

文章编号:1001-9081(2016)02-0478-05

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2016.02.0478

无线传感器网络中载体的自主移动策略

汤海建^{1*}, 鲍 宇^{1,2}, 闵 玄¹, 罗煜璇¹, 邹宇驰¹

(1. 中国矿业大学 计算机科学与技术学院, 江苏 徐州 221116; 2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室(中国矿业大学), 江苏 徐州 221116)

(*通信作者电子邮箱 thj_star@163.com)

摘要:针对部署在复杂环境中或者不易抵达区域的无线传感器网络(WSN)由于受环境影响,其节点修复、定点投放或搜索救援等环节存在人身安全、不易修复等问题,提出一种 WSN 中载体的自主移动策略。该策略首先基于少量锚节点,结合最大似然估计算法和接收的信号强度指示(RSSI)定位技术实现移动载体自身定位;然后依靠数学模型,根据当前获取的定位信息及目标节点坐标,完成下一步目标节点的选取和前进角度的修正,以最终实现移动载体的自主移动。仿真结果表明,该策略能够确保载体沿较短路径,在较短时间内到达目的地;且传感器节点密度越大,该策略成功率越高,分别对规模为 130、180、300 的无线传感器网络进行了仿真,成功率高达 96.7%。

关键词:无线传感器网络;自主移动;动态规划;定位;角度修正

中图分类号: TP393.06; TN929.5 **文献标志码:**A

Autonomous mobile strategy of carrier in wireless sensor network

TANG Haijian^{1*}, BAO Yu^{1,2}, MIN Xuan¹, LUO Yuxuan¹, ZOU Yuchi¹

(1. School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering (China University of Mining and Technology), Xuzhou Jiangsu 221116, China)

Abstract: Concerning the limitations of person safety and difficulties in nodes repair, placement, search and rescue caused by complex or unreachable special areas where the Wireless Sensor Network (WSN) deployed in, an autonomous mobile strategy of carrier in WSN was proposed. Firstly, the localization of the carrier with fewer anchor nodes was realized by combining the maximum likelihood method and Received Signal Strength Indication (RSSI). Then, relying on the mathematical model, carrier moved autonomously in WSN by acquiring current position information and target node coordinates to amend the direction angle and select the next target node. The simulation results show that the proposed strategy can ensure the carrier to reach the destination along the shorter path and in less time, and the higher the density of sensor nodes is, the more likely this strategy will succeed. The WSN with 130, 180 and 300 nodes were simulated respectively, and the success rate was as high as 96.7%.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); autonomous motion; dynamic programming; localization; angle correction

0 引言

随着物联网技术的不断发展和智能化空间的不断建设,无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)已在国防军事、农业生产、环境监测、智能家居等诸多领域得到了广泛的应用^[1-2]。WSN 在一些缺乏传统网络基础设施地域的应用尤为重要,特别在很多不易到达的区域部署 WSN,用以进行信息采集和环境监测。同样地,机器人技术也被应用于多种未知环境和危险救援领域^[3],现有机器人导航技术主要基于电磁导航、惯性导航、视觉导航和卫星导航几种方式^[4-5]。以矿井下巷道中机器人导航为例,载体若采用电磁导航成本很高且不利于维护;采用惯性导航会随着航程的增加误差无限制增加;矿井下的光线使视觉导航的准确度变得非常低;同时也因为无法获取全球定位系统(Global Positioning System, GPS)定位信息从而导致无法采用卫星导航。但是矿井巷道

中部署有大量监控所用的无线传感器节点,相比回传的图像信息会大大增加网络能量的损耗且视觉导航处理速度较慢,利用网络中的节点信息实现载体的自主移动可以节约大量资源并提高效率。

本文基于上述情形提出了一种复杂环境或特殊场合的 WSN 中,移动载体通过已有节点自主定位、动态寻路到达目标地点的方法。该方法提出载体在移动过程中依托网络中少量锚节点信息和已定位节点信息不断进行自主定位,并根据基准方向规划下一步的移动路径,以最短路径和最短时间到达目标位置。

1 相关工作

移动机器人研究的经典方法^[6-8]是基于固定的路径,通过 GPS 等提供定位辅助进行移动。随着物联网技术的不断发展,移动载体在 WSN 中的路径规划成为了研究的热点,由

