

## 基于超声波测距的高精度室内定位系统<sup>\*</sup>

谢 地,鲁照权,丁浩峰,尤海龙,陈 龙,苏明明

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009)

**摘 要:** 基于超声波测距原理,提出了一种高精度室内定位方法,给出了实验系统结构,设计了系统硬件与软件,完成了系统定位实验,分析了产生误差的原因与解决方法。在  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$  定位区域内,布置 4 个坐标已知的带有射频通信和超声波测距功能的测距节点构成定位基点。根据定位区域内移动节点与定位基点的超声波测距结果,得到移动节点与各定位基点的距离,再将这些距离通过射频通信上传到上位机进行处理、计算,得到移动节点的坐标。实验结果表明:测量定位误差不超过 3 cm,动态响应良好。

**关键词:** 射频通信;室内定位;超声波测距

中图分类号: TP393;TP212

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2019)10-0098-04

## High precision indoor positioning system based on ultrasonic ranging<sup>\*</sup>

XIE Di, LU Zhaoquan, DING Haofeng, YOU Hailong, CHEN Long, SU Mingming

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Based on the principle of ultrasonic ranging, a high-precision indoor positioning method is proposed. The structure of the experimental system is given. The system hardware and software are designed. The system positioning experiment is completed. The causes and solutions of the error are analyzed. In the  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$  positioning area, four coordinates known ranging nodes with radio frequency communication and ultrasonic ranging nodes are arranged to form a positioning base point. According to the ultrasonic ranging result of the mobile node and the positioning base point in the positioning area, the distance between the mobile node and each positioning base point is obtained, and these distances are then uploaded to the upper computer through radio frequency communication to be processed and calculated, the coordinates of the mobile node are obtained. Experimental results show that the measurement error does not exceed 3 cm and the dynamic response is quite good.

**Keywords:** radio frequency communication; indoor positioning; ultrasonic ranging

### 0 引 言

随着经济的高速发展以及人力资源成本的大幅度提高和智能制造技术的快速上升,基于位置的服务和位置感知的计算在实际应用中越来越重要<sup>[1]</sup>。室内导航在地下停车场、商场、医院等场所的应用十分必要,而现有的全球定位系统(global positioning system, GPS)导航在室内又无法应用。所以,高精度室内定位系统很有必要。室内定位与导航使人与物之间构建了空间关系,使人们的生活更加便捷。

目前主流的定位技术有 WiFi、蓝牙、超宽带(ultra wide band, UWB)、超声波等。WiFi 定位的抗干扰性一般,部署难度中等,成本较低,定位精度达到米(m)级;蓝牙定位的抗干扰性一般,部署难度较低,成本一般,定位精度达到分米(dm)级;超宽带定位的抗干扰性强,部署难度高,成本较

高,定位精度达到厘米(cm)级;超声波定位的抗干扰性强,部署难度低,成本较低,定位精度达到 cm 级<sup>[2]</sup>。

从 20 世纪末开始,国内外的很多高校、研究机构及公司就针对不同的应用背景开发了种类繁多、实现原理多样的室内定位系统。2010 年 1 月,美国俄亥俄州立大学医疗中心安装了一套当时美国最大的医疗实时定位系统<sup>[3]</sup>,即 Ekahau 系统。Ekahau 是根据 WiFi 信号强度,采用位置指纹算法的定位系统。部署成本低,定位精度可达 2~5 m。Active Badge 系统是一种以红外线为传媒介质用近似算法的室内定位系统,定位精度一般以房间为单位。Active Bat 系统是一种采用到达时间(time of arrival, TOA)法进行定位的超声波室内定位系统,能够在 95% 的情况下将定位误差控制在 9 cm 以下<sup>[4]</sup>。但系统不易部署且定位成本过高。文

收稿日期: 2018-08-30

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家级大学生创新项目(201710359008); 合肥工业大学企业委托项目(W2016JSKF0467, W2016JSKF0468)

献[5]设计的采用 ZIGBEE 组网技术的超声波室内定位系统定位精度可达 7 cm。文献[6]设计的基于 CC1101 的超声波室内定位系统对 Cricket 系统进行了改进,使定位精度提高到 5 cm。

结合实际情况,综合考虑各因素,本文基于超声波定位技术建立了室内定位系统,通过对超声波测距模块的线性拟合,提出一种数据处理方法使定位精度提高到 3 cm,且动态响应良好。

