

煤矿井下移动机器人节点三维定位算法研究*

陈宏辉 胡小平 吴开盛

(湖南科技大学 先进矿山装备教育部工程研究中心 湘潭 411201)

摘要: 在煤矿井下移动无线传感器网络中,移动机器人作为网络中的可移动节点,其空间位置的确定对网络的正常运行具有重要作用。针对目前无线传感器网络中三维定位算法精度和实现复杂度难以平衡的问题,将一种二维平面内的基于接收信号强度指示(RSSI)测距的概率质心定位算法扩展到煤矿井下狭长封闭环境中移动机器人节点的三维定位应用,通过在一定显著度下的各锚节点定位球壳求取定位重合区域,并用该区域代替整个机器人节点的分布区域,以重合区域的概率密度质心作为机器人节点的估计位置。通过实验仿真对移动机器人节点定位情况进行了验证,结果表明算法在狭长封闭模拟空间定位精度可以达到 0.13 m,基本可实现对移动机器人的空间定位。

关键词: 移动无线传感器网络;移动机器人;三维定位;RSSI;概率质心

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

3D positioning research of mobile robot node in coal mine

Chen Honghui Hu Xiaoping Wu Kaisheng

(Engineering Research Center of Advanced Mining Equipment, Ministry of Education, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In the mobile wireless sensor network of underground coal mine, as the mobile node of the network, the determination of the spatial position of the mobile robot plays an important role in the normal operation of the network. Aiming at the problem that the accuracy and complexity of the three-dimensional positioning algorithm in wireless sensor networks are difficult to balance, extends a probabilistic centroid localization algorithm based on received signal strength indication (RSSI) ranging in a two-dimensional plane to a long and narrow space in coal mines for three-dimensional positioning application of mobile robot nodes. The algorithm adopted the overlapping area, which should be locating spherical shell of anchor node under a certain outstanding degree, replacing the whole distribution area of the robot node estimated position. Then the probability-density-centroid of overlapping area was figured out as the estimated value of the robot node. The position algorithm have been verified by a simulation experiment. The result manifest that the Positioning accuracy can reach 0.13 m in long and narrow space.

Keywords: mobile wireless sensor network; mobile robot; 3D positioning; RSSI; probability-centroid

0 引言

移动无线传感网络具有自组织、抗破坏能力强、易于布置等优点,在煤矿井下监测网络方面具有较好的应用前景^[1]。但煤矿井下环境复杂,狭窄的巷道和井下设备等均会对信号的传输产生较大影响,信号的多径反射、绕射和障碍物干扰等问题突出,要基于测距的方法实现可靠定位难度相对较大,基于接收信号强度指示(received signal strength indication, RSSI)的测距则主要通过 RF 信号,且

节点本身就具有无线通信能力,不需要增加额外的设备,因此是一种低功耗低成本的测距技术^[2],在节点能量不能得到及时补充的井下环境使用基于 RSSI 的测距方法能有效延长网络寿命。但由于 RSSI 测距值不准确,要实现节点的定位必须依靠较好的定位算法。现在已有许多学者进行了相关的算法研究,Ahmad 等^[3]提出了一种基于参数环路划分的算法,利用锚节点^[4]空间划分和细分曲面实现对未知节点的三维定位;Hua 等^[5]提出了一种利用球面感知半径的三维质心定位算法,该方法可以显著降低实际三维网