收稿日期:2015-07-27;修回日期:2015-09-23。

基金项目:国家973计划项目(2013CB227900);国家863计划项目(2012AA062004);国家自然科学基金资助项目(51204185, 51034005);中国博士后科学基金面上资助项目(2012M521147);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-13-1022)。

作者简介:汤海建(1991-),男,山东滨州人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络; 鲍宇(1977-),男,江苏睢宁人,副教授,博士,主要研究方向:信息安全、无线传感器网络; 闵玄(1993-),女,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络; 罗煜璇(1994-),女,安徽合肥人,主要研究方向:无线传感器网络; 邹宇驰(1994-),男,湖南长沙人,主要研究方向:无线传感器网络。

于 WSN 的部署特点以及所处环境的复杂性,难以给出一条包含沿途所有信息的实际路径,需要通过周边的节点信息确定一条可行路径,因此许多研究人员提出了基于接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)的自主移动方法。

Sun 等^[9]提出一种如何利用 RSSI 势场来导航机器人从一个节点到达另一个节点的方法。该方法的策略相对比较简单:两个节点间的距离越近,RSSI 值就越大,因此可以沿着 RSSI 值增大的方向到达目标节点。首先建立一个 RSSI 势场数据模型,然后机器人会沿着 RSSI 势场中最陡峭的上升坡搜索目标。但是该方法没有考虑 RSSI 值有效覆盖边界的限制和机器人初始状态的影响,在一些场景中,如果机器人与目标节点之间的距离太远,有可能会失去与目标节点的联系,也就失去了 RSSI 势场信息从而导致无法到达目标节点。本文则选取可以稳定通信的节点作为目标节点,并利用数学模型确定移动方向,避免了方向偏离和目标失联。

Zhou 等^[10]提出了一种无线传感器网格网络中基于 RSSI 的机器人导航方法,该方法是在预先部署的标准网格网络中实现的,通过定位和方向调整实现 WSN 中的路径规划。首先选择可行的网格并按序排好,然后将每个网格的中心作为每一步的目的地实现网格与网格之间的导航。与本文所提策略相比,该方法是基于特定的网络部署提出的,也是在特定的网络环境实现的,具有很大的局限性;且利用网格中心导航使得路径增加,积累误差较大,导致整个导航的效率降低。

Deshpande 等^[11]提出了一种低成本和低复杂度的无线传感器网络-自主式移动机器人(Wireless Sensor Network-Autonomous Mobile Robot, WSN-AMR)交互导航方法,该方法使用结合粒子滤波的 RSSI 测量,克服了 RSSI 的不确定性。但该方法模型中,自主式移动机器人(Autonomous Mobile Robot, AMR)可以沟通的邻居节点只有一个,而本文则充分利用网络中的节点信息确定载体的移动轨迹,从而具有更高的可靠性。

文献[12]中采用基于 RSSI 的定位算法驱动机器人向固定传感器节点移动,并且使机器人收敛于该节点。该方法不能利用过去的信息来作出更好导航,而且仅通过单一的节点进行定位,相比之下本文策略具有更高的准确性和鲁棒性。

2 准备工作

为便于问题的研究,本文给出以下定义:

定义1 锚节点。在 WSN 节点定位技术中,已知自身位置的传感器节点。

定义2 未知节点。在 WSN 节点定位技术中,不知道自身位置的传感器节点。

定义3 伪锚节点。未知节点通过定位后已知自身位置信息,并可用于定位其他位置节点的普通传感器节点。

定义4 信标节点。为便于描述,本文将锚节点和伪锚节点统称为信标节点。

定义5 邻近节点。某节点或移动载体通信范围内单跳节点,即能够直接通信的节点。

2.1 RSSI-距离模型

RSSI 技术是一种无需额外硬件的测距技术,其原理是基于信号强度和传输距离之间的关系。在定位过程中,锚节点发射信号的强度恒定,根据未知节点接收到的信号强度,利用

收发节点之间的信号传播模型计算出相应节点之间的距离,再用定位算法依据距离计算节点位置。

经典的无线信号传播模型包括损耗和环境等影响因素^[15],如式(1)所示:

$$P_L(d) = P_L(d_0) + 10n \lg(d/d_0) + X_\sigma \quad (1)$$

其中: d 为发射节点与接收节点之间的距离, d_0 为近地参考距离,由测试决定; n 为路径损耗因子,表示路径损失随距离增加而增大的快慢,与周围环境有关; X_σ 服从均值为 0 的高斯分布, σ 表示模型的不确定性; $P_L(d_0)$ 表示参考距离为 d_0 时的路径损耗。

