

控制与决策

Control and Decision

基于RSSI超宽带室内定位锚节点选择方法

李冰, 崔映阳, 刘宇, 刘春刚, 高占良

引用本文:

李冰, 崔映阳, 刘宇, 等. 基于RSSI超宽带室内定位锚节点选择方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(12): 4217-4224.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0321>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[一种基于节点嵌入表示学习的社区搜索算法](#)

Community search algorithm based on node embedding representation learning

控制与决策. 2021, 36(8): 1970-1976 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1439>

[机器人信息增益RRT环境探索算法](#)

Robot RRT based on information gain for environment exploration

控制与决策. 2021, 36(11): 2683-2689 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1007>

[基于虚拟力移动锚节点的3D-DVHop-ACR定位算法](#)

3D-DVHop-ACR localization algorithm based on virtual force moving anchor nodes

控制与决策. 2021, 36(10): 2409-2417 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0323>

[基于反向学习的群居蜘蛛优化WSN节点定位算法](#)

WSN node localization based on social spider optimization and opposition based learning

控制与决策. 2021, 36(10): 2459-2466 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0258>

[基于超级节点的分布式传感器节点定位算法](#)

A distributed sensor nodes localization algorithm based on super nodes

控制与决策. 2020, 35(12): 2898-2906 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0219>

基于RSSI超宽带室内定位锚节点选择方法

李冰^{1,2}, 崔映阳¹, 刘宇¹, 刘春刚^{1,3†}, 高占良⁴

1. 河北师范大学中燃工学院, 石家庄 050024;
2. 河北省无线传感器网络数据应用技术创新中心, 石家庄 050024;
3. 河北省信息融合与智能控制重点实验室, 石家庄 050024;
4. 河北鹏博通信设备有限公司, 河北沧州 062250)

摘要: 在超宽带室内定位中, 由于室内环境复杂, 各锚节点与定位节点间的通信会受到不同程度的干扰, 干扰较大的数据会严重影响定位精度, 因此需要对锚节点进行筛选. 针对以上问题, 提出基于接收信号强度 (RSSI) 超宽带室内定位锚节点选择方法. 首先, 采用插值法计算定位节点对各锚节点间的 RSSI 并采用高斯过程回归进行优化, 得到初始的 RSSI 估计值; 然后, 对此估计值在锚节点位置和路径损耗因子处进行泰勒级数展开, 得到具有 RSSI 信息的费雪矩阵, 从而获得 RSSI 的 Cramér-Rao 下界 (CRLB); 接着, 将所有锚节点选取状态组合 (选择为 1, 不选为 0) 代入 CRLB 公式中, 通过半定松弛求解 CRLB 的迹; 最后, 最小迹所对应的选取状态组合即为选择结果. 实验结果表明, 与未进行锚节点选择的算法相比, 所提出方法在 X 、 Y 、 Z 方向上的定位精度分别提升 37.6%、32.2%、38.8%, 且该方法接近穷举法的锚节点选择结果. 此外, 所提出算法采用无监督的方式无需获取先验数据, 具有较高的实际应用价值.

关键词: 室内定位; 超宽带; 锚节点选择; 接收信号强度; 克拉美罗下界; 无监督

中图分类号: TN273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0321

引用格式: 李冰, 崔映阳, 刘宇, 等. 基于 RSSI 超宽带室内定位锚节点选择方法 [J]. 控制与决策, 2024, 39(12): 4217-4224.

Selecting anchor node based on RSSI ultra-wideband indoor positioning

LI Bing^{1,2}, CUI Yi-yang¹, LIU Yu¹, LIU Chun-gang^{1,3†}, GAO Zhan-liang⁴

(1. College of Combustion Engineering, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. Hebei Provincial Innovation Center for Wireless Sensor Network Data Application Technology, Shijiazhuang 050024, China; 3. Hebei Provincial Key Laboratory of Information Fusion and Intelligent Control, Shijiazhuang 050024, China; 4. Hebei Pengbo Communication Equipment Co., Ltd., Cangzhou 062250, China)

Abstract: In ultra-wideband indoor positioning, due to the complex indoor environment, the communication between each anchor node and the positioning node will be subject to different degrees of interference, and the more interfered data will seriously affect the positioning accuracy, so it is necessary to screen the anchor nodes. Aiming at the above problems, an ultra-wideband indoor positioning anchor node selection method based on received signal strength indication (RSSI) is proposed. Firstly, the RSSI between the anchor nodes is calculated using the interpolation method and optimized by Gaussian process regression to obtain the initial RSSI estimation value. Secondly, this estimation value is Taylor-expanded at the anchor node position and the path loss factor to obtain the Fisher matrix with the RSSI information, and then, the Cramér-Rao lower bound (CRLB) of the RSSI is obtained. Then, all the anchor nodes are selected by the method, and the RSSI of the anchor nodes is obtained. Then, all the anchor node selected state combinations (selected as 1 and unselected as 0) are substituted into the CRLB formula, and the traces of the CRLB are solved by semidefinite relaxation. Finally, the selected state combination corresponding to the minimum trace is the selection result. The experimental results show that compared with the algorithm without anchor node selection, this method improves the positioning accuracy in X , Y , and Z directions by 37.6%, 32.2%, and 38.8%, respectively, and it is close to the anchor node selection result of the exhaustive method. In addition, the proposed algorithm adopts an unsupervised approach without obtaining a priori data, which has high practical application value.