1 实验系统结构

将 4 m×6 m 的房间划分为 6 个 2 m×2 m 的定位区域,每个定位区域安装 4 个坐标已知的带有无线射频通信和超声波测距功能的定位基点。超声波测距节点将测得的超声波在空气中的传播时间,乘以声速,进行偏差校正后得到距离。基于以上基本原理设计了高精度动态室内定位系统。

定位基点通常处于休眠状态。定位时,移动节点向定位基点发送唤醒指令,待接收到应答指令后,移动节点再发送测距超声波,同时发送 RF 射频计时同步指令。

定位基点在接收到移动节点发来的同步信号后,开始计时。接收到超声波信号后,结束计时。定位基点根据计数器的计数值计算得到定位基点与移动节点的距离,并进行偏差校正后,得到距离。测得距离后,定位基点将数据发

送给上位机。发送/接收指令格式如表 1 所示。

表 1 发送接收指令格式表

指令	移动节点 ID	定位基点 ID	测距数据	CRC 校验
发送	D0 XX	B0 XX XX	00 00	XX
接收	D0 XX	B0 XX XX	XX XX	XX

2 定位原理

设图 1 中  $R_i(i=1, 2, 3)$  是定位基点在地面的投影点与移动节点之间的距离。则以  $R_1, R_2, R_3$  为半径作 3 个圆,可得出交点,即移动节点的位置坐标  $(x_i, y_i)$

$$\begin{cases} (x_1 - x_i)^2 + (y_1 - y_i)^2 = R_1^2 \\ (x_2 - x_i)^2 + (y_2 - y_i)^2 = R_2^2 \\ (x_3 - x_i)^2 + (y_3 - y_i)^2 = R_3^2 \end{cases} \quad (1)$$

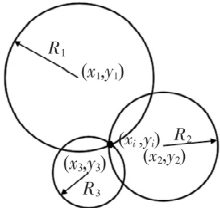


图 1 三边测距原理

设测量得到的空中定位基点与地面移动节点之间的距离为  $L_i(i=1, 2, 3)$ 。设已知空中定位基点的高度为  $H$ ,那么由  $R_i^2 = L_i^2 - H^2$  得

$$\begin{aligned} x &= \frac{(L_1^2 - L_2^2 + y_2^2 - y_1^2 + x_2^2 - x_1^2)(y_3 - y_1) - (L_1^2 - L_3^2 + y_3^2 - y_1^2 + x_3^2 - x_1^2)(y_2 - y_1)}{2[(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)]} \\ y &= \frac{(L_1^2 - L_2^2 + y_2^2 - y_1^2 + x_2^2 - x_1^2)(x_3 - x_1) - (L_1^2 - L_3^2 + y_3^2 - y_1^2 + x_3^2 - x_1^2)(x_2 - x_1)}{2[(y_2 - y_1)(x_3 - x_1) - (y_3 - y_1)(x_2 - x_1)]} \end{aligned} \quad (2)$$

3 硬件设计

室内定位系统由移动节点、定位基点、上位机三部分组成。定位基点、移动节点的核心硬件由 CC1101 射频收发器、HC-SR04 超声波模块、STC89C52 单片机、数码管、温度传感器 18B20 等组成。稳压电路 7805 与 LM1117 将 12 V 直流电压转换成 +5 V 和 +3.3 V,分别给 CC1101 射频收发器和 STC89C52 单片机供电。上位机由 STC89C52 单片机、CC1101 射频收发器构成的接收模块及 PC 组成。硬件连接图如图 2 所示。

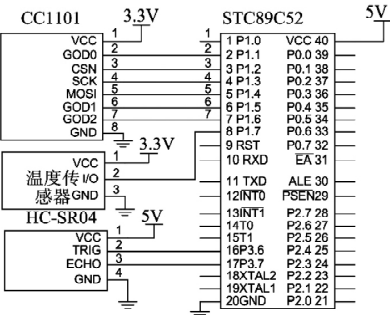


图 2 测距模块硬件连接

超声波测距模块使用 +5 V 的电压供电,发送频率为

40 kHz 的超声波,测量角度不大于 15°,测距精度可达到 3 mm,可提供 2~600 cm 的非接触式距离感测功能。

STC89C52 单片机的 P3.6 口对 HC-SR04 模块的 TRIG 引脚发出一个 10 μs 的脉冲触发信号后,HC-SR04 模块立即发出超声波信号,同时 ECHO 引脚置为高电平,待 HC-SR04 模块检测到回波信号时,ECHO 引脚置为低电平。通过检测 ECHO 引脚的高电平持续时间即可达到测量距离的目的。

