

煤矿井下基于 RSSI 的加权质心定位算法

韩东升^{1,2}, 杨 维¹, 刘 洋¹, 张 玉¹

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘 要:针对基于无线传感器网络的矿井灾害无线监测信息系统,提出了一种基于接收信号强度(RSSI)的加权质心定位算法。算法首先动态获取路径衰落指数,然后通过加权质心算法计算出自身位置。动态获取路径衰落指数实时计算了定位区域下的路径损耗指数,能够准确反映巷道不同区域对信号衰落的影响,增强了测距算法对环境的适应能力。加权质心算法通过加权系数体现各参考节点对质心坐标决定权的大小,提高了定位精度。实验测试表明,算法提高了定位精度,计算量小,定位流程简单,适用于煤矿井下环境。

关键词:加权质心算法;接收信号强度;煤矿井下;人员定位;无线传感器网络

中图分类号:TD676

文献标志码:A

A weighted centroid localization algorithm based on received signal strength indicator for underground coal mine

HAN Dong-sheng^{1,2}, YANG Wei¹, LIU Yang¹, ZHANG Yu¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: A weighted centroid localization algorithm based on received signal strength indicator (RSSI) was proposed for underground mine disaster monitoring system which based on wireless sensor network (WSN). It firstly accessed to the path of decline index dynamically, and then calculated its own location by weighted centroid algorithm. When it accessed to the path of decline index dynamically, path loss exponent was calculated in location areas which accurately reflects the affect of the signal fading in different tunnel areas and enhances adaptive capacity to the environment of distance detection algorithm. Weighted centroid algorithm embodies the impact of each reference node to the centroid coordinate by weighted coefficients, which improves the accuracy of personnel localization. The experimental results show that the proposed algorithm achieves better positioning accuracy with simple calculation and process, which demonstrates it is suitable for coal mine environment.

Key words: weighted centroid algorithm; received signal strength indication; underground coal mine; personnel location; wireless sensor network

煤矿井下工况环境十分复杂,有线监控系统由于自身的局限性难以对火灾、温度、风速、地压、瓦斯、煤尘、矿尘等对矿井安全生产具有重要影响的矿井环境参数实施全面、有效的监测,而且有线监控系统难以监测到的区域往往是安全隐患最为突出的地方,这样将不可避免地留下大量的安全隐患^[1-4]。采用无线

通信方式,建立矿井灾害无线监测信息系统可以对有线监控系统难以监测的区域实施有效、实时和灵活的监测。无线传感器网络布点灵活,可根据煤矿井下实际情况布置、更换和增加监测点,能够实现对井下区域的全覆盖,弥补了有线监测系统的缺点。

基于无线传感器的煤矿安全生产人员定位技术

为及时掌握井下人员的数量和位置信息提供了行之有效的手段,为煤矿井下安全生产和遇险后展开营救提供了可靠的信息^[5-8],对保障矿井安全生产和抢险救灾具有十分重要的作用,是矿井灾害无线监测信息系统的重要组成部分。基于无线传感器的煤矿井下定位算法,是构建煤矿安全生产人员定位技术的核心课题。

目前针对无线传感器网络的定位,已有许多学者进行了研究,并提出了新的定位算法:基于到达时间(Time of Arrival, TOA)的定位方法是已知信号的传播速度,根据信号的传播时间来计算节点间距离,然后再计算出未知节点的坐标。这种方法可以提供很高的精确度,但是它对硬件要求较高,并且需要节点间精确的时间同步。文献[9]提出了基于超声波的TDOA定位算法,该算法中的传感器节点需要集成超声波收发装置,不但增大了节点尺寸也提高了成本和能耗,而且超声波传播距离短、穿透性差。文献[10-11]提出了基于接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)的方法,采用RSSI技术的定位方法,节点无需额外的硬件装置,功耗低、成本低,已在许多实际项目中得到应用,不过由于RSSI受环境的影响较大,因此定位精度较低。

