

# 基于多传感器的室内机器人定位算法

作者姓名 赵予玮

指导教师姓名、职称 李颖 教授

申请学位类别 工学硕士



学校代码 10701  
分 类 号 TP242

学 号 1401120102  
密 级 公开

# 西安电子科技大学

## 硕士学位论文

### 基于多传感器的室内机器人定位算法

作者姓名：赵予玮

一级学科：信息与通信工程

二级学科：通信与信息系统

学位类别：工学硕士

指导教师姓名、职称：李颖 教授

学 院：通信工程学院

提交日期：2017 年 6 月



# **The Indoor Robots Localization Algorithm Based on Multi-sensors**

A thesis submitted to  
XIDIAN UNIVERSITY  
in partial fulfillment of the requirements  
for the degree of Master  
in Communications and Information Systems

By  
Zhao Yuwei  
Supervisor: Li Ying Professor  
June 2017



## 西安电子科技大学 学位论文独创性（或创新性）声明

秉承学校严谨的学风和优良的科学道德，本人声明所呈交的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，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同事对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文若有不实之处，本人承担一切法律责任。

本人签名：\_\_\_\_\_ 日 期：\_\_\_\_\_

## 西安电子科技大学 关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于西安电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅、借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。同时本人保证，结合学位论文研究成果完成的论文、发明专利等成果，署名单位为西安电子科技大学。

保密的学位论文在\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

本人签名：\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_ 日 期：\_\_\_\_\_





## 摘要

移动机器人在室内定位的应用愈发广泛。本文主要围绕室内机器人循迹研究的三个关键问题进行探究，其分别是自定位、创建地图及路径规划问题。通过使用各类传感器去感知机器人周围环境以及所处环境位置，这种自定位技术是机器人能够完成导航等各种任务的前提。

首先，本文设计了一种新的 RFID（Radio Frequency Identification Devices）传感器结合超声波传感器的方法进行信号强度定位。并使用赋权值比例算法得到待定点的横坐标，再结合超声波测距获得纵坐标，从而在全局地图上某些固定位置上对机器人进行精准的定位，以消除传统的航位推算法中的累计误差。并且提出了 RFID 标签作为人工路标进行辅助定位算法。将路标信息储存到 RFID 标签中的定位指示算法，将一些固有的位置信息，如房间门、走廊拐角等的位置信息按照一系列规则，存储在 RFID 的标签之内，便于下一次机器人行走到该位置时，辅助定位当前位置信息。

为了实现机器人的同时定位与地图创建，本文设计了一种基于多超声波传感器的局部地图构建法对教学楼室内环境进行局部地图构建，并且在检测到突变情况的时刻根据局部地图融合绘制全局地图。

在进行地图创建和自定位工作之后，为了保证基于 RFID 及超声波定位算法实验中的机器人平行于墙壁行走以及实时的位姿调整，我们在本文中设计了机器人直行控制算法。包括机器人的直行、旋转等控制指令。该算法适用于基本的室内机器人位姿调整，为解决室内路径规划问题奠定良好的基础。

由于单独使用 RFID 结合超声波定位来进行机器人室内定位时，会有定位距离过短等局限性。因此本文利用了 ZigBee 的定位范围大、功耗低等优点。将 RFID 以及超声波传感器结合 ZigBee 传感器实现室内机器人定位，弥补了单独使用 RFID 结合超声波定位的不足。并且 RFID 结合超声波定位算法也可以弥补单独使用 ZigBee 传感器在网络边缘或者之外等临界位置的定位误差较大的问题。

由于室内环境的复杂性以及单一传感器体系的信息局限性等各类因素，室内机器人在感知外部环境时，若使用一定的融合方法，将多个传感器所获得的环境信息进行更充分的融合利用。即可获得比单一传感器得到的环境信息更多有效精确的数据信息，从而将外界环境特征记录的更全面准确，为室内机器人实现自身的定位导航等更多复杂的功能提供更多的数据支持。

**关键词：**室内机器人， 地图创建， 自定位， 射频识别技术， ZigBee



## ABSTRACT

More and more mobile robots are widely used in indoor positioning. This paper mainly studies of three key issues of the robot navigation in indoor environments: robot self-localization, map building and path-planning. Robots use various sensors to sense the surrounding environment information and their position in the environment. This independent positioning technology is the precondition of robots can complete various tasks such as navigation.

Firstly, this paper presents a new way of locating the RFID (Radio Frequency Identification Devices) labels to achieve signal strength location, and use empowerment algorithm to get the horizontal axis, combined with the ultrasonic distance measurement to obtain the vertical axis, so that we can get the accurate position of robot at some fixed point to decrease the cumulative error of the Dead Reckoning location. And this paper puts forwards an assistant localization algorithm by using the RFID tags as artificial landmarks. It saves sign information of location in the RFID tags. We can store some inherent location information, such as room door, corridor, corner location information in accordance with some rules, in the RFID tags. This way can help the robots to auxiliary locate the current location information when they walk to the location next time.

In order to achieve the robot's locating and the map creating at the same time, this paper designs a local map building method based on multiple ultrasonic sensors to build the indoor environment local map. And in moments of mutations, it can detect and bulid overall map.

After the map creation and the work of locating, this paper designs a robot control algorithm to ensure that robot walking parallel to the wall in the experiment based on RFID and ultrasonic localization algorithm and to adjust the real-time posture. This algorithm includes the robot walking straightly instructions and rotating control instructions. The algorithm is suitable for adjusting the basic indoor robots positions, and it can lay the good foundation to solve the problem of indoor path planning.

Due to separately using RFID combined with ultrasonic to locate the robot indoor

positioning will bring us the limitations of short positioning distance. This article takes the advantage of the large range of ZigBee positioning and its low power consumption. It combines RFID and ultrasonic sensor and ZigBee sensor to realize the indoor robot localization, making up for the deficiency of the use RFID combined with ultrasonic to locate position singly. And the RFID combined with ultrasonic locating algorithm can also compensate for the error of using ZigBee singly sensor on the edge of the network or outside of the critical location's positioning.

Because of the complexity of the indoor environment as well as the information limitations of the single sensor system and other kinds of factors, if the indoor robots perceive the external environment by using a certain mixing method, it will help more sensors to make better use of the environment information. It can get more effective and accurate data information than using single sensor to gain the environment information, which will records the external environment characteristics more comprehensively and accurately. And it can provide more accurate data for indoor robot to realize its own navigation and positioning and more complex functions.

**Keywords:** indoor robot, map building, self-localization, RFID, ZigBee

## 插图索引

图 1.1 ZigBee 协议栈架构 .....	7
图 2.1 到达时间定位原理图 .....	11
图 2.2 到达时差定位原理图 .....	12
图 2.3 混合定位法原理图 .....	13
图 2.4 机器人的坐标系统 .....	17
图 2.5 机器人位姿描述 .....	18
图 3.1 RFID 定位系统组成示意图 .....	21
图 3.2 实际 RSSI 与理论 RSSI 值对比图 .....	24
图 3.3 拟合距离与实际距离对比图 .....	25
图 3.4 HC-SR04 超声波测距模块 .....	26
图 3.5 超声波脉冲信号时序图 .....	27
图 3.6 超声波传感器位置图 .....	35
图 3.7 阅读器与标签之间的位置示意图 .....	36
图 4.1 定位系统节点分布图 .....	40
图 4.2 实验一节点位置信息图 .....	44
图 4.3 实验二节点信息位置图 .....	45



## 表格索引

表 1.1 LOCENG 状态寄存器控制指令 .....	8
表 1.2 CC2431 寄存器名称及作用 .....	8
表 3.1 方案一下五个标签的 RFID 定位结果 .....	30
表 3.2 方案二下五个标签的 RFID 定位结果 .....	31
表 3.3 方案一下十个标签的 RFID 定位结果 .....	31
表 3.4 十个标签的 RFID 与超声波结合定位结果 .....	32
表 3.5 距离与几何模型判断规则 .....	35
表 3.6 角度对 RSSI 值的影响对比表 .....	37
表 4.1 N 和 n_index 转换表 .....	42
表 4.2 实验一中实际坐标与实验定位坐标对比表 .....	44
表 4.3 实验二中对参考节点的网络之内时的实际坐标和实验坐标对比表 .....	45
表 4.4 实验二中对参考节点的网络之外时的实际坐标和实验坐标对比表 .....	46





## 符号对照表

符号	符号名称
$C$	电磁波在空气中传播的速度
$R_i$	传感器到待测目标的距离
$t_i$	发射机发射信号到目标再返回接收器的时间
$(x_0, y_0)$	待定点坐标
$R_{ij}$	待测目标距离 $i$ 传感器与 $j$ 传感器之间的距离差
$\theta$	待测目标和传感器的水平线夹角
$r$	车轮半径
$p$	光电码盘转速
$\Delta t$	相距 $t$ 时刻的时间差
$\Delta d_L, \Delta d_R$	机器人的左右轮移动距离
$\Delta D$	机器人的移动距离
$u_k$	航位推算算法的输入
$r_k$	机器人的运动半径
$X_{k+1,k}$	机器人的里程计模型
$\omega_k$	服从高斯白噪声分布的噪声
$XOY$	全局坐标系
$X'O'Y'$	机器人局部坐标系 $X'O'Y'$
$(r, \beta)$	传感器坐标系
$\xi$	机器人在全局坐标系下的的位姿
$R(\theta)$	正交旋转矩阵
$\xi^R$	机器人局部坐标系下的机器人位姿
$P(d)$	阅读器接收到距离为 $d$ 的标签发送回来的信号强度
$P(d_0)$	参考点 $d_0$ 处接收到的的信号强度
$n$	路径长度和路径损耗之间的比例因子
$X_\sigma$	平均值为 0 的高斯分布随机变量
$d$	标签到读写器的距离
$d_0$	参考点位置
$d_{\min}$	最小的标签距离
$w_i$	第 $i$ 个标签算出的坐标所对应的权重
$A$	定位节点距参考节点一米时的信号强度值的绝对值

N	定位节点远离参考节点一米后信号强度值的衰减
$X_{LOCX}$	从 LOCX 寄存器中读出的值
$x_{delta}, y_{delta}$	限制搜索的边界参数