4 偏差校正算法与数据处理

移动节点流程图如图 3(a) 所示,定位基点流程图如图 3(b) 所示。在实验中实际测量数据在 2.5~3.5 m 之间。测量 3 m 距离时按照  $s=v(\text{声速}) \times t(\text{时间})$  得到的距离为 4.53 m,产生偏差达到 1.53 m。由于硬件与软件系统的延时造成较大的误差,故对距离进行一元线性拟合,得到距离与计数值的关系如表 2 所示。

表 2 计数值与距离关系表

距离/cm	5	10	20	30	40	50	60	70
计数值	2 165	3 983	5 263	5 577	5 877	6 150	6 471	6 763

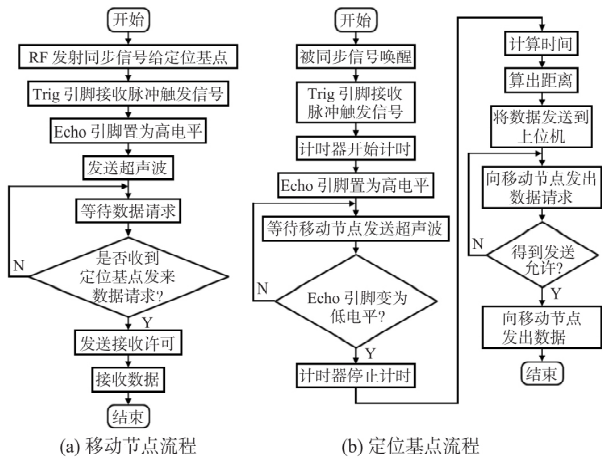


图3 移动节点和定位基点流程

表2计数值是测量30次得到的平均值。单片机振荡频率为12 MHz,定时器的一个计数值为1  $\mu$ s。在小于20 cm时超声波测距模块存在测量盲区。在大于20 cm时,由以上数据进行线性拟合得到室温15  $^{\circ}$ C时,测距方程为 $y = 30x + 4663$ 。其中 $y$ 为计数值, $x$ 为实际距离。将拟合的直线与数据比较得到图4。

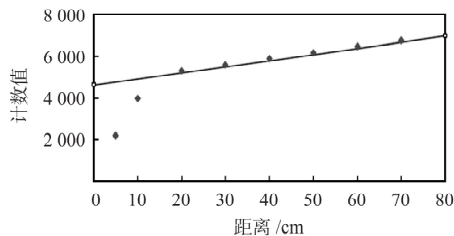


图4 线性拟合结果

对方程线性拟合后,在室温15  $^{\circ}$ C时,测量3 m实际距离时定时器计数值为13 879,对应的测量距离为3.075 m,误差缩小到7.5 cm。

声速对温度变化敏感,当温度变化较大时,需要进行温度补偿, $V = 331.4 + 0.607t$ 。其中, $V$ 为当前声速(m/s), $t$ 为室温( $^{\circ}$ C)。当温度相差10  $^{\circ}$ C时,声速相差6 m/s,3 m的测量距离误差会达到5 cm。因此,在实验中采用温度补偿进行校正,得

$$y = \frac{10000x}{331.4 + 0.607t} + 4663 \quad (3)$$

校正后,在室温25  $^{\circ}$ C下,实际3 m的测量距离为3.005 m,误差为0.5 cm。图5为室温25  $^{\circ}$ C下测量对比情况。

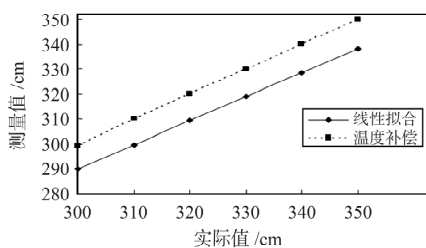


图5 测量值与实际值对比

校正后超声波测距的静态误差在0.5 cm以内,准确度

大幅度提高。

上位机接收到数据后,首先对数据进行限幅滤波,可以有效地去除粗大误差。

将限幅滤波处理后的数据直接用三边算法,得到的坐标与实际移动节点的坐标比较,误差最大达到10 cm。为了降低偏差,在得到第一组数据后,若第二组数据在以第一组数据为圆心,半径为 $R_i$ 的圆内,则保留,否则离圆心越远,乘以越小的权重得到新的数据,这样有效地避免了数据大的跳动带来的误差。经过试验,在设定半径 $R = 5$ ,权重 $\mu$ 为100减去数据到圆心的距离 $R_i$ 的0.3倍再除以100时可以将误差从10 cm缩小到3 cm以内,将精度提高了70%,即

$$R = \sqrt{(x_2 - x_1)^2} \quad (4)$$

若 $R > 5$ ,则 $x'_2 = \mu x_2$ ,  $\mu = (100 - 0.3R_i) / 100$ ;