煤矿井下巷道狭长、障碍物多、环境复杂且可能经常变化,无线信号传播存在多径传播、衰减、非视距等情况,定位算法必须具有较强的容错性和自适应性,能够适应复杂的井下环境。为此,结合井下巷道参考节点的部署特征,利用参考节点坐标已知这一特点,将参考节点间的实际距离和信号强度作为参考,提出了实时计算当前定位区域内的动态路径衰落指数的策略,并利用加权质心定位算法,大大增加了系统对于井下不同环境的适应性,提高了定位精度。

1 矿井灾害无线监测信息系统

根据煤矿井下的地形,可以将煤矿分为巷道区、开采区和采空区等。巷道区又可以分为主巷道和支巷道。在主巷道、大部分分支巷道和主要开采区,地形相对宽阔,通常布设以有线光纤骨干网为基础的有线监控系统。部分支巷道和开采区、采空区,地形相对狭窄,形状不规则,条件恶劣,布设有线监控系统十分不便或无法布设。基于矿井地形特征,设计的矿井灾害无线监测信息系统的体系结构^[12-13],如图1所示。

系统主要由部署在煤矿井下的无线传感器基础网络、有线光纤骨干网络以及地面监控调度中心等3层体系结构组成。无线传感器基础网络,由 ZigBee

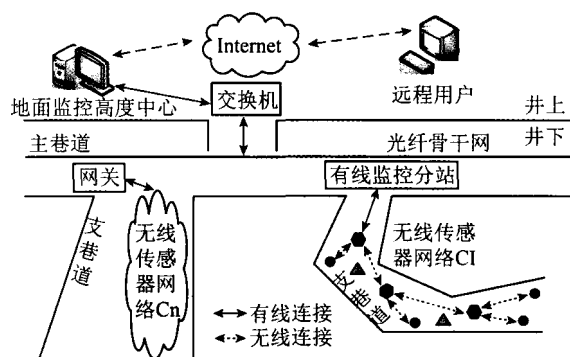


图1 矿井灾害无线监测信息系统的体系结构

Fig. 1 Architecture of wireless monitoring system of the mine disaster

无线传感器网络构成,配备各种传感器的传感节点采集周围的环境信息,经过路由节点的聚合处理,以多跳中继的方式传递至汇聚节点;工作人员携带的移动节点通过与位置已知的路由节点通信计算自身位置并传输至汇聚节点。无线传感器基础网络通过有线监控分站或无线传感器接入网关与有线光纤骨干网络互联,将收集的环境信息和位置信息传输至地面监控调度中心(Ground Monitoring and Dispatching Center, GMDC)。监控调度中心由数据库服务器和中央计算机组成,负责数据的存储、查询、预警和决策分析,同时对无线传感器基础网络进行控制和管理。此外,地面监控调度中心与互联网相连,使得远程管理人员能够通过互联网或其他专用网络对本地煤矿的整体安全情况进行有效查询和监控。

选用网状拓扑结构,网络节点部署如图2所示。该网状网络由两层结构组成:上层的骨干网络和底层的感知网络。骨干网络由汇聚节点和路由节点构成,可以与其通信范围内的任何骨干网络节点直接通信,构成了网状网络,负责数据的转发与汇聚。感知网络由传感节点和移动节点构成,负责环境参数的采集和井下人员的定位。

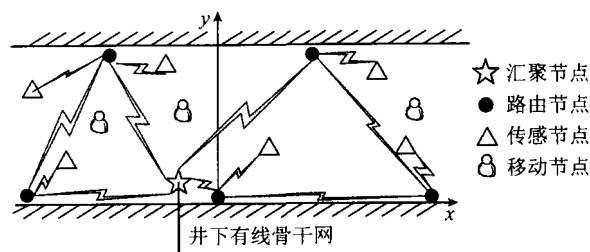


图2 网状无线传感器网络的拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of mesh WSN

该网状无线传感器网络具有可靠性高、覆盖区域大和扩展性强等优点。网络所采集的数据可以在多个方向上灵活传输,传输路径多样,有效降低了因节点位置变化或个别链路和网络节点失效对数据成功

