

分类号_____

学号 M201672233

学校代码 10487

密级_____

华中科技大学

硕士学位论文

基于超声波与航迹推算 的扫地机器人室内定位方案

学位申请人： 黄胜林

学科专业： 软件工程

指导教师： 邹志革 副教授

答辩日期： 2019.1.16

**A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering**

**Indoor Positioning Scheme of Sweeping Robot
Based on Ultrasonic and Track Estimation**

**Candidate : Huang Shenglin
Major : Software Engineering
Supervisor : Assoc. Prof. Zou Zhige**

**Huazhong University of Science & Technology
Wuhan 430074, P. R. China**

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本论文属于 ☐ 保密， 在_____年解密后适用本授权书。
☐ 不保密。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

摘要

扫地机器人在智能清扫过程中,首先要确定机器人的当前位置。近年来,随着扫地机器人的广泛应用,扫地机器人的室内定位也成为热门话题。目前的扫地机器人的室内定位常采用:激光测距定位系统、视觉导航定位系统。尽管激光测距精度高,但成本与维修费用过高;而视觉导航定位对参照物要求极高,参照物过于模糊会严重影响定位精度。

为了解决以上问题,本文首先分析了常见室内定位方案的原理、成本、精确度等,通过对比几何测量法、航迹推算法、指纹匹配法等定位方案的优缺点,以低成本、高精度为目标,提出一套适用于扫地机器人室内定位的方案,该方案将超声波定位与航迹推算定位相结合,取长补短。当环境复杂导致基于 TOA 的超声波定位无法有效工作时,采用基于编码器、陀螺仪的航迹推算进行室内定位;当超声波定位有效时,通过超声波定位对航迹推算定位的结果进行修正,从而减小航迹推算中的累计误差。在航迹推算中,通过卡尔曼滤波与四元数分析对编码器、陀螺仪的数据进行处理,得到扫地机器人的位移信息,再根据上一时刻扫地机器人的坐标,得到当前时刻的坐标;在超声波定位中,采用超声波发射端与接收端分体式设计,根据扫地机器人与基站的距离计算出扫地机器人的坐标。

为了验证本方案的可行性,在本实验室搭建出扫地机器人的软硬件测试平台。在实际测试中,提取多组数据,通过分析实验数据,证明了此融合定位系统可长时间稳定工作,测试中最大误差为 24.7cm,且定位系统的硬件成本可控制在 100 元内。

关键词: 超声波定位 航迹推算 多传感器融合 扫地机器人

Abstract

The priority is to determine the current position of the sweeping robot in the intelligent cleaning process. In recent years, the indoor positioning of the sweeping robot has also become a hot topic with the increasing demand of it. At present, the laser ranging and visual navigation positioning systems are usually adopted in the indoor positioning of the sweeping robot. The laser ranging is able to locate accurately at the cost of high expense and maintenance fee. The visual navigation positioning system has an extreme high demand for the reference objects, and the positioning accuracy will be seriously reduced if the reference object is too fuzzy.

In order to solve the above problems, this paper first analyzes the principle, cost and accuracy of the common indoor positioning schemes. With the target of low cost and high precision, the indoor positioning scheme suitable for the sweeping robot is proposed through comparing the advantages and disadvantages of the positioning schemes such as geometric measurement method, track estimation algorithm and fingerprint matching method. This scheme combines ultrasonic positioning with track estimation, making advantage of and complementing each other. When the environment is complicated and the TOA-based ultrasonic positioning cannot work effectively, the track estimation based on the encoder and the gyroscope is used for indoor positioning. When the ultrasonic positioning is effective, the track estimation result is corrected by ultrasonic positioning, thereby the cumulative error of the track estimation is reduced. In the track estimation, the data of the encoder and the gyroscope are processed by Kalman filter and quaternion analysis to obtain the displacement information of the sweeping robot, and then the coordinates of the current time are obtained according to the coordinates of the sweeping robot at the previous moment; In the ultrasonic positioning, the ultrasonic transmitting end and the receiving end are separately designed, and the node coordinates of the cleaning robot are calculated according to the distance between the cleaning robot and the base station.

In order to verify the feasibility of this scheme, the software and hardware test platform of the sweeping robot is built in this laboratory. In the actual test, multiple sets of data were extracted, and the experimental data was analyzed to prove that this fusion positioning system can work for a long time, and the maximum error in the test is 24.7cm, and the hardware cost of the positioning system can be controlled within 100 yuan.

Key words: Ultrasonic positioning Track estimation
Multi-sensor fusion Sweeping robot

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
1 绪论	
1.1 研究背景与意义	(1)
1.2 国内外发展现状	(2)
1.3 研究内容与章节安排	(5)
2 室内定位技术研究	
2.1 引言.....	(7)
2.2 几何测量法.....	(7)
2.3 航迹推算法.....	(11)
2.4 指纹匹配法.....	(12)
2.5 本章小结.....	(13)
3 超声波与航迹推算融合定位算法分析	
3.1 定位方案设计.....	(14)
3.2 超声波室内定位	(19)
3.3 编码器-陀螺仪-加速度计航迹推算.....	(24)
3.4 融合算法分析.....	(30)
3.4 本章小结.....	(31)
4 整体平台的搭建与测试	
4.1 实验平台.....	(32)
4.2 软件流程.....	(40)
4.3 实验与分析.....	(41)

4.4 本章小结.....	(49)
5 总结与展望	
5.1 全文总结.....	(50)
5.2 未来展望.....	(51)
致 谢.....	(52)
参考文献.....	(53)

1 绪论

1.1 研究背景与意义

近年来,随着智能家居的普及以及移动机器人的发展,扫地机器人^[1]的市场需求愈发明显,人们对其智能化的要求也越来越高。

在最早的扫地机器人中,主要通过周围红外传感器探测进行避障,采取弓字型、沿边模式、重点清扫等路径规划。存在着重复清扫、覆盖率低等问题,严重影响用户体验。

扫地机的智能清扫过程可以分为如下几个步骤:“在哪里”、“去哪里”、“怎么走”、“怎么躲”、“存地图”。因此要实现智能化清扫,首先要通过室内定位解决“在哪里”这个问题。

目前对于扫地机器人室内定位,会采用各种各样的感知传感器。例如相机、红外传感器、超声波传感器、激光雷达^[2]、里程计、陀螺仪^[3]、加速度计等。其中,相机、红外传感器、超声波传感器、激光雷达定位技术是通过传感器感知扫地机器人所处的外部环境,从而判断出扫地机器人在所处环境中的位置。而安装在扫地机器人上的陀螺仪、加速度计、编码器是用于感知机器人自身的运动,推断出扫地机器人的角度、距离信息,然后通过扫地机器人上个时间段所处的室内位置,推算出此阶段机器人所处位置。

在扫地机器人室内定位中,不同的定位原理、不同的传感器搭配,会产生不同效果的定位方案。例如扫地机器人向上拍摄天花板图像,通过对比天花板图像偏差实现定位,此定位方案中天花板的特征信息模糊将会严重影响定位精度,且算法复杂度高,对机器硬件要求高。也有通过激光探头 360° 不停的旋转,测量出扫地机器人与环境的距离,从而得到机器人的相对信息,根据已知的位置坐标,得到绝对坐标。但激光探头价格昂贵,且不断旋转会严重影响寿命。

针对目前定位方案中存在的问题,本文提出一种超声波与航迹推算^[4]融合定位系统。此方案高精度、低成本、对环境依赖程度低,对扫地机器人的智能化有着重大意

义。

1.2 国内外发展现状

扫地机器人是一种能自主移动、智能扫地、自动回充电的机器人，最早出现于欧美等发达国家，于 2010 年左右进入我国市场。相比于这些发达国家，中国在扫地机器人上的技术积累较少，起步较晚，目前仍处于高速发展阶段，扫地机器人有望成为继吸尘器之后又一个家电爆品。随着科技水平的提高、国内消费水平的提高以及智能家居的普及，扫地机器人的市场需求量巨大，2017 年国内扫地机器人销售量近 400 万台，销售额高达 56.7 亿。2018 年国内扫地机器人销售量接近 500 万台。

1898 年，美国人约翰·瑟曼圣易路斯申请了关于地毯吸尘器的专利(US No.634042)，这是扫地机器人的雏形，它通过压缩空气将灰尘吹走。直到 1901 年，英国人布斯对其进行了改良，通过电动抽风机，使内部气压低于外界气压，从而达到吸尘的目的，将灰尘吸入到机器内部容器内。

1996 年，瑞典伊莱克斯公司生产出第一款扫地机器人“三叶草”，最初采用超声波避障，第二代加入红外传感器实现避障和防跌落。直到 2001 年才实现量产，但价格非常昂贵。

目前市场上热门的扫地机品牌有：iRobot、斐纳 TOMEFON、Proscenic、科沃斯、福玛特、飞利浦、松下、戴森、海尔、小米等。

iRobot 是由麻省理工大学的机器人科学家创立，第一款 iRobot 扫地机 Roomba 系列于 2012 年 9 月推出。



图1-1 Roomba扫地机器人视觉定位

这款扫地机在边刷与吸尘口间增加了一个 V 字型滚刷，比起真空吸尘口，滚刷的高速旋转使得清扫能力极大提升。目前已推出 Roomba9 系，如图 1-1 所示，Roomba980 零售价接近万元，主要面向高端市场。不仅增加了断点续航、10 倍吸力模式、虚拟墙、WiFi 互联等功能，可极大程度的增加用户体验，还加入了 VSLAM^[5] 视觉运算处理技术，让扫地机器人可根据环境绘制出室内实时地图，从而实现全景规划导航，扫地机器人可根据已清洁和未清洁区域，实现更加便利的清洁。

SLAM 也叫同步定位与地图构建，发展到如今已经几十年。主要是通过传感器的收集信息，在计算自身位置坐标时，同时构建环境地图，从而解决在未知环境下运动时的定位与地图构建问题。与 SLAM 相比，VSLAM^[5] 则更加高级，主要是基于视觉的同步定位与地图构建，中文也叫视觉 SLAM，相当于设备装上眼睛，通过眼睛来完成定位和扫描，更加精准和迅速。参差不齐的 SLAM 技术有很多，比如一微半导体的 SLAM 和 VSLAM 方案已被陆续运用在各种机器人产品上，此方案有着配套的 SDK 开发平台，方便进行二次开发。VSLAM 的技术框架主要包括：传感器数据预处理、前端（视觉里程计）、后端（非线性优化）、回环检测、地图构建，如图 1-2 所示。

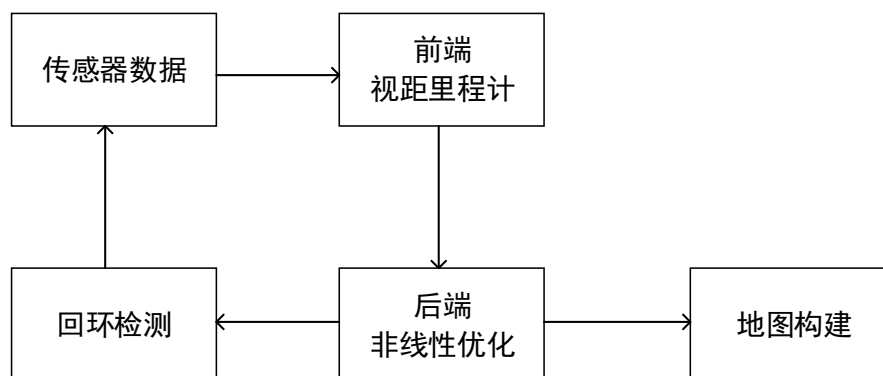


图1-2 VSLAM技术框架

VSLAM 的使用非常广泛，但也有着其缺点，比如：目标运动过快和光线过暗都可导致图像模糊，且环境特征不明显或者特征重复也会影响其工作。

科沃斯作为国内最早的扫地机器人研发与生产厂商之一，在智能扫地机器人领域发力较早。2008 年 10 月，推出公司第一款扫地机器人地宝 7 系。至今十余年，推出多款扫地机器人，广受消费者熟知和喜爱。其智能扫地机器人功能齐全，价格合理，

主要面向中低端市场，并得到相当不错的销量。经过 10 余年的发展，科沃斯扫地机器人从最初的“横冲直撞”的随机式清扫，到利用定位导航技术更有规律的规划清扫，清扫效率大幅提升，有效降低机器损耗，使用寿命延长。其最新推出的扫地机器人 DN55,采用 LDS 激光雷达导航^[6]。如图 1-3 所示，主要依靠该产品正面突出的圆柱部分，也就是外置的 LDS 激光测距传感器，通过测得的距离配合 SLAM 人工智能算法，扫地机器人可以实现定位同时构建地图。不过 LDS 传感器的造价较高，且不断旋转会严重影响寿命。



图1-3 科沃斯DN55扫地机器人

小米在国内品牌知名度极高，小米作为互联网品牌的新星。从最初的小米手机，将业务逐步拓展到其他领域，推出了平衡车、空气净化器、小米智能手环等科技产品。2016 年 9 月，小米推出了首款米家扫地机器人，采用了非常简洁的外观设计，可以通过透明灰尘盒直接看清内部情况。如图 1-4 所示，定位方式同样是采用激光雷达测距方案。



图1-4 米家扫地机器人

可以看出，为了提升用户体验，扫地机器人已经从最初的横冲直撞发展到通过室

内定位实现规划清扫,使其更加智能化。而目前常用的市场上采用的定位方式,主要是通过视觉定位或者激光雷达定位,然后配合 SLAM 人工智能算法,实时构建地图。虽然视距定位和激光雷达定位精度较高,但是都存在着成本较高的问题,且视觉定位需要光照环境好环境对比度高,激光雷达探头易损坏。基于此目的,本文采用低成本的超声波定位与航迹推算定位融合,然后搭建出扫地机器人平台,对定位精度进行测试与分析,同时降低了硬件成本。

1.3 研究内容与章节安排

对于室内扫地机器人,实现一套精度高、覆盖范围广、可靠性高、成本低、环境动态性强、环境适应能力强的室内定位系统,是一个具有挑战的事情。本文从多种传感器,多种方法融合的角度去解决此问题。提出了一套基于扫地机器人的超声波与航迹推算融合的室内定位方案,在不影响精度的情况下,极大程度的降低硬件成本。

根据本文内容,可分为五章,按如下结构组织:

第 1 章 作为本论文的绪论,首先是介绍了本论文的研究背景与意义,简要说明了扫地机器人的市场需求以及室内定位对扫地机器人智能化的重要性,然后研究了目前国内外市场上主流扫地机器人的定位方案。根据目前的研究现状的不足,主要针对成本问题,所以亟需提出一种低成本高精度的室内定位系统。

第 2 章 按照位置估计方法,将室内定位方案分为三大类:几何测量法、航迹推算、指纹匹配法。分别介绍了 TOA、TDOA、RSSI、AOA 等室内几何测量法,航迹推算以及指纹匹配法的基本原理。