## 缩略语对照表

缩略语	英文全称	中文对照
ALV	Autonomous Land Vehicle	自主陆行车
CMU	Carnegie Mellon University	卡内基梅隆大学
GPS	Global Position System	全球定位系统
WSN	Wireless Sensor Network	无线传感器网络
Wi-Fi	Wireless Fidelity	无线保真技术
RFID	Radio Frequency Identification Devices	无线射频识别
IBM	International Business Machine	美国国际商用机器公司
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers	电气与电子工程师协会
GPRS	General Packet Radio Service	通用分组无线业务
3G	The 3rd Generation Telecommunication	第 3 代移动通信技术
AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing	按需距离矢量路由
NWK	Kde Network Wizard Kde	网络
PAN	Personal Area Network	个人局域网
OSI	Open System Interconnect Reference Model	开放系统互联参考模型
ALP	Application Layer Protocol	应用层协议
PHY	Physical Layer	物理层协议
MAC	Media Access layer	媒介层协议
SAP	Service access point	服务接入点
SOC	System on a Chip	片上系统
TOA	Time of Advent	到达时间
TDOA	Time Difference Of Arrival	到达时差
RSSI	Received Signal Strength Indicator	接收信号强度值
AOA	Activity on Arcs	角度测量
BS	Base Station	基站
DR	Dead Reckoning	航位推算法
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping	同时定位及地图构建
RFID	Radio Frequency Identification	射频识别
PC	Personal Computer	个人电脑
VCC	Volt Current Condenser	电源
GND	Ground	接地

TRIG	Trigger ranging	触发测距
I/O	Input/Output	输入/输出
TTL	Time to Live	一个封包在网络上存活时间
KHz	kilohertz	千赫
KNN	k-Nearest Neighbor algorithm	K 最邻近结点算法
LSB	Least Significant Bit	最低有效位

# 目录

摘要 .....	I
ABSTRACT .....	III
插图索引 .....	V
表格索引 .....	VII
符号对照表 .....	IX
缩略语对照表 .....	XI
目录 .....	XIII
第一章 绪论 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 RFID 技术研究现状 .....	3
1.3 ZigBee 技术研究现状 .....	4
1.4 ZigBee 系统组成 .....	5
1.4.1 ZigBee 系统结构 .....	5
1.4.2 ZigBee 路由协议 .....	5
1.4.3 ZigBee 网络结构 .....	5
1.4.4 ZigBee 协议栈 .....	6
1.4.5 CC2431 硬件简介 .....	7
1.5 本文主要的研究内容 .....	8
第二章 机器人定位与地图构建技术简介 .....	11
2.1 现有的定位算法介绍 .....	11
2.1.1 到达时间定位(TOA) .....	11
2.1.2 到达时差定位(TDOA) .....	11
2.1.3 信号强度定位 (RSSI) .....	12
2.1.4 角度测量定位 (AOA) .....	13
2.1.5 混合定位法 .....	13
2.1.6 航位推算法 (DR) .....	14
2.2 同时定位与地图构建概述 .....	15
2.3 地图描述方法 .....	16
2.3.1 栅格地图(grid-based map) .....	16
2.3.2 几何特征地图(geometric feature map) .....	16
2.3.3 拓扑地图(topological map) .....	16

2.4 机器人的坐标系统模型 .....	17
2.5 本章小结 .....	19
<b>第三章 基于 RFID 及超声波结合定位算法研究</b> .....	<b>21</b>
3.1 RFID 定位技术的系统组成 .....	21
3.2 基于 RFID 的室内机器人定位技术研究 .....	22
3.2.1 无线信号强度测距原理 .....	23
3.2.2 信号强度与距离之间的关系 .....	23
3.3 超声波测距原理及基本技术 .....	25
3.4 基于 RFID 及超声波定位算法研究及定位实验 .....	28
3.4.1 信号强度定位算法 .....	28
3.4.2 赋权值比例算法 .....	29
3.4.3 RFID 定位与超声波测距的结合 .....	32
3.4.4 基于 RFID 人工路标的辅助定位 .....	33
3.5 基于超声波传感器的地图构建算法 .....	34
3.5.1 局部地图的构建 .....	34
3.5.2 全局地图的构建 .....	36
3.6 基于超声波传感器的直行控制算法 .....	36
3.7 本章小结 .....	38
<b>第四章 基于 ZigBee 定位算法研究</b> .....	<b>39</b>
4.1 ZigBee 室内机器人定位技术设计 .....	39
4.1.1 定位实现过程 .....	39
4.1.2 盲节点坐标的计算流程和方法 .....	41
4.2 ZigBee 定位算法研究及定位实验 .....	43
4.3 本章小结 .....	47
<b>第五章 总结与展望</b> .....	<b>49</b>
5.1 本文工作总结 .....	49
5.2 未来研究展望 .....	49
<b>参考文献</b> .....	<b>51</b>
<b>致谢</b> .....	<b>55</b>
<b>作者简介</b> .....	<b>57</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景

21 世纪以来，移动机器人技术作为新兴产业发展的技术之一，它在各种科学实验领域的发展受到了人们越来越多的关注，同时也逐渐走进了我们的生活中。

自主性与带动性是移动机器人的显著特点，因此在很多学科中，比如：人工智能学科、控制工程学科、计算机科学学科、电子工程学科等，机器人技术都有着其独特的应用背景。在医疗、国防、生活、教育等方面，移动机器人的研究都起着重要意义<sup>[1]</sup>。

计算机技术和人工智能技术的高速发展也同时促进了机器人技术的迅速扩展。机器人的应用领域也逐渐开始从传统的工业制造向各种新型的智能服务领域转型。各种服务类的机器人出现在我们身边，比如图书馆的书单索引机器人、医院中的监控病人身体指标的机器人、家庭中的教育孩童的机器人、小区中的安防巡视机器人、餐饮行业中的点餐机器人等。

斯坦福大学在 20 世纪 60 年代研究出了第一个自主移动机器人，开启了机器人研究的新世纪。与此同时，美国通用电气公司 General Electric Quadruped 研制出了可以在不平坦环境下运动的步行机器人。80 年代伊始，人形机器人计划在日本开始研究；同时期，在美国能源部开展了智能系统计划并且在美国国防部开始进行研究 ALV（自主陆行车）；欧洲尤里卡中心的机器人研究计划也逐渐进行了开展；世界各大公司也逐渐投入资金与精力到移动机器人中。如今，科技的发展不断推进着移动机器人走向更智能实用的方向。如硅谷无人驾驶初创公司 LuminarLidar 用激光传感器量产无人车；亚马逊的机器人部门 Amazon Robotics 在 2014 年新增了 15000 台机器人，来帮助包裹的搬运处理；AlphaGo 之父杰米斯·哈萨比斯设计的阿尔法狗在 2016 年大战围棋冠军李世石事件上一举成名等。

移动机器人的研究虽然在我国起步相对于国外某些发达国家而言较晚，但其发展趋势很迅猛。2016 年深圳的机器人企业共 469 家，产业产值达 787 亿元，得益于领先布局全产业链、优化产业结构，本土企业强势崛起，深圳机器人产业已迈入高速发展期；2017 年 4 月 13 日，消费级无人机寡头大疆创新发布了全新的精灵 Phantom 4 Advanced 无人机，为追求高画质航拍用户群体量身定制的产品，实现了专业级的航拍；2017 年 CES 展会上北京一维弦科技（Ewaybot）推出的 MoRo 家居助理机器人可以通过实时语音控制，用户可以使用自然语言与 Moro 交互，在室内和室外环境中进行导航。

因此离我们日常生活很近的室内移动机器人的自主移动研究逐渐成为一个热点问题。在室内机器人移动过程中，有三个主要的问题：在哪里，去哪里，怎么去。而这些问题的核心，就是室内机器人定位技术。

现如今，定位系统中技术最纯熟的系统是全球定位系统（GPS）<sup>[2]</sup>。但 GPS 存在着非自主性、较差的动态性能并且定位目标受遮挡会导致丢失信号等缺点不利于应用在室内环境中<sup>[3]</sup>，并且室内存在的各种多径效应、非视距传输等问题会使定位精度下降很明显。<sup>[4][5]</sup>因此在这些干扰因素较大的室内环境里，无线传感器网络（WSN）<sup>[6][7][8]</sup>在室内定位中的应用现如今也愈发的广泛。Wi-Fi 作为常见的室内定位技术手段之一，在某些信号比较强的室内位置范围里，定位精度最高可达十几米，但是却无法准确地显示用户的位置<sup>[9]</sup>。蓝牙技术则是一种微观层次上的技术，许多建筑物内都在使用这项技术<sup>[10]</sup>，但是信号衰减太严重，隔墙体较多的环境有可能就会接收不到信号。定位技术发展大致可以描述为“GPS—Wi-Fi—Bluetooth—RFID”，各类传感器如陀螺仪、加速度传感器及电子罗盘等都可以辅助提供数据给定位机器人。因此基于传感器的室内机器人定位成为了现阶段室内机器人自主定位的主要研究对象。

而作为常用定位传感器的 RFID，在传统的定位技术中起着至关重要的作用。在传统的 RFID 传感器定位中<sup>[11][12][13]</sup>，往往采用的是三点定位方式。其具体方法是已知三个 RFID 传感器的位置坐标，通过信号强度测量得到三个 RFID 传感器分别与目标标签的距离，通过已知点坐标与到目标点距离列方程求解，从而得到目标点位置。但由于各种误差因素影响，通常得到的三个圆是相交成某一区域而非特别精确的一点。通常的解决方法为计算所相交的该区域的质心。这种传统的 RFID 单独进行室内定位的缺点则是：受环境影响较大，误差较大，且计算过程复杂。

为了克服利用 RFID 单独进行室内定位的种种缺陷，张璐阳等在信息通信 2011（3）：99-100 期刊上发表名为《基于超声波测距的 RFID 监控方案》的文章中<sup>[14]</sup>，他提出了一种将 RFID 和超声波传感器结合起来，共同进行室内定位的方法，主要内容是对于所需要定位的物品，都分配一个 RFID 标签。在室内四角装上 RFID 传感器，每个 RFID 传感器虽然只有有限的识别监控范围，但通过布置 RFID 传感器的位置，令可识别范围中的每个 RFID 标签都能接收至少两个 RFID 传感器所发射出的射频信号，获得其位置信息。当阅读器另外再识别到新的 RFID 标签出现在该识别区域或在该区域移动时，RFID 阅读器检测并获取该标签上的信息。同时，超声波传感器跟踪反馈其位置到中央处理单元，最终达到实时监控跟踪的目的。

这种方法虽然解决了 RFID 传感器和超声波传感器单独定位方法的误差和精度问题，但是却需要多个 RFID 传感器进行目标识别，同时需要设置多个超声波发射点进



行定位。其自身的缺点是：针对不同的实际需求灵活性较差，数据处理过程依然复杂。

为了克服上述现有技术存在的缺陷，本论文提出了一种基于多点 RFID 结合超声波的室内机器人定位方法，用于解决现有 RFID 结合超声波的机器人室内定位方法中存在的针对不同的实际需求灵活性较差，数据处理过程复杂的问题。并且引入了 ZigBee 传感器，克服了 RFID 结合超声波定位时距离过短的缺点。