传输的影响,甚至引起的网络瘫痪。这在一定程度上提高了网络信息传输的可靠性。

2 基于 RSSI 值的加权质心的人员定位算法

由于煤矿井下巷道狭长,环境变化频繁,因而对 RSSI 的影响较大,各处的路径衰落指数也不同。用相同的节点对在相同的距离、不同的区域下测出的 RSSI 值差别可能非常大;即使在相同距离、同一区域下,但不同的时刻也会导致 RSSI 值不同;另外,井下巷道内的空气流动、人员和机车的移动,都将引起 RSSI 值的较大波动,从而导致 RSSI 定位算法精度不是令人非常满意。为了克服上述不足,提高传统 RSSI 算法的定位精度,提出了基于 RSSI 值的加权质心的人员定位算法。算法由路径衰落指数的动态获取和加权质心定位两部分组成:路径衰落指数通过位置已知的参考节点间相互通信来获取,当移动节点定位时,移动节点向周围一跳范围内的参考节点发送定位请求,从而获取与参考节点间的 RSSI 值及当前定位区域的路径衰落指数;再通过加权质心算法计算出自身位置。

2.1 路径衰落指数的动态获取

由于参考节点的位置已知,可周期性测量邻居参考节点间的信号强度,将其带入无线信号传播模型中可求出当前区域内的路径衰落指数。

如图 3 所示,假设参考节点 A_3 收到附近另外两个参考节点 A_1, A_2 的 RSSI 值,根据 RSSI 值公式^[14]有

$$\begin{cases} RSSI_{13} = -(10n \lg d_{13} + A) \\ RSSI_{23} = -(10n \lg d_{23} + A) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $RSSI_{13}, RSSI_{23}$ 分别为 A_3 与 A_1, A_2 间的 RSSI 值; d_{13}, d_{23} 分别为 A_3 到 A_1, A_2 间的实际距离; A 为经过 1 m 传输后的路径损耗值; n 为路径衰落指数,反映的是环境因素对无线电能消耗的影响,障碍物越多则 n 越大,其范围一般在 2~5。

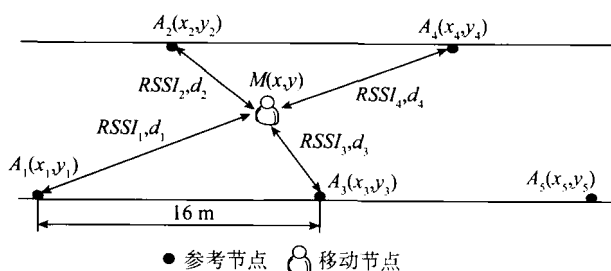


图3 移动节点定位的场景

Fig. 3 Scene of the mobile node position

两式相减可得

$$RSSI_{23} - RSSI_{13} = 10n \lg \frac{d_{13}}{d_{23}} \quad (2)$$

由式(2)可知,在计算 n 值时,仅由 $RSSI_{13}, RSSI_{23}, d_{13}$ 和 d_{23} 决定,与 A 值没有关系。在路径衰落指数获取过程中,由于参考节点间距离已知,通过参考节点间的相互通信得到 RSSI 值,再代入式(2),即可得到与实际环境相对应的路径损耗指数 n 值,然后用得到的 n 值对移动节点进行测距定位。该方法既实时计算了当前定位区域下的路径损耗指数,又弱化了信号衰减模型的作用,因此能够准确反映巷道不同区域对信号衰落的影响,增强了 RSSI 测距算法对环境的适应能力,提高了定位精度。