收稿日期:2020-11-22

* 基金项目:国家自然科学基金(61572185)项目资助

络环境中的定位误差,具有广泛的应用前景;Mardini 等^[6]提出了一种自适应定位算法,采用带移动平均的双状态马尔可夫模型检测 RSSI 读数,将估计误差从 11.7 m 降低到 3 m;Sharma 等^[7]利用入侵杂草和细菌觅食优化理论提出了一种基于模糊逻辑的三维定位方法,仿真结果表明该算法在定位精度、稳定性、定位覆盖和可扩展性等方面要优于质心法、加权质心法等现有的三维定位算法;朱清山等^[8]通过将 ZigBee 技术与 RSSI 测距结合的方法,提高了线性匹配邻近算法在的室内定位精度。Wang 等^[9]提出了一种基于相对定位地图的鲁棒定位算法,该算法与现有方法相比,具有更强的抗干扰能力和更高的定位精度;在煤矿巷井等复杂条件下,也有相关学者开展了研究,Song 等^[10]研究了一种用于煤矿井下的改进的序列定位算法,使用 ZigBee 设备构建无线传感器网络和定位人员位置,仿真结果表明,改进的算法改善了边缘节点定位不理想问题且能达到基于序列的定位算法的定位精度;Zhao 等^[11]提出了一种基于凸集的地下巷道定位算法,来解决参考位置选择过于稀疏导致给煤矿人员的定位困难问题,该算法比传统的基于指纹的定位算法具有更高的定位精度;李卫硕等^[12]将 BP 神经网络运用到机器人的定位避障中,能较好地应用于复杂多障碍物场景;目前无线传感器网络中节点的三维定位是一个热点研究内容,众多方法中也依然存在精度不足或算法过于复杂的问题。

在煤矿井下巷道狭窄环境中,由于结构限制,待测节点和锚节点间的间距通常不大,而且加上巷道环境内信号的多径反射、绕射和障碍物干扰等问题的影响,测距难免存在较大误差,此时必须通过算法来消减这些误差造成的影响,概率质心定位算法可以将这种影响的不确定性通过概率来体现并提高最终定位结果的准确性。本文通过一种基于 RSSI 的概率质心算法,将所测距离按一定的概率分布绘出,从而得到概率球壳,再由各锚节点得到各球壳的相交区域,再分别求取相交区域内的概率质心,最后取平均值即为最后估计的节点位置。算法实现简单,并通过实验仿真对其定位效果进行了验证。

1 RSSI 测距模型与三维定位原理

1.1 RSSI 测距模型

在无线通信中,可以通过建立 RSSI 与通信距离的关系模型来确定两通信节点间的距离^[13]。由于在实际应用环境中存在绕射、多径反射和障碍物等干扰因素,所以本文采用对数常态分布模型较为合理^[14]。其表达式为:

$$P_i(d_i) = P_T - P_L(d_0) - 10n\lg(d_i/d_0) + X_{\sigma_i} \quad (1)$$

式中: d_i 为接收点和第 i 个发射节点之间的实际距离; d_0 为已知的参考距离; n 为信道衰减指数,可根据实际环境查表选取; X_{σ_i} 为锚节点的测量误差,是均值为 0、标准差为 σ_i 的高斯随机变量; P_T 为发射节点的信号强度; $P_L(d_0)$ 为传输距离为 d_0 时信号强度的路径损耗值; $P_i(d_i)$ 为距离发射点 d_i 处的接收信号强度。

在无线传感器网络中,发射节点通常可以方便的设定发射功率,接收节点可以测量接收功率的强度,所以表达式中的 P_T 、 $P_L(d_0)$ 、 $P_i(d_i)$ 均为已知,只有信道衰减指数 n 根据网络所处环境而有所不同。在精度要求不很严格的场合常通过查表获得^[15]。当确定了 n 以后,通过式(1)可以直接求得未知节点与第 i 个锚节点之间的距离 d_i 的值如下:

$$d_i = d_0 \times 10^{\left(\frac{P_T - P_L(d_0) - P_i(d_i)}{10n}\right)} \times X'_{\sigma_i} \quad (2)$$

1.2 三维空间节点定位原理

在无线传感器网络三维定位中,当不存在定位误差时,最少可通过 4 个锚节点即可实现对未知节点的空间定位^[16]。假设 4 个锚节点的坐标分别为 $A_i(x_i, y_i, z_i)$,与未知节点间距离分别为 $d_i, i = 1, 2, 3, 4$,未知节点的坐标为 $M(x, y, z)$ 。根据三维空间的距离计算公式,可以得到一组非线性方程组:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = d_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = d_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = d_3^2 \\ (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 = d_4^2 \end{cases} \quad (3)$$