RFID 和 ZigBee 技术是比较新兴的机器人定位技术，它们的定位优势主要在于设备简单、成本较低、便于安装操作、传输速率高，在室内机器人定位领域有着重要的应用。由于室内环境的复杂性、自身状态的不定性、单一传感器体系的信息局限性等各类因素，室内机器人在感知外部环境时，如果仅仅只靠单一的传感器体系是很难进行精准定位的。因此在实际的机器人定位系统中，我们将多个不同的传感器获得的环境信息使用一定的方法进行融合，并且进行更充分的利用。相对于单一传感器所获得的环境信息，这样的融合方式能提供更有效精确的数据信息，从而将外界环境特征记录的更全面准确，为室内机器人实现自身的定位导航路径规划等更多复杂的功能提供更多准确的数据支持。本论文着重对基于多传感器的室内移动机器人定位算法进行了研究和实验。

## 1.2 RFID 技术研究现状

RFID<sup>[15]</sup>是现如今很主流的一种非直接接触式的识别技术，通过发射射频信号去识别各个指定的标签并读取各个目标标签上被写入的信息。这种识别技术成为 21 世纪最有发展前景的技术之一。其优势在于无需人工参与、非接触式、并且可以在各种恶劣工作中应用等。

在军事应用领域，英国最先将射频识别技术用于战争中甄别敌军飞机身份。在 20 世纪 60 年代，RFID 技术普及到各种商用零售业及军用领域中，比如利用 RFID 识别药品是否造假；使用 RFID 标签对军需物资进行身份识别等。2010 年的统计数据表明，欧洲大约占 3% 的公司将 RFID 技术应用在公司产品的生产控制中以及跟踪库存产品、对员工进行身份识别、停车场的汽车收费和安保方面的门禁控制等场景中。

与世界发达国家的发展水平相比，国内相对于 RFID 的研究与应用还是存在着比较大的差距。国内在 RFID 产业领域缺乏自主的核心技术，在超高频 RFID 领域的技术当面基本处于起步阶段。由于在低高频领域里的 RFID 技术领域门槛较低，国内许多企业进入该领域也相对较早，因此在低高频领域的应用技术较为成熟，应用范围也比较广泛。从全球范围看，RFID 大部分芯片市场技术被欧美国家的飞利浦、西门子厂商占领。而 RFID 的标签、天线及读写器则主要由 Intermec、Symbol 等公司供给。IBM、HP、微软等公司所主导了 RFID 的系统集成研究。RFID 技术现如今已经应用

在身份识别、公交地铁、仓库管理、车辆管理及生产线自动化控制等领域发挥着重大的作用。

RFID 做为应用领域日益扩大的一项未来科技产业技术，现如今已经应用在我们日常生活的各种角落中。并随着物联网的发展，RFID 技术将会广泛促进效率的提升，为我们的日常生活造福。在近期，Muhammad Jawad Hussain 设计了一种基于以 RFID 的手机防丢失和防盗措施的方案<sup>[16]</sup>：通过为手机配备低功耗 RFID 阅读器，并将机主用无源 RFID 标签标记，为手机主人在丢失手机的瞬间给予视听警报，并当检测出已经远离机主执行相应的安全措施。而电子标签的应用也日益广泛，比如 Feng Zhu 等人于 2017 年提出的专注于多个 RFID 阅读器下的标签分配问题<sup>[17]</sup>。识别分析各个标签，这也是如今是高效产品库存和管理的基础前提。

虽然在现有的 RFID 技术领域，还有着相当多的问题需要解决，例如 RFID 为基础的定位系统受环境影响比较明显，在恶劣天气或者环境下的稳定性差并且定位误差较大；电子标签步骤的部署过程较为复杂，如果布置的不合理就会引起定位的覆盖范围小等问题，这些问题在以后的研究中会做进一步解决。随着 RFID 定位技术的不断完善改进，其应用潜力还有待我们进一步挖掘开发。

### 1.3 ZigBee 技术研究现状

ZigBee 协议最开始是由 IEEE802.15.4 小组设计的通信协议，第一个标准于 2014 年 12 月 14 日发布，至今已就十个系列的产品发布相应的标准及规范。根据 07 年 ZigBee 联盟所发布的规范，ZigBee 产品系列由此而诞生，在医疗保健、智能家居、智能能量控制、电信服务及零售服务等应用领域，起着其独特的作用<sup>[18]</sup>。

ZigBee 应用广泛，它有着低功耗、可自动组网等优点。如今 ZigBee 有着通用的 IEEE802.15.4 标准以及制定的其他各种协议标准，特别是制定出的 ZigBee ZIP 协议，为未来与 IP 网的对接提供了平台。如今，ZigBee 可定位范围为 10-300 米，虽然数据传输速率是 250Kbps，传输过程中功率仅需要 1mW，可以同时部署最大节点为 65000 个，并且在传输中能保证所进行通信的信息的安全性。很多主流芯片厂商都支持 ZigBee 芯片。ZigBee 自带无线路由功能，理论上可以使 ZigBee 覆盖的通讯面积无限拓展。ZigBee 在物联网和环境监测方面的应用也越发广泛，在物联网技术的基础下，ZigBee 的无线网络技术可以实现实时地监测小区或者校园等环境。总体来说，ZigBee 是目前工控及医疗领域无线接入很好的方式之一。

ZigBee 的发展前景主要包括：家庭室内的空调系统的温度控制、室内电器的自动控制、煤气自动计量控制等在智能家居内的应用。在工业控制领域，可以使用各种 ZigBee 传感监控器来进行工业上的自动化控制。在公共场所中也可以用于烟雾探测

器等火警设备中。在医疗领域，可以应用于老人等行动不便者的医疗传感器，对他们的各类身体指标、血压、体温及心率等信息进行实时监控。

## 1.4 ZigBee 系统组成

蜜蜂传递方位信息的八字舞，这种独特的交流方式构成了蜂群之间的通信网，ZigBee 之名也来源于此，它也被人们叫做 IEEE802.15.4 协议<sup>[19]</sup>。这种短距离无线通信技术的成本低廉、复杂度低、远低于其他设备的功耗并且可以灵活自组网等特点使得 ZigBee 在室内机器人定位和远程智能控制领域有着其得天独厚的优势。其仅为 1mW 的发射功率已然很低，且在使用 ZigBee 时，还可以通过开启休眠模式省电。因此相较于其他无线设备如 GPS，ZigBee 的功耗非常之低。我们可以在不同的应用需求下搭建实际所需求的特定的 ZigBee 网络架构，通过灵活的自组网方式容纳更多的从设备，并且可以通过调整 ZigBee 设备数量和不同的自组网方式来满足对定位精度要求。

### 1.4.1 ZigBee 系统结构

下述的三个部分组成了 ZigBee 的结构<sup>[20]</sup>：第一部分为控制器、智能传感器、智能终端等各类数据采集设备，以及由这些底层设备通过相互的连接所形成的感知层网络。第二部分则是将底层设备采集到的数据利用各种接入技术，如：Wi-Fi、GPRS、卫星等，传输到互联网上的拥有强大的查询、存储及计算能力的网络层。第三部分是感知不同的需求状态，提供特定服务给用户的应用层。

### 1.4.2 ZigBee 路由协议

ZigBee 路由协议也称为 AODV 的专用网络路由协议<sup>[21]</sup>。该协议规定了在网络环境下节点的移动、数据连接失败或者数据包丢失等一些网络规则。其规则如下：若目标节点在路由器的相邻位置时，当收到某一个数据包时，路由器会直接将数据给目标临节点传递。若目标节点并非相邻节点时，路由器检索路由表中曾经被记录的下一级地址的路由记录，若路由记录依然没有被检索到，数据将会被存储在缓冲区内并且 ZigBee 路由器继续发起路径寻找。ZigBee 的各类节点进行通信时是依靠它们父亲节点执行路由功能，比较特殊的是，终端节点不具备任何路由功能。ZigBee 作为路由器时的功能有：路径的选择和维护等。

### 1.4.3 ZigBee 网络结构

ZigBee 的终端设备对存储器容量的要求是最少的并且可以通过使用网络和其他设备进行通信从而执行一系列的功能。但是不同的网络层（NWK 层）的构架会对设

备所需的资源造成不同的影响。

星状、网状和树状是最基本的 ZigBee 网络结构<sup>[22]</sup>。其中星状结构拥有路由功能的 PAN 协调器是整个网络的中心，它可以进行数据的处理和融合、初始化整个网络中的其他设备并且对它们进行维护。在协调器周围位置，还另外分布着其余的终端设备，这些终端设备可以直接和协调器通信并将数据送至该节点。收到数据后协调器将其融合，再将处理后的数据转发。协调器设备是整个 ZigBee 网络的分布式处理中心。星状网络结构虽然组网简单且成本较低、功耗较低但对于整个网络覆盖而言，一旦中心节点发生了故障，会导致整个网络通信瘫痪。各个节点之间的通信将会被中断并且通信的范围由于成本等各类因素受限。

在网状 ZigBee 网络结构中，网络覆盖范围大且伸缩性很好，通过 PAN 协调器建立网络并且选择网络参数。对比于星状结构，该结构可靠性很高。当网络中个别节点或者这些节点间的链路出现故障时，整个通信网不会瘫痪，其他路由会作为代替通道传输数据。相反，组网方式较为复杂，功耗大则是其组网方式的缺点。

而树状网络结构中，结合了上述两种网络结构的特点，协调器节点的作用是采用分层路由的策略来选择网络关键参数并且建立网络，传输数据和控制信息。在树状网络结构中，各个传感器节点串联在一条或多条通信链路中，每条链路都与终端的传感器节点连接起来。这种树状结构的组网方式让 ZigBee 网络结构变得更加高效可靠灵活，但是缺点则是当中间节点出现故障失效时，某些节点也同样会失去连接，导致不能通信。

#### 1.4.4 ZigBee 协议栈

ZigBee 协议栈<sup>[23]</sup>的基础为 OSI 模型。与该模型所相异的是，ZigBee 协议栈只对原有七层中涉及到 ZigBee 的层进行相关定义。并且在原有 IEEE 802.5.4-2003 标准的基础上，该协议栈体系又新建立了 ALP 层、安全服务提供层和 NWK 层。该堆栈提供给 ZigBee 规范所要求的所有功能，堆栈的架构图如下。