Keywords: indoor positioning; ultra-wideband; anchor node selection; received signal strength indication; Cramér-Rao lower bound; unsupervised

收稿日期: 2024-03-27; 录用日期: 2024-06-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62071167).

†通讯作者. E-mail: liuchungang@hebtu.edu.cn.

0 引言

目前,全球定位系统(global positioning system, GPS)和北斗卫星导航系统已广泛应用于定位领域.然而,受诸多因素影响,卫星定位无法有效应用于复杂多变的室内环境中^[1-2].常见的室内定位技术主要有蓝牙、WiFi、超宽带(ultra-wideband, UWB)、射频识别(radio frequency identification, RFID)、行人航迹推算(pedestrian dead reckoning, PDR)、超声波等^[3-5].

相较于其他室内定位技术,UWB定位技术具有定位精度高、设备功耗低、信号穿透力强、时间分辨率高等优势,在室内高精度定位的应用场景中已普遍采用.然而,室内环境十分复杂,存在非视距(non-line-of-sight, NLOS)、多径等干扰,因此,各锚节点与定位节点间的通信会受到不同程度的干扰^[6-8],从而影响定位精度.为了获取受影响较小的定位数据需要对锚节点进行选择.

Courtay等^[9]提出了三边测量最佳(best anchor selection for trilateration, BAST)锚节点选择方法,该方法基于定位节点的先验位置信息进行预测,并选择最接近该预测值的3个锚节点,与加权质心定位方法相比,BAST的精度提高了4.17倍,而相对于多边形定位方法则提高了1.26倍;Chen等^[10]提出了一种基于几何精度因子(geometric dilution of precision, GDOP)的锚节点选择方法,该方法计算待选择锚节点子集的GDOP值,并将锚节点对总GDOP值的贡献作为评估标准,当锚节点的贡献值高于设定的阈值时,这些锚节点将被选中;Zhao等^[11]将锚节点选择问题转化为两个独立的布尔选择向量问题,通过将原始的非凸问题转化为易处理的半定松弛(semidefinite relaxation, SDR)问题来求解Cramér-Rao下界(CRLB)的最小迹,并基于这一结果进行锚节点的选择.以上提到的所有方法均依赖于定位节点的位置信息.因此,定位节点位置信息的准确程度会显著影响锚节点选择的结果.

de Cock等^[12]提出了基于信道冲激响应(channel impulse response, CIR)的锚节点选择方法,该方法通过UWB设备获取CIR,提取出第1路径信息来选择不同的锚节点,并融合惯性测量单元来辅助位置解析,当存在人体阴影效应时,通过根据信号的第1路径选择锚节点,定位精度可提高27%;van Herbruggen等^[13]提出了基于到达时间差(time difference of arrival, TDoA)的UWB定位系统误差校正的锚对选择方法,利用卷积神经网络来预测CIR信息,以获取较为准确的第1路径信息;2024年,van Herbruggen

等^[14]提出了一种双向测距(two way ranging, TWR)UWB室内定位系统的实时锚节点选择方法,该方法对接收信号强度(received signal strength indication, RSSI)和第1路径信息赋予不同的权重,以获得UWB链路质量因子,并将其作为锚节点选择的标准,从而进一步提高了锚节点选择的准确度.由于通信信道的特性是动态变化的,第1路径信息会随着时间、环境等因素而发生变化,提取和分析第1路径信息需要准确的信号处理结果和硬件支持,增加了系统设计和调试的难度.

以上锚节点选择方法是在定位节点估算位置、信道特征提取以及信号处理等方法的基础上完成的,不仅易受到各种参数误差的影响降低系统的鲁棒性,而且选择标准复杂、计算难度大,影响了实际应用.针对这些问题,本文提出一种基于RSSI超宽带室内定位锚节点选择方法,该方法对原有的链路质量因子进行改进,将RSSI引入CRLB中,作为新的锚节点选择标准.所提出方法避免了第1路径信息受时间、环境等因素变化带来的影响,同时不需要对定位节点位置进行估计,因此避免了估计值误差对锚节点选择的影响,更适用于实际应用场景.

所提出方法的具体流程如下:首先,使用插值法计算定位节点对各锚节点间的RSSI得到初始估计值,采用高斯过程回归得到优化后的RSSI估计值^[15];然后,对此估计值在锚节点位置和路径损耗因子处进行一阶泰勒级数展开^[16],得到具有RSSI信息的费雪矩阵,从而获得RSSI的CRLB;接着,为每个锚节点设置一个独立的布尔选择向量,将由这些向量组成的锚节点选取状态组合代入CRLB公式中,通过SDR求解CRLB的迹;最后,最小迹所对应的选取状态组合即为选择结果.通过在室内设备仓库进行实验,验证所提出方法的有效性.

1 RSSI数据模型

在一个三维空间内, u 为定位节点,位置向量记为 $\mathbf{u}=[x \ y \ z]^T$;有 N 个锚节点对定位节点进行定位,其中第 i 个锚节点的位置向量为 $\mathbf{b}_i=[x_i^o \ y_i^o \ z_i^o]^T$ ($i=1, 2, \dots, N$).由此可得到 N 个锚节点到定位节点的距离公式为

$$d_i = \|\mathbf{u} - \mathbf{b}_i\| + n_i. \quad (1)$$

这里: d_i 为锚节点与定位节点间的欧氏距离,距离测量噪声 n_i 是相互独立的且服从均值为0方差为 σ_i^2 的高斯分布, $\|\cdot\|$ 为Euclidean范数.