已知未知节点多次接收到的信号强度均值为 \overline{RSSI} ,距离发射节点 d_0 处的参考点接收的信号强度 A ,由常态分布模型变换得到发射节点与未知节点距离如式(2)所示:

$$d = 10^{\frac{A - \overline{RSSI}}{10n}} \quad (2)$$

2.2 WSN 的部署

本文旨在实现一种相对通用的自主移动策略,故选择一种较为常见的 WSN 部署方案:含有少量锚节点的随机撒点网络。在 $600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ 的区域内,锚节点的分布间隔为 150 m 。图 1 中“+”表示载体起点,“o”表示最终目标节点,两点之间的连线是理想的移动路径,即载体自主移动的基准方向线。区域内部署 100~300 个传感器节点并服从随机分布,通过自组织形式组网。网络中的传感器节点可以根据锚节点信息和已知位置节点定位;同样地,载体也可以根据这些信息完成定位,并选取合适的下一步目标节点实现动态路径规划。WSN 部署模型如图 1 所示。

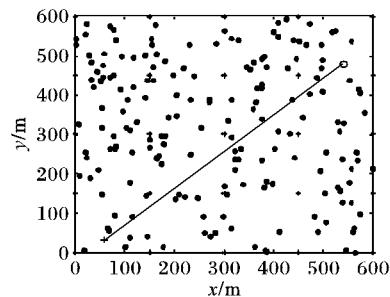


图 1 锚节点均匀分布的 WSN

3 载体的自主移动策略

本文所提移动策略对整个过程进行动态规划,完成阶段性点到点的自主移动。阶段性移动策略(如图 2)主要由五大模块组成:检测目标节点、载体在 WSN 中的定位、选取下一步目标节点、方向修正和避障机制。整个自主移动过程循环执行阶段性选点和移动,直至到达最终目标节点。

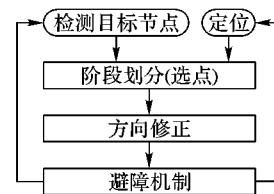


图 2 移动策略

3.1 节点定位

载体或传感节点的定位算法采用极大似然估计法。已知信标节点的坐标 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, 未知节点坐标为 (x, y) , 具体计算过程如下:

锚节点周期性广播自身的身份标识 (identification, ID) 和坐标信息。

1) 待定位在一定时间周期内接收锚节点信号, 对同一 ID 锚节点发送来的数据包提取该数据包的 RSSI 值。满足设定的接收数据包的阈值 (本文实验中设定为 32, 可根据信号的传输质量来调整这个值) 后, 对这些 RSSI 值求取平均值, 作为该 ID 锚节点的最终 RSSI 值, 然后再根据式(2) 计算出距离 d , 这样就得到了待定位节点和某个 ID 锚节点间的距离。为了提高定位的准确性, 待定位节点可以请求邻近节点的 ID 信息、坐标信息及其定位误差, 筛选定位误差满足一定阈值 (根据传感器节点的密度来确定阈值, 密度越大, 阈值越小; 反之, 阈值越大, 以尽量寻求伪锚节点来辅助定位) 的邻近节点作为伪锚节点, 与锚节点一同作为本次定位所需的信标节点。采用同样的方法对所有信标节点进行处理, 计算出相应的 n 个距离 d_1, d_2, \dots, d_n 。最后, 未知节点记录所有信标节点的 ID、坐标信息及其对应距离 d 。

2) 构建信标节点坐标和未知节点坐标的方程组。

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = d_2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = d_n \end{cases} \quad (3)$$

该方程组是一个非线性方程组, 化简后得到如下线性方程:

$$AX = b \quad (4)$$

其中 $X = [x, y]^T$, 利用最小二乘法求解方程(4), 得到未知节点的坐标值如下所示:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (5)$$

3.2 阶段划分策略

移动载体请求邻近节点的 ID 和坐标信息, 根据存储的最终目标节点的 ID 与请求到的邻近节点的 ID 对比分析, 判断是否含有最终目标节点: 若邻近节点中包含最终目标节点, 则直接将最终目标节点设定为下一步目标节点, 到达后完成整个自主移动过程; 若邻近节点中不包含最终目标节点, 则根据式(6)筛选请求到邻近节点。

$$\begin{cases} y_0 - R < y < y_0 + R \\ x_0 - R < x < x_0 + R \\ (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \leq R^2 \end{cases} \quad (6)$$