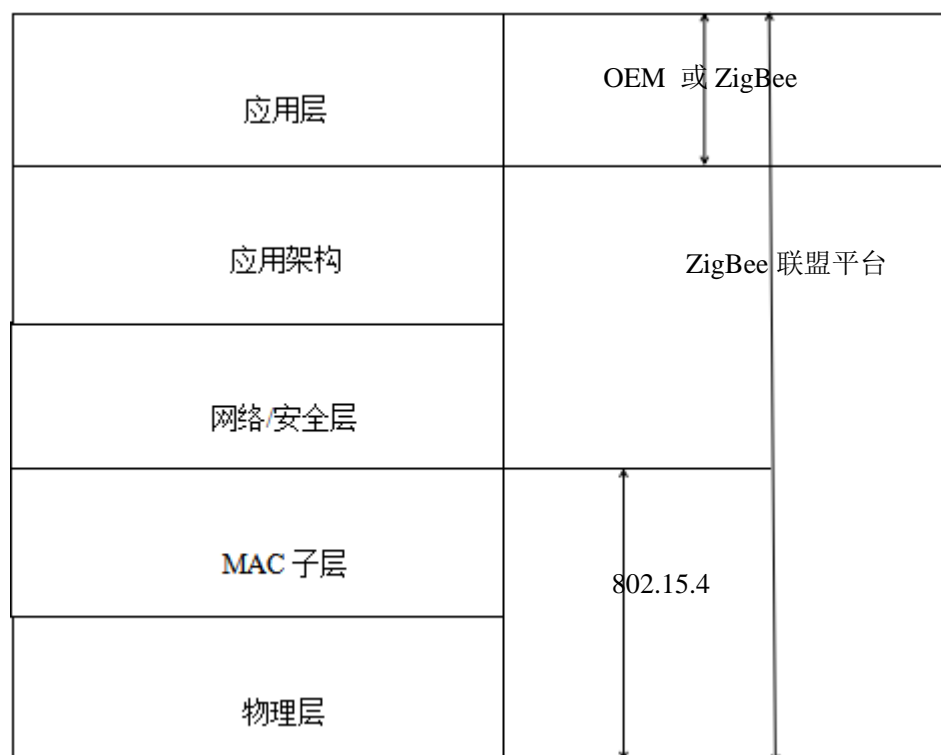


图 1.1 ZigBee 协议栈架构

SAP 连接了各子层与 802.15.4 MAC 的通信。其中大多数层都存在两个接口：数据实体接口，提供上层所需的常规数据服务；另一个为管理实体接口，为上层提供内部层的配置参数与管理机制。

### 1.4.5 CC2431 硬件简介

由 TI 公司所设计的 CC2431<sup>[24][25]</sup>是 ZigBee 技术较为成熟的一款无线短距离传输的 SoC 系统，它拥有着硬件定位引擎和无线路由功能，并能满足 IEEE 802.15.4 无线传感器网络的应用需要。其工作原理是通过测量接收到的信号强度 RSSI 值和各个参考节点的坐标信息计算出盲节点的位置信息，然后将位置坐标信息发送给终端。

对 CC2431 内部寄存器操作时，其定位引擎也会获得相应操作指令。整个定位引擎寄存器名为 LO2CENG，若想开启整个定位工作时，首先置 LOCENG.EN 为 1。并且将 A、N 值和信号最强的 8 个参考节点对应的 RSSI 值写入寄存器。对盲节点坐标估算时，则将 LOCENG 中 PARLD 位置 0，并且将 LOCENG 中 RUN 位置 1。

等待一定的时延后，就可以从 LOCX 和 LOCY 中分别读出盲节点的横纵坐标值，这些坐标会一直保持有效，直到寄存器重新启动或者刷新出新的计算结果。

在 CC2431 中，相关寄存器主要包括 LOCENG、LOCX、LOCY、LOCMIN 等。对于 LOCENG 状态控制寄存器的控制指令介绍如表 1.1，对于其他寄存器名称介绍如

表 1.2。

表 1.1 LOCENG 状态寄存器控制指令

Bit	Name	Reset	R/W	Description
7~5		000	R0	Reserved, read as 0
4	EN	0	R/W	定位引擎使能 0: 中断引擎; 1: 闭合引擎
3	DONE	0	R	数据准备好后, 置为 1
2	PARLD	0	R/W	读取参数并将参数写到寄存器 MEASPARM 中, 置 1 并且在写完最后一位后置 0
1	REFLD	0	R/W	读取坐标并将坐标写到寄存器 REFCOORD 中, 置 1 并且在写完最后一位后置 0
0	RUN	0	R/W	置 1 则开始计算估计坐标值

表 1.2 CC2431 寄存器名称及作用

Bit	Name	Reset	R/W	Description
7~0	REFCOORD	00h	R/W	存储参考节点的横坐标及纵坐标
7~0	MEASPARM	00h	R/W	存储 A, n 值和 8 个所选出的参考节点的 RSSI 值
7~0	LOCX	00h	R	定位计算盲节点横坐标
7~0	LOCY	00h	R	定位计算盲节点纵坐标
7~0	LOCMIN	00h	R	定位计算最小值

## 1.5 本文主要的研究内容

如今, 室内移动机器人技术主要研究以下三个典型也是最关键的技术即自我定位技术、地图创建技术和路径规划技术。

在早期室内移动机器人的研究中, 其自我定位和地图构建是单独分成两个相互独立的方面而研究的。为了构建自身局部地图, 机器人需要得知当前时刻所处的位置。相反, 为了自身定位, 机器人需要感知周围准确的环境地图。这种机器人的自我定位

和地图构建是存在着一定的数据关联性的。1988 年, Smith 等人第一次提出了机器人的同时定位及地图构建 SLAM 算法<sup>[26]</sup>, 这成为了机器人真正实现自主导航移动的关键步骤。在一个未知环境中机器人自主进行定位, 构建周围环境地图, 这是解决上述三个室内机器人经典问题的基础。

室内移动机器人的定位方法可分为相对位姿定位和绝对位姿定位, 相对位姿定位根据移动机器人的内部里程计, 陀螺仪等传感器进行定位<sup>[27]</sup>, 此类方法会存在较大的累计误差且精度较差。另一种为绝对位姿定位, 它是依据机器人传感器或外界标识来获取环境信息并且进行定位<sup>[28]</sup>, 此类定位方法对传感器精度要求较高。本文使用第三章提出的 RFID 与超声波融合定位算法对 DR 算法进行修正校准。

本文提出了一种基于 RFID 传感器、超声波传感器及 ZigBee 传感器融合的室内机器人定位算法。同时提出了相邻超声波传感器来对地图进行构建的一种算法, 并且可以利用局部地图构建出全局地图。并给出室内机器人直行旋转等一些基本的控制算法。

第一章简要阐述了本文的研究背景及意义, 对 RFID 及 ZigBee 技术的发展现状进行了概述, 简单介绍了 ZigBee 的系统组成与 CC2431 的硬件功能, 归纳了本论文的主要研究内容。

第二章简要介绍室内机器人的同时定位与地图构建技术, 概述了现有的机器人通用的定位算法。阐述了机器人的坐标系模型及位姿表述方式以及三种通用的描述地图方法。

第三章设计了一种 RFID 融合超声波共同进行室内机器人定位的算法, 并且提出了 RFID 标签作为人工路标进行辅助定位算法。本章设计了基于相邻传感器的局部地图构建, 并设计了一种简单算法, 将局部地图融合组建成为全局地图, 实现了机器人自定位与地图构建的共同实现。并且为了保证章节 3.4 中的基于 RFID 及超声波定位算法实验中的机器人平行于墙壁行走以及实时的位姿调整, 在本章设计了机器人直行控制算法。

第四章基于 ZigBee 的定位算法研究。研究了基于信号强度的 ZigBee 定位算法, 并提出了单独使用 ZigBee 进行室内定位的缺点, 分析了与 RFID 结合超声波定位算法融合起来共同定位的优点。

第五章列出本文所做的工作, 得出关于所设计的室内定位算法相应结论, 并对未来工作的研究方向进行了展望。





## 第二章 机器人定位与地图构建技术简介

如绪论中所阐述的，机器人同时进行定位及地图构建的 SLAM 算法，是机器人真正实现自主导航移动的关键步骤。因此本章主要介绍室内机器人现有的定位算法、三种通用的描述地图方法、机器人的三种坐标系模型及位姿表述方式。

### 2.1 现有的定位算法介绍

#### 2.1.1 到达时间定位(TOA)

到达时间定位算法的原理是用三个已知位置对所需坐标进行定位<sup>[29][30]</sup>。将电磁波在空气中传播的速度  $C$  乘以发射信号返回到接收器的时间  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ ，分别得到与待定处的坐标位置  $(x, y)$  之间的距离。利用这三个已知点的坐标  $(x_i, y_i)$  及它们到所求的待定目标点的距离值  $R_i = c \cdot t_i$ ，列出方程组如下，利用数学知识计算待测位置的坐标信息。

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 = R_1^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 = R_2^2 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 = R_3^2 \end{cases} \quad (2-1)$$

解得待定点坐标  $(x_0, y_0)$ ，原理图如图 2.1 所示。

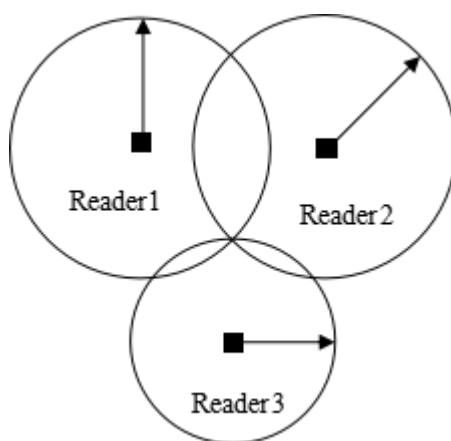


图 2.1 到达时间定位原理图

#### 2.1.2 到达时差定位(TDOA)

在到达时差定位算法中，同样也是已知三个已知位置的坐标。在同一时刻，同时

测量三个已知位置到待定位坐标的距离<sup>[31][32]</sup>。该待测的位置坐标位于以传感器 Reader1 和传感器 Reader2 为焦点的双曲线上，其距离差  $R_{21} = c \cdot (t_2 - t_1)$  为标差。并且该待测目标同时也位于以传感器 Reader1 与 Reader3 为焦点的双曲线上，距离差  $R_{31} = c \cdot (t_3 - t_1)$  为标差。利用双曲线的几何原理列方程求解最终得到待定点的位置坐标。

$$\begin{cases} \sqrt{(x_0 - x_2)^2 - (y_0 - y_2)^2} - \sqrt{(x_0 - x_1)^2 - (y_0 - y_1)^2} = R_{21} \\ \sqrt{(x_0 - x_3)^2 - (y_0 - y_3)^2} - \sqrt{(x_0 - x_1)^2 - (y_0 - y_1)^2} = R_{31} \end{cases} \quad (2-2)$$

最终解得待定点坐标  $(x_0, y_0)$ ，原理图如图 2.2 所示。由于该算法要求每个已知位置上的传感器的时钟一定要同步，否则该算法计算所得误差很大，无法精确的求解得到目标标签的位置。