第 3 章 对比常用的定位方案,针对成本、精度等问题,提出本论文的基于扫地机器人的超声波与航迹推算融合室内定位方案,简要介绍本论文的定位方案。重点介绍了超声波定位原理,指出其优点与不足。然后分析航迹推算中需要用到的四元数分析、旋转矩阵、卡尔曼滤波等,对比四元数和旋转矩阵,采用了四元数分析。最后介绍了本文中数据融合方法。

第 4 章 介绍本论文的整体平台硬件设计方案和软件架构。基于此平台,将超声波定位与航迹推算定位的融合定位的测试结果,通过无线串口显示在计算机上,进行

分析。从而证明了本超声波与航迹推算融合定位方案的可行性。

第 5 章 为全文的工作总结以及对未来的展望。主要是对本论文所做工作进行系统性的总结，对其中的不足的部分，提出改进方案。

2 室内定位技术研究

2.1 引言

目前室外定位,主要以卫星定位为主,基本上没有其他技术手段可与其竞争。而室内定位由于环境复杂,有着行人、桌椅、墙壁等各种障碍物,并且这些障碍物还会随着更换位置,还有着温度、声音、灯光等各种干扰源。所以室内定位较复杂且定位技术众多,且每种定位技术都存在着各自的局限性。

如果按照位置估计方法,室内定位技术可以分为三类:几何测量法、航迹推算法、指纹匹配法。本章将简要介绍这三类定位方案的原理以及优缺点,从而选取出适合本扫地机的定位方案。

2.2 几何测量法

几何求解定位法基本原理:通过某种方法,先测量出扫地机器人与基站(信标节点)间的距离,然后通过几何关系和公理,求出扫地机在空间中的具体坐标。在具体的室内定位系统中,主要是通过接收信号强度(RSSI)^[7]、信号到达时间(TOA)^[8]、信号到达时间差(TDOA)^[9]等来得到距离信息,或者通过到达角度法(AOA)^[10]得到角度信息,然后通过空间几何知识求解定位。

2.2.1 基于 TOA 定位方法

TOA (time of arrival) 是一种很常见的射频测距方法,这种基于射频测距方法的室内定位有着实时性高、成本低等优点。TOA 是先测量信号传输的时间,根据公式 $S = VT$,从而可以得出发送方和接收方之间的距离。所以在测距过程中传输信道的状态对 TOA 的精度有着很大的影响。因此,在室内定位中,严重的多径和非视距现象都会对定位系统的精度产生较大的影响。

S Bartoletti 与 W Dai^[11]等人提出了针对宽带信道的 TOA 测距数学模型。Sharp I 与 Yu K^[12]提出了一个适用范围更广的 TOA 误差模型,主要是针对非线性误差与信

号检测引起的误差。通过调整参数, Sharp I 与 Yu K^[12]提出的 TOA 误差模型还可用于窄带信号与宽带 UWB 信号。

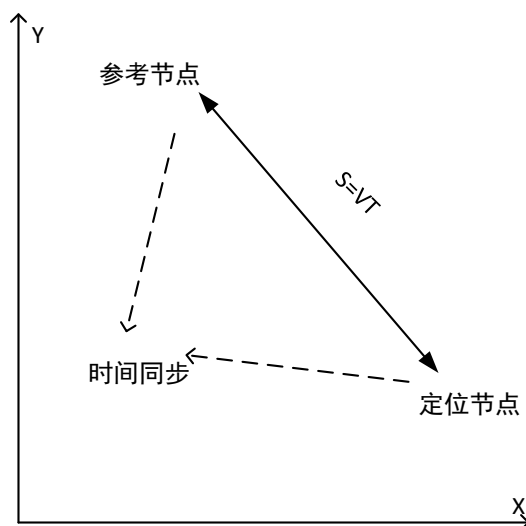


图2-1 TOA法测距原理

根据公式 $S=VT$, 如果知道信号传播速度 V 与传播时间 T , 可得到扫地机器人与基站间的距离 S , 如图 2-1 所示。TOA 测距中, 要求测得信号的绝对传播时间, 因此扫地机器人与基站间必须有着精确的同步时钟, 否则微秒级的时间误差也可能导致比较大的距离误差。

2.2.2 基于 TDOA 定位方法

TDOA (Time Difference Of Arrival) 定位方法又称为双曲线法。此方法通过测量扫地机器人与基站间信号传输的时间差, 然后根据公式 $\Delta s = v\Delta t$, 得出扫地机器人到两基站的距离差。在蜂窝网络中, 此方法比较常用, 移动终端同时向多个基站发送信号, 每个基站均记下信号到达的时间, 从而可以算得信号到达任意两个基站的时间差, 然后根据时间差得到双曲线方程组。通过三个或者多个基站测得的时间差可以得到两条以上的双曲线, 通过双曲线的相交点从而实现对定位目标的位置确定, 如图 2-2 所示。

由于 TDOA 定位系统只用知晓信号在定位目标与各基站间的传播时间差, 因此对比 TOA, 不需要基站与定位目标间的时钟同步, 提高了定位精度, 但算法的复杂

度更高。

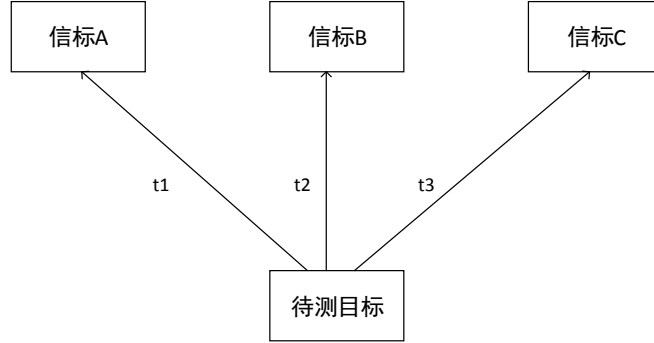


图2-2 TDOA法测距原理

A、B、C 分别为三个已知坐标位置的信标节点，坐标位置如上图所示。假设扫地机器人的坐标为 (x, y) ，从扫地机器人发出信号，到 A、B 收到信号的时间差为 Δt_1 ，其中 c 为传播速度，则有如下方程式：

$$\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} = \Delta t_1 \cdot c \quad (2-1)$$

同理可得：

$$\sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} = \Delta t_2 \cdot c \quad (2-2)$$

$$\sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} - \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} = \Delta t_3 \cdot c \quad (2-3)$$

从而可得到扫地机器人的坐标 (x, y)

2.2.3 基于 RSSI 定位方法

在信号的传播过程中，接收到的信号强度会随着传播距离的增加而逐渐衰减，从而可以根据信号强度得到距离信息。基于 RSSI 的信道模型就是利用此原理来进行测距。根据无线信号强度与距离之间的传播模型，得到距离信息，再用几何法得到定位目标的位置，因此传播模型的可靠性对 RSSI 方案的精确度有着极大的影响。但是由于在室内定位中，房间中的生物、墙壁、桌椅等障碍物都会对传播信号产生影响，使得模型具有很大的波动性，导致室内传播模型多种多样。通常假设接收信号强度服从正态分布，在此情况下，我们可以采用窄带信号的路径损耗对数模型：

$$P_1(d_1) = P_0(d_0) - n10\lg\left(\frac{d_1}{d_0}\right) + X \quad (2-4)$$

其中 $P_1(d_1)$ 表示距离 d_1 处的信号强度， $P_0(d_0)$ 表示距离 d_0 处的信号强度； n 表示路径损耗参数， X 是服从正态分布的随机变量。常见的 RSSI 定位系统多采用蓝牙、WiFi、Zigbee 等媒介，但定位精度有限。

如何提高 RSSI 定位精度，很多学者曾做过大量学术研究。在 IEEE 802.15.4a 标准中，曾给出了 2-10GHz、100-1000MHz 的路径损耗模型和几种室内环境中的损耗模型参数值，具有重大的参考意义。

2.2.4 基于 AOA 定位方法

基于信号到达角度（AOA）是一种常见的利用无线传感器的定位方法，具有着算法通信开销低、定位精度不错等优点，是一种典型的几何测距方法。通过感知目标物体与不同基站信号的到达方向，从而估算出目标物体的位置坐标。通常需要采用阵列天线来实现，如图 2-3 所示，两个方向的直线交点都是待测目标 X 的位置坐标 (x, y) 。

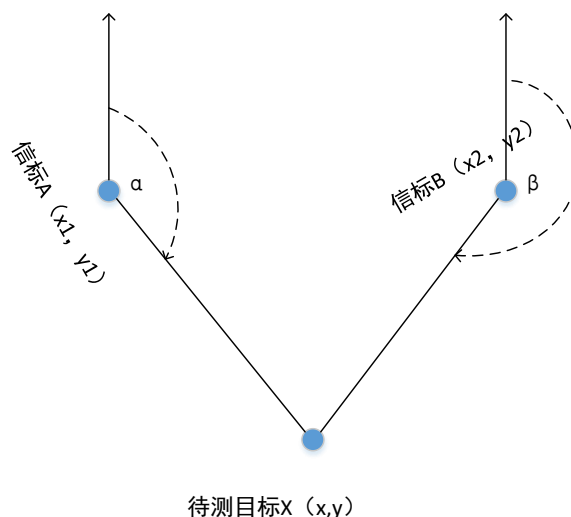


图2-3 AOA测距原理

图 2-3 中，信标 A(x_1, y_1)、信标 B(x_2, y_2)，发射角分别为 α 、 β 。

著名的硬件厂商德州仪器已经推出了 AOA 算法包，在最新的 CC2640R2F 蓝牙协议栈(simplelink_cc2640r2_sdk_2_20)中，根据 SDK 的说明文档，可以看到德州仪器软件包可以直接提供 API 接口，接收机可以直接计算出 θ 角，而且还提供了完整

的天线阵列的评估套件，配合 CC2640R2 官方开发板，即可调试室内定位方案。

2.3 航迹推算法

航迹推算利用编码器、陀螺仪、加速度计等惯性测量设备，获得待测目标的惯性数据，然后根据上一时刻的位置条件，从而确定出此时扫地机器人的位置信息。由于航迹推算法采用积分的过程，所以在短距离短时间内，航迹推算的精度较为可靠。随着时间和距离的增加，航迹推算的累计误差会越来越大。在航迹推算中，常常采用卡尔曼滤波^[13]、互补滤波^[14]等方法尽量减小加速度、角速度中的噪声。

角度信息通常通过陀螺仪测得。陀螺仪测得角速度信息，在测量过程中，陀螺仪容易产生漂移，从而影响测量精度。同时，航迹推算具有自主性高、受外界因素影响小等特点。由于航迹推算是根据上一时刻推算当前时刻的位置与姿态，所以存在着零点漂移和累计误差等问题。

由于室内环境较平坦，可以认为正常情况下扫地机器人机身高度固定，在室内平稳前行。因此翻滚角与仰俯角可以一直认为为零，不做考虑。所以本文只需考虑平面上的航迹推算。所以只需建立平面坐标系，室内机器人航迹推算模型图如图 2-4 所示。

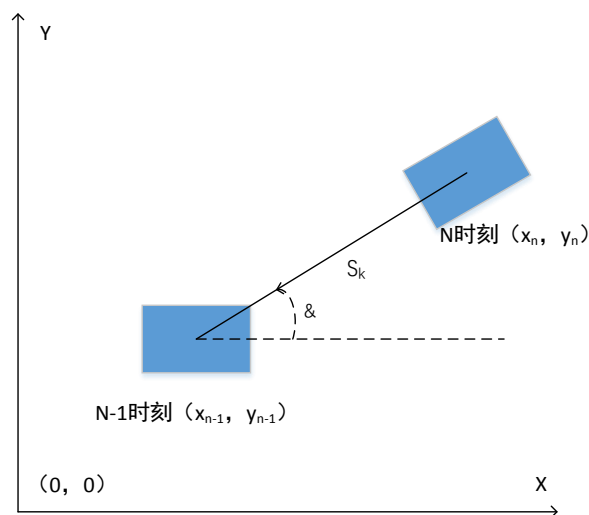


图 2-4 扫地机航迹推算模型图

假设编码器高低电平变化一次，对应扫地机器人行驶步长为 L ，通过计数器可以

得到单位时间内，编码器高低电平变化次数为 N_k ，则在时间 T 内，扫地机器人行驶距离为 S_k ，可得：

$$S_k = N_k L \quad (2-5)$$

通过陀螺仪测得时间 T 内，航向角变化为 α ，则扫地机器人的当前位置信息为：

$$x_n = x_{n-1} + S_k \sin \alpha \quad (2-6)$$

$$y_n = y_{n-1} + S_k \cos \alpha \quad (2-7)$$

2.4 指纹匹配法

指纹匹配法^[15]是提取环境中“位置指纹”，“位置指纹”是将环境中的“指纹”与环境中的位置对应起来。指纹匹配法需要建立信号强度-位置的数据库，因此需要提前得到不同位置的各基站的信号强度。然后通过采集定位目标的信号强度，与数据库中的信号强度进行匹配，从而得出待测目标的坐标位置。这种方法叫做“指纹匹配法”。在将测量出的信号强度(RSS)与数据库进行匹配时，通常采用 k-近邻法^[16]来估算目标位置。

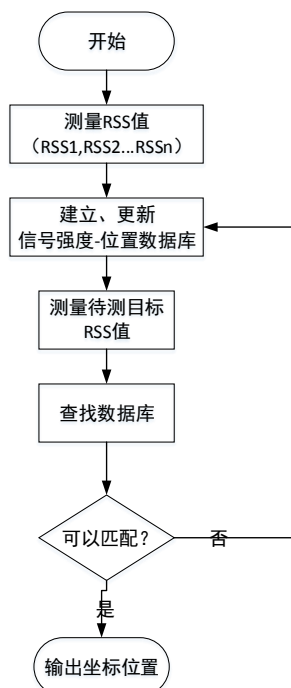


图2-5 指纹匹配法原理图

指纹匹配法的原理如图 2-5 所示。指纹匹配法需要人工采集建立信号强度-位置数据库，过程较复杂。并且随着室内环境的变化，数据库需要重新维护，长期使用的成本较高且过程较为复杂。

2.5 本章小结

本章按照位置估计方法，室内定位技术可以分为三类：几何测量法、航迹推算法、指纹匹配法。分别简要介绍了基于 TOA、TDOA、RSSI、AOA 的几何测量法、航迹推算法、指纹匹配法的原理。

3 超声波与航迹推算融合定位算法设计

在对常用的室内定位技术做出简要研究后，每种定位方式都存在着各自的优缺点，选取何种定位方式应用于本文中的扫地机器人，是一个亟需解决的问题。本章从便于安装、对环境适用性强、成本低、精度高等性能指标设计出一套超声波与航迹推算融合定位方案。并以此为基础来开始融合定位中所用的软件算法研究。

3.1 定位方案设计

对于扫地机器人工作的室内环境而言，室内环境复杂，障碍物多种多样，扫地机器人采用圆形设计是最佳选择，圆形可以尽量避免自身和家具的损坏，市面上常见的扫地机器人也均采用圆形形状。本论文中的扫地机器人平台也采用圆形形状的设计。