通过式(3),当测距值 d_i 不存在测距误差时,可以准确求出未知节点的位置。而实际应用中,节点间距离 d 的测量必然存在误差,所以直接运用理论方法通常无法求得未知节点位置,只能通过算法来估计未知节点的位置。

2 三维空间概率质心定位

在煤矿井下巷道狭窄环境中,由于结构限制,待测节点和锚节点间的间距通常不大,而且加上巷道环境内信号的多径反射、绕射和障碍物干扰等问题的影响,测距难免存在较大误差,此时必须通过算法来消减这些误差造成的影响,概率质心定位算法可以将这种影响的不确定性通过概率来体现并提高最终定位结果的准确性。

2.1 二维平面中的概率质心定位方法

文献[17]对二维平面内的概率质心定位算法进行了研究,由式(1)可知,由于测得信号强度值含有随机误差,设 d'_i 为收发节点测得的距离,则可知锚节点与未知节点间测得的距离符合正态分布,式(1)经变换可得:

$$P_i(d'_i) = P_T - P_L(d_0) - 10n\lg(d'_i/d_0) \quad (4)$$

以测距值 d_i 的概率分布为:

$$P(d_i) = P\{D_i \leq d_i\} = P\{d'_i 10^{\frac{X_{\sigma_i}}{(10n)}} \leq d_i\} =$$

$$P\left\{X \leq 10n\lg \frac{d_i}{d'_i}\right\} = \Phi\left(\frac{10n\lg \frac{d_i}{d'_i}}{\sigma_i}\right) \quad (5)$$

由此可得 d_i 的概率密度函数为:

$$f(d_i) = \frac{10n}{\sqrt{2\pi}\sigma_i d_i \ln 10} \exp\left[-\frac{(10n\lg(d_i/d'_i))^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (6)$$

此未知节点与锚节点间距离 d_i 在分布区域内的概率分布函数为:

$$P(d_i) = \Phi\left(\frac{10n \lg(d_i/d'_i)}{\sigma_i}\right) = \Phi(x) \quad (7)$$

式中: $\Phi(x)$ 表示变量为 x 的标准正态分布, 当 $|x| \leq 1.65$ 时, $5\% \leq \Phi(x) \leq 95\%$, 所以 $|x| > 1.65$ 的概率小于 10% , 因此可以忽略。据此可以得到单个锚节点在一定显著度下的定位环形区域, 如图 1 所示。再将 n 个环形区域相交求得的重叠区域即为未知节点的定位区域, 再分别求取各锚节点在该区域中的概率质心的横纵坐标值, 最后求取各向平均值即可得到未知节点的坐标值。

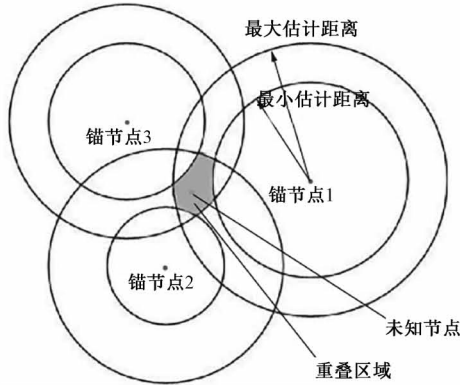


图1 重叠区域示意图

2.2 三维空间概率质心定位方法

1) 重合区域求取

假设 n 个锚节点的坐标分别为 $A_i(x_i, y_i, z_i)$, 与未知节点间距离分别为 $d_i, i = 1, 2, \dots, n$, 未知节点的坐标为 $M(x, y, z)$ 。在 0.1 显著性水平下可以求得对应的 d_i 如下:

$$d'_i 10^{-1.65\sigma_i/(10n)} \leq d_i \leq d'_i 10^{1.65\sigma_i/(10n)} \quad (8)$$