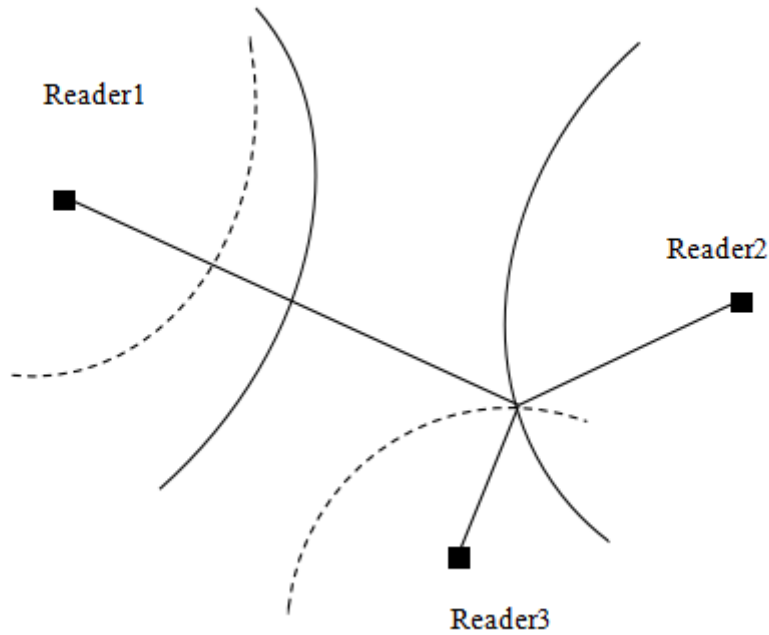


图 2.2 到达时差定位原理图

### 2.1.3 信号强度定位（RSSI）

RSSI 信号强度值定位算法<sup>[33]</sup>，其主要原理是通过接收器获取接收到的信号强度值，并且利用传播损耗模型公式将 RSSI 值转化为距离，再利用已有的算法算出移动节点的位置信息。在第三章中在 RFID 结合超声波融合定位算法中，同样运用了该 RSSI 定位算法，将收到的各标签 RSSI 值转换为各标签距阅读器的距离值，在后文会

进行详尽的说明分析。该定位算法的优点是易于在室内环境搭建自身所需的 RFID 标签布局，简单易行，RFID 标签成本也很低。其缺点则是但受环境影响且容易受干扰。

#### 2.1.4 角度测量定位 (AOA)

AOA 测量法<sup>[34][35]</sup>的算法通过检测信号反射回来的方向。通过传感器感知待测目标返回电磁波的来波方向（即入射角），虚拟创建出一条从待测位置到传感器之间的连线。同样，我们按这种方式通过多个不同位置的传感器测到的信号来波的角度值，创建出的多条直线交汇于一点，就可以确定唯一的目標的位置坐标，即为目标位置。虽然该方法的定位精度比较高，但同时它成本较高，其接收端的天线阵列的价格较为高昂。

#### 2.1.5 混合定位法

混合定位一般是基于测距和测角这两种基础定位方法来对定位目标进行定位，原理图如图 2.3 所示。

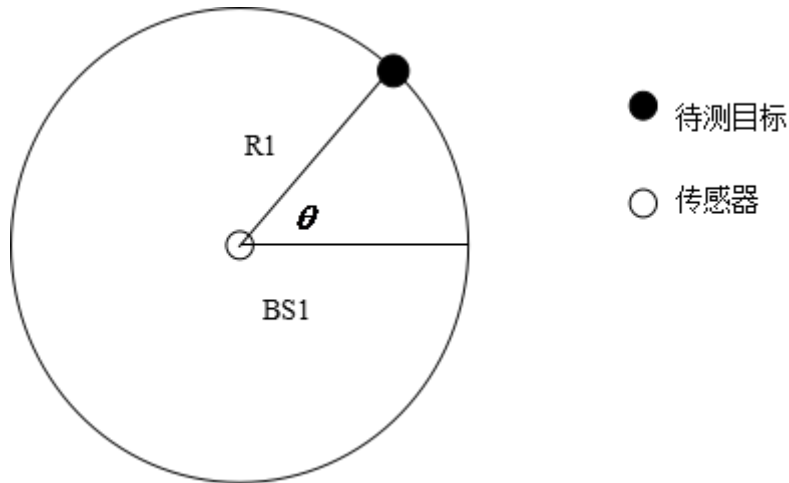


图 2.3 混合定位法原理图

在图 2.3 中，当传感器测得与待测目标距离为  $R_1$ ，BS 为基站（BaseStation），并且测得待测目标和传感器的水平线夹角  $\theta$ ，以基站的位置作为坐标原点，竖直方向为纵坐标方向建立坐标系，根据几何推导可以得到：

$$\tan(\theta) = \frac{(x_0 - x_1)}{(y_0 - y_1)} \quad (2-3)$$

$$(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 = R_1^2 \quad (2-4)$$

通过解该方程组，所求的待测目标的坐标  $(x_0, y_0)$  就可以得到了。

### 2.1.6 航位推算法 (DR)

航位推算法<sup>[36]</sup>的现代定义是由 Cotter 首先提出来的。这种算法的基本思想是让机器人从一个已知坐标的位置处开始行走，根据机器人在该点的速度，方向以及运动的时间，推算出运动到下一时刻的坐标位置。在该算法中，我们利用里程计等传感器来对机器人的两个轮子在一定时间内分别所转过的弧度值进行检测计算。假设里程计的光电码盘为  $p$  线/转，并且已知机器人的两个轮子半径均为  $r$ 。在一段时间  $\Delta t$  内，测得光电传感器输出的脉冲数为  $N$ ，则可以计算出机器人轮子的移动距离是：

$$\Delta d = 2 \cdot (N / p) \cdot \pi r \quad (2-5)$$

设机器人的左右两侧的轮子移动距离分别为  $\Delta d_L, \Delta d_R$ ，并且两个轮的之间的间距为  $a$ ，机器人若从位姿  $X_k = (x_k, y_k, \theta_k)$  变换到  $X_{k+1} = (x_{k+1}, y_{k+1}, \theta_{k+1})$ ，则该机器人的移动距离为：

$$\Delta D = (\Delta d_L + \Delta d_R) / 2 \quad (2-6)$$

在这段时间里机器人所转过的角度为：

$$\Delta \theta = (\Delta d_L - \Delta d_R) / a \quad (2-7)$$

我们将  $u_k = (\Delta D_k, \Delta \theta_k)$  作为航位推算法的输入，因此可以将机器人的运动弧度所对应的半径描述为：

$$r_k = \frac{\Delta D_k}{\Delta \theta_k} \quad (2-8)$$

其中， $\Delta D_k$  是机器人在一段时间内对应的弧长， $\Delta \theta_k$  是机器人在该段时间内角度的变化值。因此我们定义该机器人的里程计模型为：

$$X_{k+1,k} = f(X_{k,k}, u_k) + \omega_k \quad (2-9)$$

$\omega_k$  为该过程中服从高斯白噪声分布的噪声。

航位推算法在移动机器人的导航研究中，可以很方便地帮助我们利用里程计来描述机器人在一定时间内位姿的变换。里程计在短时间内可以较准确地表述机器人的运

动增量信息并且它拥有较高的采样率。在短距离定位算法中，有着其显著的优点。但是由于航位推算法是一个逐渐累加的过程，该算法的测量和计算误差是不可避免的，若不及时的使用一定辅助方式对该算法进行累计误差的消除，则会导致最终的坐标计算偏离很大。里程计会产生一系列累计误差的原因可以大致分为非系统误差及系统误差。非系统误差主要有：运动在路面不平整上的环境导致某一个车轮打滑，机器人车体碰撞在的障碍物等不可避免的情况。而在地面较为平整规则的室内环境中，主要影响最终的计算结果是系统误差。其包括有：机身两侧轮子的半径差异、标称值上面的差异、码盘的固有采样频率等固有情况所带来的误差。

因此，本文第三章提出的 RFID 结合超声波定位算法对机器人在全局坐标系上进行定位，从而可以消除由单一的里程计传感器所带来的累积误差的影响。

## 2.2 同时定位与地图构建概述

同时定位与地图构建算法<sup>[37]</sup>也称为 SLAM 算法，它是室内机器人能实现自主移动的关键前提条件，也是室内移动机器人能自主导航的关键技术。

SLAM 问题可被描述如下情形：假设有机器人从未知起点出发并开始移动，在行走的过程中，机器人通过对周围环境的观测及测得的移动增量等数据构建该未知环境的地图，并且利用描绘出的室内地图来实现自定位。为了实现构建地图，室内机器人需要已知实时的位姿信息。相反的，为了实现自定位，机器人也需要得知周围当前的环境地图信息。二者相辅相成，在机器人感知环境的过程中相互实现。

Smith Self 和 Cheeseman 在 1989 年第一次提出 SLAM 以来，该问题逐渐成为了机器人技术的研究热点，大量研究工作人员在进行了一系列研究推算工作后，获得了很多实用性的方法和成果与进展<sup>[38]</sup>。

现阶段，比较通用的 SLAM 方法主要有：航位推算法、卡尔曼滤波器法和粒子滤波器法等。

航位推算法是通过里程计、陀螺仪、加速度传感器等机器人内部的传感器在地图上进行移动累计并进行定位<sup>[39]</sup>，在第一章绪论中已简单的概述了该算法原理。

Smith 等人在构建随机地图中应用了卡尔曼滤波器法<sup>[40][41]</sup>。该方法将机器人的控制信息直接输入到系统状态方程中，通过对环境特征的观测和特征提取来获取机器人的位置和地图特征等信息的预测。并且在整个过程会不断更新特征地图信息和机器人自身的位姿信息。由于卡尔曼滤波法的计算过程较为繁琐，算法的复杂度较高，因此这种算法的适用于结构化室内环境或小范围的室外环境。降低该算法的复杂度也成为了现如今研究领域的另一个热点问题。

Murphy 等人最早运用了粒子滤波法<sup>[42]</sup>解决栅格地图的构建问题。粒子滤波器法

需要大量的样本数量才能更优的得到近似的后验概率密度,并且在复杂环境中所需要的样本数量则会变的也很多,从而导致算法复杂度较高。因此,有效减少所需样本数量的采样方式也成为了粒子滤波算法时需要重点考虑的关键问题。

## 2.3 地图描述方法

栅格地图、几何特征地图与拓扑地图是传统描述地图特征的方法,用它们去构建地图时分别有着其各自的优缺点。

### 2.3.1 栅格地图(grid-based map)

Moraves 和 Elfes 最先提出了栅格地图<sup>[43]</sup>的构建方法,现在已经成为通用流行的室内机器人绘制地图的描述方法之一。

栅格地图的表述思想是将整个大环境分割成为若干大小相同的栅格单元格,并且在每个单元格之中都要设定一个概率值,其数值大小表示障碍物存在于该栅格单元格上的可能性。

栅格法也属于一种近似描述地图的方法,这种方法不需要对环境的特征信息做出很精确的描述,并且栅格地图很易于更新、构建和维护。栅格地图存在的缺点则是它描述环境的精确度不高。而且随着环境不断扩大,栅格地图所需要的栅格数量不断增大,从而导致地图创建所需内存不断增加,机器人在这种大地图上路径规划效率较低的地图上快速完成信息的实时处理将会变得很难。