若 $R \leq 5$ ,则 $x'_2 = x_2$ 。

上位机将数据经过限幅滤波和算法处理后,得到距离数据。缓冲单元在移入一个新数据前,将最陈旧的数据移去,一直保持缓冲单元中有8个最新数据,并对8个数据求一次均值。

由于三边算法只需要3个距离就可以算出坐标,上位机选取最小的3个距离进行定位计算,最后将定位指标显示在界面上。

## 5 实验结果

实验中,以40 cm/s运动的小车作为移动节点,在2 m  $\times$  2 m的定位区域内沿事先规划的直径为120 cm的圆作匀速运动。运动中的小车每隔50 ms进行一次定位,定位基点测得距离后实时发送给上位机。

上位机界面上圆对应的实际圆的直径为120 cm。小车通过红外寻迹的方法沿圆作圆周运动。空心的小圆圈是小车的实时位置, $R_1 \sim R_4$ 是4个定位基点的坐标。由误差分析可以看到最大误差为2.73 cm。与文献[1]相比,误差减小了40%,平均误差为1.11 cm。

以下4种情况是产生误差的主要原因。一组定位数据如表3所示。

表3 定位误差/cm

实际坐标	测量坐标	误差	实际坐标	测量坐标	误差
(102.76, 142.39)	(103.98, 141.16)	1.73	(147.87, 52.31)	(147.26, 52.31)	0.61
(116.17, 137.46)	(116.17, 138.69)	1.23	(143.60, 43.06)	(142.38, 44.29)	1.73
(128.97, 132.52)	(128.97, 133.14)	0.62	(136.29, 36.27)	(134.46, 36.27)	1.83
(137.50, 125.73)	(136.9, 126.35)	0.86	(124.10, 29.49)	(124.10, 30.10)	0.61
(143.60, 120.80)	(143.60, 120.18)	0.62	(113.73, 25.78)	(114.34, 25.78)	0.61
(150.3, 111.54)	(149.7, 111.54)	0.60	(98.50, 22.08)	(98.49, 22.08)	0.01
(154.57, 101.05)	(154.57, 99.82)	1.23	(87.52, 23.32)	(88.74, 23.32)	1.22
(156.40, 91.18)	(158.23, 90.57)	1.92	(69.24, 30.10)	(69.85, 29.49)	0.86
(157.62, 81.93)	(157.62, 81.31)	0.62	(60.10, 37.51)	(60.70, 37.51)	0.60
(155.79, 73.29)	(158.23, 72.06)	2.73	(50.34, 47.38)	(50.95, 46.76)	0.87
(152.13, 62.80)	(153.35, 63.42)	1.37			

- 1) 声速对温度变化敏感,当温度变化大时,需要进行温度补偿。当温度相差 10℃ 时,声速相差 6 m/s,3 m 的测量距离误差达到 5 cm,故在实验中采用温度补偿进行校正。
- 2) 在测量各定位基点坐标时可能存在测量误差。
- 3) 当测距误差为  $\varepsilon$  时,由式(1)得到定位误差达到  $\varepsilon_2$ 。
- 4) 系统硬件与软件的延时造成单片机计时的误差,实验通过线性拟合方程进行校正。

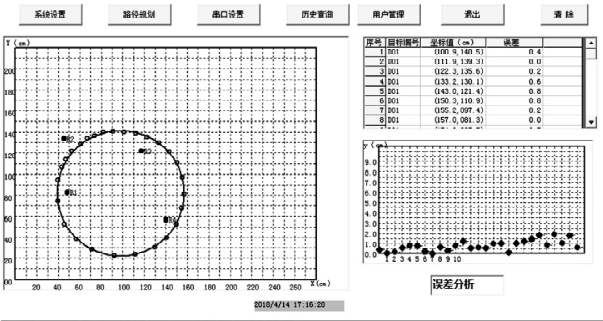


图 6 上位机界面

6 结束语

本文基于超声波测距原理,提出并实现了一种高精度室内定位方法,设计了实验系统结构、硬件与软件,完成了系统定位实验。通过对测距结果的线性拟合、温度补偿、偏差校正,使得定位精度由文献[1]中的 5 cm 提高到了 3 cm。本系统结构简单,易于实现,抗干扰能力强。实验结果表明,本文的方法具有较高的应用价值。

参考文献:

[1] 徐盛良,鲁照权,周永燕,等.基于超声波测距的室内定位系统[J].机械设计与制造工程,2017,46(11):112-116.