其中: (x_0, y_0) 表示当前移动载体坐标; R 表示传感器节点的有效通信半径; (x, y) 表示邻近节点坐标。

根据点到直线间的距离公式求得符合式(6) 筛选条件的邻近节点到基准方向线之间的距离, 分别为 d_1, d_2, \dots, d_n 。设 i 节点为距离基准方向线最近的节点, 其距离为 d_i , 则 d_i 与其他距离的差值小于一定阈值的邻近节点都有可能成为下一步目标节点:

$$\begin{cases} |d_i - d_1| \leq \eta \\ |d_i - d_2| \leq \eta \\ |d_i - d_3| \leq \eta \\ \vdots \\ |d_i - d_n| \leq \eta \end{cases} \quad (7)$$

其中 η 表示根据节点密度和地形复杂度而人为设定的阈值。节点密度较大时, 该值较小; 反之, 亦然。这样既可以保证候选节

点的数量, 也不会使节点数目过多, 造成计算时间上的负担。

根据式(7) 筛选出的邻近节点集为 $O = \{i, j, \dots, m\}$ ($m \leq n$), 从中选择 x_k ($k \in O$) 最大的节点 k 作为下一步目标节点, 这样使得每次选择的下一步目标节点都尽可能地靠近最终目标节点, 并且减少了移动载体循环计算的次数, 缩短了移动载体到达最终目标节点的时间。

3.3 移动方向修正

移动载体在移动过程中需要不断修正前进方向以保证移动载体收敛于基准方向线附近向最终目标节点移动; 移动载体在 WSN 的移动过程中, 保存数据处理中心坐标、最终目标节点坐标、上一步移动载体坐标、当前移动载体坐标以及选定的下一步目标节点坐标。

假设: 数据处理中心坐标和最终目标节点坐标两点构成基准方向线 L_1 ; 上一次移动载体坐标和当前移动载体坐标两点构成当前方向线 L_2 ; 当前移动载体坐标和下一步目标节点坐标两点构成修正方向线 L_3 。

在选定下一步目标节点后需要修正方向以实现点到点的移动, 三条方向线 L_1, L_2, L_3 将构成一个三角形 (如图 3 所示); 根据直线的一般式方程 $Ax + By + C = 0$ 以及确定直线的两个坐标点可以得出三条方向线的方程, 这三条方向线的交点就是三角形的三个顶点, 分别为 D, E, F ; 根据直线一般方程可求得 D, E, F 的坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ 。

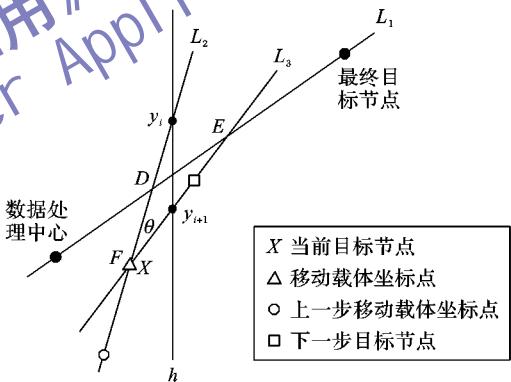


图 3 修正前进角度数学模型

向量 FD 是指当前移动载体的方向, $FD = (x_1 - x_3, y_1 - y_3)$, 设向量 FD 的模为 a , 则:

$$a = \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2} \quad (8)$$

向量 FE 是指移动载体到达下一步目标节点所需的方向, $FE = (x_2 - x_3, y_2 - y_3)$, 设向量 FE 的模为 b , 则:

$$b = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2} \quad (9)$$

根据两向量的数量积公式可得:

$$val_i = \cos(\theta_i) = \frac{\mathbf{FD} \cdot \mathbf{FE}}{a * b} = \frac{(x_1 - x_3) * (x_2 - x_3) + (y_1 - y_3) * (y_2 - y_3)}{\sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2} * \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}} \quad (10)$$