将式(1)表示为如下矩阵形式:

$$\mathbf{d} = \mathbf{G}\mathbf{h} + \Delta\mathbf{n}. \quad (2)$$

其中 \mathbf{d} 、 \mathbf{h} 、 $\Delta\mathbf{n}$ 、 \mathbf{G} 分别为

$$\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{h} = [\|\mathbf{u} - \mathbf{b}_1\|, \|\mathbf{u} - \mathbf{b}_2\|, \dots, \|\mathbf{u} - \mathbf{b}_N\|]^T, \quad (4)$$

$$\Delta\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_N]^T, \quad (5)$$

$$\mathbf{G} = [\mathbf{I}_N]. \quad (6)$$

这里 \mathbf{I}_N 为单位矩阵.

RSSI用于估计设备接收到的无线信号的强度,通常以信号功率的dBm(分贝毫瓦)为单位表示.定位节点到第 i 锚节点的RSSI记作 P_i^o ,有

$$P_i^o = P_0 - 10\eta_0 \log_{10} \left(\frac{d_i}{d_0} \right). \quad (7)$$

其中: P_0 为在参考距离 d_0 处的功率; η_0 为路径损耗因子,路径损耗因子受环境变化而改变,取值区间通常为[1, 5].令 $d_0=1$,将式(7)简化为

$$P_i^o = P_0 - 10\eta_0 \log_{10} d_i. \quad (8)$$

本文将使用径向基函数插值法对RSSI测量数据进行初始估计,将估计值进行高斯过程回归优化得到更为精准的RSSI估计值记作 \tilde{P}_i ,可表示为

$$\tilde{P}_i = P_0 - 10\eta_0 \log_{10} \tilde{d}_i, \quad (9)$$

其中 $\tilde{d}_i = \|\tilde{\mathbf{u}} - \mathbf{b}_i\|$ 为估计的RSSI值对应的距离, $\tilde{\mathbf{u}}$ 为定位节点的估计位置.

在实际定位中,锚节点的真实位置 \mathbf{b}_i 和路径损耗因子 η_0 包含先验观测值,将它们分别表示为 \mathbf{B}_i 和 η ,具体如下所示:

$$\begin{cases} \mathbf{B}_i = \mathbf{b}_i + \mathbf{w}_i, \\ \eta = \eta_0 + X_\eta. \end{cases} \quad (10)$$

其中: \mathbf{w}_i 为 \mathbf{B}_i 的先验观测误差, X_η 为 η 的先验观测误差.测量RSSI可表示为 P_i ,即

$$P_i = P_0 - 10\eta \log_{10} d_i. \quad (11)$$

2 基于RSSI的锚节点选择方法

2.1 CRLB模型

由式(2),对定位节点 \mathbf{u} 的CRLB可表示为^[17]

$$\text{CRLB}(\mathbf{u}) = (\tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{Q}}^{-1} \tilde{\mathbf{H}})^{-1}, \quad (12)$$

其中

$$\tilde{\mathbf{H}} = \frac{\partial(\mathbf{G}\mathbf{h})}{\partial\mathbf{u}^T} = \begin{bmatrix} \frac{(\mathbf{u} - \mathbf{b}_1)^T}{\|\mathbf{u} - \mathbf{b}_1\|} \\ \frac{(\mathbf{u} - \mathbf{b}_2)^T}{\|\mathbf{u} - \mathbf{b}_2\|} \\ \vdots \\ \frac{(\mathbf{u} - \mathbf{b}_N)^T}{\|\mathbf{u} - \mathbf{b}_N\|} \end{bmatrix} = \frac{(\mathbf{u} - \mathbf{b}_i)^T}{\|\mathbf{u} - \mathbf{b}_i\|}. \quad (13)$$

根据文献[18],相同量程测量噪声方差相同,即 $\Delta\mathbf{n}$ 的协方差矩阵可表示为

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_N^2\} + \mathbf{1}_N \mathbf{1}_N^T \sigma_1^2. \quad (14)$$

2.2 基于RSSI的锚节点选择方法

2.2.1 基于RSSI的CRLB

由式(5),将 $10\eta_0 \log_{10} \tilde{d}_i$ 在锚节点位置 \mathbf{B}_i 和路径损耗因子 η 处进行一阶泰勒级数展开,有

$$\begin{aligned} 10\eta_0 \log_{10} \tilde{d}_i &= \\ 10\eta \log_{10} d_i - 10X_\eta \log_{10} d_i &+ \frac{10\eta(\mathbf{u} - \mathbf{b}_i)^T}{\ln 10 \cdot \|\mathbf{u} - \mathbf{b}_i\|^2} \mathbf{w}_i. \end{aligned} \quad (15)$$

将式(15)代入(9),有

$$\begin{aligned} \tilde{P}_i &= P_0 - 10\eta \log_{10} d_i + 10X_\eta \log_{10} d_i - \\ &\frac{10\eta(\mathbf{u} - \mathbf{b}_i)^T}{\ln 10 \cdot \|\mathbf{u} - \mathbf{b}_i\|^2} \mathbf{w}_i. \end{aligned} \quad (16)$$

将式(16)减去(11),可得到

$$\tilde{P}_i - P_i = 10X_\eta \log_{10} d_i - \frac{10\eta(\mathbf{u} - \mathbf{b}_i)^T}{\ln 10 \cdot \|\mathbf{u} - \mathbf{b}_i\|^2} \mathbf{w}_i. \quad (17)$$

