷,韩成浩.基于卡尔曼滤波的建筑物内人员定位系统研究[J].吉林建筑大学学报,2015,32(3):68-70.

[15] WANG Y, FU S Q, WANG F H. Improved maximum correntropy criterion Kalman filter with adaptive behaviors for INS/UWB fusion positioning algorithm[J].Alexandria

engineering journal,2024,109:702-714.

[16] WEI X J. Machine learning-based strategy for efficient node localization in wireless sensor networks[J].Journal of ambient intelligence and humanized computing,2025,16:67-84.

【作者简介】

林茹茹(2000—),女,山东青岛人,硕士研究生,研究方向:工地人员定位系统设计。

韩成浩(1972—),通信作者(email:784220625@qq.com),男,吉林图们人,博士,教授,研究方向:建筑火灾风险防控与应急救援。

(收稿日期:2024-12-29 修回日期:2025-04-29)