由各锚节点坐标以及对应的 d_i 值可以建立球面方程组:

$$\begin{aligned} \bar{x}_i &= \frac{\iiint_{a_1 \leq x \leq a_2, b_1 \leq y \leq b_2, c_1 \leq z \leq c_2} f(x, y, z) x dx dy dz}{\iiint_{a_1 \leq x \leq a_2, b_1 \leq y \leq b_2, c_1 \leq z \leq c_2} f(x, y, z) dx dy dz} = \\ &= \frac{\iiint_{a_1 \leq x \leq a_2, b_1 \leq y \leq b_2, c_1 \leq z \leq c_2} (x - x_i) \frac{10n}{\sqrt{2\pi\sigma_i \ln 10} \times \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \exp\left\{-\frac{[10n \lg(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} / d'_i)]^2}{2\sigma_i^2}\right\} dx dy dz}{\iiint_{a_1 \leq x \leq a_2, b_1 \leq y \leq b_2, c_1 \leq z \leq c_2} \frac{10n}{\sqrt{2\pi\sigma_i \ln 10} \times \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \exp\left\{-\frac{[10n \lg(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} / d'_i)]^2}{2\sigma_i^2}\right\} dx dy dz} + x_i \end{aligned} \quad (13)$$

同理, 重合区域内概率质心 y 轴方向和 z 轴方向的质心坐标 $\bar{y}_i$ 和 $\bar{z}_i$ 可参照式(13)求得。

利用该概率密度函数性质以及极坐标变换、分部积分以及积分中值定理等可分别求得各式积分, 得到重合区质心坐标后, 再将由 n 个锚节点得到的质心坐标代入式(14), 可求得未知节点的估计坐标:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = d_i^2, i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

将对应 d_i 的最大最小值代入可以得到由各锚节点所求的在一定显著度下的未知节点分布的球壳区域, 然后可以由此求得最终的重合区域, 实际求得的重合区为不规则多面体, 一方面边界的确定将十分复杂, 另一方面也将使得后续积分计算难度增大, 所以本文采用立方体区域近似代替实际的多面体重叠区, 根据式(9)采用放大的思想可以分别得到各向的取值范围, 并以此选定重合区域取值范围如下:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \max(x_i - d_i) \leq x \leq \min(x_i + d_i) = a_2 \\ b_1 &= \max(y_i - d_i) \leq y \leq \min(y_i + d_i) = b_2 \\ c_1 &= \max(z_i - d_i) \leq z \leq \min(z_i + d_i) = c_2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

2) 概率质心求取

由于重合区内各锚节点的测量是相互独立事件, 所以重合区域的概率分布函数应为各锚节点在该区域内概率分布函数的乘积, 即:

$$P = P(d_1)P(d_2) \cdots P(d_n) = \prod_{i=1}^n \int_0^{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}} f(d_i) dd_i \quad (11)$$

分别对 $d_1, d_2, \dots, d_n$ 求偏导, 可以得到各锚节点在重合区域内的概率密度函数:

$$f(x, y, z) = \prod_{k=1, k \neq i}^n P(d_k) \frac{10n}{\sqrt{2\pi\sigma_i \ln 10} \times \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \cdot \exp\left\{-\frac{[10n(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} / d'_i)]^2}{2\sigma_i^2}\right\} \quad (12)$$

由于 $\prod_{k=1, k \neq i}^n P(d_k)$ 为常数, 所以各锚节点在重合区域内的概率质心 x 轴方向的质心坐标 $\bar{x}_i$ 可表示为:

$$\begin{aligned} (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) &= \frac{1}{n-2} \left(\left(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i \right) - \max \bar{x}_i - \min \bar{x}_i, \right. \\ &\quad \left. \left(\sum_{i=1}^n \bar{y}_i \right) - \max \bar{y}_i - \min \bar{y}_i, \left(\sum_{i=1}^n \bar{z}_i \right) - \max \bar{z}_i - \min \bar{z}_i \right) \end{aligned} \quad (14)$$