根据 $P_i - P_0 = 10\eta \log_{10} d_i$,可得到

$$\frac{10\eta(\mathbf{u} - \mathbf{b}_i)^T}{\ln 10 \cdot \|\mathbf{u} - \mathbf{b}_i\|^2} \mathbf{w}_i = (P_i - P_0) \frac{X_\eta}{\eta} - (\tilde{P}_i - P_i). \quad (18)$$

将式(13)代入(18),有

$$\tilde{\mathbf{H}} = \frac{\ln 10 \cdot \|\mathbf{u} - \mathbf{b}_i\|}{10\eta \mathbf{w}_i} \left[(P_i - P_0) \frac{X_\eta}{\eta} + P_i - \tilde{P}_i \right]. \quad (19)$$

得到具有RSSI信息的费雪矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}$,通过 $\tilde{\mathbf{H}}$ 计算更新后的CRLB.

2.2.2 半定松弛

假设从具有 N 个锚节点的系统中选择 M 个锚节点.此外,假设距离测量噪声的协方差由 \mathbf{Q} 表示.为了执行锚节点选择,首先定义一个布尔向量 $\boldsymbol{\omega}$,即

$$\boldsymbol{\omega} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N]^T, \quad (20)$$

其中 $\omega_i \in \{0, 1\}$ 为是否选择第 i 个锚节点的指示符,即当选择第 i 个锚节点时 $\omega_i = 1$,否则 $\omega_i = 0$.由此定义一个 $\tilde{\mathbf{W}} \in \mathbb{R}^{N \times M}$,该矩阵是通过 $\text{diag}(\boldsymbol{\omega})$ 中删除未选择的锚节点所对应的所有列而获得的.从构造的 $\tilde{\mathbf{W}}$ 可得到 $\tilde{\mathbf{W}}\tilde{\mathbf{W}}^T = \text{diag}(\boldsymbol{\omega})$.由此可采用 $\tilde{\mathbf{W}}$ 来表示从 N 个锚节点中选出 M 个锚节点的CRLB公式,有

$$\text{CRLB}(\mathbf{u}) = (\tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{W}} (\tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{W}})^{-1} \tilde{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{H}})^{-1}. \quad (21)$$

在测距噪声不相关的条件下, \mathbf{Q} 为一个对角矩阵,由此得到 $(\tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{W}})^{-1} = \tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{Q}^{-1} \tilde{\mathbf{W}}$.因此,式(21)可等

价地写为含有 ω 的形式,即

$$\text{CRLB}(\mathbf{u}) = (\tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{W}} \tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{Q}^{-1} \tilde{\mathbf{W}} \tilde{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{H}})^{-1} = (\tilde{\mathbf{H}}^T \text{diag}(\omega) \mathbf{Q}^{-1} \text{diag}(\omega) \tilde{\mathbf{H}})^{-1}. \quad (22)$$

基于式(22),可将锚节点选择问题表述为以下优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{\omega} & \text{tr}\{((\tilde{\mathbf{H}}^T \text{diag}(\omega) \mathbf{Q}^{-1} \text{diag}(\omega) \tilde{\mathbf{H}})^{-1})\}. \\ \text{s.t.} & \mathbf{1}_N^T \omega = M, \\ & \omega_1 \in \{0, 1\}^N. \end{aligned} \quad (23)$$

问题(23)可使用SDR来解决,通过引入一个辅助变量 $\bar{\mathbf{Z}}$,满足

$$((\tilde{\mathbf{H}}^T \text{diag}(\omega) \mathbf{Q}^{-1} \text{diag}(\omega) \tilde{\mathbf{H}})^{-1}) \preceq \bar{\mathbf{Z}}. \quad (24)$$

根据舒尔补的方式,不等式(24)可改写为如下所示的线性矩阵不等式:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Z}} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \tilde{\mathbf{H}}^T \text{diag}(\omega) \mathbf{Q}^{-1} \text{diag}(\omega) \tilde{\mathbf{H}} \end{bmatrix} \succeq 0 & \Leftrightarrow \\ \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Z}} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \tilde{\mathbf{H}}^T \text{diag}(\omega) \mathbf{Q}^{-1} \tilde{\mathbf{H}} \end{bmatrix} \succeq 0, \end{aligned} \quad (25)$$

其中的等价关系源于 \mathbf{Q} 为对角线.此外,引入另一个辅助变量 \mathbf{W} ,使得

$$\mathbf{W} = \omega \omega^T. \quad (26)$$

已知式(26)等价于

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W} & \omega^T \\ \omega & 1 \end{bmatrix} \succeq 0. \quad (27)$$

现在,问题(23)可以转化为

$$\begin{aligned} \min_{\omega, \mathbf{W}, \bar{\mathbf{Z}}} & \text{tr}\{\bar{\mathbf{Z}}\}. \\ \text{s.t.} & \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Z}} & \tilde{\mathbf{H}}^T \text{diag}(\omega) \mathbf{Q}^{-1} \tilde{\mathbf{H}} \end{bmatrix} \succeq 0, \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{W} & \omega^T \\ \omega & 1 \end{bmatrix} \succeq 0, \\ & \text{tr}\{\mathbf{W}\} = M, \\ & \text{Diag}(\mathbf{W}) = \omega. \end{aligned} \quad (28)$$

对于每个可行解,计算问题(28)的目标值.选择目标值最小的可行解作为最终解.