如图 3 所示,设与移动节点 M 最近的 3 个参考节点依次是 A_3, A_2, A_4 , 通过这 3 个节点间的通信获取当前区域的路径衰落指数。由于 A_3 到 A_2 和 A_4 的距离相等,如果在 A_3 上运用式(2)将无法计算路径衰落指数,因此需在 A_2 或 A_4 上进行计算。选择在稍近的参考节点 A_2 上进行计算,假设 A_2 到 A_3 和 A_4 的 RSSI 值分别 $RSSI_{23}$ 和 $RSSI_{24}$, 距离分别为 d_{23} 和 d_{24} 。则有

$$n = \frac{RSSI_{23} - RSSI_{24}}{10 \lg \frac{d_{24}}{d_{23}}} \quad (3)$$

为了尽量反映当前时刻下的路径衰落指数,移动节点每次定位时都要向周围的参考节点发送路径衰落指数请求,参考节点收到后按照上述方法计算路径衰落指数,之后向移动节点回复。这样虽然能提高定位精度,但需要付出代价:即增加了通信开销,也增加了定位时延。因此,根据实际需要,可以选择周期性地获取路径衰落指数,也可以选择上述的实时获取。

2.2 加权质心定位算法

由 2.1 节的分析可知, RSSI 值越大,节点间的距离越近;反之越远。并且到节点的距离越近, RSSI 值的可信度越高,由 RSSI 值的偏差产生的绝对距离误差越小,因而测距精度越高;当距离大于某一值时,由 RSSI 波动造成的绝对距离误差将会很大。RSSI 值的这种特征,将直接影响定位的精度。为此,提出了基于 RSSI 值的加权质心的人员定位算法。

加权质心定位算法的基本思想就是通过加权系数体现各参考节点对质心坐标决定权的大小^[15]。RSSI 值越大,节点间的距离越近,则对移动节点位置的确定具有越大的决定权,以此进行距离加权计算。

选取合理的加权系数对定位的精度有着直接、重大的影响。为了尽量弱化信号衰减模型的影响,在确定加权系数时采取弱化信号衰减模型的思想,即通过

式(2)得到移动节点到各参考节点之间距离的比值,并以此作为加权系数,同时为了进一步改善它们的权重决定权,更好的反映不同距离的参考节点对移动节点位置的影响,提出了加权因子(k)的概念,通过 k 值可以调整修正的程度。并提出了优选参考节点进行节点定位计算的规则,即选取与移动节点最近的几个参考节点进行定位,以进一步提高定位精度。选择距移动节点最近的3个参考节点进行定位,因为如果两个节点空间上很接近,则其环境基本相似,可能有相同的邻居节点。

如图3所示,假设移动节点 M 到3个参考节点 A_3, A_2, A_4 的RSSI值依次是 $RSSI_3, RSSI_2, RSSI_4$,并已经得到当前区域下的路径衰落指数 n ,则有:

$$\begin{aligned} a &= \frac{d_3}{d_2} = 10^{\frac{RSSI_2 - RSSI_3}{10n}} \\ b &= \frac{d_3}{d_4} = 10^{\frac{RSSI_4 - RSSI_3}{10n}} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, d_2, d_3, d_4 分别为 M 到 A_2, A_3, A_4 的测量距离,设加权因子为 k ,则移动节点 M 的坐标 (x, y) 计算公式为

$$\begin{aligned} x &= \frac{x_3 + a^k x_2 + b^k x_4}{1 + a^k + b^k} \\ y &= \frac{y_3 + a^k y_2 + b^k y_4}{1 + a^k + b^k} \end{aligned} \quad (5)$$

在实际应用中,通过调整加权因子 k 以获得更好的定位效果。加权质心定位算法计算简单,无额外的通信开销,并且弱化了信号衰减模型,提高了定位精度。

综上,定位算法是在获取了动态路径衰落指数后,移动节点根据参考节点与其通信时的信号强度,选取信号强度最大的参考节点进行距离估算,详细的定位流程如下:

(1)定位周期到,移动节点向周围一跳范围内的参考节点周期性地广播定位请求信息,连续发送 M 次;

(2)参考节点收到定位请求信息后,从中提取出RSSI值,对一组RSSI值,参考节点剔除其中的最大值和最小值,然后对剩余的RSSI值求平均,即去除最大最小值后取平均法,记录该移动节点的RSSI信息;