在驱动设计上，采用“三轮车”设计结构，即一个万向前轮、两个驱动后轮。驱动后轮均采用直流电机进行驱动。这样的整体设计可以保证转向的灵活性和整体机身的稳定性。

为了进一步提升用户的体验，扫地机器人一般还会有自动回充电系统和虚拟墙功能。当工作完成时，自动返回充电；当电量不足时，也会自动返回充电。对于某些区域，容易使扫地机器人卡住或者有跌落风险，可以采用虚拟墙，一键进行隔离。同时，虚拟墙和充电桩作为智能扫地机器人的必需装置，也可以作为两个信标进行使用。

3.1.1 常见定位方案算法对比

本节将定位方式分为：接收信号强度、信号到达时间、信号到达时间差、角度测量法、航迹推算法、指纹法、附近定位技术、环境特征提取、视觉定位。从精度、成本、算法实现难易度（对 MCU 的性能要求）、安装所需特殊装备进行对比，得出对比表，如表 3-1 所示。

表 3-1 常见定位方案算法对比表

算法	精度	成本	算法实现难易度	特殊设备	结论
接收信号强度	低	低	信号强度与传播距离模型的影响因素太多	无	室内中的人、墙壁、桌椅对无线信号产生影响，导致室内信号衰减模型多种多样，不适用于扫地机器人
信号到达时间	高	低	较容易实现	无	发射管、接收管需要时钟同步，否则误差较大，但时钟同步较容易实现，只需两个发射端
信号到达时间差	高	低	较容易实现	无	只需测传播的相对时间，比通过测信号到达时间的定位方法精度高
角度测量法	高	高	较容易实现	阵列天线	阵列天线价格过高且装置过大，不适用于扫地机器人
航迹推算法	低	低	较容易实现	无	短距离内定位精度较高，但随着距离增加，累计误差太大，可用于辅助定位
指纹法	高	高	信号强度坐标与位置坐标的模型构造太过复杂	多组传感器	与通过信号强度判断距离类似。将一组传感器改为多组，通过多组信号强度判断位置坐标，精度可提高，但所需发射端太多
附近定位技术	低	低	较容易实现	基站	通过附近基站判断位置区域，只能判断出大致区域，精度过低，且参考基站要选择固定基站。
视觉定位	高	高	算法较复杂，需要对图像或者视频进行处理	CCD 摄像头	如果采取对视频中相邻帧的图像进行处理判断，可得到比较精确的定位，但运算量大，设备要求较。

从精度方面考虑，附近定位技术精度太低、航迹推算法累积误差太大。所以附近定位法不做考虑，但航迹推算法仅需要编码器、陀螺仪、角加速度计就可以完成，所以可用于本系统的辅助定位。

从算法复杂度考虑，指纹法、视觉定位算法过于复杂，算法复杂度过高对 MCU 的要求会更高，算法实现也较困难，不适合用于室内扫地机器人定位。

从特殊设备和价格考虑，角度测量法需要阵列天线，不便于安装。，视觉定位需要 CCD 摄像头且对环境的差异性要求高，所以不能作为本文考虑的室内定位。

因此可选择通过信号到达时间或者信号到达时间差来进行定位，配合航迹推算法室内定位。信号到达时间定位在室内机器人中只需要 2 个发射端，而信号到达时间差定位需要 3 个发射端，在精度上差别不大。选择几何定位的方案比较适合扫地机器人，并且为了减少定位成本和方便安装，在几何定位的三个参考点上可以减少为两个。这样就必须采用到达时间法来测量距离。

3.1.2 常见定位方案载体对比

本节将定位方案载体分为激光雷达、射频^[17]、红外传感器、超声波传感器、ZigBee、蓝牙^[18]、WiFi、图像识别、编码器与陀螺仪与加速度计^[19]、地磁计^[20]。从算法、价格、优缺点对比，得出对比表，如表 3-2 所示。

表 3-2 定位方案载体对比表

实现技术	一般算法	价格（近似）	优点	缺点
激光雷达	到达时间测距	几百-几千	测距非常准确 只需单独的探测器	价格昂贵
射频	信号强度测距	射 频 读 卡 器 (¥20*N)	精度高，响应快	射频信号容易受干扰， 强度测量较大误差
红外传感器	信号强度测距	需较多接收模块 (¥3*N)	响应快，电路简单	距离有限： 5-60cm，角度小
超声传感器	信号到达时间	¥4*N	传播速度慢，MCU 可以及时处理，距 离远	功率大，声速受温度影 响
ZigBee	信号强度传播模型	¥35*N（家用较 少）	低功耗，短距离通 信	传播模型复杂 数据处理复杂
蓝牙	信号强度传播模型或者 指纹法	¥16*N	功耗低	传播模型复杂
WiFi	信号强度指 纹法	¥12.5*N	家用较多可以直接 检测相关区域的强 度	指纹法运算量很大，室 内传播信号变化大，不 稳定
图像识别	识别提取环 境特征点	几百-几千	准确度高，可以做 到智能化	图像处理的运算量非 常大
编码器、陀螺 仪、加速度计	航迹推算	扫地机固有	短距离准确度高， 安装使用方便	长距离使用累积误差 很大
地磁计	指纹法	¥30	器件使用少	误差很大

由于在定位方法上选择了通过信号到达时间来进行定位，而超声波速度最慢，所

以相同误差时间上,选择超声波精度最高。而超声波价格适中,在可接受的范围内。

虽然超声波功率高,但超声波是通过灯塔或者充电桩等其他设备进行发射,对扫地机器人的续航能力没太大影响。

但是到达时间的测量存在时间误差,如何减少这个误差是这个方案的最大问题。采取高精度的晶振是一种解决方案,但是成本过高,故可通过通信来进行时间“伪同步”。

为此,我们提出了基于建立无线通信基础上的到达时间超声波定位技术^[21]。

3.1.3 采用方案

可以将整体方案分为三部分:数据采集、数据处理与坐标信息获取,如图 3-1。

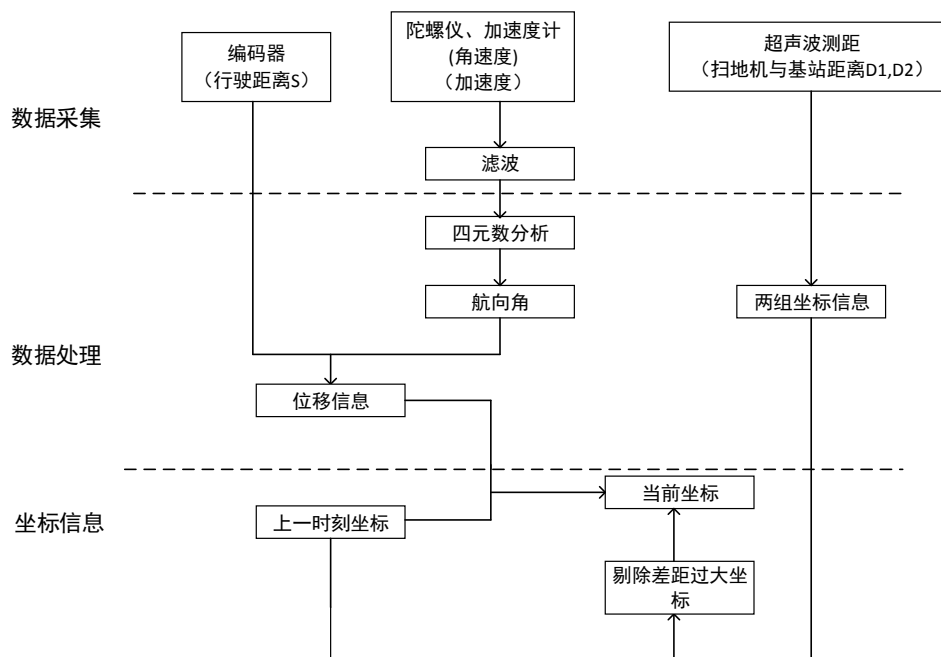


图3-1 整体方案框图

在数据采集部分,通过编码器获取扫地机的行驶距离,陀螺仪、加速度计获取角速度与加速度数据,超声波测距得到扫地机与基站间的距离。数据处理部分,将加速度与角速度信息转换为航向角^[22],配合行驶距离,得到扫地机的相对位移信息,再根据上一时刻坐标,推算出当前坐标。通过超声波测距得到扫地机器人与基站的距离信息,从而得到两组扫地机器人的超声波定位坐标,根据航迹推算坐标信息剔除差距

过大的超声波坐标，从而对当前坐标进行更新。

在有超声定位的环境下采用超声定位，而进入到无超声定位的环境采用航迹推算的模式，再次进入有超声定位的区域时，对航迹推算的结果进行修正。有超声信号进行定位的方式如图 3-2 所示。

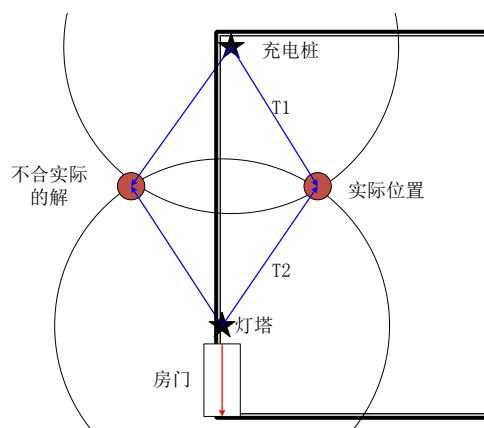


图3-2 超声波定位系统中坐标获取方式

通过测量信号从充电桩到达扫地机的时间，可以计算出扫地机与充电桩（灯塔）的距离：

$$\begin{cases} (x_1 - x_\epsilon)^2 + (y_1 - y_\epsilon)^2 = r_1^2 \\ (x_2 - x_\epsilon)^2 + (y_2 - y_\epsilon)^2 = r_2^2 \end{cases} \quad (3-1)$$

其中， (x_i, y_i) 为参考节点（灯塔、充电桩）坐标（其中 $i=1, 2$ ）；而 (x_ϵ, y_ϵ) 为扫地机器人的坐标。

但是由于只有两个参考节点，会得到两个解，其中一个为不合实际的解。假设摆放方案为图 3-2 所示：定位参考点未按照推荐的摆放，会出现两个解。但是在预先知道初始位置的条件下，扫地机器人的坐标变化是渐变的，也可以根据上一时刻的坐标排除不合理的解，从而得到唯一解。

3.2 超声波室内定位

3.2.2 超声波测距原理

超声波测距^[23]作为一种非接触式的测距方法，有着成本低廉、结构简单、精度

高、稳定性好、布置方便等优点,应用广泛,如用于车辆防碰、移动机器人室内定位、自主避障等。

目前的超声波测距有利用到达时间法(time of arrival, TOA)的,即检测超声波从发射端到接收端所需时间 t , 然后根据当前温度等环境条件下超声波的速度 v , 从而根据公式 3-2 计算出两者间的距离 s :

$$s = v \cdot t \quad (3-2)$$

在图 3-3 中,超声波传感器系统采用自发自收的方式,从而根据公式 3-3 计算出目标到障碍物的距离 s :

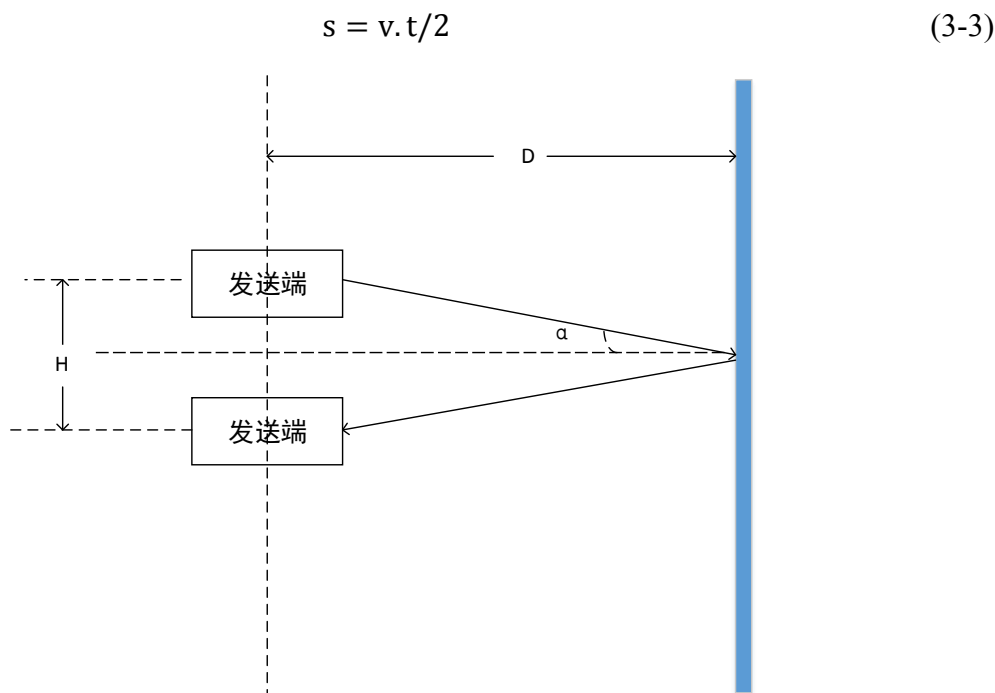


图3-3 自发自收超声波示意图

由于在自发自收超声波系统中,测量的为扫地机器人到前方障碍物的距离,而障碍物位置坐标未知,无法得出扫地机器人绝对位置坐标。因此在本文中,将采用接收其他系统发射超声波的方式来实现超声波测距。进行时间同步后,通过测算超声波的传播时间来推算出扫地机器人与固定信标间的距离。

3.2.1 超声波物理特性

超声波是一种振动频率大于 20000HZ 的声波,可以在气体、液体、固体中传播。具有以下物理特性:

- (1) 超声波是由于物体的机械振动所产生的,属于机械波,因此具备着频率、波长、传播速度等物理量。
- (2) 超声波的频率高于 20000HZ,频率很高,波长较短,绕射现象小。
- (3) 超声波的传播速度与介质及温度有关,在气体、液体、固体中均可传播。在气体中传播最慢。
- (4) 超声波的传播有着方向性。
- (5) 外界光线以及电磁场对超声波的传播影响小,超声波与其他声波一样,会产生干涉、反射、叠加和共振现象,并在直播过程中有衰减。

3.2.3 节点坐标的获取

得到了扫地机器人与充电桩、虚拟墙等基站间的距离后,需要根据距离信息得到扫地机器人的具体未知坐标。常见的节点坐标获取的计算方式有:最小二乘法^[24]、三角质心法^[25],还有与三角质心法类似的加权质心法、加权三角质心法。本节简要介绍最小二乘法与三角质心法。

(1) 最小二乘法

最小二乘法其实也可以叫做最小平方法,是一种优化方法。最小二乘法的目标是求出误差的最小平方和,从而得出最优解。最小二乘法也是机器学习领域最有效的算法之一。在室内定位中,也常用最小二乘法来估算节点的位置坐标。假设扫地机器人的坐标位置未知,为 $S(x, y)$,扫地机器人到每一个信标(灯塔或者充电桩)的距离为 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$; 其中对应的信标坐标已知,分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)$, 可得方程组:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = S_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = S_2^2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = S_n^2 \end{cases} \quad (3-4)$$