综上所述,本文提出基于RSSI的锚节点选择方法(RSSI semi-definite relaxation, RSDR),步骤如下.

step 1: 初始化相关参数、维度、最大迭代次数、终止条件等,在初始时刻采集RSSI数据得到测量RSSI为 P_i .

step 2: 对测量RSSI数据 P_i 进行径向基函数插值

和高斯过程回归得到RSSI估计值 \tilde{P}_i ,从而得到关于RSSI的CRLB.

step 3: 引入一个布尔选择向量 ω ,并以选择锚节点的CRLB作为目标函数,建立锚节点选择问题(23).

step 4: 使用SDR将非凸的锚节点选择问题(23)转化为易于求解的SDP问题(28).

step 5: 求解SDP问题得到锚节点选择向量 ω .

在室内定位中,4个锚节点便可完成三维定位,但是使用额外的锚节点来考虑时间信号阻塞、数据包丢失或锚节点位置不佳等情况能够在一定程度上提高定位精度.目前,对锚节点数量的研究已较为成熟^[19-21],不再赘述.在已有研究的基础上^[14-15],所提出方法采用8个锚节点,对其中5个进行选择,并在设备仓库完成定位实验验证.

3 实验结果和性能分析

3.1 实验环境

本实验采用蓝点科技的BPHERO-UWB定位模块,测距误差小于0.1m,主控芯片为STM32F103系列MCU.实验室搭建模拟实际应用场景(单位为m)如下:实验室空间为 $8.3 \times 7.3 \times 3.7$,货架尺寸为 $6 \times 0.5 \times 2$,分为3层,每层高度为0.85.货架上的物品为金属制仪器设备.锚节点布设位置如图1所示,实验环境和所用设备如图2所示.

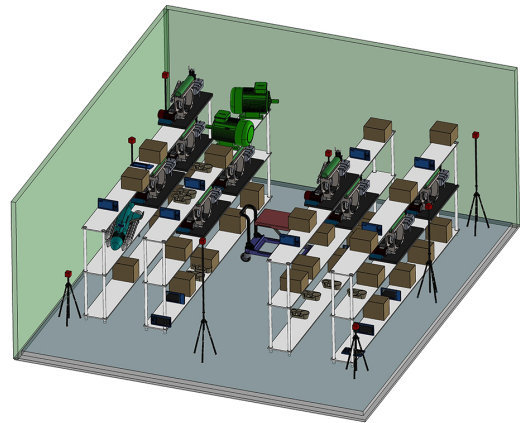


图1 锚节点位置



图2 实验场景和设备

锚节点位置如表1所示.锚节点位置采用激光测距仪测量真实位置,测距精度可达 ± 5 mm.

表1 锚节点位置

锚节点	位置/m
b_1	(0, 0, 0)
b_2	(1.113, 3.621, -2.103)
b_3	(4.097, 3.524, -1.473)
b_4	(7.458, 3.524, -0.187)
b_5	(7.606, 0, -2.103)
b_6	(7.462, -3.194, -0.351)
b_7	(4.204, -3.281, -1.506)
b_8	(1.013, -3.392, -2.103)

3.2 实验结果和性能分析

实验共采集30个定位节点位置数据,对每个定位节点位置进行400次数据采集,利用Matlab R 2020b仿真软件进行数据处理. 本文使用平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)作为评价定位精度的指标. MAE和RMSE的定义如下所示:

$$E_{MAE} = \frac{1}{p} \sum_{r=1}^n |U - \bar{U}|, \tag{29}$$

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{r=1}^p [(\hat{x} - x)^2 + (\hat{y} - y)^2 + (\hat{z} - z)^2]}. \tag{30}$$

其中: p 为实验位置的个数, U 和 \bar{U} 分别为测量值和计算值, (x, y, z) 和 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 分别为定位节点的真实坐标和通过锚节点选择方法计算的定位节点坐标.

实验结果如表2所示. 所提出方法在 X 方向最大误差为0.343 m,最小误差为0.005 m;所提出方法在 Y 方向最大误差为0.360 m,最小误差为0.018 m;所提出方法在 Z 方向最大误差为0.740 m,最小误差为0.001 m. 由表2的数据结果可见,所提出方法多数情况下在 X 、 Y 、 Z 三个方向具有较好的锚节点选择性能.

