

基于无线传感器网络的机器人 高精度定位系统

张歌凌¹, 孙利娟^{2,3}

(1. 黄河水利职业技术学院 信息系, 河南 开封 475000; 2. 武汉大学 计算机学院, 武汉 430072;
3. 开封文化艺术职业学院 信息电子系, 河南 开封 475000)

摘要: 机器人的定位在运动控制系统和任务执行环节起着至关重要的作用, 为了提高机器人在特殊环境中作业的定位精度, 设计了一种基于无线传感器网络的机器人高精度定位系统。在微处理器 ATmega1280 的硬件平台上采用芯片 NanoPAN5375 接收信号强度指示 (RSSI) 进行测距定位, 并利用对称双边双路测距和极大似然估计算法大大提高了定位精度; 同时, 使用基于轮询的时分多址接入协议和表驱动簇路由协议, 解决了多机器人协同作业定位问题, 并使系统在网络性能设计上得到了平衡; 通过在 60 m×60 m 区域内的实验表明, 该系统工作稳定可靠, 测量的相对定位误差小于 0.25 m, 具有较高的定位精度, 适用于机器人在矿井搜救、核泄漏检测和火山探索等特殊环境下的定位需要。

关键词: 机器人定位; 无线传感器网络; 极大似然估计; 通信协议

High Precision Positioning System of Robot Based on Wireless Sensor Network

Zhang Geling¹, Sun Lijuan^{2,3}

(1. Department of Information, Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475000, China;
2. College of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Department of Electronic information,
Kaifeng Vocational College of Culture and Arts, Kaifeng 475000, China)

Abstract: The robot positioning plays a vital role in the motion control system and task execution aspects, a robotic precision positioning system based on wireless sensor networks is designed to improve the positioning accuracy of the robot operating in a particular environment. The Receive Signal Strength Indication (RSSI) is used to range and locate by Chip NanoPAN5375 on the on the microprocessor hardware platform ATmega1280, and the positioning accuracy is improved using dual ranging bilateral symmetry and maximum likelihood estimation algorithm. Meanwhile, the Multi-robot collaboration positioning is solved by based polling division multiple access protocol and table-driven cluster routing protocol, which makes the system to get a balance on the network performance. Through experiments in the 60m × 60m area show that the system is stable and reliable measure of the relative positioning error is less than 0.25m, with high accuracy, which is suitable for mine rescue robot positioning needs nuclear leak detection and volcanic exploration and other special circumstances.

Key words: robots positioning; wireless sensor network; maximum likelihood estimation; communication protocol

0 引言

随着智能机器人技术的发展, 在一些诸如矿井搜救、核泄漏检测和火山探索等危险性较高的领域, 人们更希望用机器人取代人类进行作业, 甚至在很多时候需要多个机器人进行协同工作, 为了使这些机器人能够按照预定的轨迹运动, 就需要对他们进行精确地实时定位^[1]。传统的机器人和 WSN 系统的定位方案一般采用基于 GPS 的绝对坐标定位或者基于 Zigbee 无线传感器网络的相对定位。前者不仅需要加装额外的 GPS 接收机增加设备的体积和成本, 而且依赖于卫星信号的覆盖, 在室内、地下等信号不理想的场合误差很大甚至无法工作。即便在信号良好的情况下民用 GPS 的单点定位误差也在 10 m 左右^[2]; 后者通常利用通信设备的接收信号强度指示 (RSSI,

Received Signal Strength Indication) 进行距离估计, 再采用一定的定位算法计算位置坐标, 该方法无线电多径效应影响严重, 通信距离短, 测距误差大, 定位精度低^[3-4]。为此, 基于无线传感器网络设计了一种适应机器人在特殊环境作业的高精度定位系统, 采用线性调频的 Chirp 信号进行通信和测距, 采用一定的算法实现实时定位, 定位精度较基于 GPS 和 RSSI 的定位有了显著的提高。

1 系统组成及网络结构

1.1 系统组成

设计的基于无线传感器网络的机器人高精度定位系统主要包括 WSN 通信定位子系统 and 监控子系统两大部分。(1) WSN 通信定位子系统包含基站和机器人移动节点。基站为位置信息已知的节点, 由固定电源供电, 负责测距定位和通信中继。机器人移动节点为机器人携带, 能够与基站进行通信和测距。(2) 监控子系统包括数据服务器和监控主机, 它们位于监控机房内, 通过局域网与基站相连。机器人定位监控系统整体如图