[2] ROEHR S, GULDEN P, SHMAKOV D, et al. Wireless local positioning-existing solutions and novel system concepts [C]//IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility, 2015.

[3] 代森.基于超声波室内定位系统的设计与实现[D].成都:西南交通大学,2017.

[4] SHI A, DUAN J, SUN X, et al. Impact of multipath effects on theoretical accuracy of TOA-based indoor VLC positioning system[J]. Photonics Research, 2015, 3(6): 296.

[5] 胡斌斌.基于 ZigBee 无线传感网络室内定位研究[D].南京:南京邮电大学,2017.

[6] 李娟,唐小超,葛立峰.基于 CC1101 射频技术的室内超声波定位系统[J].自动化与仪表,2009,24(6):1-4.

[7] 周先赞.基于超声波的室内导航定位方法研究[D].南昌:南昌大学,2016.

[8] 高峰,郑源明.超声波传感器测量声速与距离实验的研究[J].传感器与微系统,2009,28(11):68-70.

[9] 郭凯旋,卢彦霖,冯涛,等.基于智能切换算法的室内外无缝定位技术研究[J].传感器与微系统,2018,37(7):49-51.

[10] 孟崇,涂锦辉,申辉,等.基于 RFID 的室内智能导航系统[J].南开大学学报,2010,43(6):87-93.

[11] GUAN W, WU Y, WEN S, et al. Errata: High precision three-dimensional iterative indoor localization algorithm using code division multiple access modulation based on visible light communication[J]. Optical Engineering, 2016, 55(10): 106105.

作者简介:

谢 地(1993-)男,硕士研究生,研究方向为室内定位与导航。  
鲁照权(1962-)男,博士,教授,主要研究领域为复杂系统建模与控制。

(上接第 97 页)

量浓度小于 20 mg/100 mL 时,LED 灯熄灭、蜂鸣器不工作,继电器触点闭合,汽车正常启动;当酒精质量浓度大于 20 mg/100 mL,LED 灯红光闪烁、蜂鸣器鸣叫,继电器触点断开,禁止汽车启动。仿真结果表明,系统工作稳定、可靠性高、符合设计要求。

表 2 防酒驾系统测试结果

血液中酒精质量浓度	报警器状态	继电器及汽车启动系统状态
5 mg/100 ml	LED 灯灭、蜂鸣器停	触点闭合,汽车启动
10 mg/100 ml	LED 灯灭、蜂鸣器停	触点闭合,汽车启动
15 mg/100 ml	LED 灯灭、蜂鸣器停	触点闭合,汽车启动
25 mg/100 ml	LED 灯红闪、蜂鸣器鸣叫	触点断开,汽车不启动
30 mg/100 ml	LED 灯红闪、蜂鸣器鸣叫	触点断开,汽车不启动

5 结束语

本文设计了一种基于单片机的汽车防酒驾控制系统,采用 MQ-3 型气体传感器检测驾驶员呼气中酒精浓度;当检测到酒精浓度超标时,系统声光报警并通过继电器切断汽车启动系统,禁止汽车启动。测试结果表明:系统性能良好,功

能完善,操作简单,通用性强,具有广泛的推广应用价值。

参考文献:

[1] 张新龙.酒后驾车与交通事故的法医学探讨[J].道路交通,2007(12):60-61.

[2] 朱云凤,杨天平,陈丽娟.涉嫌酒驾 632 例血中乙醇含量及交通事故因素分析[J].交通医学,2013,27(2):160-161.

[3] 谭艳春,朱又敏.基于 STC89C52 多功能体育用计时器的仿真与设计[J].软件工程,2019,22(7):16-18.

[4] 段富海,孙丹,赵奎兵,等.呼气式酒精检测技术及其防醉驾应用的发展综述[J].中国仪器仪表,2012(9):47-52.

[5] 董亚男.基于 AT89S52 的多路数据采集系统的设计与实现[J].赤峰学院学报,2017,3(33):48-50.

[6] 施保华,赵娟.MSP430 单片机入门与提高[M].武汉:华中科技大学出版社,2016:118-122.

作者简介:

金韦利(1984-)女,硕士,讲师,研究方向为测控技术。  
张赞宁(1979-)女,通讯作者,博士,副教授,研究领域为网络控制理论、电力系统广域稳定控制、微电网运行优化与网络化控制。