根据反余弦函数和式(10) 可求得两方向向量的夹角 θ_i 。作平行于 y 轴的一条直线 h : $x = x_3 + x_0$ (x_0 为 1 ~ 10 的任意整数), 设直线 h 与当前移动载体方向线的交点的纵坐标为 y_i , h 与移动载体到达下一步目标节点所需方向的修正方向线的交点的纵坐标为 y_{i+1} , 则移动载体顺时针修正方向的转动角度满足下式要求:

$$\begin{cases} \arccos(val_i), & y_i > y_{i+1} \\ 0, & y_i = y_{i+1} \\ 360^\circ - \arccos(val_i), & y_i < y_{i+1} \end{cases} \quad (11)$$

3.4 避障机制

移动载体在 WSN 中遭遇复杂地形或障碍无法继续前进时,移动载体停止前进并向数据处理中心发送紧急情况处理请求,数据处理中心分析数据后发送紧急情况控制指令,移动载体根据紧急情况控制指令选择超声波自动避障或者开启摄像头回传环境数据进行手动控制避障,成功避障后移动载体重新定位进行自主移动。

3.5 移动载体自主移动算法

本文主要研究在复杂环境或特殊场合的 WSN 中,通过已有节点的引导,移动载体自主寻路到达目标地点以完成人力无法近距离操作的作业任务。移动载体在 WSN 中自主定位并修正前进方向的具体策略算法描述如下:

步骤1 构造基准方向向量。数据处理中心发送特定数据请求指令,获取最终目标节点的坐标信息,以数据处理中心为起点,最终目标节点为终点构造基准方向向量,并将最终目标节点和数据处理中心的 ID、坐标信息以及基准方向向量信息存储到移动载体中。载体初始移动状态如图 4 中虚线圆内所示,移动载体从数据处理中心出发,以 0.3 m/s 的速度向最终目标节点所在方位移动 5 m,根据 3.1 节定位方法进行定位,并存储当前移动载体的坐标信息。

步骤2 移动载体的定位。当载体需要确认自身的位置信息时根据 3.1 节定位方法进行定位。

步骤3 阶段划分(即选取下一步目标节点)。如图 4 中半圆内为可选节点的范围,选取节点到理想路径间距离之差小于 η 的节点作为候选节点;选取尽可能远离当前载体所在位置的节点作为下一步目标节点,即图 4 中所示空心三角。具体选取方案如 3.2 节中所示。

步骤4 修正前进方向。选定下一步目标节点后,存储下一步目标节点坐标信息,并根据 3.3 节所示方法完成前进方向的修正,实现点到点的自主移动。

步骤5 移动中检测下一步目标节点的信号强度。移动载体在移动过程中,每进入一个簇就加入该簇,通过这种方式融入网络进行数据的传输和通信。移动载体通过自带的无线收发装置获取下一步目标节点发来信号的信号强度值,以便判断是否到达下一步目标节点。

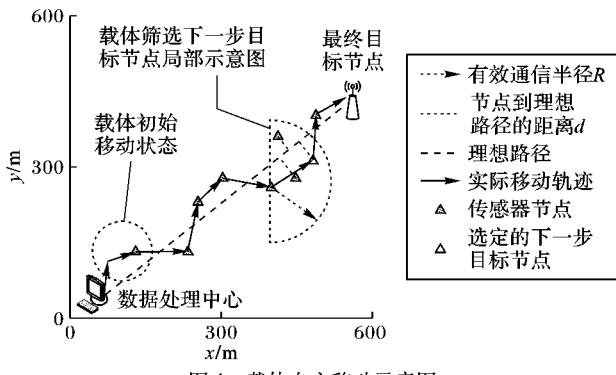


图 4 载体自主移动示意图

移动载体请求下一步目标节点的数据,当接收到数据包后,数据包中就有 RSSI 信息。RSSI 反映接收信号强度,可以通过读取无线芯片的寄存器得到,能够用来判断两个节点间

距离。根据得到的 RSSI 值也可以计算出发射功率衰减值,以 ZigBeeCC2530 为例,若读取到的 RSSI 值为 0XBC,将其转换为十进制数是 188;IEEE 标准定义了一种机制来衡量无线网卡接收到的 RF 能量值,其数值为 0 ~ 255 的整数^[13~14],即我们所说的 RSSI。故其能量值为 $188 - 255 = -67 \text{ dBm}$ 。根据 RSSI-距离模型设定无线信号强度阈值,当接收的 RSSI 值达到阈值时,判定载体到达下一步目标节点。