(3)移动节点发送完 M 次定位请求后广播一次收集RSSI信息,这时周围的参考节点会向该移动节点回复对应的RSSI信息;

(4)移动节点收集完RSSI信息,如果收集的RSSI值个数小于3个,则直接汇报位置信息;否则,对收集的RSSI信息进行排序,并选取最大的3个作为

优选参考节点,然后向RSSI值最大的参考节点发送路径衰落指数请求信息,信息中包括另外两个参考节点的网络地址。并设置一个定时器,时间为 T_1 ;

(5)收到路径衰落指数请求信息的参考节点向周围参考节点发送 M 次RSSI信息,之后向周围参考节点请求回复RSSI信息,参考节点只接收另外两个参考节点回复的RSSI信息。收到RSSI信息后,根据式(3)计算出路径衰落指数,并向移动节点回复该路径衰落指数值。

(6)移动节点收到参考节点发送的路径衰落指数后,按照式(4)和(5)的加权质心定位算法计算出自身的位置信息。如果 T_1 时间到,移动节点还没收到路径衰落指数,则用上一次的路径衰落指数计算自身坐标。之后,向汇聚节点汇报得到的坐标。

至此,移动节点的一次定位过程结束。具体的定位算法流程如图4所示。

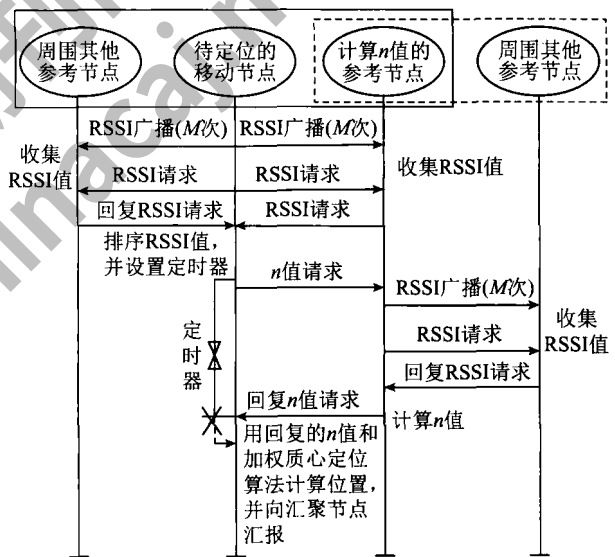


图4 移动节点的定位流程

Fig. 4 Position flow of the mobile node

上述的定位流程是在比较好的情况下进行的,然而实际实用中可能存在一些问题,下面将对可能出现的问题进行说明并提出了相应的解决方案。

(1)移动节点广播RSSI收集请求后,可能没有收到3个及以上参考节点的回复信息。如果收到两个,则通过式(4)计算自己到这两个参考节点的距离比值,并以此在两参考节点的连线上取一个点作为该移动节点的坐标。如图3所示,假设移动节点 M 只收到了参考节点 A_2 和 A_3 的RSSI信息,则通过式(4)可以计算出移动节点 M 到 A_2 和 A_3 的距离比值 a ,则移动节点的坐标计算公式为

$$x = \frac{x_2 + ax_3}{1 + k}, y = \frac{y_2 + ay_3}{1 + k} \quad (6)$$

如果只收到一个参考节点的回复信息,则将此参考节点的坐标作为移动节点的位置;如果一个节点也没有收到,则重启定位流程重新定位。

(2) 当距移动节点的某个参考节点失效了,这时移动节点收到的最近 3 个参考节点可能不能构成一个三角形,或能构成三角形但移动节点实际不在这个三角形内部。通过实验测试,这种情况下加权质心定位算法仍然适用,产生的误差在可接受的范围内。

(3) 由于井下人员的位置比较随机,并可能经常发生移动,如果这时再采用上述的定位算法,效果并不理想。为此,设计分两种方案进行定位:如果测得移动节点的移动速度小于 $v(m/s)$,则采用上述的定位算法;如果速度超过了 $v(m/s)$,则将移动节点收到的最大 RSSI 值对应的参考节点坐标作为该移动节点的坐标。