### 2.3.2 几何特征地图(geometric feature map)

Laumond 和 Chatila 最早提出了几何特征地图<sup>[44]</sup>,这种地图表示法的思想主要是机器人在利用自身各类传感器收集到的周围环境信息之后,在其中提取各类诸如线段、面、拐角等几何特征,并且根据提取出的环境特征再对应于现实中的门、墙壁以及走廊里的拐角等的环境特征。

这种地图描绘方法使用了几何特征来对环境进行一系列的表述,整体较为直观明确,环境模型也易于绘制,便于机器人对目标位置进行识别并且做出良好的路径规划。但是几何特征法需要对探测数据进行一定的预处理,探测数据的数量的不同也会对该地图描绘起着不同的精度影响,并且这种方法还会受到环境中的噪声的影响,因此几何特征描述法适合对高度结构化比如各种室内环境进行描述。

### 2.3.3 拓扑地图(topological map)

Byun 和 Kuipers 最早提出了拓扑地图<sup>[45][46]</sup>,室内环境可被建模成一张带节点的拓扑图,各节点间用连接线相连。各个节点映射于实际环境中的某些特殊的地点,比

如可以代表各种电梯门、房间门、走廊拐角、楼梯入口等比较特殊的位置。同样的，节点间的连接线对应于不同节点之间的通道，比如实际环境中房间 A 和房间 B 之间的通道等各类位置。

在环境中某些的具体地理特征在拓扑图中可以被忽略，并且在该地图描述方法中也不必精确的描述不同节点之间具体的地理位置关系，机器人的位姿信息也不必要求表述的很精确详尽。拓扑图虽然比较抽象地描述了实际环境，但是在构建拓扑地图中，可快速的实现对路径的规划，并且该地图表示简单、易于扩展并且占内存很小，比较适合用于表示较大规模的集成环境。相反，拓扑地图的缺点是它创建和维护比较困难，并且环境复杂度会影响其分辨率。

## 2.4 机器人的坐标系模型

在移动机器人自定位及地图创建的过程中，局部坐标系  $X'O'Y'$ 、全局坐标系  $XOY$  和机器人机身上传感器坐标系  $(r, \beta)$ ，分别起着其各自的作用，表述了不同的特征信息。

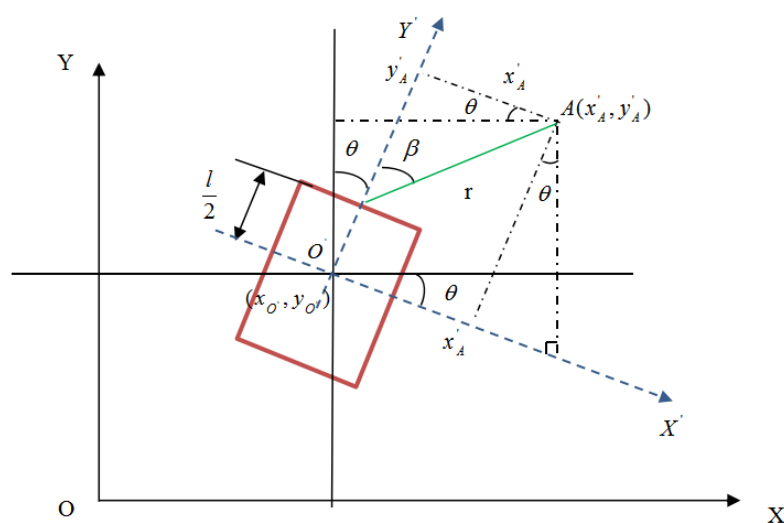


图 2.4 机器人的坐标系

这三种机器人的系统模型如图 2.4 所示， $X'O'Y'$  表示机器人局部坐标系， $XOY$  代表全局坐标系，此二者都是笛卡尔坐标系<sup>[47]</sup>。其中，在局部坐标系  $X'O'Y'$  上可以表述机器人实时运动状态，原点  $O'$  为机器人机身最正中位置，其纵坐标  $Y'$  方向也是机器人前行的方向。最后一个坐标系是由传感器构成的极坐标系  $(r, \beta)$ ，其中， $r$  是目标位置到传感器的距离值， $\beta$  为机器人行进方向和传感器与目标物的连线形成的夹角。红色的矩形框描述的是机器人的机体， $l$  为机器人机体的侧边长度大小， $\theta$  表示全局参考坐标系与自身的局部坐标系所形成的角度差。

全局坐标系  $XOY$  相对于整个室内大环境是处于静止的坐标系。它可以表述出机器人的实际位置信息。而机器人坐标系  $X'O'Y'$  则是相对于机器人机体本身是静止的。以室内环境为参考物，该坐标系是实时变换的。

机器人的位置以及车体行进方向<sup>[48]</sup>共同表述了室内移动机器人的位姿，即机器人当前的运动状态。移动机器人的位置可以由一个全局坐标  $(x, y)$  唯一确定， $Y$  轴与  $Y'$  轴夹角  $\theta$  可描述机器人前进方向。机器人全局坐标系下的位姿可表述为：

$$\xi = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

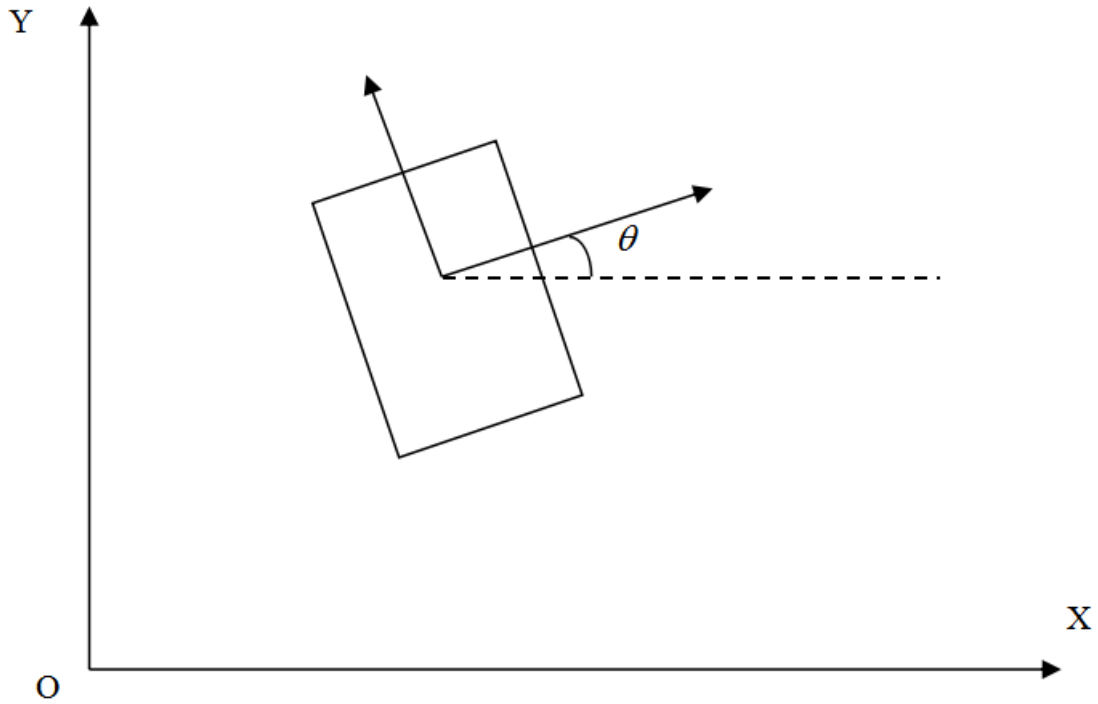


图 2.5 机器人位姿描述

如图 2.5 所示，机器人的位姿状态向量也可以表示为  $(x, y, \theta)$ 。图中  $\theta$  角表示与  $X$  轴的夹角大小，顺时针为正，反之为负。

局部坐标与全局坐标之间可利用正交旋转矩阵互相转换<sup>[49]</sup>。定义转换矩阵  $R(\theta)$ ：

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$



局部坐标与全局坐标之间的映射关系可以表示为：

$$\xi^R = R(\theta)\xi \quad \xi = R(\theta)^{-1}\xi^R$$

$$R(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

其中， $\xi^R$  代表局部坐标系下机器人位姿，而  $\xi$  代表在全局坐标系下机器人位姿。在现有的室内地图构建算法中，常用的算法是先自身的机器人坐标系上绘制出实时的局部地图，再经过机器人的对环境变化的感知，进一步地融合构建绘制出全局地图。

## 2.5 本章小结

如今，SLAM 技术是室内移动机器人研究领域的热点问题，本章简要介绍了 SLAM 的思想以及三种通用的描述地图方法，分别分析了这三种地图构建方法的优缺点，在最后简要地介绍了机器人绘制地图时常会用到的三类坐标系，给出了机器人在局部坐标系及全局坐标系中的位姿描述方法及它们之间的映射关系。



### 第三章 基于 RFID 及超声波结合定位算法研究

#### 3.1 RFID 定位技术的系统组成

射频识别，即 RFID 的定位，它的原理是通过识别特点的电子标签并读写相应的数据来得到各个电子标签与 RFID 阅读器之间的信号强度值的大小，并将各个强度值代入到传播损耗模型公式中转换成各个电子标签到阅读器的距离，再利用数学几何关系，计算出目标标签所在的坐标位置。因此将基于 RFID 的定位也称为电子标签定位。