步骤6 紧急避障处理。当载体遭遇障碍时根据 3.4 节所述避障机制完成避障。

步骤7 判断移动载体是否到达下一步目标节点。CC2530 的发射功率典型值为 4.5 dBm^[14],根据 RSSI-距离模型和以上数据分析设定一个最高信号强度阈值,当检测到的下一步目标节点的信号强度值小于最高信号强度阈值时,继续自主移动;当检测到的下一步目标节点的信号强度值大于等于最高信号强度阈值时,即认为移动载体到达目标节点,移动载体停止移动。返回步骤 2。

4 实验仿真与分析

使用 Matlab 工具进行仿真,基本初始条件是 WSN 位于 $600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ 的区域内,锚节点数目为 25,锚节点间隔为 150 m(包括边缘节点),传感器节点通信半径为 100 m。该区域左下角坐标为(0,0),右上角坐标为(600,600)。区域内锚节点均匀部署, n 个传感器节点随机部署在仿真场景内。仿真选定 $(sink.x, sink.y)$ (仿真设置为(60,30)) 作为载体移动的起点(即数据处理中心),选定 $(target.x, target.y)$ (仿真设置为(540,480)) 作为载体移动的最终目标节点,并通过这两个坐标点确定基准方向线。利用 Matlab 仿真算法实现对传感器节点的定位,选取移动载体有效通信半径内的节点,计算有效通信半径内节点到基准方向线的距离,选取距离较小且位置合适的节点作为下一步目标节点,循环这个过程直至当前载体所在位置与最终目标节点间的距离小于载体的有效通信半径。

仿真实例 1 如图 5 所示。图 5 中,“+”表示数据处理中心,“o”表示最终目标节点,正方形表示载体每个循环阶段的目标节点。传感器节点总数 $n = 180$ ($\eta = 5 \text{ m}$) 且传感器节点的部署较为均匀,仿真的路径很好地收敛于基准方向线,形成了近乎直线的移动路径。仿真实例 2 ($\eta = 10 \text{ m}$) 如图 6 所示,仿真形成的载体移动路径较为曲折,但仍能收敛于基准方向线;仿真实例 3 ($\eta = 2 \text{ m}$) 如图 7 所示,仿真形成的载体移动路径较图 5、6 所形成的移动路径更加理想,载体几乎可沿基准方向线到达最终目标节点,所走路径最短。通过图 5~7 可以看出传感器节点的密度越大,所形成的移动路径越理想。

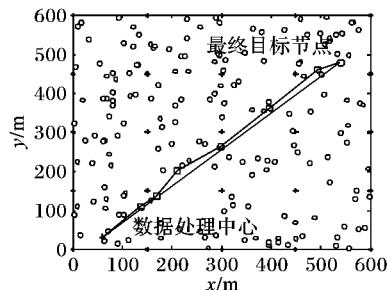


图 5 180 个传感器节点的仿真

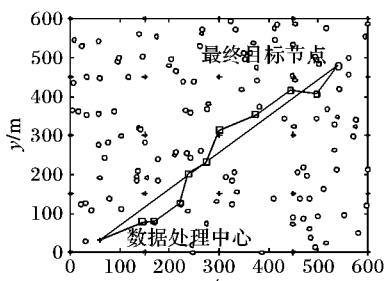


图 6 130 个传感器节点的仿真

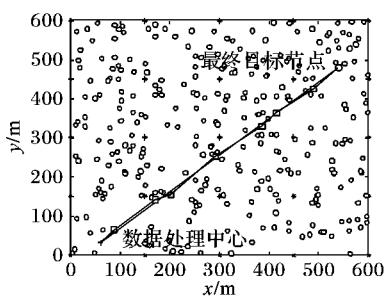


图 7 300 个传感器节点的仿真

5 结语

本文提出了一种 WSN 中载体的自主移动策略,完全脱离人工,依靠传感器节点实现自身定位,并结合数学模型完成移动路径的规划和完全自主的移动控制。通过 Matlab 实验仿真验证了本文所提自主移动策略的理论可行性,同时验证了移动路径的规划与传感器节点密度的关系。通过仿真实例可以看出,传感器节点密度越大,移动路径规划的效果就越理想;而当传感器节点密度过低时,由于载体自身定位所需节点数目和有效通信范围内可选节点数目的限制,所形成的移动规划路径较为曲折,但仍能够到达目标节点。对不同数量传感器节点的传感器网络进行了多次模拟实验,最终都能够较为理想地到达目标节点;而且本文所提算法主要包括节点定位、节点选取以及方向的调整,这些策略算法均基于简单数学模型,其算法复杂性较低且反应速度快。在实际应用中,传感器节点的密度能够满足该策略的要求,因为过低传感器节点密度的 WSN 在实际应用中是不可行的,不能完成有效的监测任务。因此,本文所提出的 WSN 中载体的自主移动策略在理论上是完全可行的。