在上述定位方法中, 通过引入最大似然估计中概率分

布函数的概念,先由各锚节点得到一定显著度下的分布区域,再确定出重合区,然后用分布区域的概率密度函数作为该区域的密度函数,使得越靠近未知节点的点所占的比重越大,从而求得概率质心较为接近真实节点坐标。

3 模拟实验及分析

为模拟煤矿井下的狭窄空间环境,在一处狭长走廊模拟环境下进行了节点的接收信号强度测试,实验环境如图 2 所示,实验器材主要包括与 PC 端连接的接收节点和布置在指定位置的发射节点,走廊宽度为 1.8 m,高度为 3.6 m,长度约有 116 m,实验所使用的长度为 20 m。实验中使用的收发器是以 CC2530 为芯片的 ZigBee 开发板,实验中选取节点信号发射强度 $P_T = 0$ dBm, $d_0 = 1$ m,通过多次测量求取平均值得到 1 m 处接收信号强度 $P(d_0) = -42$ dBm,用同样的方法获得了距离值为 3, 5, 7, 10, 13, 16, 20 m 处的接收信号强度值。然后用式(4)对数据点进行拟合,可以求得当 n 取 2.8 时数据点可以得到较好的拟合,如图 3 所示。当确定该环境下的 n 值后,通过对同一距离位置多次测量,得到按理论公式计算的距离值标准差集中在 1~3 之间。然后在 MATLAB R2016a 仿真环境下,建立一个 $10\text{ m} \times 6\text{ m} \times 6\text{ m}$ 的空间区域,8 个锚节点的坐标分别为 $(0, 0, 0)$, $(10, 0, 0)$, $(0, 6, 0)$, $(10, 6, 0)$, $(0, 0, 6)$, $(10, 0, 6)$, $(0, 6, 6)$, $(10, 6, 6)$,为避免在进行大量仿真时实时调整标准差设定而增大工作量,8 个锚节点的标准差选取为 $\sigma_i = [1, 1.6, 1.3, 1.5, 1.2, 2, 2.3, 3]$,在 MATLAB R2016a 仿真环境下,建立一个 $10\text{ m} \times 6\text{ m} \times 6\text{ m}$ 的空间区域,并在该区域内随机选取 10 个未知节点,再通过算法程序求得该未知节点的估计坐标,定位方法如图 4 所示,图中一共包含 8 个锚节点,坐标上面已分别给出,每个锚节点都有一个内外定位球壳。从图 5 给出的剖面图中可以较为清楚的看到概率球壳和定位节点的实际位置和估计节点的位置。