收稿日期: 2014-03-05; 修回日期: 2014-04-26。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61170243)。

作者简介: 张歌凌 (1975-), 女, 河南开封人, 讲师, 硕士, 主要从事计算机应用与人工智能方向的研究。

1 所示。

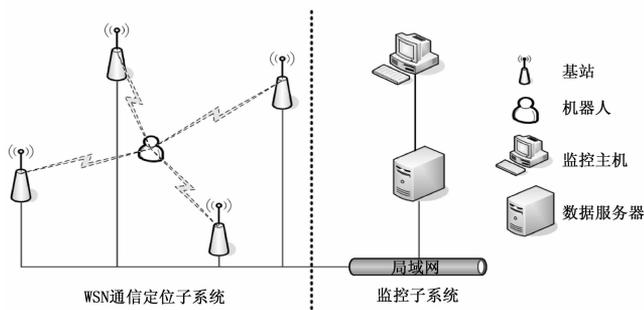


图 1 机器人定位监控系统整体示意图

机器人在预定的区域活动时，通过 WSN 通信定位子系统进行精确定位，通过局域网将接收到的实时位置、图像和环境参数等信息上传到数据服务器进行分析处理，并显示在监控主机上。根据收到的实时数据分析后，再向机器人发出控制运动或者执行任务的指令。

1.2 网络结构

WSN 通信定位子系统实际上是组成了一个两个层次的分层网络：各基站组成上层网络，通过有线的以太网连接，移动节点和基站组成下层网络，通过无线信道连接^[5]。同时，为方便对移动节点进行管理和监控，网络的拓扑结构采用分簇的形式，该分簇网络的拓扑结构如图 2 所示。

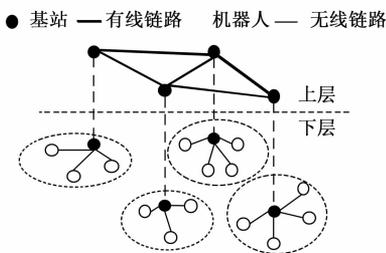


图 2 分簇网络拓扑结构示意图

与传统分簇无线传感器网络的不同之处在于该网络的下层簇成员节点具有随机移动性，网络的拓扑结构具有高度的动态特性。

2 移动机器人硬件平台

机器人是整个系统的功能核心，包括实时定位、运动控制、图像采集、数据存储、环境参数获取、网络通信和电源管理等。移动机器人在微处理器 ATmega1280 的硬件平台上开发，系统的通信模块选用符合 IEEE802.15.4a 标准的 NanoPAN5375 芯片。该芯片最显著的特点是采用了宽带线性调频扩频 (Chirp Spread Spectrum, CSS) 技术，可提供 125 kbps ~ 2 Mbps 的传输速度，可编程输出功率可带 +20 dBm，接收灵敏度可达 -95 dBm，由于 CSS 技术具有优秀的抗干扰性能和无线电测距效果，大大提高了定位的精度^[6]。数字接口采用 SPI 接口，可方便地与微控制器 ATmega1280 相连接。移动机器人硬件平台组成如图 3 所示。

同时为机器人设计了视觉摄像机，实时采集周围的图像信息，再经过 DSP 视频压缩单元后，通过流媒体技术上传上数

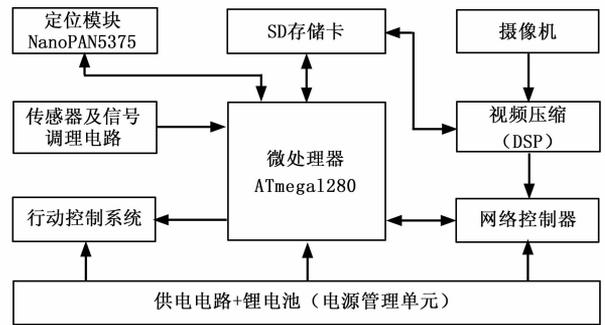


图 3 移动机器人硬件平台组成框图

据服务器，如遇到网络故障时，还可以暂时存在 SD 存储卡中。大部分机器人在执行任务时都要对危险环境中参数进行探测，可选择性的添加的温度、有毒气体、核辐射和红外探测等传感器等。另外，监控主机通过收到的环境参数信息，再结合通过摄像机采集到的图像和机器人在空间的位置，经过综合评估后，向机器人的行动控制系统发出控制指令，实现了远程控制机器人在危险特殊的环境中作业的目的。