参考文献:

- [1] 洪锋, 褚红伟, 金宗科, 等. 无线传感器网络应用系统最新进展综述[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(S2): 81–87. (HONG F, CHU H W, JIN Z K, et al. Review of recent progress on wireless sensor network applications [J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(S2): 81–87.)
- [2] 韦孝云, 卢刚, 温书胜. 面向精准农业的无线传感器网络研究进展[J]. 工业控制计算机, 2012, 25(5): 18–19. (WEI X Y, LU G, WEN S S. Research progress of wireless sensor network for precision agriculture [J]. Industrial Control Computer, 2012, 25(5): 18–19.)
- [3] 谭民, 王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报, 2013, 39(7): 963–972. (TAN M, WANG S. Research progress on robotics [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(7): 963–972.)
- [4] 蒋浩然, 陈军, 王虎, 等. 移动机器人自动导航技术研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(12): 207–213. (JIANG H R, CHEN J, WANG H, et al. Research progress of automatic navigation technology for orchard mobile robot [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2011, 39(12): 207–213.)
- [5] 吴晓明. 基于计算机视觉的机器人导航综述[J]. 实验科学与技术, 2007, 5(5): 25–28. (WU X M. A survey on robot navigation based on computer vision [J]. Experiment Science and Technology, 2007, 5(5): 25–28.)
- [6] 王殿君. 基于改进 A* 算法的室内移动机器人路径规划[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(8): 1085–1089. (WANG D J. Indoor mobile-robot path planning based on an improved A* algorithm [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(8): 1085–1089.)
- [7] BAKER D J, EPHREMIDES A. The architectural organization of a mobile radio network via a distributed algorithm [J]. IEEE Transactions on Communications, 1981, 29(11): 1694–1701.
- [8] ZHOU L, JIANG J. An approach to safe path planning for mobile robot in the dynamic environment based on compact maps [J]. Journal of Computers, 2012, 7(2): 405–410.
- [9] SUN X, ZHAO X, LI E, et al. Mobile robot navigation using RSSI potential field in wireless sensor network [J]. Journal of Computational Information Systems, 2010, 6(14): 4751–4759.
- [10] ZHOU N, ZHAO X, TAN M. RSSI-based mobile robot navigation in grid-pattern wireless sensor network [C]// Proceedings of the 2013 Chinese Automation Congress. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 497–501.
- [11] DESHPANDE N, GRANT E, DRAELOS M, et al. Received signal strength based bearing-only robot navigation in a sensor network field [C]// IROS 2014: Proceedings of the 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 4618–4623.
- [12] DE CARVALHO A R, RIBAS A D, DA CAMARA NETO V F, et al. An RSSI-based navigation algorithm for a mobile robot in wireless sensor networks [C]// LCN '12: Proceedings of the 2012 IEEE 37th Conference on Local Computer Networks. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2012: 308–311.
- [13] 李士宁. 传感网原理与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 16–29. (LI S N. Theory and technology of sensor network [M]. Beijing: China Machine Press, 2014: 16–29.)
- [14] 姜仲, 刘丹. Zigbee 技术与实训教程——基于 CC2530 的无线传感网技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 42–43. (JIANG Z, LIU D. Technology and training tutorial of Zigbee: based on CC2530 [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 42–43.)

Background

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (51204185, 51034005), the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China (2012AA062004), the National Basic Research Program (973 Program) of China (2013CB227900), Postdoctoral Science Foundation of China (2012M521147), Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-13-1022).

TANG Haijian, born in 1991, M. S. candidate. His research interests include wireless sensor network.

BIAO Yu, born in 1977, Ph. D., associate professor. His research interests include information security, wireless sensor network.

MIN Xuan, born in 1993, M. S. candidate. Her research interests include wireless sensor network.

LUO Yuxuan, born in 1994. Her research interests include wireless sensor network.

ZOU Yuchi, born in 1994. His research interests include wireless sensor network.