从第一行开始，分别减去第 n 行，可得：

$$\begin{cases} x_1^2 - x_n^2 - 2(x_1 - x_n)x + y_1^2 - y_n^2 - 2(y_1 - y_n)y = S_1^2 - S_n^2 \\ x_2^2 - x_n^2 - 2(x_2 - x_n)x + y_2^2 - y_n^2 - 2(y_2 - y_n)y = S_2^2 - S_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 - 2(x_{n-1} - x_n)x + y_{n-1}^2 - y_n^2 - 2(y_{n-1} - y_n)y = S_{n-1}^2 - S_n^2 \end{cases} \quad (3-5)$$

可将上面方程组转换为：

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \dots & \dots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + S_n^2 - S_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + S_n^2 - S_{n-1}^2 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

$$AX = B \quad (3-9)$$

于是利用最小二乘法，可以得出扫地机器人坐标向量为：

$$\vec{X} = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (3-10)$$

(2) 三角质心法

在室内定位中，三角质心法比较容易实现，且非常容易理解。同样扫地机器人的坐标位置未知，为 $S(x, y)$ ，扫地机器人到每一个信标（灯塔或者充电桩）的距离为 S_1, S_2, S_3 ；其中对应的信标坐标已知，分别为 $P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2), P_3(x_3, y_3)$ 。分别以三个信标为 P_1, P_2, P_3 圆心，以与扫地机器人间的距离 S_1, S_2, S_3 为半径作圆，如图 3-4 所示。

由于实验误差导致三个圆不可能交于同一点，假设三个圆分别相交于 A、B、C 三点。在图 3-4 中，取三角形 ABC 的质心，即为扫地机器人的位置坐标(x, y)。

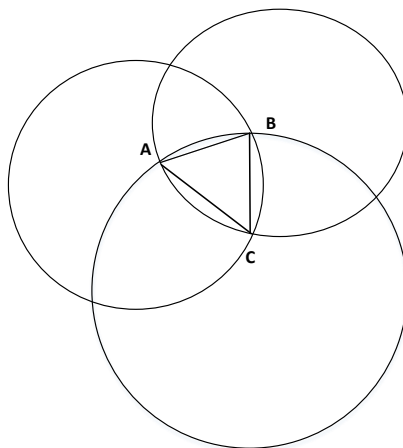


图3-4 三角质心法原理图

3.2.4 温度补偿

超声波的传播速度受介质的影响，同时，超声波传播速度也受温度的影响。为了使结果更加准确，在本系统中添加了超声波的温度补偿问题。在空气中，超声波的传播速度 c 与温度 T 有着如下的关系：

$$c = 331.45 + \sqrt{1 + T/273}(\text{m/s}) \quad (3-11)$$

其中 T 为环境摄氏温度 $^{\circ}\text{C}$ ，根据式 3-11，可以得到温度与声速的关系，如表 3-3 所示：

表 3-3 温度与声速关系表

温度 $^{\circ}\text{C}$	-30	-20	-10	0	10	20	30	100
超声波速度 m/s	313	319	325	332	338	344	349	386

可以看出，超声波的传播速度受温度影响较大，所以为了测量的准确性，我们需要添加温度传感器，从而计算出当前温度下超声波的传播速度。

3.3 编码器-陀螺仪-加速度计航迹推算

由于超声波在传播过程中,衰减明显,存在着有效接收距离。所以单独依靠超声波无法进行完整的室内定位。且超声波定位受多径效应和非视距传播影响较大,超声波频率受多普勒效应^[26]和温度影响,所以需要过滤掉无效的数据。

当接收不到超声波或者超声波定位所测数据无效时,需要借助其他的辅助定位,所以本文提出一种基于编码器、陀螺仪、加速度计的航迹推算室内定位系统。其中,编码器用于测算距离信息,陀螺仪又叫角速度传感器,主要用于测算角速度信息,加速度计用于测算加速度信息。然后将角速度信息与加速度信息进行四元数分析^[27]可以得到角度信息。

3.3.1 卡尔曼滤波

1960年,卡尔曼访问了NASA,针对载人太空船登月中的宇宙飞船测轨问题,首次提出了卡尔曼滤波算法^[28]。从最初的只适用于线性系统的狭义卡尔曼滤波逐步发展到能适用于非线性系统的广义卡尔曼滤波算法。在自主或协助导航系统中,卡尔曼滤波对数字信号处理有着较广的应用。

由于确定的信号有固定的频谱,我们使用常规的高通、低通、带通、带阻滤波器,使有用信号正常的通过,对干扰信号进行滤波处理。而由于随机信号没有固定的频谱,没有既定的变化规律,这种情况下,可以采用卡尔曼滤波,通过递归方法解决离散数据滤波问题,使其估算均方误差最小。

在本文的航迹推算系统中,参与测量的陀螺仪和加速度计均为惯性器件,因为在牛顿力学中,陀螺仪测得的角速度、加速度计测得的加速度均是相对与惯性空间。在此惯性系统中,以陀螺仪的测量角度为例,对于角度信息,我们可以认为角度差与时间的积分,即: $d\theta = dt \times \omega$, 然后根据上一时刻的角度信息,可以推算出当前角度信息。

由于陀螺仪也有着随机变化的静态漂移^[29],在角速度为零时,也会输出一个非零值。所以需采用卡尔曼滤波,从而可以得出角度的迭代过程,迭代过程分为以下五

步：

第一步为先验估计，其中 gyro_m 为陀螺仪测量的角速度值， q_bias 为静态漂移值， dt 为两次测量角度预测值 angle 间的时间间隔：

$$\text{angle} = \text{angle} + (\text{gyro_m} - \text{q_bias}) * \text{dt} \quad (3-12)$$

第二步为协方差矩阵的预测，其中 Q_gyro 为陀螺仪的过程噪声协方差， Q_angle 为加速度计的过程噪声协方差：

$$\text{Pdot}[0] = \text{Q_angle} - \text{P}[0][1] - \text{P}[1][0] \quad (3-13)$$

$$\text{Pdot}[1] = -\text{P}[1][1] \quad (3-14)$$

$$\text{Pdot}[2] = -\text{P}[1][1] \quad (3-15)$$

$$\text{Pdot}[3] = \text{Q_gyro} \quad (3-16)$$

$$\text{P}[0][0] += \text{Pdot}[0] * \text{dt} \quad (3-17)$$

$$\text{P}[0][1] += \text{Pdot}[1] * \text{dt} \quad (3-18)$$

$$\text{P}[1][0] += \text{Pdot}[2] * \text{dt} \quad (3-19)$$

$$\text{P}[1][1] += \text{Pdot}[3] * \text{dt} \quad (3-20)$$

第三步为计算卡尔曼增益，其中 R_angle 为加速度的测量噪声协方差， K_0 为加速度计的卡尔曼增益， K_1 为陀螺仪偏差的卡尔曼增益， E 为测量余量协方差， t_0 与 t_1 为后验误差协方差：

$$\text{PCt_0} = \text{C_0} * \text{P}[0][0] \quad (3-21)$$

$$\text{PCt_1} = \text{C_0} * \text{P}[1][0] \quad (3-22)$$

$$\text{E} = \text{R_angle} + \text{C_0} * \text{PCt_0} \quad (3-23)$$

$$\text{K_0} = \text{PCt_0} / \text{E} \quad (3-24)$$

$$\text{K_1} = \text{PCt_1} / \text{E} \quad (3-25)$$

$$\text{t_0} = \text{PCt_0} \quad (3-26)$$

$$\text{t_1} = \text{C_0} * \text{P}[0][1] \quad (3-27)$$

第四步为根据卡尔曼增益进行修正，其中 angle 为后验估算角度值， q_bias 为更新最优估计值偏差， angle_dot 为更新最优角速度， outAngle 为卡尔曼融合计算出的角度（弧度值）， outAngleDot 为卡尔曼融合计算出的角速度（弧度值）：

$$\text{angle_err} = \text{angle_m} - \text{angle} \quad (3-28)$$

$$\text{angle} += K_0 * \text{angle_err} \quad (3-29)$$

$$q_bias += K_1 * \text{angle_err} \quad (3-30)$$

$$\text{angle_dot} = \text{gyro_m} - q_bias \quad (3-31)$$

$$\text{outAngle} = \text{angle} \quad (3-32)$$

$$\text{outAngleDot} = \text{angle_dot} \quad (3-33)$$

第五步为更新协方差矩阵：

$$P[0][0] -= K_0 * t_0 \quad (3-34)$$

$$P[0][1] -= K_0 * t_1 \quad (3-35)$$

$$P[1][0] -= K_1 * t_0 \quad (3-36)$$

$$P[1][1] -= K_1 * t_1 \quad (3-37)$$

通过以上过程，可以大大降低陀螺仪的随机漂移所产生的误差，从而提高了角速度的精确性。

3.3.2 四元数分析

对于得到的角速度信息与加速度信息，如何将其转换为角度信息。目前常用的方法为：先将角速度与加速度转换为四元数，再将四元数转换为欧拉角。

1843 年，爱尔兰数学家哈密顿首次提出四元数概念。复数由实数和虚数单位 i 组成，而四元数是由实数和虚数单位 i 、 j 、 k 组成。表示旋转的三维空间，通常有旋转矩阵和四元数两种方法。旋转矩阵^[30]采用 3×3 的矩阵来表示，需要 9 个变量来表示三维旋转空间。而四元数仅需四个元素来表示，故本文采用四元数表示三维旋转空间。

陀螺仪测得的三个方向的角速度数据分别为 g_x ， g_y ， g_z ；加速度计测得的三个方向的加速度数据分别为 a_x ， a_y ， a_z 。

第一步，首先对加速度数据在体轴下进行归一化：

$$\text{norm} = 1/\sqrt{a_x * a_x + a_y * a_y + a_z * a_z} \quad (3-38)$$

$$a_x = a_x * \text{norm} \quad (3-39)$$

$$a_y = a_y * \text{norm} \quad (3-40)$$

$$a_z = a_z * \text{norm} \quad (3-41)$$

第二步，由于测试环境中有着重力加速度，所以将地理坐标系下的重力加速度加入到本体轴下，可得：

$$v_x = 2 * (q_1 * q_3 - q_0 * q_2) \quad (3-42)$$

$$v_y = 2 * (q_0 * q_1 + q_2 * q_3) \quad (3-43)$$

$$v_z = q_0 * q_0 - q_1 * q_1 - q_2 * q_2 + q_3 * q_3 \quad (3-44)$$

第三步，采用叉乘法求取误差分量：

$$e_x = a_y * v_z - a_z * v_y \quad (3-45)$$

$$e_y = a_z * v_x - a_x * v_z \quad (3-46)$$

$$e_z = a_x * v_y + a_y * v_x \quad (3-47)$$

第四步，将误差分量进行积分：

$$e_x \text{Int} = e_x \text{Int} + e_x * \text{Ki} \quad (3-48)$$

$$e_y \text{Int} = e_y \text{Int} + e_y * \text{Ki} \quad (3-49)$$

$$e_z \text{Int} = e_z \text{Int} + e_z * \text{Ki} \quad (3-50)$$

第五步，因为误差表面是来自于旋转矩阵，其实最终来自于角速度，所以要将误差补偿给角速度：

$$g_x = g_x + \text{Kp} * e_x + e_x \text{Int} \quad (3-51)$$

$$g_y = g_y + \text{Kp} * e_y + e_y \text{Int} \quad (3-52)$$

$$g_z = g_z + \text{Kp} * e_z + e_z \text{Int} \quad (3-53)$$

第六步，采用一阶龙格库塔法更新四元数：

$$q_0 = q_0 + (-q_1 * g_x - q_2 * g_y - q_3 * g_z) * \text{halfT} \quad (3-54)$$

$$q_1 = q_1 + (q_0 * g_x + q_2 * g_z - q_3 * g_y) * \text{halfT} \quad (3-55)$$

$$q_2 = q_2 + (q_0 * g_y - q_1 * g_z + q_3 * g_x) * \text{halfT} \quad (3-56)$$

$$q_3 = q_3 + (q_0 * g_z + q_1 * g_y - q_2 * g_x) * \text{halfT} \quad (3-57)$$

第七步，将四元数归一化：

$$\text{norm} = 1/\text{sqrt}(q_0 * q_0 + q_1 * q_1 + q_2 * q_2 + q_3 * q_3) \quad (3-58)$$

$$q_0 = q_0 * \text{norm} \quad (3-59)$$

$$q_1 = q_1 * \text{norm} \quad (3-60)$$

$$q_2 = q_2 * \text{norm} \quad (3-61)$$

$$q_3 = q_3 * \text{norm} \quad (3-62)$$

第八步，将四元数转换为欧拉角，由于采用的姿态角（欧拉角）可分为：pitch、roll、yaw，其中 pitch 叫做仰俯角，即为绕 Y 轴的旋转角。roll 叫做滚转角，即为绕 X 轴的旋转角。yaw 叫做偏航角，即为绕 Z 轴的旋转角。而扫地机器人在水平面上移动，c 为固定系数，故只需求解出 yaw 偏航角为：

$$\text{actan}^2(2 * (q_0 * q_1 + q_2 * q_3), q_0 * q_0 + q_1 * q_1 - q_2 * q_2 - q_3 * q_3) * c \quad (3-63)$$

因此将陀螺仪测得的角速度信息、加速度计测得的加速度信息通过卡尔曼滤波后，再通过四元数分析，可以得出偏航角 yaw。

3.3.3 航迹推算流程

距离信息：通过 PWM 波驱动电机，然后 PID 算法控制轮子走直线，或者以扫地机器人中心为轴来进行转向。编码器安装在驱动轮上，通过读取 IO 口的高低电平，得到固定周期 T 内编码器计数值，然后计算出行驶距离。