3 机器人节点的定位算法

系统利用位置已知固定的基站建立起相对坐标系，移动节点与基站之间通过通信进行相对定位，进而得到其在该坐标系中的坐标。根据是否需要测距，自定位技术可分为无需测距的 (Range-Free) 和基于测距的 (Range-Based) 两种定位方法^[7]。Range-Free 定位方法由于无需测距和测角装置，因此其成本和能耗较低，但定位精度较差。Range-Based 定位方法利用距离值通过一定的算法定位，虽然比 Range-free 方法增加了计算开销，但定位精度有了较大的提升。因此本系统采用 Range-Based 定位方法。

3.1 对称双边双路测距

基于测距的定位方法需要移动节点测量自己与至少 3 个基站之间的距离。本系统采用对称双边双路测距算法，不需基础设施辅助，可实现移动测距，不需要移动节点与基站之间以及基站与基站之间的时间同步，降低了系统对节点硬件的要求，进而降低了系统的复杂度和成本。

移动节点主动发起测距具体过程为：移动节点先向基站发出测距数据包，当 MAC 层开始发送时读取当前节点时钟；基站接收到该数据包时 MAC 层记录接收时间，经过一段时间的处理 (t_2) 会向移动节点发送答复，答复数据包发送时 MAC 层也记录下发送时间；移动节点接收到该答复时记录接收时间 t_1 ，即从发送数据包到收到答复的时间为 t_1 。同理，基站再次向移动节点发送测距数据包，接收答复数据包并获得时间 t_3 和 t_4 ，最后通过一个通信数据包将 t_3 和 t_4 发送给移动节点^[8]。这就完成了一次双边双路测距过程。根据移动节点得到的时间参数可以得到数据包在两点之间的传输时间。

$$t = \frac{(t_1 - t_2) + (t_3 - t_4)}{4} \tag{1}$$

根据该公式计算得到的时间，结合电磁波在空气中的传播速度，即可得到两节点之间的距离。

$$d = c * t = c * \frac{(t_1 - t_2) + (t_3 - t_4)}{4} \tag{2}$$

式中, c 为电磁波在空气中的速度, 得到的距离值 d 实际上是移动节点天线和基站天线之间的距离, 而不是移动机器人与基站的水平距离, 需要根据基站高度利用三角形勾股定理进一步求解出基站和移动节点的水平距离。

3.2 极大似然估计法定位算法

极大似然估计法^[9]是利用不在一条直线上的 n ($n \geq 3$) 个信标节点以及未知节点与这些信标节点之间的距离来计算未知节点定位的二维定位算法。其基本原理是以 n 个信标节点分别为圆心, 以未知节点到各个信标节点的距离为半径画圆, n 个圆的交点即为未知节点的坐标, 以 3 个信标节点为例其基本原理如图 4 所示。

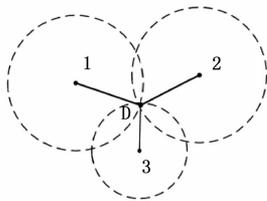


图 4 极大似然估计法定位原理示意图

已知信标节点 1, 2, ..., n 的坐标值分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, 未知节点到 3 个信标节点之间的距离值分别为 d_1, d_2, \dots, d_n 。假设未知节点坐标为 (x, y) , 则存在以下一组方程:

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

从第一个方程开始分别减去最后一个方程, 并将得到的线性方程改写成为矩阵形式: $\mathbf{AX} = \mathbf{b}$, 其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) \\ \vdots \\ \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_{n-1}^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (6)$$

使用标准的最小均方差估计方法可得到未知节点的坐标为:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (7)$$

4 无线传感器网络通信协议

4.1 路由协议

系统的通信业务主要是各机器人节点将自己的位置信息和其他状态信息传输给数据服务器及各机器人节点之间的通信。该系统上层网络为静态有线网络, 下层网络为动态移动网络, 因此可使用路由表驱动的动态路由协议。路由表生成和维护的过程如下: 首先移动节点监测周围的基站, 通过距离、链路质量和基站连接数等参数选择一个基站加入其所在的簇。各基站保存簇内成员列表, 包含节点地址和位置信息等, 并周期性地

通过以太网将成员列表上传至数据服务器。这样各基站能够维护簇内路由表, 服务器能够维护一个实时更新的全网路由表。当节点离开该基站的覆盖范围之后, 则重新选择一个基站加入。