RFID 的定位系统<sup>[50]</sup>主要由阅读器、电子标签、发射天线以及数据处理终端等部件所共同组成。各个部件之间的组成原理如图 3.1 所示。

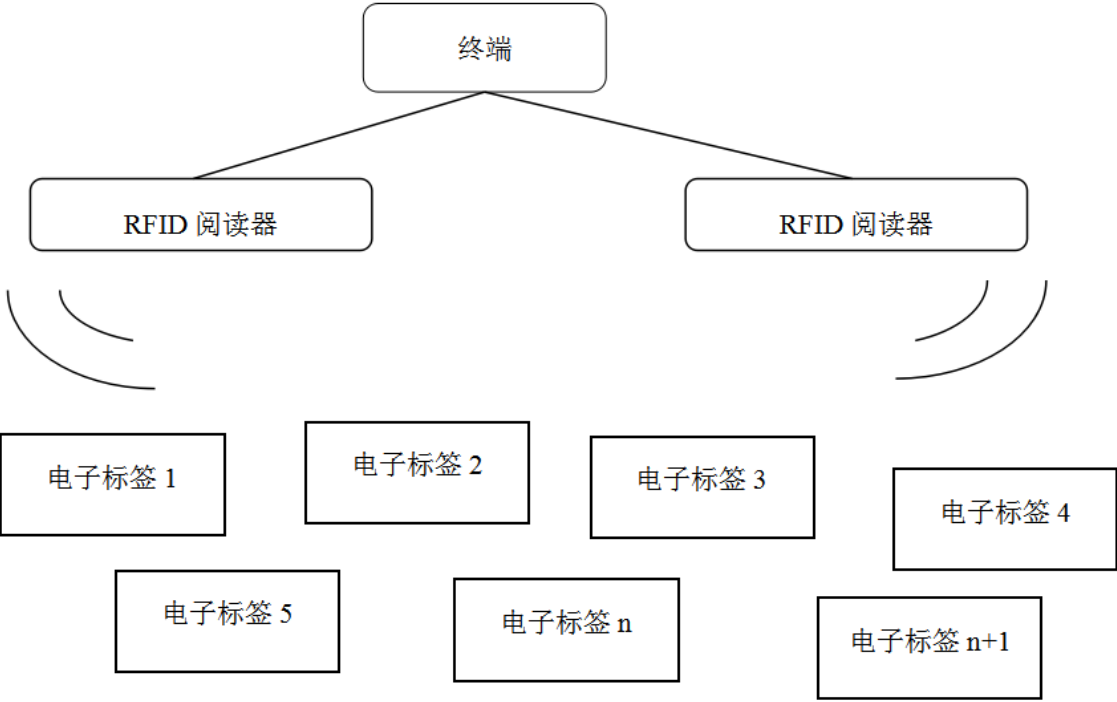


图 3.1 RFID 定位系统组成示意图

(1) 阅读器

控制射频发射接收信号是阅读器的首要任务。在系统控制电路的作用下，阅读器朝外发射一定频率的射频信号，并利用射频的收发器接收从外界各个电子标签传回来的信号，并且对各个已编码的射频信号进行解码操作，再将识别出的各个电子标签上记录的相关信息全部传输给上位机等处理器去处理。

(2) 天线

阅读器上的天线是阅读器和各个电子标签之间通信的媒介设备，它主要负责发射与接收射频信号。我们可以根据实际定位的精度需求来选择不问功率的天线。

### (3) 电子标签

各式各样的电子标签可以放置在待定位的目标物体表面，也可以放置于待定位的物体的体内，每个电子标签的电子编码都是独一无二的，因此被放置的标签目标也可以被阅读器唯一地确定身份。按制作材料可以分为金属标签、木质标签和纸质标签等。芯片及各种耦合元器件组成电子标签，当标签进入定位系统耦合电路所形成特定的电磁场中时，即进入可识别的范围内，标签内产生感应电流，传送已被特定编码的信息回到阅读器，最后阅读器将信息传至处理终端。

### (4) 数据处理终端

在数据处理终端上，我们可以对 RFID 系统进行相应的操作，从而获取定位所需要的数据以及标签内的相关信息。

RFID 阅读器具有体积小重量轻等优点，便于直接安装在室内移动机器人上。同时，各式各样的 RFID 标签有低成本、体积小便于携带隐藏、可重复读写等优点，因此多个电子标签布置在各种不同室内环境时也很方便。同时，射频信号在穿透玻璃、实木、纸张等材质时，拥有着具有较强的穿透性，其信号也不易衰减。以上各类 RFID 特性对研究室内机器人定位起着很重要的作用。

通过发射及接收射频信号，RFID 读写器读取信号区域内的多个 RFID 电子标签的信息。然而，射频信号易受各种电磁场的干扰，如人体的磁场、计算机的磁场等，同时环境对射频信号的影响也比较大。因此在室内较大范围内，若单纯用 RFID 传感器来进行室内机器人定位时会有较大的误差影响。

## 3.2 基于 RFID 的室内机器人定位技术研究

RFID 的定位过程可以简单描述为：RFID 阅读器首先在周围一定范围内不断发射射频信号，当各个电子标签出现在该阅读器所产生的射频感应磁场中时，标签内部的会获得感应电流为芯片供能，内部的芯片就会通过内置天线将储存好的信息送至阅读器。阅读器收到信息后，对这些射频信号解码，从而获得电子标签记录的相关信息，并将其记录的信息传送给数据处理终端，最后通过一系列的算法计算得到待测标签的坐标，再进行相关计算从而实现室内移动机器人的定位。

对 RFID 系统而言，由于各个电子标签返回信号强度的衰减不同，不同位置的标签对应的 RSSI 值也不同。因此利用阅读器收到的 RSSI 值就能推算出各个标签和阅读器间的距离。最后通过分析电波传播的路径损耗模型，以及电波的反射散射等传播模型来估计在射频信号在定位过程中的一些重要的特征参数。

### 3.2.1 无线信号强度测距原理

我们可以将 RFID 传感器获取到的信号强度值 RSSI 利用对数—常态分布传播损耗模型<sup>[51]</sup>公式将接收到的 RSSI 值转化为距离值。

在一个 RFID 系统中，每个电子标签所发出的都是一个固定的信号强度值。但是由于各种实际环境因素影响且各个标签和阅读器之间的距离也不同，射频信号的传播损耗也是不同的，因此 RFID 阅读器接收到不同电子标签的信号强度也不同。我们可以根据阅读器接收到的信号强度值，将其代入到理论和经验的传波损耗模型中，即将信号强度与估算的距离值一一对应起来。在理论上，射频信号的衰减与距离值之间的关系是对数关系。当 RFID 的标签节点离发射端越近时，整个无线信号强度测距系统的绝对距离误差就越小；反之，当 RFID 标签节点距离信号发射端大于某一个临界值时，整个无线信号强度测距系统的绝对距离误差将会变得很大。临界值的大小随着不同环境的变换而变化，应根据实际的测距精度、天线功率大小等实际因素而考虑。

机器人在室内运动时，移动节点可以回收到  $n$  个参考节点的信号，所以应当选取 RSSI 绝对值较大前几个参考节点进行定位计算，这样的方式可以在一定程度上减少 RFID 定位系统的误差。在本文中采用对数—常态分布传播损耗模型对射频信号的衰减和距离进行描述，该模型可以表示为：

$$P(d) = P(d_0) - 10n \lg(d / d_0) - X_\sigma \quad (3-1)$$

$P(d)$  代表在距阅读器  $d$  处的 RSSI 值； $P(d_0)$  代表在参考位置  $d_0$  处的 RSSI 值； $n$  称为信号传播常量，其含义是描述路径损耗与路径长度之间的比例，此常量由各种障碍物分布的实际环境决定； $X_\sigma$  是均值为 0 的一个高斯分布随机变量，具体含义是射频信号穿过障碍物时的衰减。

根据上述模型，可得到阅读器与标签的距离  $d$  和它们之间 RSSI 的转换关系，表达式如下：

$$d = d_0 10^{[P(d_0) - P(d)] / 10n} \quad (3-2)$$

$P(d_0)$  和  $n$  大小均与的信号传播的实际环境有关，因此需要在具体的环境下进行测量和计算。

### 3.2.2 信号强度与距离之间的关系

本文中的实验采用的天线的识别量程为 3 米，并且在 1 米距离之内的测量精度比

较高。固定 RFID 阅读器的位置，从距离阅读器 10cm 处开始移动一个电子标签，并且每隔 10cm 进行一次测量并记录数据。为避免某些突发因素的影响，本实验每在一个位置时，会记录十组数据，并求出每一个位置时估算距离的平均值。

根据 (3-1) 式，可以推导出信号传播常量  $n$ ，其数学表达式如下：

$$n = (P(d_0) - P(d)) / 10 \lg(d / d_0) \quad (3-3)$$

我们可以令参考位置  $d_0$  为 10cm，在该点测量并得到  $P(d_0)$  和其他某一已知位置的信号强度  $P(d)$  值。进行利用多次实验，分析所测得的数据，求出实际当前环境下的  $n$  值，并求出  $n$  的平均值，最终本实验得到  $n$  的数值大小是 1.9914。由于不同的实际环境中  $n$  值也会随其变化，因此每当实际环境改变时，应重新进行上述步骤重新测量信号传播常量。最后将当前环境下测得的  $n$  值带入到公式 (3-2) 中，即可以求出根据阅读器读取到的 RSSI 值所对应的估计距离值。