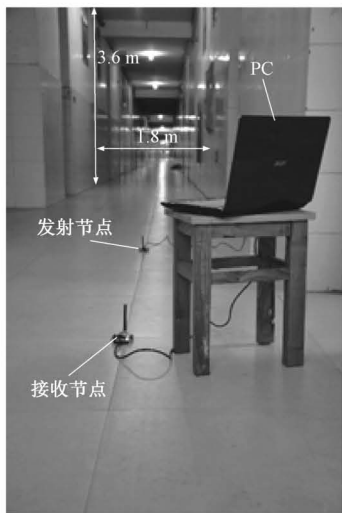


图 2 节点测距实验

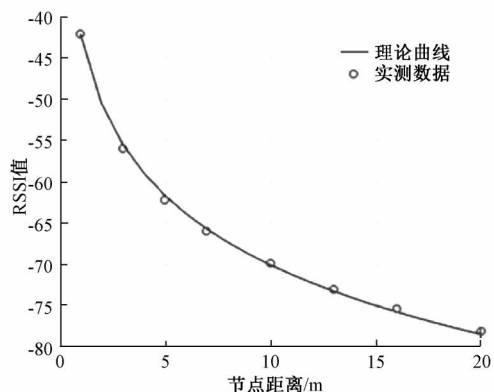


图 3 RSSI 曲线拟合

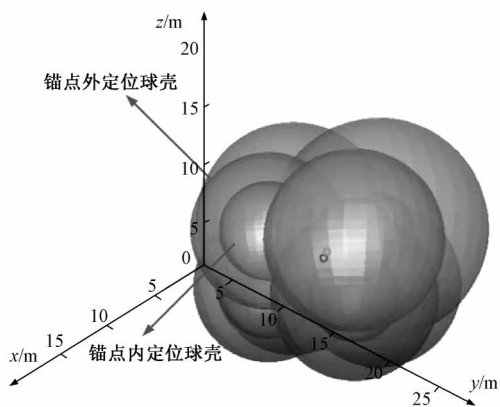


图 4 算法定位示意图

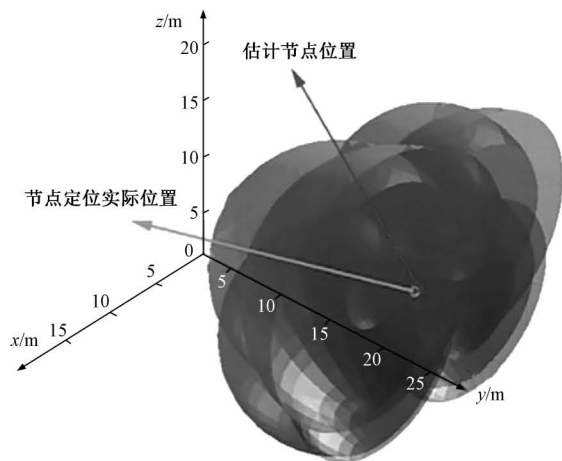


图 5 算法定位剖面图

在仿真中通过均方根误差 (RMSE) 来描述定位精度,均方根误差在此处表示为估计节点和真实节点间的几何距离,具体表达式如式(15)所示。

$$RMSE = \sqrt{(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2 + (z - \hat{z})^2} \quad (15)$$

表 1 所示为 10 组随机选取的未知节点坐标及均方根误差。

表1 节点定位结果

x	$\hat{x}$	y	$\hat{y}$	z	$\hat{z}$	RMSE
4	4.50	2	2.68	3	2.90	0.85
6	5.81	4	3.53	3	3.23	0.56
5	5.05	4	3.28	2	2.75	1.04
6	5.93	2	2.70	4	3.44	0.90
7	6.48	3	3.19	5	4.08	1.07
7	6.43	4	3.60	3	3.26	0.75
3	3.62	1	2.11	4	3.61	1.33
7	6.43	3	3.16	4	3.66	0.68
2	3.10	4	3.66	4	2.54	1.27
5	5.19	3	3.12	3	3.09	0.24

从表1中可以看出,在该区域范围内,在给定的标准差 σ_i 下三维定位误差均在1 m左右,当未知节点靠近锚节点组成的立方体边界时,定位得到的均方根误差明显增大,而当未知节点处于锚节点构成的立方体几何中心时,定位误差将大大减小,所以在锚节点密度足够大时,考虑一种合理的锚节点选取方案将对定位结果产生较大影响^[18]。从得到的均方根误差来看,该算法的定位精度较好,但较该算法在二维平面的定位精度有较大降低,在相似环境下,二维平面内的RMSE均在1 m之内,但扩展到三维空间后,由于 z 向定位误差的引入,以及在求取相交区域时为简化积分求解而进行的立方体替代引入的误差,造成了定位精度的下降,但从结果来看,仍可满足一般情况下的定位需求。

4 结 论

本文针对基于RSSI的测距方法受环境因素影响大,在现有的测距模型和设备条件以及处于特殊的井下环境的情况下,测得的距离值准确度较差的问题,研究了一种基于RSSI测距的概率质心定位算法,将所测距离按一定的概率分布绘出,从而得到概率球壳,再由各锚节点得到各球壳的相交区域,再分别求取相交区域内的概率质心,最后取平均值得到估计节点的位置。首先通过实验测得环境中的信道衰减指数,然后通过多次测距实验求取测距标准差 σ_i ,最后通过定位算法得到未知节点的估计位置,从仿真结果来看该算法能够较为准确的实现三维空间的节点定位。虽然算法本身在相交区域求解和进行概率积分时均引入了误差,但对定位结果影响较小,而在相同条件下通过实验可得,当 σ_i 减小时,RMSE可进一步减小。该算法后续应当对相交区域优化方法和三重积分计算方法做进一步改进以减小算法引入的定位误差,另外,针对当未知节点靠近锚节点构成的立方体边界时定位结果较差的问题,在长度方向可以考虑结合相邻区域内的锚节点提高定位精度,在宽度和高度方向可以考虑引入边界定位误差修正实现定位精度的提高。