3 算法的性能评估

为了对所提出的基于 RSSI 值的加权质心定位算法的性能进行评估,进行了实验测试,试验选择在模拟煤矿井下巷道环境的实验室走廊中进行。实验室走廊长 90 m、宽 2 m、高 3 m,用于模拟矿井巷道;走廊两侧有实验室和楼梯,用于模拟矿井开采区或采空区。走廊地面为水泥地,墙壁较粗糙,顶部两侧布设有电缆。在地形结构和电磁波传播特性上,实验室环境与实际矿井环境比较相似,使得实验室试验结果具有一定的参考价值。设计相邻参考节点间的水平距离为 8 m,即同侧相邻参考节点间的距离为 16 m,如图 5 所示。根据煤矿井下环境对设备的防爆等安全要求,以及无线传感器网络节点低成本、低功耗、支持 ZigBee 协议等需求,实验节点选择了美国德州仪器(TI)公司的 CC2430 芯片。该芯片基于 8015 微处理器内核,集成了无线通信模块,其工作频率为 2.4 GHz,还集成有 128 kB 的可编程 flash 和多个模数转换(Analog to Digital Converter, ADC)接口。电源采用 2 节 1.5 V 干电池供电。

定义点位误差 E 和横向误差 E_l ,假设移动节点的实际坐标为 (x_0, y_0) ,计算得到的坐标为 (x, y) ,则有

$$E = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$$

$$E_l = |x - x_0| \quad (7)$$

在计算移动节点坐标的过程中,为了便于对比几种定位算法的性能,移动节点向汇聚节点发送的并不是计算后的坐标,而是参考节点的网络地址和对应的 RSSI 信息,坐标的计算由人工进行。另外固定 n 值是在定位前,通过 RSSI 值和对应的实际距离运用最

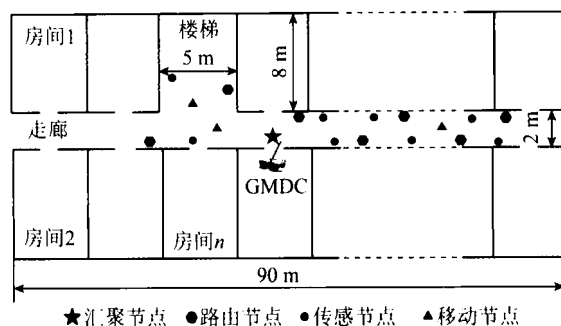


图5 实验室环境的节点部署

Fig. 5 Deployment of nodes in the laboratory environment

小二乘法拟合得到的;区域 n 值是动态获取的,每次定位都重新计算。加权质心算法中的加权因子 k 是通过 Matlab 仿真对比得到的,取值为 1.8。

为了更直观地反映各定位算法之间的性能差异,根据表 1 中的数据用 Matlab 软件绘制了相应的数据曲线,如图 6 所示。

通过分析表 1 和图 6 可以得到如下结论:

(1) 在相同的实验环境下,同为加权质心定位算法,采用区域 n 值的平均点位误差和平均横向误差整体上小于采用固定 n 值的算法,因此采用区域 n 值的算法能够实时反映当前区域内的路径衰落指数,定位精度较高。