表2 实验数据

序号	定位节点位置/m	X 误差/m	Y 误差/m	Z 误差/m	序号	定位节点位置/m	X 误差/m	Y 误差/m	Z 误差/m
1	(2.41, 2.6, -0.4)	0.142	0.159	0.411	16	(2.4, -1.2, -1.31)	0.027	0.031	0.090
2	(2.41, 2.6, -1.31)	0.343	0.360	0.119	17	(2.3, -0.9, -1.63)	0.091	0.042	0.359
3	(2.41, 2.6, -1.79)	0.138	0.269	0.247	18	(5.2, -0.9, -0.4)	0.054	0.121	0.031
4	(4.91, 2.6, -0.4)	0.077	0.177	0.140	19	(5.2, -1.2, -1.41)	0.126	0.030	0.112
5	(4.91, 2.6, -1.31)	0.118	0.168	0.162	20	(5.2, -1.1, -1.53)	0.226	0.157	0.326
6	(4.91, 2.6, -2.12)	0.035	0.083	0.479	21	(5.92, -0.9, -0.4)	0.148	0.334	0.740
7	(6.29, 2.6, -0.4)	0.145	0.095	0.252	22	(5.92, -0.9, -1.24)	0.022	0.268	0.211
8	(6.29, 2.6, -1.31)	0.007	0.087	0.094	23	(5.92, -0.9, -1.63)	0.015	0.018	0.077
9	(2.5, 1.25, -0.4)	0.005	0.102	0.029	24	(2.06, -2.35, -0.4)	0.116	0.271	0.037
10	(2.5, 1.5, -1.31)	0.092	0.109	0.202	25	(1.85, -2.6, -1.31)	0.204	0.146	0.037
11	(2.5, 1.3, -1.79)	0.135	0.066	0.331	26	(2.15, -2.35, -1.71)	0.081	0.071	0.222
12	(4.69, 1.25, -0.4)	0.036	0.055	0.130	27	(4.11, -2.35, -0.4)	0.153	0.219	0.183
13	(4.69, 1.25, -1.24)	0.037	0.045	0.383	28	(4.11, -2.55, -1.01)	0.203	0.025	0.211
14	(4.69, 1.5, -2.07)	0.069	0.084	0.001	29	(4.11, -2.35, -1.71)	0.038	0.253	0.170
15	(2.3, -0.9, -0.4)	0.083	0.087	0.140	30	(6.83, -2.35, -0.4)	0.292	0.200	0.158

所提出方法通过RSSI改进非凸的锚节点选择问题,使用SDR将锚节点选择问题转化为SDP问题. 为了验证所提出方法的准确性,将所提出方法、BAST方法^[9]、Previous-SDR方法^[11]、SDR方法^[17]以及穷举法的定位结果与未处理^[22]的定位结果进行定位精度对比. 图3~图5和表3展示了不同方法的定位误差统计结果. 由实验结果可知,所提出方法的平均绝对误差低于其他选择方法且接近穷举法的锚节点选择结果,具有较好的锚节点选择性能. 与未处理相比:所提出方法在 X 、 Y 、 Z 方向上的定位精度分别提升了37.6%、32.2%、38.8%. 在 X 、 Y 、 Z 方向,RSDR方法的箱体宽度均要小于未处理方法、BAST方法、Previous-SDR方法和SDR方法且接近穷举法;BAST方法基于

距离选择最接近定位节点的锚节点,因此,该方法的定位结果更具有随机性,导致BAST方法在 Y 方向上的定位精度较差;Previous-SDR和SDR方法均基于距离设置锚节点选择问题,在NLOS干扰的情况下会显著影响锚节点的选择正确性,出现锚节点选择不准确的情况. RSDR方法通过RSSI的CRLB设置锚节点选择问题,有效地避免了锚节点选择的随机性,同时使用插值法和高斯过程回归对RSSI进行估计,降低了NLOS带来的干扰. 尽管RSDR方法在面对严重干扰时因其较小的四分位距而可能产生异常值,但是值得注意的是,这些异常值所代表的定位精度实际上却超越了BAST方法、Previous-SDR方法与SDR方法. 这一特性凸显出RSDR方法在处理复杂环境时的

独特优势,展现出了更好的鲁棒性.

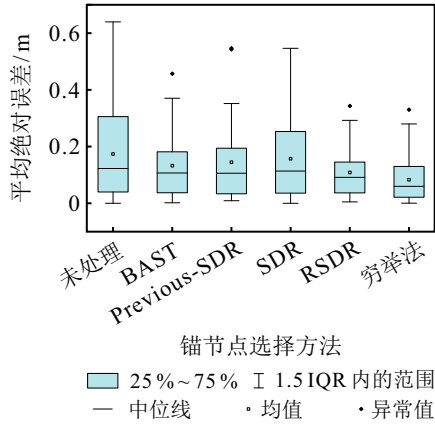


图3 X方向不同方法间误差箱形图

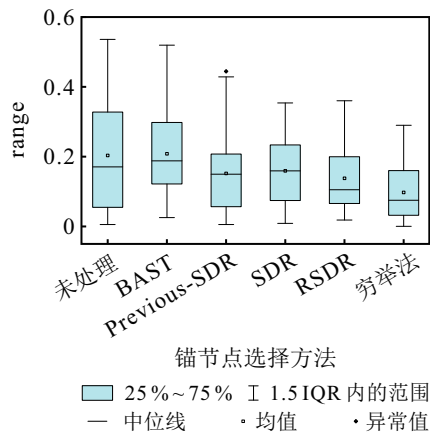


图4 Y方向不同方法间误差箱形图

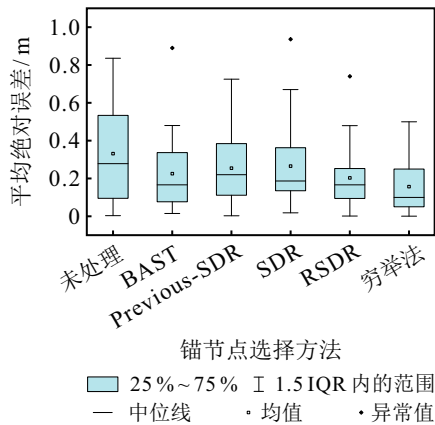


图5 Z方向不同方法间误差箱形图

表3 不同方法在X、Y、Z方向的平均定位误差

方法	X方向/m	Y方向/m	Z方向/m
未处理	0.174	0.203	0.332
BAST	0.133	0.208	0.225
Previous-SDR	0.145	0.152	0.254
SDR	0.157	0.159	0.266
RSDR	0.109	0.138	0.203
穷举法	0.083	0.098	0.156