参考文献

- [1] WANG N, SHEN X L. Research on WSN nodes location technology in coal mine[C]. 2009 International Forum on Computer Science-Technology and Applications, IEEE, 2009, 3: 232-234.
- [2] DAIYA V, EBENEZER J, MURTY S A V S, et al. Experimental analysis of RSSI for distance and position estimation[C]. 2011 International Conference on Recent Trends in Information Technology (ICRTIT), IEEE, 2011: 1093-1098.
- [3] AHMAD T, LI X J, SEET B C. 3D localization based on parametric loop division and subdivision surfaces for wireless sensor networks[C]. 2016 25th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), IEEE, 2016: 1-6.
- [4] 刘雨, 肖本贤, 尹柏强. 基于修正RSSI值的四边形加权质心定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 107-114.
- [5] HUA X, JINJIN Z, LEI B. A new three-dimension spatial location algorithm of wireless sensor network [J]. Int. Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2016, 9(1): 233-255.
- [6] MARDINI W, KHAMAYSEH Y, ALMODAWAR A A, et al. Adaptive RSSI-based localization scheme for wireless sensor networks[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2016, 9(6): 991-1004.
- [7] SHARMA G, KUMAR A. Fuzzy logic based 3D localization in wireless sensor networks using invasive weed and bacterial foraging optimization [J]. Telecommunication Systems, 2018, 67(2): 149-162.
- [8] 朱清山, 王伟. 基于RSSI的指纹地图室内定位算法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(10): 6-9.
- [9] WANG H, WEN Y, ZHAO D. Robust positioning algorithm based on relative location map for mobile wireless sensor networks[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2017, 32(5): 3695-3710.
- [10] SONG M, QIAN J. Improved sequence-based localization applied in coal mine [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016, 12(11): 933-936.
- [11] ZHAO W, CHENG Y, MENG L, et al. An improved underground location algorithm based on convex sets of RSSI [J]. The Open Cybernetics & Systemics Journal, 2016, 10(1), DOI: 10.2174/1874110X01610010163.
- [12] 李卫硕, 孙剑, 陈伟. 基于BP神经网络机器人实时避障算法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 204-211.
- [13] MOUNIR T A, MOHAMED P S, CHERIF B, et al. Positioning system for emergency situation based on

- RSSI measurements for WSN[C]. 2017 International Conference on Performance Evaluation Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN), IEEE, 2017:1-6.
- [14] 尚超,王峰,聂百胜,等. 煤矿井下无线传感器网络三维定位算法研究[J]. 煤田地质与勘探, 2016(1): 116-122.
- [15] 姚丹霖,端木庆敏. 无线传感器网络节点定位算法研究[J]. 计算机工程与科学, 2008(3):82-85.
- [16] 周艳,李海成. 基于 RSSI 无线传感器网络空间定位算法[J]. 通信学报, 2009, 30(6):75-79.
- [17] 程森林,李雷,朱保卫,等. WSN 定位中的 RSSI 概率质心计算方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014(1): 100-104.
- [18] 高健,陆阳,李庆巧,等. 采用三次通信的 TOF 与 TDOA 联合定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3):66-73.

作者简介

陈宏辉, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感网络。

E-mail: 1454750560@qq.com

胡小平, 教授, 博士生导师, 先进矿山装备教育部工程研究中心主任, 主要研究方向为机器人控制与机器人视觉、机电一体化技术。

E-mail: hxp210@163.com

吴开盛, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感网络。

E-mail: 3214312937@qq.com