路由表生成后, 当移动节点之间有通信需求时, 节点将信息发给所簇头基站, 基站根据查询路由表获得转发路径, 并按照路径进行转发。由于定位的需求, 移动节点还需要在已加入的基站外另外选择两个可通信的基站作为定位基站, 并向这两个基站发出请求。基站接收到请求后, 将该移动节点加入该基站的测距节点列表。

4.2 基于轮询的时分多址接入协议

如果系统中多个机器人协同工作, 会造成移动节点数量大, 为避免同一时刻多个节点竞争信道产生冲突碰撞, 采用了时分多址 (time division multiple access, TDMA) 技术, 即在某一时刻只有一个节点发送数据。从系统的功能考虑通信的实时性应是首要考虑的内容, 且基站不必使用移动电源供电可减小对低功耗的要求。

文献 [10] 中基于轮询的 TDMA 方法不需要进行时间同步, 故可以很好的解决一般 TDMA 方法时钟基准误差的问题。根据文献 [10] 所提供的轮询 TDMA 协议进行修改。基于轮询的 TDMA 协议中基站具有分配节点通信的控制权。当网络的拓扑结构生成后, 每个基站维护两个信息表: 簇内路由表和测距节点列表。其中测距节点列表同时包含了簇内路由表的所有节点。基站利用定时器产生 TDMA 时间帧和时隙, 根据测距节点列表的大小分配时间帧内的时隙数量, 并将每个时隙分配给一个列表内的一个节点, 每个时隙相互不重叠, 规定每个节点只能在自己的时隙内发送数据, 并在每个时隙开始时对相应的移动节点授权。移动节点只有在获得授权后才能发送数据, 发送完毕或时隙结束后即丧失通信权。由于一般情况所需发送的数据量较小, 故可将时隙设置得比较小, 从而降低通信时延。

5 测试实验与结果分析

为验证系统性能, 对 WSN 通信定位子系统的通信和定位进行实验验证。实验采用 4 个 NanoLOC 节点模拟基站, 使用 1 个 NanoLOC 节点模拟机器人的移动。4 个基站呈正方形分布在一个 $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ 区域内, 移动节点在该区域内随机移动测试通信和定位情况, 当移动到几个已知坐标的点时停留一段时间, 观察移动节点之间的通信状况并对比定位结果和实际坐标的误差。定位算法采用前文所述极大似然估计法, 并进行多次测量计算求平均值减小随机误差, 测量次数设为 10 次。实验节点和基站分布示意图如图 5 所示。

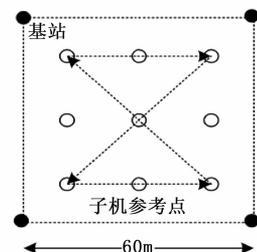


图 5 实验节点和基站分布示意图

为考核移动节点间的通信情况,节点发送的数据帧中设置一个 16 位字段用于对数据包计数,每产生一个数据包计数加 1 并写入该字段。汇聚节点收到数据包后提取该值,用于统计是否有数据包的丢失。当机器人在区域中移动时,汇聚节点能实时接收到移动节点发送的位置,其中当机器人移动到图中各参考点时,定位结果和实际位置坐标如表 1 所示。

使机器人按照一定的规则移动,搜集汇聚节点接收到的坐标信息进行作图,得到的机器人实际运动轨迹如图 6 所示。

表 1 定位结果对比

实际坐标	定位结果	误差(m)
(10,10)	(10.17,10.08)	0.19
(10,30)	(9.91,30.22)	0.23
(10,50)	(9.84,49.22)	0.18
(30,10)	(30.22,10.08)	0.23
(30,30)	(29.86,30.10)	0.17
(30,50)	(29.79,50.12)	0.24
(50,10)	(50.09,9.80)	0.21
(50,30)	(49.79,29.86)	0.25
(50,50)	(49.89,49.80)	0.23

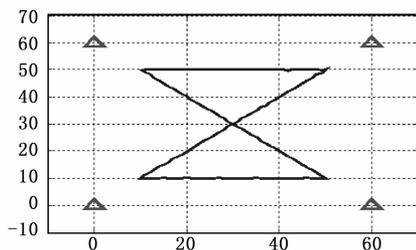


图 6 机器人实际运动轨迹

实验表明使用 NanoLOC 节点模拟基站及移动节点,可以对 60 m×60 m 的区域内处于静止和移动状态的移动节点进行良好地通信以及较高精度地定位,且对机器人的相对定位误差均小于 0.25 m;通信方面移动节点周期性快速发送,汇聚节点接收到的数据包计数连续无中断,即说明无丢包现象。

(上接第 1962 页)

[2] Kc K, Anyanwu K. Scheduling Hadoop Jobs to meet deadlines [A]. Cloudcon' 10 Proceedings of the 2010 IEEE Second International Conference on Cloud Computing Technology and Science [C]. 2010: 388-392.