图6~图8为30个定位节点位置根据不同方法在X、Y、Z方向上的定位误差统计结果.未处理、

BAST、Previous-SDR、SDR、RSDR和穷举法在X方向上90%的误差分别为0.40m、0.27m、0.27m、0.34m、0.20m、0.15m;在Y方向上90%的误差分别为0.42m、0.34m、0.32m、0.27m、0.26m、0.22m;在Z方向上90%的误差分别为0.69m、0.44m、0.50m、0.53m、0.38m、0.34m.在X、Y方向,当定位误差取值小于0.1m时,各方法的累积分布函数值相差不大,这是由于部分定位节点的初始估计位置的精度度较高,各锚节点选择方法的定位精度比较准确,随着初始估计位置的准确性降低,BAST、Previous-SDR和SDR方法的定位误差也逐渐增大,RSDR方法不受初始估计位置的影响,因此锚节点选择准确度更高.在Z方向上,由于其GDOP相较于X、Y方向较大,最后定位误差稍大.在定位误差大于0.2m时,RSDR与BAST、Previous-SDR和SDR方法相比,拥有较好的锚节点选择性能.

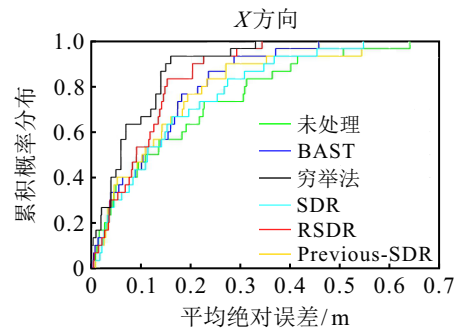


图6 X方向不同方法间的误差

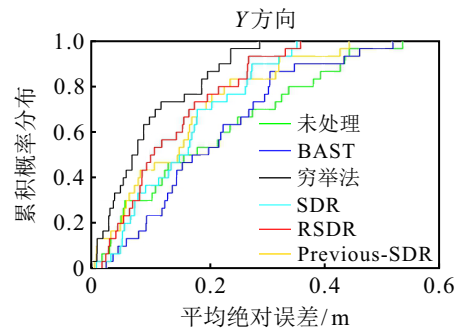


图7 Y方向不同方法间的误差

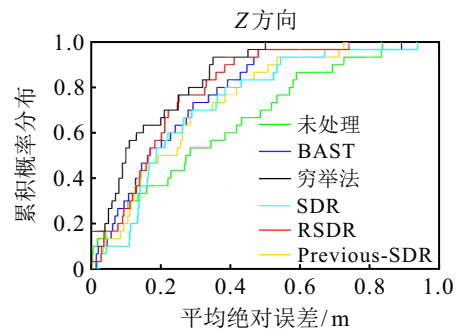


图8 Z方向不同方法间的误差

为了进一步验证所提出方法的有效性,对6种方法的三维整体定位精度进行比较,实验结果如图9所

示,平均三维整体定位精度如表4所示.

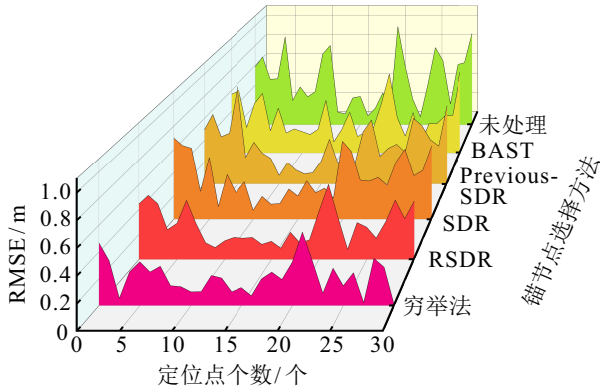


图9 不同方法的三维整体定位误差

表4 不同方法的三维整体平均定位误差

方法	三维整体平均RMSE/m
未处理	0.449
BAST	0.341
Previous-SDR	0.361
SDR	0.362
RSDR	0.272
穷举法	0.217

由图9和表4的结果显示,不同方法的三维整体定位误差变化明显不同:SDR方法的锚节点选择效果最糟糕,误差存在较大波动,且平均误差最大;RSDR方法的锚节点选择性能明显要优于BAST、Previous-SDR与SDR方法.RSDR方法的平均整体定位误差从0.449m降低至0.272m,定位精度提升了39.4%.尽管在某些定位节点的误差较大,但是从所有定位节点的误差来看,RSDR方法的整体定位误差波动范围明显小于其他集中锚节点选择方法,表明RSDR方法能够获得较好的定位效果.

4 结论

本文提出了一种基于RSSI超宽带室内定位锚节点选择方法.将SDR问题扩展至超宽带室内定位系统中,验证了RSSI的CRLB作为锚节点选择问题的性能.所提出锚节点选择方法不需要对定位节点进行位置估计,避免了估计值误差对锚节点选择的影响,有效提高了锚节点选择的准确性.实验结果表明,所提出方法在X、Y、Z方向上的定位精度分别提升了37.6%、32.2%、38.8%,定位结果接近穷举法的性能.在实际应用中,如钢厂、大型车间等,锚节点部署会受到场地限制,影响最优锚节点的选择.未来的工作将对上述情况进行研究.此外,本文主要针对静态室内定位,但是随着定位需求的多样化,将进一步提高方法的实时性,完成实时动态定位.