(2) 均采用区域 n 值,加权质心定位算法在平均点位误差和平均横向误差等性能方面整体上也小于采用极大似然定位的算法,具有较好的定位精度。

(3) 距路由节点越近,加权质心定位算法的平均横向误差越小,但纵向误差相对较大。

4 结 论

我国煤炭资源丰富,但是煤矿大多为地下开采,地质条件复杂,生产条件恶劣,给煤矿安全生产带来极大的威胁。随着国家对煤矿安全生产工作的日益重视,煤矿生产管理现代化的需求日益强烈,矿井人员的考勤定位越来越体现出其重要性。煤矿井下通信环境复杂,容易受周围环境的影响。为了提高定位精度,从弱化信号衰减模型的角度出发,提出了基于动态获取路径衰落指数的加权质心定位算法,并引入了加权因子的概念。通过试验证实,同为加权质心定位算法,采用动态获取路径衰落指数的区域 n 值时较采用固定 n 值时定位误差减小;采用区域 n 值时,加权质心定位算法较极大似然定位的算法,定位精度获得提高。同时,由于参考节点的位置已知,动态获取路径衰落指数容易实现,且加权质心定位算法计算简单,无额外的通信开销。因此,提出的动态获取路径衰落指数的加权质心定位算法提高了定位精度,并且

表1 几种定位算法的性能比较

Table 1 Performance comparison of localization algorithms

定位算法	实际坐标	计算坐标	平均点位误差 E/m	平均横向误差 E_l/m
固定 n 值+加权质心	(1,1)	(0.768,0.745)	0.345	0.232
区域 n 值+极大似然		(0.880,1.203)	0.236	0.120
区域 n 值+加权质心		(0.791,0.773)	0.309	0.209
固定 n 值+加权质心	(3,0.5)	(2.350,0.262)	0.692	0.650
区域 n 值+极大似然		(4.243,0.961)	1.326	1.243
区域 n 值+加权质心		(2.505,0.322)	0.722	0.495
固定 n 值+加权质心	(5,1.5)	(6.943,1.778)	1.963	1.943
区域 n 值+极大似然		(6.784,1.235)	1.804	1.784
区域 n 值+加权质心		(5.960,1.758)	0.994	0.960
固定 n 值+加权质心	(7,1)	(6.204,1.538)	0.961	0.796
区域 n 值+极大似然		(7.950,0.824)	0.966	0.950
区域 n 值+加权质心		(6.828,1.829)	0.927	0.172
固定 n 值+加权质心	(10,0.75)	(8.873,1.100)	1.180	1.127
区域 n 值+极大似然		(8.961,0.954)	1.059	1.039
区域 n 值+加权质心		(8.946,1.137)	1.123	1.054
固定 n 值+加权质心	(13,1.25)	(13.925,1.731)	1.060	0.925
区域 n 值+极大似然		(14.052,1.050)	1.071	1.052
区域 n 值+加权质心		(13.976,1.420)	0.991	0.976
固定 n 值+加权质心	(16,1)	(14.865,0.748)	1.163	1.135
区域 n 值+极大似然		(14.486,0.903)	1.517	1.514
区域 n 值+加权质心		(15.902,0.680)	0.112	0.098

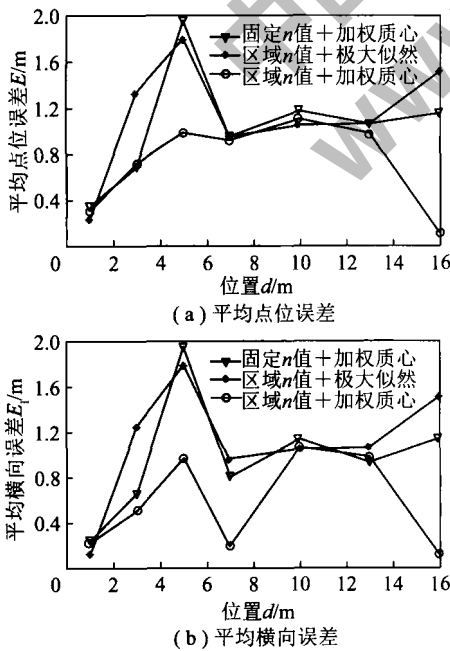


图6 几种定位算法的性能比较

Fig. 6 Performance comparison of localization algorithms

计算量小,定位流程简单,适合用于煤矿井下环境。

参考文献:

[1] 张江石,傅贵,陈娜,等.矿工应急处置能力评估方法研究中国煤矿重大事故中的不安全行为研究[J].煤炭学报,2012,37(2):290-294.
Zhang Jiangshi,Fu Gui,Chen Na,et al. Experimental study on the miners' emergency handling ability[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(2):290-294.