角度信息：获取陀螺仪和加速度计的角速度和加速度数据后，通过 IIC 传输到单片机上，先通过卡尔曼滤波对随机漂移进行自动跟踪与补偿，通过四元数分析得出角度信息。

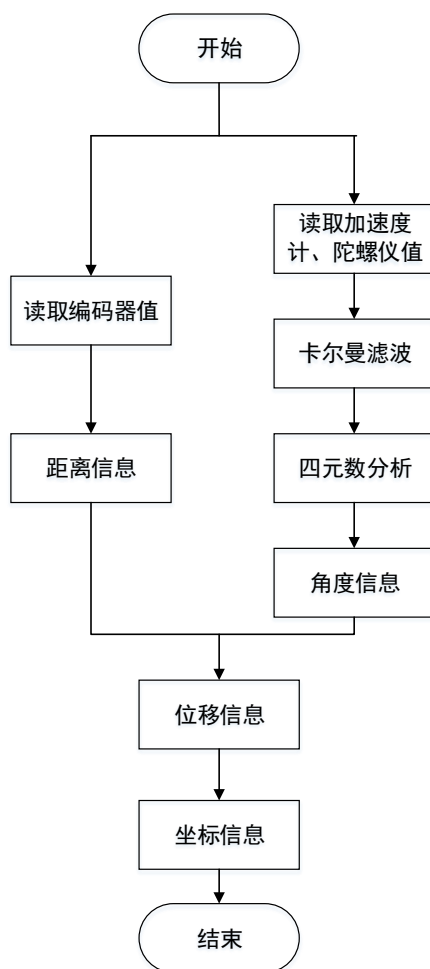


图 3-5 航迹推算软件流程图

如图 3-5 所示，最后根据角度信息、距离信息、上一时刻扫地机器人的坐标，通过航迹推算得到扫地机器人的当前坐标。

3.4 融合算法分析

在航迹推算测得当前的近似坐标的情况下,为了进一步提高定位的准确性,采用超声波定位进行修正,其中需要采用多传感器信息融合定位算法^[31]。

精度较高的定位方式为超声波定位,而当超声波定位失效时,机器人还具有其他的辅助信息可以用来修正定位:驱动轮上的编码器、陀螺仪和加速度计测得的角度信息。融合超声波定位与航迹推算定位的方法有很多种,但是适合本文的有如下可以选择:

直接采取超声波定位:因为超声波定位精度高,且无累积误差。所以当航迹推算与超声波定位不一致时,且通过判断可认为超声波定位数据有效时,直接采用超声波定位;

加权平均法:简单的将各种信息进行一个加权处理平均得到的信息即为“准确”信息,例如,在定位中,超声的决定性较大,分配较大的权值,而航迹推算参考性可能不够,权值较小;

概率估计:极大似然估计^[32]、贝叶斯估计^[33]、最小二乘法回归^[34]、模糊逻辑推理^[35]、人工神经网络^[36]、遗传算法^[37]等其他算法。

(1) 数据融合基本含义

在多传感器系统中,充分利用不同时间不同传感器的所测得数据,利用数据分析、观测、计算机技术等手段,对被测对象进行一致性描述的过程叫做多传感器数据融合。多传感器数据融合中,需要充分利用冗余和互补信息和各种技术手段。

(2) 数据融合过程

在本扫地机器人平台中,采用数据预处理和判断超声波定位是否有效的方式,对数据进行融合。

数据预处理:由于超声波定位系统的有效距离为 5m,而超声波传播速度约为 340m/s,所以超声波传播时间超过 0.015s 的数据可以认为是无效数据;由于本文中,扫地机器人转向角速度基本固定,前行时也采取匀速前行,所以固定时间内,如果角度、距离信息与上一时刻的差值过大,此时通过超声波定位得到的位置信息也认为是

无效数据。

直接采取超声波定位：当航迹推算时，突然可以接收到超声波信号时，判断超声波信号不是反射、干涉、叠加后的超声波信号，直接采取超声波定位得到的坐标信息。

3.5 本章小结

在本章中，首先通过对比常见定位方案技术和常见定位方案载体，分析其成本、安装难易度、优缺点、算法复杂度等。提出超声波与航迹推算融合室内定位方案。

根据超声波的物理特性，分析超声波的测距原理，针对得到距离信息后如何获取节点坐标，提出了最小二乘法和三角质心法。由于超声波传播速度受温度的影响，对其进行了温度补偿。但是超声波传播距离有限，且受多径效应和非视距传播的影响，所以提出了基于编码器、陀螺仪、加速度计的航迹推算定位方法。在航迹推算中，获取角度信息需使用卡尔曼滤波与四元数分析，因此基于扫地机器人平台对二者进行了简要分析与推导。

对于超声波定位信息与航迹推算定位信息，提出了先进行数据预处理，然后超声波信号是否为干扰信号的方案。当超声波定位失败时，采用基于编码器、陀螺仪、加速度计的航迹推算来进行室内定位，同时，通过超声波定位修正航迹推算定位结果。虽然航迹推算精度没有超声波定位高，但是可以保证系统的稳定性。

4 整体平台的搭建与测试

为了验证本论文中融合定位方案的可行性，在实验室搭建了简单的扫地机器人平台。由于本实验平台的目的是验证超声波与航迹推算融合定位方案的可行性，因此本扫地机器人平台只考虑扫地机器人的行走功能和定位功能。将硬件平台主要分为电机驱动系统、超声波定位系统、航迹推算定位系统，扫地机器人外壳采用市场上热销的某款科沃斯扫地机器人，扫地机器人 MCU 选择采用 STM32F407 开发板。对于软件平台，采用 keil5 对 STM32 进行硬件编程，采用无线串口与串口调试助手作为上位机，对扫地机器人的数据进行显示。

4.1 实验平台

在本文中，硬件平台的处理器主要采用 STM32F407。对于扫地机器人的电机驱动系统、超声波定位中的接收系统、航迹推算定位系统均共用一块 STM32F407 开发板。

STM32F407 系列采用了 90 纳米 NVM 工艺和 ART(自适应实时存储器加速器)，以 Cortex™-M4 为内核，是一款可达到 210DMIPS@168MHz 的高性能微控制器。同时集成了单周期 DSP 指令和 FPU，支持浮点运算。板载 3.3V/5V 电源供应，有着 114 引脚，1024K 的 FLASH，192K 的 SRAM，有着 16 个定时器，3 个 ADC，2 个 DAC，支持 IIC、IIS、SPI 等。资源丰富，接口多，可以满足本实验平台的搭建。

扫地机器人实物如图 4-1 所示，基站实物如图 4-2 所示。

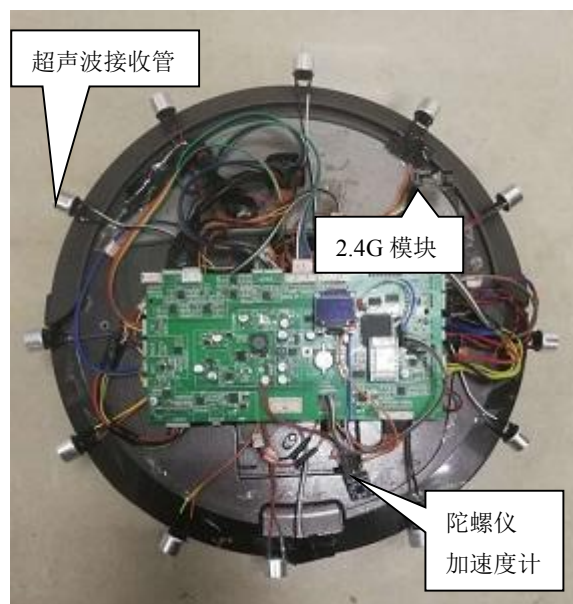


图 4-1 扫地机器人平台

在图 4-1 中，有着 12 个超声波接收管，1 个 2.4G 模块，还有着陀螺仪、加速度计组成的 MUP6050 模块^[38]。

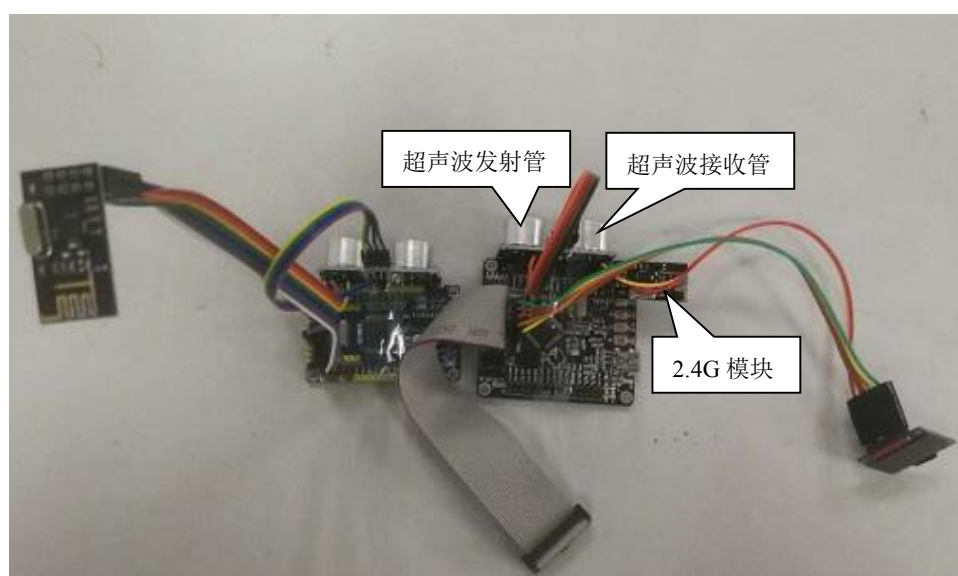


图 4-2 两个基站实物图

图 4-2 为两个基站，每个基站有着 1 个超声波接收管，1 个超声波发射管，1 个 2.4 模块。

整体的硬件系统框图如图 4-3 所示

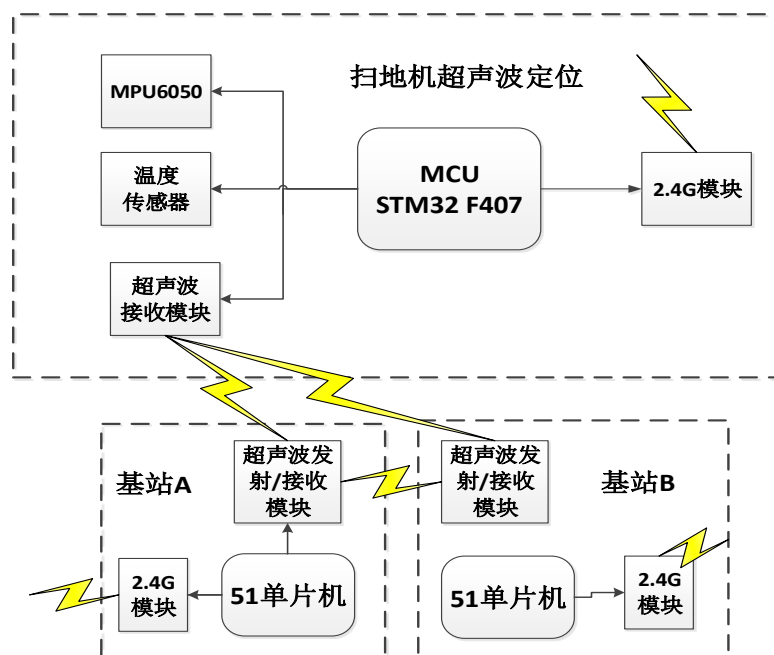


图 4-3 整体硬件系统框图

整体硬件系统分为 3 个部分，分别为扫地机、基站 A 与基站 B。本节将简要介绍下驱动系统、超声波定位系统与航迹推算系统。

4.1.1 驱动系统

由于扫地机器人有着 1 个万向轮、2 个驱动轮。因此只需要通过 PWM 控制两个驱动轮上的直流电机。当 PWM 占空比大时，电机转速高。当驱动电压为高电平时，电机正转；当驱动电压为低电平时，电机反转。在两个驱动轮上均安装着编码器。驱动系统流程图如图 4-4 所示。

通过 STM32 上的定时器 1 产生两路 PWM 波^[39]，通过控制 PWM 波的占空比和高电平分别对两个驱动轮上的直流电机进行驱动。

在扫地机器人的行驶过程中，通过定时器 2 对编码器的值进行计数，得到固定时间内编码器的差值，从而得到驱动轮的转速与行驶距离。将实际测得转速与预先设

定的标准转速对比,通过PID算法^[40]调整定时器1产生PWM波的占空比,从而对机器人进行减速或者加速,最终使得扫地机器人能按设定的姿态及速度行驶。整套过程是一个完整的闭环反馈调节,可以使得驱动轮的速度无限接近于标准速度。

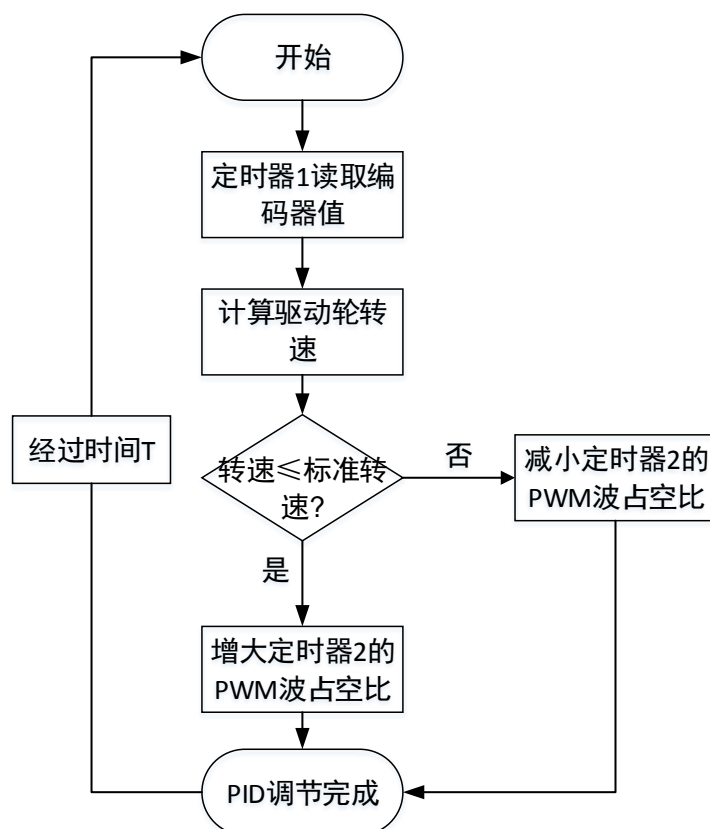


图 4-4 驱动系统流程图

4.1.2 超声波定位系统

扫地机器人与基站间采用超声波发射端与接收端分体式设计,测距流程如图 4-5 所示。超声波接收装置安装于扫地机器人,作为待定位目标,发射装置作为基站。发射装置与接收装置间采用 2.4G 无线通讯^[41]模块进行时钟同步。发射装置的 2.4G 信号与超声波信号同时发射,扫地机器人上的接收装置分别记录接收到信号的时间。由于 2.4G 无线通讯模块采用的是电磁波通信,远远大于超声波的传播速度,因此可以忽略 2.4G 信号传播时间。