参考文献(References)

[1] Lu Y Q, Ma H J, Smart E, et al. Real-time performance-focused localization techniques for autonomous vehicle: A review[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 6082-6100.

[2] 郭戈,刘佳庚,孙晓峥.融合5G/GNSS的车辆高精度鲁棒安全定位: 进展与展望[J]. 控制与决策, 2023, 38(2): 289-303.
(Guo G, Liu J G, Sun X Z. Secure robust precise vehicle localization with 5G/GNSS fusion: Advances and prospects[J]. Control and Decision, 2023, 38(2): 289-303.)

[3] Yang B, Dai C H, Ye H Y, et al. Research on high precision indoor positioning method based on low power bluetooth technology[C]. The 6th International Conference on Big Data and Information Analytics. Shenzhen, 2020: 133-137.

[4] Carotenuto R, Merenda M, Iero D, et al. An indoor ultrasonic system for autonomous 3-D positioning[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(7): 2507-2518.

[5] Gezici S, Tian Z, Giannakis G B, et al. Localization via ultra-wideband radios: A look at positioning aspects for future sensor networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 70-84.

[6] 郭林,刘冉,蓝发籍,等.基于激光与UWB序列匹配的目标跟踪[J]. 控制与决策, 2024, 39(8): 2613-2621.
(Guo L, Liu R, Lan F J, et al. Object tracking based on sequence matching between UWB and LiDAR[J]. Control and Decision, 2024, 39(8): 2613-2621.)

[7] Zekavat R, Buehrer R M. Impact of anchor placement and anchor selection on localization accuracy[M]. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2012: 425-455.

[8] 齐小刚,陈谔,李芷楠.室内定位中非视距的识别和抑制算法研究综述[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 1921-1933.
(Qi X G, Chen Z, Li Z N. A review of non-line-of-sight identification and mitigation algorithms for indoor localization[J]. Control and Decision, 2022, 37(8): 1921-1933.)

[9] Courtay A, Gentil M L, Berder O, et al. Anchor selection algorithm for mobile indoor positioning using WSN with UWB radio[C]. IEEE Sensors Applications Symposium. Sophia Antipolis, 2019: 1-5.

[10] Chen H G, Dhekne A. PnPLoc: UWB based plug & play indoor localization[C]. IEEE the 12th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Beijing, 2022: 1-8.

[11] Zhao Y, Li Z, Hao B J, et al. Sensor selection for

- TDOA-based localization in wireless sensor networks with non-line-of-sight condition[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(10): 9935-9950.
- [12] de Cock C, Coene S, van Herbruggen B, et al. IMU-aided detection and mitigation of human body shadowing for UWB positioning[C]. *IEEE the 12th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*. Beijing, 2022: 1-8.
- [13] van Herbruggen B, Fontaine J, de Poorter E. Anchor pair selection for error correction in time difference of arrival (TDoA) ultra wideband (UWB) positioning systems[C]. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*. Lloret de Mar, 2021: 1-8.
- [14] van Herbruggen B, van Leemput D, van Landschoot J, et al. Real-time anchor node selection for two-way-ranging (TWR) ultra-wideband (UWB) indoor positioning systems[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2024, 8(3): 6002404.
- [15] Bravenec T, Gould M, Fryza T, et al. Influence of measured radio map interpolation on indoor positioning algorithms[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23: 20044-20054.
- [16] 焦田雨, 姜祖青. 基于校正源抑制路径损耗因子误差和传感器位置误差的RSS定位算法[J]. *信息工程大学学报*, 2022, 23(5): 520-529.
(Jiao T Y, Jiang Z Q. An RSS localization algorithm using calibration emitter to alleviate path loss exponent uncertainty and sensor position errors[J]. *Journal of Information Engineering University*, 2022, 23(5): 520-529.)
- [17] Dai Z C, Wang G, Jin X P, et al. Nearly optimal sensor selection for TDOA-based source localization in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 12031-12042.
- [18] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, 42(8): 1905-1915.
- [19] Kumar V, Arablouei R, Jurdak R, et al. RSSI-based self-localization with perturbed anchor positions[C]. *IEEE the 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications*. Montreal, 2017: 1-6.
- [20] Li J, Xiu C, Yang D. An optimal deployment method of uwb positioning base-station[J]. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022, X3W1: 85-91.
- [21] 李芷楠, 丁凯, 齐小刚, 等. 基于改进引力搜索算法的室内定位锚节点部署方案[J]. *控制与决策*, 2023, 38(9): 2707-2713.
(Li Z N, Ding K, Qi X G, et al. Indoor positioning anchor node deployment scheme based on improved gravitational search algorithm[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(9): 2707-2713.)
- [22] Lakshmi Y V, Singh P, Abouhawwash M, et al. Improved chan algorithm based optimum UWB sensor node localization using hybrid particle swarm optimization[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 32546-32565.

作者简介

李冰(1984—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为物联网、机器人技术, E-mail: libing0804@126.com;

崔映阳(1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为无线通信 UWB室内定位, E-mail: cuiydyang@163.com;

刘宇(1979—), 男, 讲师, 主要研究方向为公共数学教学及应用数学, E-mail: liu_yu_79@126.com;

刘春刚(1970—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为无线通信安全技术、软件无线电、卫星通信理论与技术、无线数据传输技术, E-mail: liuchungang@hebtu.edu.cn;

高占良(1967—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为通信工程, E-mail: 1114115178@qq.com.