[2] Yarkan S,Guzelgoz S,Arslan H,et al. Underground mine communications:a survey [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2009,11(3):125-142.

[3] 申宝宏,雷毅,郭玉辉.中国煤炭科学技术新进展[J].煤炭学报,2011,36(11):1779-1783.
Shen Baohong,Lei Yi,Guo Yuhui. Progress of coal science and technology in China [J]. Journal of China Coal Society,2011,36(11):1779-1783.

[4] 孙继平.煤矿井下紧急避险关键技术[J].煤炭学报,2011,36(11):1890-1894.
Sun Jiping. Research on key technologies of emergency refuge system in underground coal mine [J]. Journal of China Coal Society,2011,36(11):1890-1894.

[5] Gui Yang,Tao Zhigang,Wang Changjun,et al. Study on remote monitoring system for landslide hazard based on Wireless Sensor Network and its application [J]. Journal of Coal Science & Engineering

- (China), 2011, 17(4): 464-468.
- [6] 张 力. 我国煤矿安全生产形势分析[J]. 能源政策研究, 2010(2): 28-31.
Zhang Li. Analysis of China's coal mine production safety situation [J]. Energy Policy Research, 2010(2): 28-31.
- [7] 杨立刚. 我国煤矿安全事故的原因分析[J]. 安全, 2008(10): 5-7.
Yang Ligang. Cause of the accident of China's coal mine safety [J]. Safety, 2008(10): 5-7.
- [8] 马 力, 郭 辉. 基于 ZigBee 协议的煤矿井下智能传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2007(8): 66-68.
Ma Li, Guo Hui. Smart sensor for underground coal mine based on ZigBee protocol [J]. Instrument Technique and Sensor, 2007(8): 66-68.
- [9] 罗海勇, 朱珍民, 张 波, 等. 多模定位技术[J]. 信息技术快报, 2010, 8(5): 23-32.
Luo Haiyong, Zhu Zhenmin, Zhang Bo, et al. Multi-mode positioning technology [J]. Information Technology Letter, 2010, 8(5): 23-32.
- [10] 章坚武, 张 璐, 应 瑛, 等. 基于 ZigBee 的 RSSI 测距研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(2): 285-288.
Zhang Jianwu, Zhang Lu, Ying Ying, et al. Research on distance measurement based on RSSI of ZigBee [J]. Journal of Transduction Technology, 2009, 22(2): 285-288.
- [11] 乔钢柱, 曾建潮. 信标节点链式部署的井下无线传感器网络定位算法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1229-1233.
Qiao Gangzhu, Zeng Jianchao. Localization algorithm of beacon nodes chain deployment based on coal mine underground wireless sensor networks [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1229-1233.
- [12] 习凤娥. 煤矿环境网格型多参数无线传感器监测网络的实现与互联[D]. 北京: 北京交通大学, 2009: 50-58.
Xi Feng'e. Realization and interconnection of wireless sensor monitoring network with mesh structure and multi parameters in coal mine environment [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009: 50-58.
- [13] 刘 彬, 杨 维. 网格型煤矿监测无线传感器网络设计与实现[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(7): 44-48.
Liu Bin, Yang Wei. Design practice on grid type coal mine monitoring and measurement network with wireless sensor [J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(7): 44-48.
- [14] 高国胜, 陈俊杰, 李 刚. 基于 RSSI 测距的信标节点自校正定位算法[J]. 测控技术, 2009, 28(8): 93-97.
Gao Guosheng, Chen Junjie, Li Gang. Beacon node self-tuning localization algorithm based on RSSI [J]. Measurement & Control Technology, 2009, 28(8): 93-97.
- [15] 赵 昭, 陈小惠. 无线传感器网络中基于 RSSI 的改进定位算法[J]. 传感技术学报, 2009, 22(3): 391-394.
Zhao Zhao, Chen Xiaohui. An improved localization algorithm based on RSSI in WSN [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(3): 391-394.