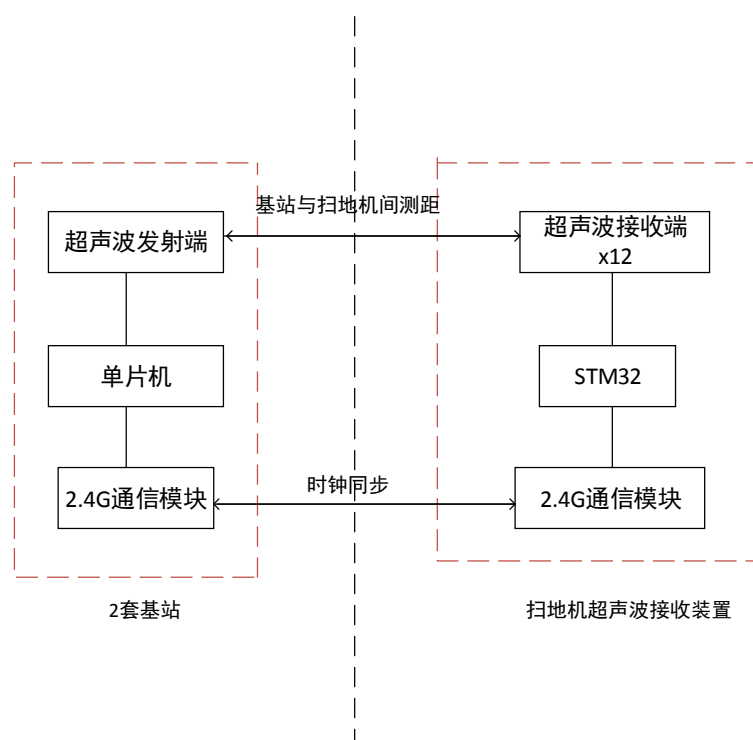


图 4-5 基站与扫地机间测距

如图 4-6 所示，基站 A 与基站 B 间的测距方案，与基站与扫地机间的测距方案相同，其中 2.4G 模块用于两基站间的时钟同步。

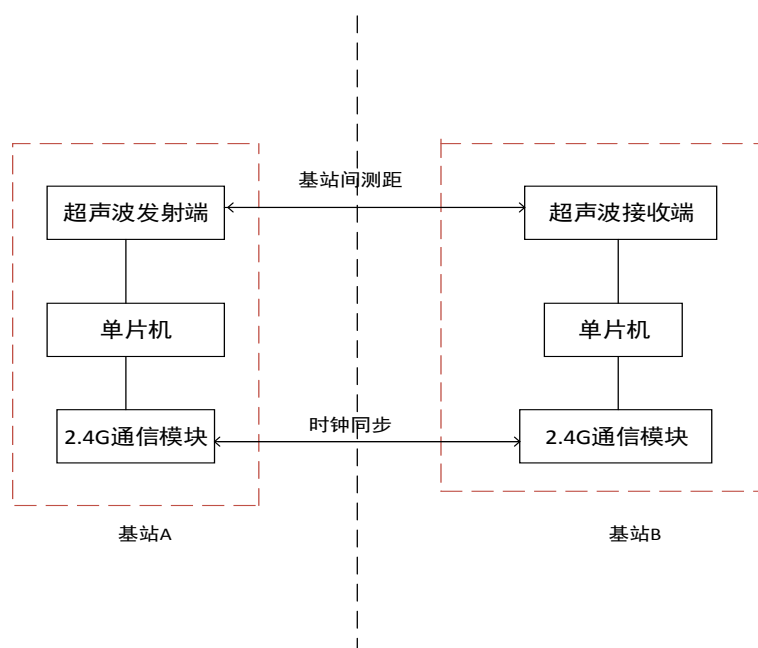


图 4-6 基站 A 与基站 B 间测距

由于超声波的传播速度受空气温度影响，因此在扫地机器人上安装一个温度传感器，进行校准超声波速度，从而使测距更加准确。

(1) 超声波测距系统

超声波传感器按照检测方式可以分为两种检测模式。

第一种为直接反射式，被检测物障碍物位于传感器前方，传感器发射的超声波反射，接收器接收到超声波，从而可以判断出检测物的距离。接收头实质上是一种带压电效应^[42]的换能器，它接收到信号后，产生 mv 级别的微弱电压信号，然后再通过放大电路产生高低电平，单片机通过获取 IO 的高低电平判断是否接收到超声波。原理如图 4-7 所示。

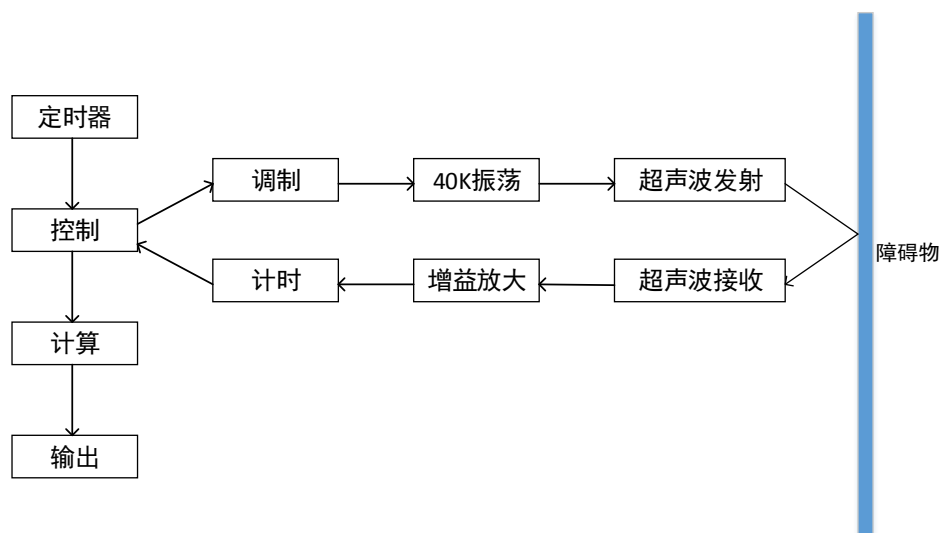


图 4-7 超声波测距原理框图

第二种为分体式的检测模式。超声波发射装置与超声波接收装置，形成完整的分体式超声波测距。可通过使能端控制超声波传感器的开关，接收器接收到超声波时，产生开关信号，通过计算发送超声波到接收超声波所需的时间，计算出两者间的距离。

本论文中在扫地机上采用第二种分体式测距方式，将超声波接收器安装在待测目标上，从而测试出扫地机器人与基站间的距离。

超声波传感器采用 RT 分体超声波收发器。如图 4-8 所示。



图 4-8 RT 分体超声波收发器

为了测试的方便性，本论文中两个基站上均安装超声波模块 HC-SR04 模块，此模块即可发射超声波也可以接收超声波。测试基站间距离时，先通过 2.4G 模块进行基站间的时钟同步，然后基站 A 发射超声波，基站 B 接收来自基站 A 的超声波，从而得出基站 A 与 B 间的距离。在测得基站 AB 间距离后，基站 A、B 会根据扫地机的信号来控制超声波的发射，从而测量出基站与扫地机间的距离。其中超声波发射模块的时序图如图 4-9 所示

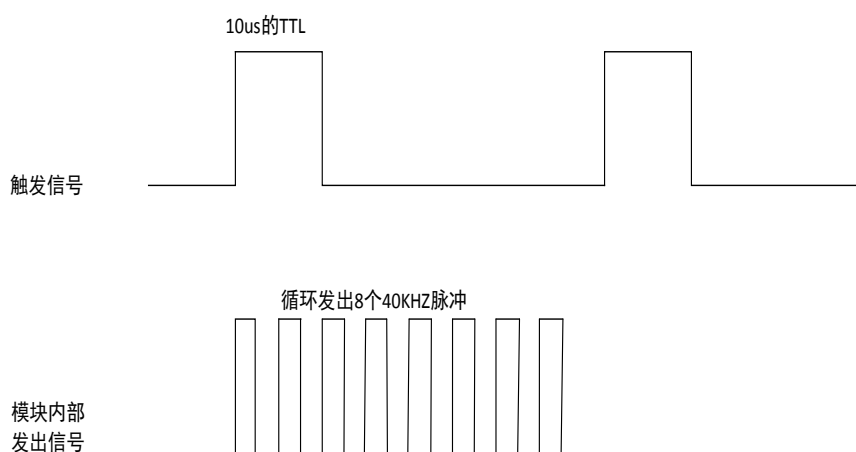


图4-9 超声波时序图

对于超声波发射模块，当使能端给使能端提供一个超过 10us 的高电平信号时，超声波发射器将循环发射出 8 个 40KHZ 的脉冲。

(2) 2.4G 模块

2.4G 无线模块选择的是 NRF24L01。NRF24L01 是由 NORDIC 公司生产的一款无线收发器芯片，工作在 2.4GHz-2.5GHz 频段。采用全双工 SPI 接口，并且配有使能端引脚，便于单片机控制其收发。本系统采用此模块，主要用于同步超声波传感器所在的单片机上时钟。

(3) 温度传感器

为了提高超声波测距的测量精度，在系统中添加了温度感测器 T106。此温度传感器适合气体使用，电阻值和 B 值精度高，一致性好。采用 NTC 10K 热敏电阻，其输出电压与摄氏温标呈线性关系。在常温下，T106 不需要额外的校准处理，即可达到 $\pm 1\%$ 的检测精度。接线形式简单，采用 XH2.54-2 针插头 (2P)，在单电源工作模式下，测量范围为 $-50^{\circ}\text{C} \sim +110^{\circ}\text{C}$ 。根据实际温度的值，利用上式可计算补偿声速。

4.1.3 航迹推算定位系统

硬件平台主要分为距离测量和角度测量两部分，在角度测量上，主要采用陀螺仪与加速度计通过卡尔曼滤波和四元数得到角度信息。距离测量上，主要通过编安装在驱动轮上的编码器，然后通过编码器上的 IO 电平变化对计数器进行计数，从而得到距离信息。主控依然采用 STM32F407 这款芯片，惯性器件采用 MPU6050 模块。

MPU6050 模块为 6 轴运动处理器，集成了 3 轴 MEMS 陀螺仪和 3 轴 MEMS 加速度计，以及一个可扩展的数字运动处理器 DMP，且 MPU6050 可用 I2C 接口连接一个第三方的数字传感器，比如磁力计。

4.2 软件流程

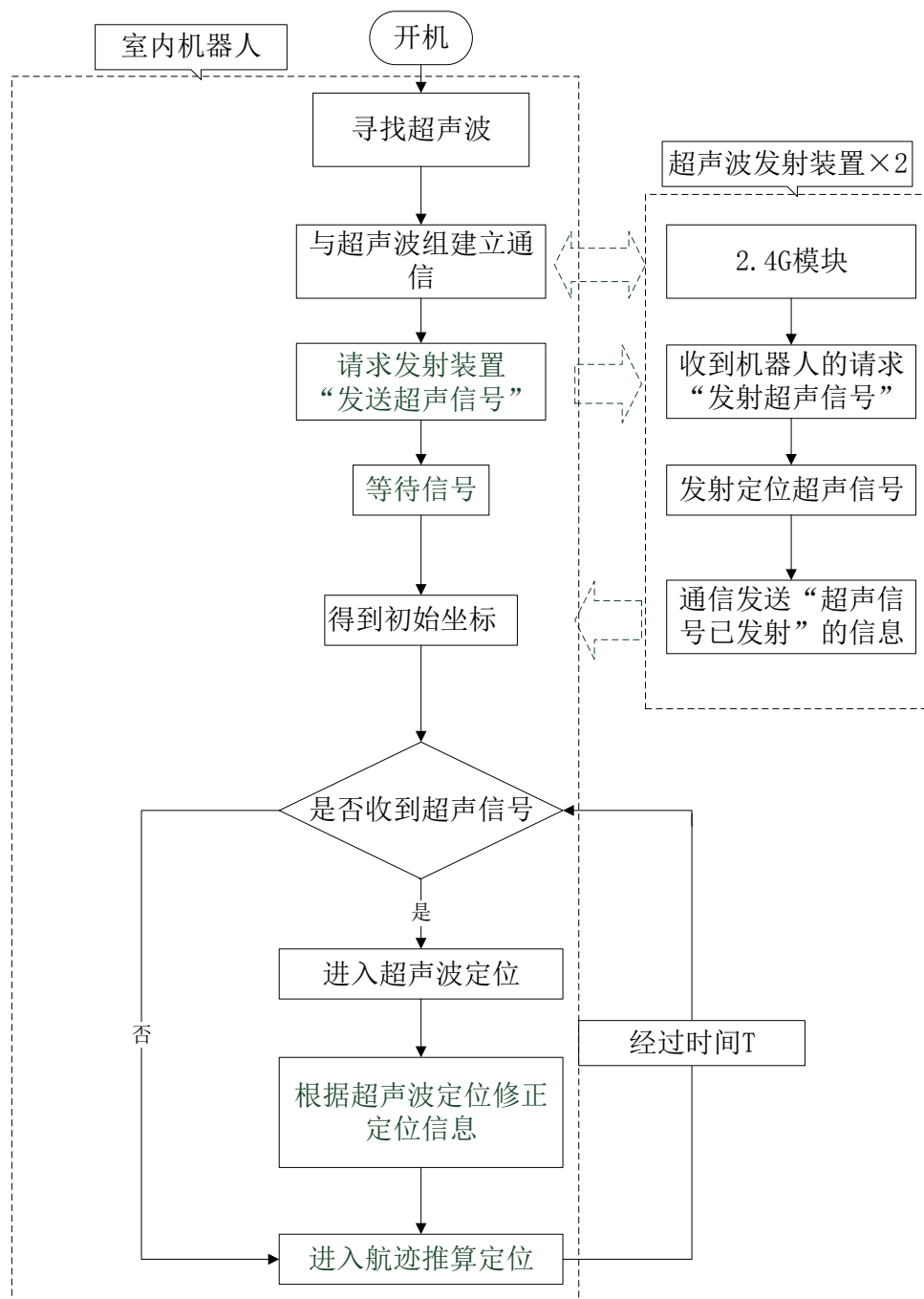


图 4-10 扫地机器人室内定位软件流程

如图 4-10 所示，扫地机器人开机后，首先寻找超声波信号，确认扫地机器人已行走至能接收到超声波的区域内。然后扫地机器人请求与超声波发射装置建立通信

连接，建立连接后，通过 2.4G 信号进行时钟同步，通过超声波信号测出扫地机器人到基站的距离，从而得出扫地机器人的坐标信息。如果能接收到超声波并判断此时超声波定位有效，采取超声波定位系统计算出的坐标信息，其中超声波定位周期时间为 200ms。

如果没接收到有效超声波信号，采用航迹推算定位坐标，航迹推算定位周期时间为 50ms。在航迹推算过程中，每隔固定时间 T ，进行一次判断，判断是否接收到超声波信号。当接收到有效超声波时，采取超声波定位系统计算出的坐标，并通过超声波定位对航迹推算定位结果进行修正。

4.3 实验与分析

4.3.1 测试平台

本章软硬件实验配置如下：以 STM32F407 为主控的扫地机器人(如图 4-1 所示)，两台以 STC12C5A60S2 为主控的超声波发射系统（如图 4-2 所示），一台 Intel i3 处理器的计算机作为上位机。计算机与扫地机器人间采用无线串口进行通信。通过上位机显示扫地机器人的实时数据，便于观察与分析。

由于超声波传感器有一定的辐射范围，经测试在本文中，所采用的超声波传感器的辐射角度约为 $\theta = 30^\circ$ ，有效距离约为 $s=5\text{m}$ ，因此辐射范围如图 4-11 所示。