[3] 李 莉, 廖剑伟, 欧 灵. 云计算初探 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27 (12): 4419-4422.

[4] Joldes G R, Wittek A, Miller K. Real-time nonlinear finite element computations on GPU—application to neurosurgical simulation [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 199: 3305-3314.

[5] 蔡 勇, 李光耀, 王 琥. GPU 通用计算平台上中心差分格式显式有限元并行计算 [J]. 计算机研究与发展, 2013, 50 (2): 412-419.

[6] 张雪萍, 龚康莉, 赵广才. 基于 MapReduce 的 K-Medoids 并行算法 [J]. 计算机应用, 2013, 33 (4): 1023-1025.

6 结束语

针对危险的特殊作业环境,为了能够准确获取机器人在空间的位置信息,并顺利执行任务,设计了一套基于无线传感器网络的高精度定位系统,借助具有宽带线性调频扩频技术的 NanoPAN5375 芯片,并加入了极大似然估计法定位算法,大大提高了定位精度。通过在 60 m×60 m 区域内的实验结果表明,系统工作稳定可靠,在可将基站架设在一定高度的视距条件下,该系统在通信和定位方面均能有良好的表现,测量的相对定位误差均小于 0.25 m,为在矿井搜救、核泄漏检测和火山探索等特殊环境下工作的机器人提供了实时高精度的定位数据。

参考文献:

[1] 牛国臣, 徐 萍, 冯 琦. 基于里程计和 PTZ 视觉的移动机器人自定位 [J]. 计算机应用, 2011, 31 (10): 2821-2824.

[2] 罗小敏, 蔡昌盛. GPS/GALILEO 组合单点定位精度分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33 (3): 136-140.

[3] 陈三凤, 陈万明. 基于 RSSI 误差分析的无线传感器网络定位研究 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47 (14): 10-14, 75.

[4] 孙红新, 叶小岭, 胡 凯. 基于超声波的移动机器人的同时定位和地图构建 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (11): 2769-2771.

[5] 段翠翠, 王瑞荣, 王建中, 等. 基于无线传感器网络的高危生产区人员定位系统 [J]. 传感技术学报, 2012, 25 (11): 1599-1602.

[6] 余义斌, 曹长修, 李昌兵. 基于权重重心法的传感器网络节点定位 [J]. 计算机仿真, 2007, 24 (6): 296-330.

[7] 葛日波, 沈海龙. 基于 UWB 编码的井下无线传感器网络定位方法 [J]. 计算机应用与软件, 2013, 30 (12): 284-287.

[8] 张广峰, 段其昌, 刘 政. 基于加强学习与联想记忆粒子群优化算法的节点定位 [J]. 传感器与微系统, 2013, 32 (3): 72-73.

[9] 石琴琴, 霍宏, 方 涛, 等. 使用最速下降法提高极大似然估计算法的节点定位精度 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25 (7): 2038-2040.

[10] 刘瀚文, 姜春兰, 李 明, 等. 网络化弹药的临时集中控制轮询时分多址协议 [J]. 探测与控制学报, 2013, 35 (2): 50-54.

[7] 曾清红. 无网格局部 Petrov-Galerkin 方法的并行计算研究 [J]. 计算力学学报, 2012, 29 (2): 205-209.

[8] 林旺群, 卢风顺, 丁兆云, 等. 基于带权图的层次化社区并行计算方法 [J]. 软件学报, 2012, 23 (6): 1517-1530.

[9] 万 军, 赵不贻. 并行计算的 Petri 网建模和 FPGA 实现 [J]. 计算机应用研究, 2013, 9 (30): 2660-2663.

[10] Bryant R E. Data intensive super computing: The case for DISC, CMU-CS-07-128 [R]. Pittsburgh, PA, USA: Carnegie Mellon University, Department of Computer Science, 2007.

[11] Polo J, Carrera D, Becerra Y, et al. Performance-driven task co-scheduling for map-reduce environment [A]. 12 th IEEE/IFIP Network Operation and Management Symposium [C]. 2010: 373-380.

[12] 王永贵, 韩瑞莲. 基于改进蚁群算法的云环境任务调度研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (5): 1203-1211.