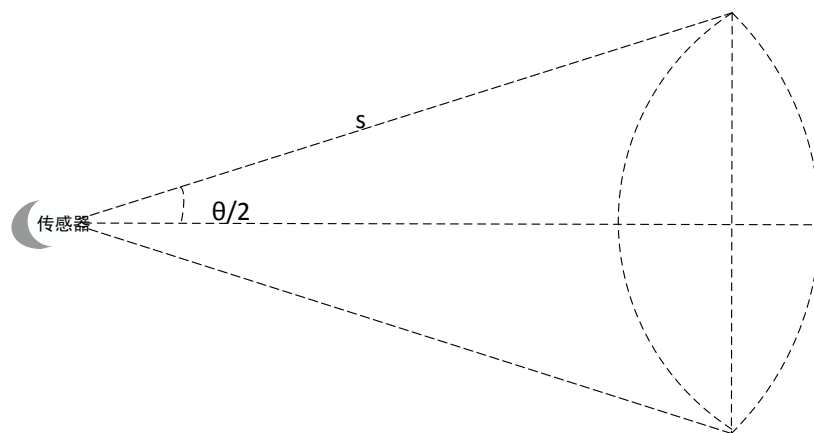


图 4-11 超声波传感器辐射范围

4.3.2 初始坐标的确定及坐标系的建立

本实验测试环境如图 4-12 所示，测试环境约为 $4.6\text{m} \times 5.9\text{m}$ 。



图4-12 测试房间

将基站 A 与基站 B 放置于无障碍区域，如图 4-13 所示，以防障碍物对超声波测距的影响。同时使基站 A 与基站 B 间的距离尽可能大，这样可以提高两组超声波同时能覆盖的区域。

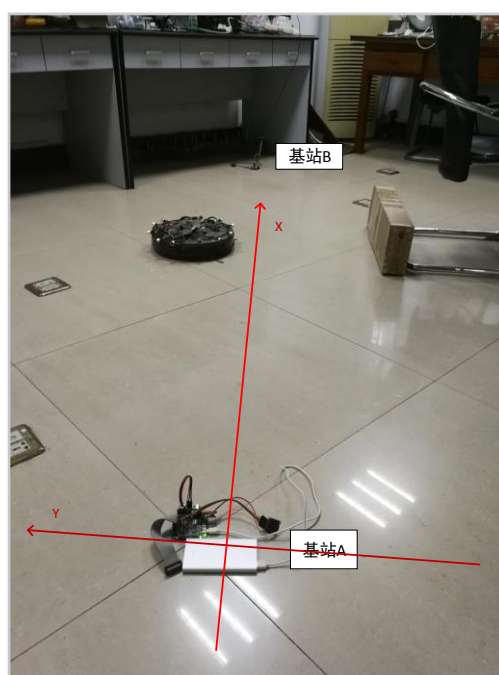


图4-13 基站的实物摆放

将基站 A 与基站 B 的超声波传感器尽可能对齐，将基站 A 的坐标设置为(0,0)。通过基站 A 与 B 的 2.4G 模块，将两者的时钟进行同步，基站 A 发射超声波，基站 B 接收超声波。通过超声波测距测到两者间的距离为 321.5cm，实际通过卷尺测得两者间的距离为 318cm。因此可以将基站 B 的坐标设置为(321.5,0)。则可在房间中建立如图 4-13 所示的 X 轴。

测得基站 A 与 B 间距离后，将基站 A 与 B 均设置为超声波定位模式，即接收到扫地机 2.4G 模块发出的特定指令后，基站的超声波发射端循环发出 8 个 40kHz 脉冲。寻找能同时接收到基站 A 与 B 的超声波信号区域，作为扫地机的初始点。本论文中直接将扫地机放置于 AB 中心点附近。此时可以接收到基站 A 与 B 的超声波信号。测得的距离信息如图 4-14 所示。



图4-14 扫地机初始点信息

其中测得的距离均加上了扫地机半径 15cm，假设扫地机的坐标为 (x_0, y_0) ，则可得

$$\sqrt{x_0^2 + y_0^2} = 142.6 \quad (4-1)$$

$$\sqrt{(x_0 - 321.5)^2 + y_0^2} = 183.2 \quad (4-2)$$

于是可得扫地机的坐标为(140.2,26.3)或(140.2,-26.3)，本系统中，取扫地机初试坐标 $y_0 > 0$ ，因此可建立图 4-14 中的 Y 轴。所以构建出完整的平面坐标系。对于其他

时刻超声波定位测试的 2 组数据，取与此刻航迹推算定位信息更接近的数据。

4.3.3 超声波数据预处理

由于超声波在房间内会产生干涉、反射、叠加等现象。所以采取了如下几个措施。

(1) 超声波的波形如章节 4.1.2 中图 4-9 所示，发射端循环发出 8 个 40kHz 脉冲。所以在超声波接收端接收到超声波后，通过放大电路配合定时器可严格检测波形，过滤掉干涉、叠加后的超声波信号。定时器检测频率方式如图 4-15 所示。

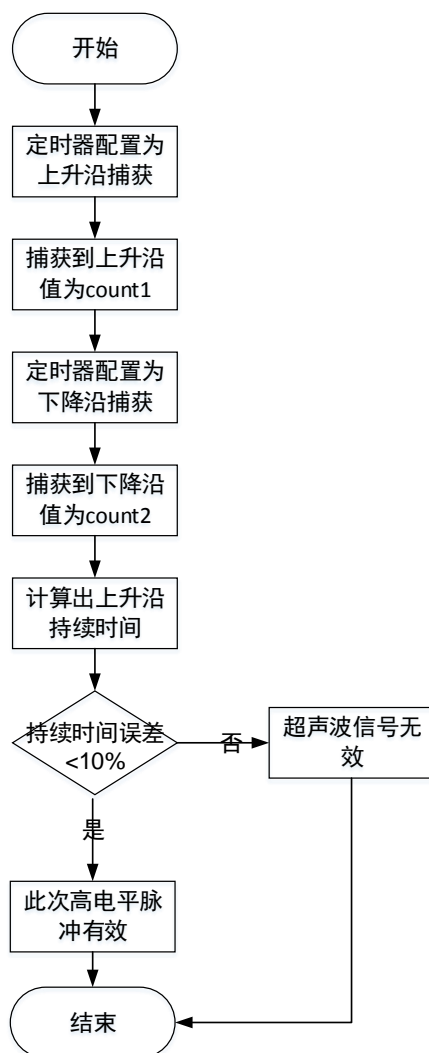


图 4-15 计算超声波高电平脉冲持续时间流程图

将图 4-15 中步骤进行 8 次，将接收端超声波高电平持续时间与发射端高电平持续时间对比。如果 8 次对比误差均在 10% 内，认为有效。反之，认为超声波产生了

干涉或者叠加，需要舍弃掉。

(2) 由于扫地机器人移动速度约为 15cm/s，移动速度较慢，且超声波单次测距所需时间在 50ms 内，所以基站 A 与 B 采取分时发送超声波，尽量减小互相间的干扰。

(3) 超声波的反射对定位结果造成的影响，本文采取先估算出超声波可能存在的区域。测试环境如图 4-16 所示。

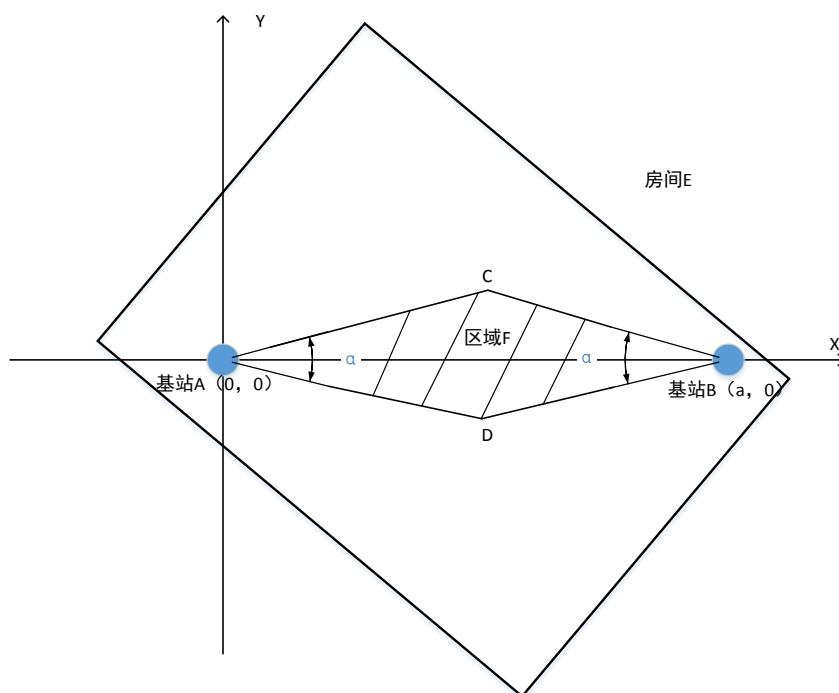


图 4-16 测试环境模拟图

在图 4-16 中，基站 A 与 B 的摆放呈对射关系，其中区域 F 为超声波可能覆盖的区域。虽然超声波的辐射角约为 30° ，但是考虑到基站的摆放的不规则以及定位误差，可取 α 稍大于 30° ，可取为 40° 。

则 AC 的方程为 $y = x \tan(\alpha/2)$ ，其中 $0 < x < a/2$

BC 的方程为 $y = (a-x) \tan(\alpha/2)$ ，其中 $a/2 < x < a$

所以当扫地机收到基站 A 与 B 发射来的超声波时，需先判断 x 处于 $(0, a/2)$ 与 $(a/2, a)$ 哪个区间。假设 x 处于 $(0, a/2)$ 时，那么 $|y|$ 需小于 $x \tan(\alpha/2)$ ，否则认为其为无效数据，很有可能是因为扫地机接收到超声波的反射信号。在本测试中令 $a=321.5$ 。

4.3.4 实验测试与数据处理

由于扫地机的行走路线以弓字型为主，红外壁障和检测碰撞开关为辅。在本测试中，理论行走路线如图 4-17 所示。但由于障碍物导致弓字型路线不标准，与理论路线会有差别。

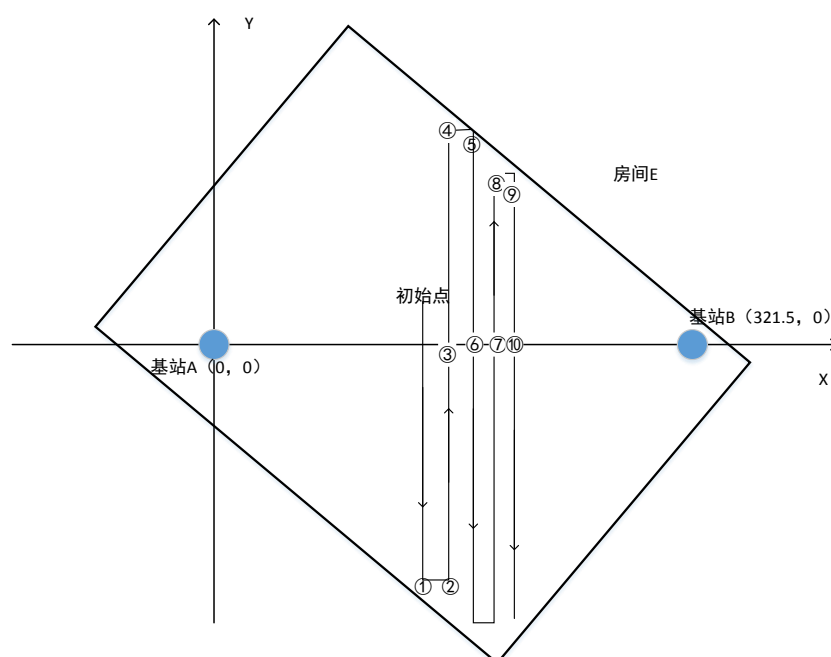


图 4-17 扫地机器人理论行驶路线

在图 4-17 中，选取特征点 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10，特征点均为扫地机器人状态切换时。在特征点附近，通过遥控使扫地机暂停行走。通过卷尺测出扫地机的实际坐标。通过串口将扫地机能否收到超声波及定位信息上传到上位机。

在实际测试中,选取中如图 4-18 中 10 个特征点作为测量点。



图 4-18 实际测量点

上传到上位机的信息如图 4-19 所示,在能测出扫地机器人到基站 A 与 B 的距离时,通过距离求出扫地机器人坐标的两组解,两组解 X 轴坐标一样, Y 轴坐标成正负关系,根据此时航迹推算定位信息,滤掉一组无用解,将剩下的一组解作为最终的定位坐标。当无法实现超声波定位时,直接采用航迹推算信息作为此时的定位坐标。

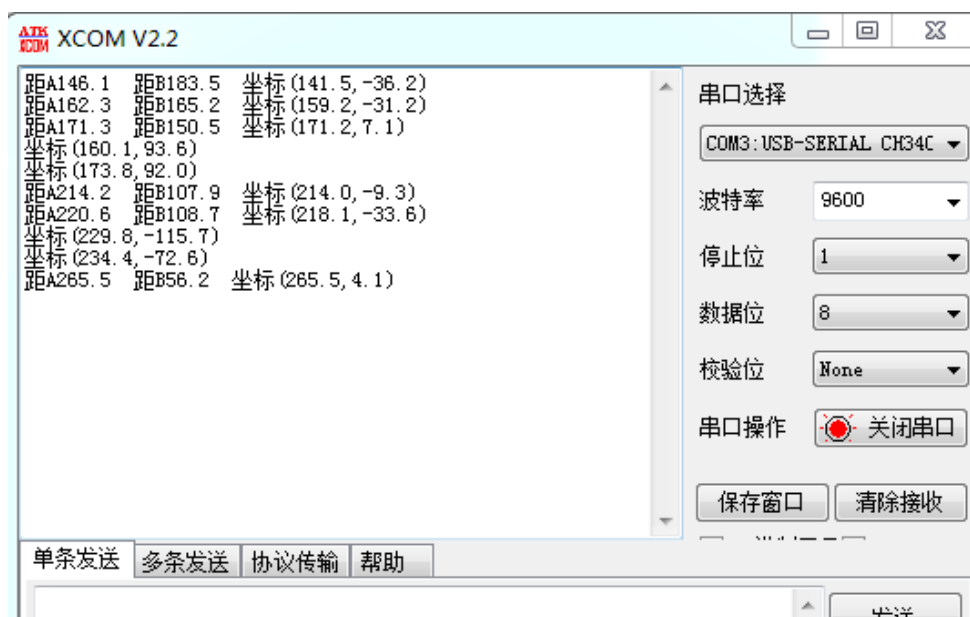


图 4-19 特征点测量信息

如图 4-19 所示,在 1、2、3、6、7、10 处可以实现超声波定位,在 5、6、8、9

处无法实现超声波定位。对比实际坐标可得表 4-1

表 4-1 定位坐标信息

次序	实际坐标(cm)	测得坐标(cm)	$\Delta X(\text{cm})$	$\Delta Y(\text{cm})$	$\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$	有无超声定位
基站 B	(318,0)	(321.5,0)	3.5	0	3.5	有
初始点	(148,30)	(140.2,26.3)	-7.2	-3.7	8.1	有
1	(150,-37)	(141.5,-36.2)	-8.5	1.2	8.6	有
2	(167,-38)	(159.2,-31.2)	-7.8	6.8	10.3	有
3	(168,-4)	(171.2,7.1)	3.2	11.1	11.6	有
4	(170,101)	(160.1,93.6)	-9.9	-7.4	12.4	无
5	(189,107)	(173.8,92.0)	-15.2	-15	21.4	无
6	(220,-15)	(214.0,-9.3)	-6	5.7	8.3	有
7	(230,-35)	(218.1,-33.6)	-11.9	1.4	12.0	有
8	(242,-130)	(229.8,-115.7)	-12.2	14.3	18.8	无
9	(252,-90)	(234.4,-72.6)	-17.6	17.4	24.7	无
10	(269,-5)	(265.5,4.1)	-3.5	9.1	9.7	有

4.3.5 结果分析

(1) 根据表 4.1 中 3-4-5、7-8-9 两组数据可知，航迹推算的误差随着时间的增加，误差逐渐增加。

(2) 根据表 4.1 中 1、2、3、6、7、10 几组可以接收到超声波的数据可知，超声波定位不存在这累计误差，误差较为平均，在 3.5-12.0cm 间；

(3) 根据表 4.1 中 5-6、9-10 数据可知，在航迹推算定位时，如果接收到有效的超声波信号时，可以通过超声波定位对定位结果进行修正，将航迹推算的累积时间置零，从而减小航迹推算的累计误差。

(4) 整体分析：超声波定位精度在 10cm 左右但不具备可持续性，定位信息为离散的，必须在超声波可接受到的有效区域；而航迹推算误差随时间增加而增加；而本

融合定位系统,保证了定位系统的连续性及稳定性,在房间内任意点均可获得定位信息,精度在可接受范围内,且误差不随时间增加而持续增加。证明了本论文所提出方案的可行性。

(5) 与激光雷达对比: 由于编码器分辨率过低,测试中本系统的最大误差在 24.7cm,不如激光雷达 10cm 内的精度。但是本系统的硬件成本极低,小米扫地机更换激光雷达需 460 元且质保期仅 3 个月,本系统硬件成本: STM32F407 芯片(约 25 元)、2 个 STC12C5A60S2 芯片(共 20 元)、12 个超声波发射器(共 24 元)、2 个 HC-SR04 模块(共 10 元)、红外编码器(扫地机器人固有,PID 算法走直线所需)、MPU6050 模块(约 7 元)、3 个 2.4G 模块(约 15 元),总共约 97 元。

4.4 本章小结

本章为扫地机器人平台的搭建与测试。硬件系统的分为驱动系统、超声波定位系统、航迹推算定位系统三个部分。驱动系统主要通过 PID 算法与 PWM 波来控制驱动轮,超声波定位系统分为: 安装在扫地机器人上的接收装置和后期将会安装在灯塔、充电桩上的基站,航迹推算系统主要采用编码器、陀螺仪与加速度计等惯性器件。接着介绍了扫地机器人定位的软件流程。最后通过实验测试证明了超声波与航迹推算融合定位方案的可行性,并估算了定位系统的硬件成本。

5 总结与展望

5.1 全文总结

随着科学技术的发展以及生活水平的提高,扫地机器人的市场需求急剧上升,对其智能化的要求也越来越高。而室内环境复杂,全球定位系统无法满足室内定位需求。目前主流的扫地机器人均采用激光雷达测距或者 VSLAM 图像视距室内定位,成本都较高。且激光雷达的探头不停旋转,容易坏掉。VSLAM 图像视距定位需要光照条件好。都存在着各自的缺陷。

本文首先分析了 TOA 定位、TDOA 定位、AOA 定位、RSSI 定位、航迹推算定位、指纹匹配法等各自的原理及优缺点。航迹推算存在着累积误差、零点漂移等问题,TOA 与 TDOA 定位方案类似且 TDOA 需要更多基站,而 RSSI 定位精度太差,指纹匹配法基于 RSSI 定位,但所需数据太多,且需提前建立信号强度-位置坐标数据库。根据以上优缺点,从成本、便于安装、稳定性等因素考虑,提出一种适用于扫地机器人的超声波和航迹推算融合室内定位系统。

对于超声波室内定位系统,采取 2.4G 通信模块进行时钟同步,通过计算超声波在发射装置与接收装置间的传播时间,从而得到两者间的距离。基于 TOA 测距模型,通过最小二乘法计算出待测目标的位置坐标。

对于航迹推算室内定位系统,采用编码器得到距离信息。将陀螺仪、加速度计的测量值,经过四元数分析和卡尔曼滤波得到角度信息。最后通过航迹推算得到待测目标的位置坐标。

通过融合算法将超声波定位与航迹推算两者融合,搭建出多传感器融合定位系统。通过航迹推算,极大程度提高了定位系统的稳定性。通过超声波定位,对航迹推算定位带来的累计误差进行周期性修正。

最后通过搭建实验测试平台,对融合定位系统的数据进行分析,分析其误差与缺陷。证明了超声波与航迹推算融合定位方案的在扫地机器人平台上的可行性。在不影响精度的同时,减小了扫地机器人室内定位方案的硬件成本。

5.2 未来展望

尽管本文在基于扫地机器人的室内定位方案上取得了一点成就，将超声波定位与航迹推算定位融合，取长补短，极大的降低了扫地机室内定位方案的硬件成本。但由于时间和能力所限，还存在着部分不足。在以下方面可以继续改进或完善：

(1) 可在扫地机器人外围安装红外传感器或者超声波传感器探测障碍物，知道障碍物信息后，配合定位系统得到的位置坐标，通过 SLAM 人工智能算法构建出室内轮廓地图，在扫地机之后的行驶过程中，实时定位并对地图进行优化，达到自适应的过程。

(2) 在超声波覆盖率上还有很大的提升空间，在不影响定位系统安装的便捷性的情况下，可适当增加超声波发射装置的个数。

(3) 对于基站 A 与 B 的分时发送，可以采用超声波调制解调的方法，实现基站 A 与 B 同时发送但互不干扰。

(4) 目前在状态规划和路径规划方面，只用了 PID 算法保证机器人的直行和转向按固定姿态。可以增加些其他算法与规划。因为移动机器人的行走路线智能化可以适当减小定位的复杂度和提高定位的精确度。

(5) 对于数据融合部分，在算法上还有很大的提升空间，当航迹推算与超声波定位都有数据时，目前仅采用了前期预处理和直接采取超声波定位，后期可以采用人工神经网络法、模糊逻辑推理等算法，将航迹推算的数据也融合到本系统。

致谢

时光匆匆，转眼间，两年半的硕士生涯即将结束。在 ICC 实验室（超大规模集成电路与系统研究中心）的两年半时光，有过挫折与艰辛，但是更多的是收获与喜悦。

回首自己的研究生时光，首先感谢我的指导老师邹志革老师。从参加完研究生复试，我就提前半年来到超大规模，开始跟着邹老师做项目。作为一个从应用物理学跨专业来到 ICC 实验室的学生，邹老师总是细心的教导我。一直记得，刚来实验室的时候，我甚至都不明白数字集成电路、模拟集成电路、嵌入式的区别，邹老师认真的为我讲解这三者的区别，询问我的兴趣，帮我介绍实验室的项目。由于跨专业，前期在项目上困难重重，邹老师从不催我，反而是鼓励我、激励我。邹老师在对我们培养上，以身作则，言传身教，邹老师每天早上都是第一个来到实验室开始学术研究。在生活上，邹老师也对学生给与帮助，搬家时会主动询问要不要开车帮我搬家。在科研的同时，邹老师也会督促我们进行体育锻炼，每周会组织一次羽毛球比赛。“你们应该有两个朋友，一个是实验室，一个是球场”，这是邹老师常对我们说的一句话。

同时也感谢我的另外位导师，雷鑑铭老师。雷老师认真细致的思维方式、乐观向上的生活态度，也一直影响着我。在扫地机器人项目上，给与了我很多的帮助与指导，使我获益匪浅。

感谢我同组的组员，在项目上，他们总是毫无保留的给与我意见。在与他们的交流中，我总是可以学到很多。与你们一起完成项目真的挺开心。

衷心感谢 ICC 实验室所有的老师和师兄师姐们，你们一直作为我求学路上的榜样，给与我帮助，激励着我前行。

最后，要感谢我的父母。感谢他们一直以来对我的关爱与教育，感谢他们给我提供了一个舒心的家庭环境，让我健康的成长。

参考文献

- [1] 柴剑. 智能扫地机器人技术的研究与实现: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [2] 基于激光与单目视觉融合的机器人室内定位与制图研究: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [3] Li H, Zheng S, Xin N. Precise Control for Gimbal System of Double Gimbal Control Moment Gyro Based on Cascade Extended State Observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(6):1~1.
- [4] Qiu S, Wang Z, Zhao H, et al. Inertial/Magnetic Sensors based Pedestrian Dead Reckoning by Means of Multi-sensor Fusion. *Information Fusion*, 2017, 39:108~119.
- [5] Masoud A, Hoff W. Segmentation and tracking of nonplanar templates to improve VSLAM. *Robotics & Autonomous Systems*, 2016, 86:29~56.
- [6] Qian C, Liu H, Tang J, et al. An Integrated GNSS/INS/LiDAR-SLAM Positioning Method for Highly Accurate Forest Stem Mapping. *Remote Sensing*, 2016, 9(1):3~3.
- [7] 韦春玲, 王步飞. 基于 WLAN 接收信号强度特征的室内活动识别. *计算机应用*, 2017, 37(5):1326~1330.
- [8] Ke M, Xu Y, Anpalagan A, et al. Distributed TOA-based Positioning in Wireless Sensor Networks: A Potential Game Approach. *IEEE Communications Letters*, 2017, PP(99):1~1.
- [9] Wang Y, Ho K C. TDOA Positioning Irrespective of Source Range. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(6):1447~1460.
- [10] Tomic S, Beko M, Rui D. Distributed RSS-AoA Based Localization With Unknown Transmit Powers. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(4):1~1.
- [11] Bartoletti S, Dai W, Conti A, et al. A Mathematical Model for Wideband Ranging. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2015, 9(2):216~228.
- [12] Sharp I, Yu K. Indoor TOA Error Measurement, Modeling, and Analysis~. *IEEE*

- Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 1(9):2129~2144.
- [13] 王龙, 章政, 王立. 改进扩展卡尔曼滤波的四旋翼姿态估计算法. 计算机应用, 2017, 37(4):1122~1128.
- [14] 张栋, 焦嵩鸣, 刘延泉. 互补滤波和卡尔曼滤波的融合姿态解算方法. 传感器与微系统, 2017, 36(3):62~65.
- [15] 唐洋, 白勇, 马跃,等. 基于 WiFi 的指纹匹配算法在室内定位中的应用研究. 计算机科学, 2016, 43(5):73~75.
- [16] 吴泽泰, 蔡仁钦, 徐书燕,等. 基于 K 近邻法的 WiFi 定位研究与改进. 计算机工程, 2017, 43(3):289~293.
- [17] 李祺, 秦红磊. 卫星导航接收机通用射频前端设计及实现. 电子测量技术, 2017, 40(2):73~76.
- [18] 基于蓝牙 4.0 低功耗室内定位研究: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [19] 洪凯程. 长航时惯性导航模型仿真及验证技术研究: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [20] 周婧, 陈庙红, 吴豪杰. 基于惯性导航的平面航迹推算的研究. 计算机科学, 2017, 44(S1):582~586.
- [21] 徐盛良. 基于信号强度与超声波测距结合的室内定位系统: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [22] 王鹏彰, 孙美玲. 基于 PSO-SVM 的四旋翼航向角误差补偿研究. 传感器与微系统, 2017, 36(3):48~50.
- [23] Jung D, Lee J M, Gwon S Y, et al. Compensation Method of Natural Head Movement for Gaze Tracking System Using an Ultrasonic Sensor for Distance Measurement. Sensors, 2016, 16(1):110~110.
- [24] 汪葵, 魏民祥, 赵万忠,等. 基于递推最小二乘法与模糊自适应扩展卡尔曼滤波相结合的车辆状态估计. 中国机械工程, 2017, 28(6):750~755.
- [25] 魏培, 姜平, 贺晶晶,等. 基于内三角形质心算法的超宽带室内定位. 计算机应用, 2017, 37(1):289~293.

- [26] 李岩, 周次明, 田涛, 等. 基于光纤多普勒效应的超声传感方法. 光子学报, 2018(2):49~54.
- [27] 唐雷, 张哲琛, 赵忠华, 等. 基于误差四元数与 Kalman 滤波的行人惯导系统设计. 电子设计工程, 2017, 25(4):1~4.
- [28] Barrau A, Bonnabel S. The Invariant Extended Kalman Filter as a Stable Observer. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, PP(99):1~1.
- [29] 孙伟, 文剑, 张远, 等. MEMS 陀螺仪随机误差的辨识与降噪方法研究. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(1):15~20.
- [30] Higham N J, Noferini V. An algorithm to compute the polar decomposition of a 3×3 matrix. Numerical Algorithms, 2016, 73(2):349~369.
- [31] 徐晋鸿. 基于多传感器融合的机器人导航级大范围室内定位研究: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [32] 李开灿, 刘大飞, 林存津. Lomax 分布极大似然估计的两点研究. 数学杂志, 2016(1):207~213.
- [33] Zhang F, Knoll A. Systematic Error Modeling and Bias Estimation. Sensors, 2016, 16(5):729~729.
- [34] 张峰, 陈华伟, 李妍文. 基于多核最小二乘支持向量回归的 TDOA-DOA 映射方法. 数据采集与处理, 2017, 32(3):540~549.
- [35] 魏江来. 数据库模糊逻辑推理中的关键信息索引优化. 计算机仿真, 2016, 33(8):457~460.
- [36] Rong H, Lv J, Peng C, et al. Dynamic Regulation of the Weights of Request Based on the Kalman Filter and an Artificial Neural Network. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(23):1~1.
- [37] Martínez-Cañada P, Morillas C, Plesser H E, et al. Genetic algorithm for optimization of models of the early stages in the visual system. Neurocomputing, 2017, 250:101~108.
- [38] 张平, 刘祚时. 基于惯性传感器 MPU6050 的手势识别方法. 传感器与微系统,

2018, 37(1):46~49.

- [39] 刘从. 一款反激式峰值电流模 PWM AC-DC 转换器 XD1230 的设计: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [40] 姜成平. 一种四旋翼无人机控制系统的设计与实现研究: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [41] Azini A S, Kamarudin M R, Jusoh M. Transparent antenna for WiFi application: RSSI and throughput performances at ISM 2.4 GHz. Telecommunication Systems, 2016, 61(3):569~577.
- [42] 蒋旭. 基于分形结构的压电陶瓷振动换能器研究: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2018.