阅读器实际读取到的 RSSI 值和由该点位置的距离值理论推算出的 RSSI 值关系图如图 3.2 所示。

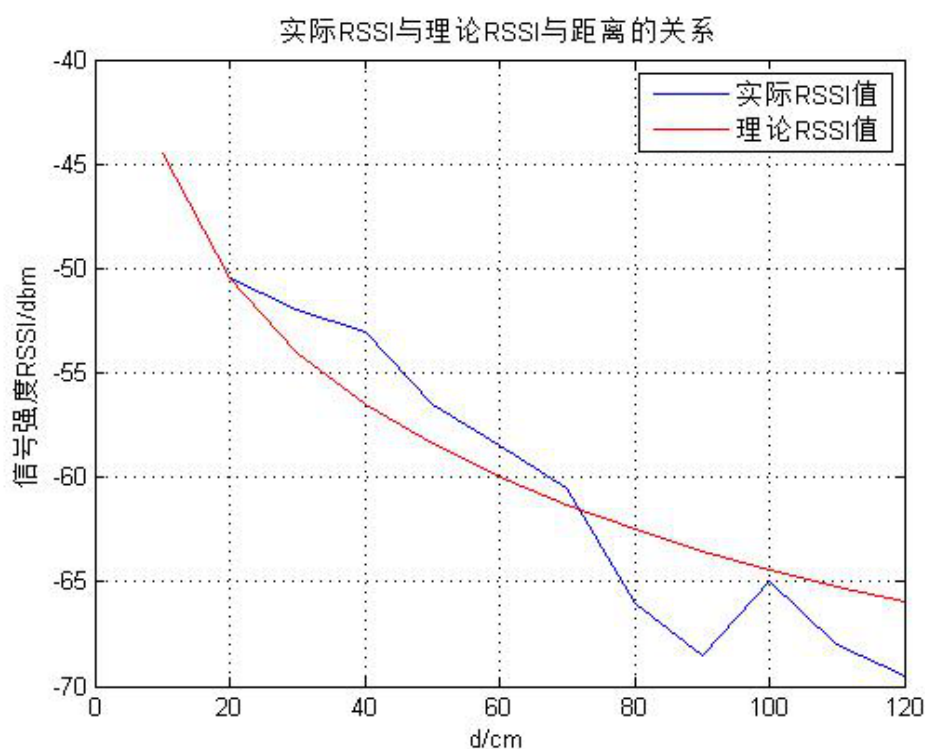


图 3.2 实际 RSSI 与理论 RSSI 值对比图

红色线条是理论的 RSSI 值与距离之间的函数关系图，而蓝色线条则是实际测量

出的 RSSI 值与实际距离之间的函数关系图。实际值与理论值相差的主要误差因素是实际环境中的各种电磁干扰以及距离衰减。

而阅读器实际读取到的 RSSI 值推算出的拟合距离值与实际环境中标签离阅读器的距离值关系图如图 3.3 所示：

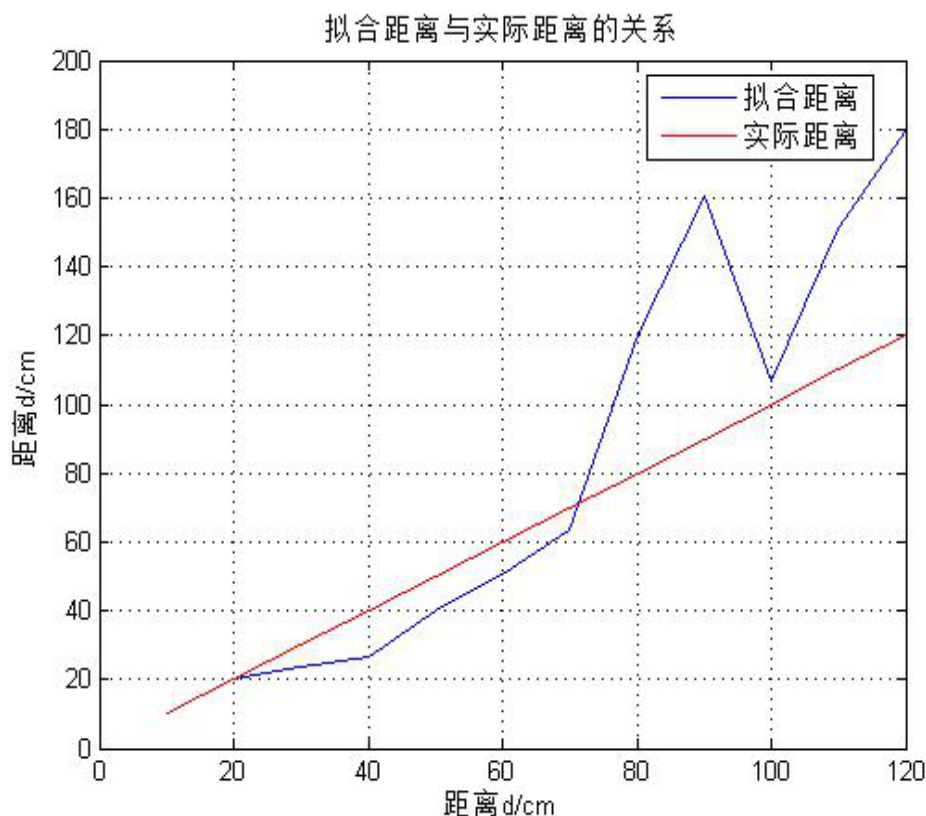


图 3.3 拟合距离与实际距离对比图

其中，红色线条是实际测量的距离值，而蓝色线条则是实际测量出的 RSSI 值反推出的拟合距离图。实际值与理论值相差的主要误差因素也是实际环境中的电磁干扰以及距离衰减。

结合图 3.2 和图 3.3，我们可以大致看出本实验在 70cm 的量程范围内对拟合距离的估算较为精确，其误差可以控制在 10cm 范围内。但是若单独使用 RFID 来进行室内机器人定位时，在较大的环境中会产生较大的误差问题。

### 3.3 超声波测距原理及基本技术

为了减少上述单纯使用 RFID 传感器来进行室内定位大范围时的误差较大问题，本文引入了结合超声波传感器来对室内机器人共同定位。下面对超声波做一下简单的概述。

超声波的特点是高频率、易发射接收、方向指向性较强，并且与待测物体无需接触，强度可以根据自身需求来控制。因此超声波成为了理想距离测量手段之一。测距原理是发射端发射出超声波，遇目标障碍物反射回到接收端，并记录从发射到接收过程的时长，又已知声波传播速度，因此通过乘法运算即可以得到目标障碍物的测量距离值，上述的过程也被称为超声波测距过程。

利用超声波传感器测距的实际应用非常广泛，比如工业现场的勘测、汽车的倒车提醒、未知深海区域的勘测等。专业级的超声波模块可达到百米的测距量程，能达到厘米级的精度测量。若想要更精纯的精度，可以通过提高测量时间差到微秒级别，并且使用温度传感器为声波的传播速度再加上速度的补偿量，那么这种高精度超声波的测距仪的测量精度可达毫米数量级。

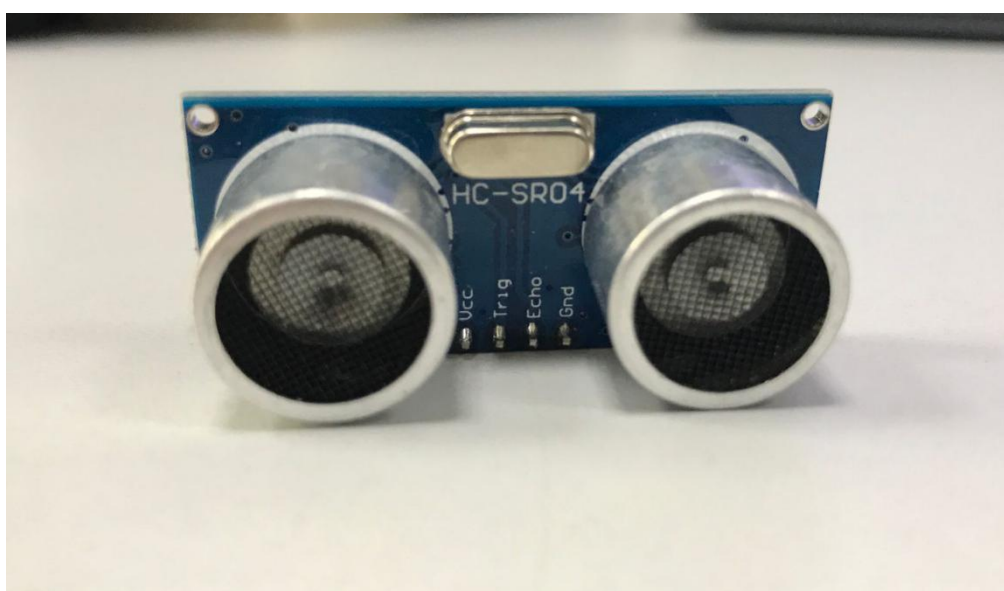


图 3.4 HC-SR04 超声波测距模块

如上图，本文选取的超声波测距模块型号为 HC-SR04<sup>[52]</sup>。此模块测距的量程是 2cm 至 400cm，测距精度可达 3mm。该模块由发射器、接收器及内部控制电路构成。模块的四个功能引脚分别是：负责接地的 GND 接口；提供 5V 直流电的 VCC 接口；触发测距的 TRIG 接口；信号接收的 ECHO 接口。该超声波测距模块的工作原理如下：

首先将 GND 端接地，并给 VCC 端供电。先发送一个持续至少  $10\mu s$  的触发信号至 TRIG 端，触发测距。

此时，模块的内部会产生八个周期方波，频率是 40kHz。ECHO 端变为高电平并持续检测是否出现返回信号。

若 ECHO 端检测到有回波信号返回时，重新变为低电平。高电平持续的信号称之为回响信号，回响信号的时间长短也是声波从发射到被接收的时间长短，目标障碍



与模块的距离和回响信号存在时间成正比例。

回响信号持续的时间与声波在空气中的传播速度相乘，即计算出目标障碍物距超声波传感器的距离值，表达式如下：

$$\text{测量距离} = (\text{回响信号持续时间} \times \text{声速}) / 2 \tag{3-4}$$

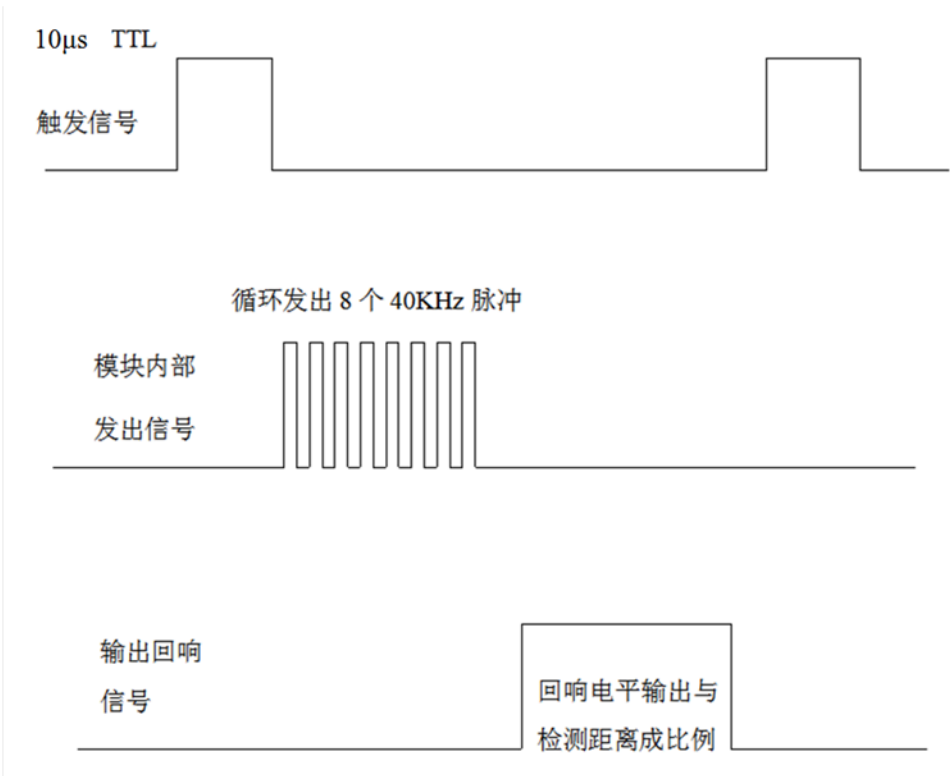


图 3.5 超声波脉冲信号时序图

超声波各个脉冲信号的时序如上图，先为 TRIG 端提供一个至少持续 10 $\mu$ s 的触发信号。此时，模块的内部会产生周期方波。ECHO 端不断监测回波信号是否出现，当回波信号出现，则输出回响信号。此测量周期至少持续 60ms 以防止发射信号对回响信号造成干扰。

在测距的过程中，为了保证模块测量结果的准确性，我们尽量选择的被测障碍物的正对的表面积不少于 0.5 平方米，并且选择平面尽量平整的障碍物。一般在室内机器人定位中的误差范围可以控制在 2cm 范围内，测距精度较高。

超声波测距模块主要是由驱动和应用程序所构成的。驱动程序负责测距整个过程，而应用程序为模块传递各种驱动控制参数。在 HC-SR04 模块中的应用程序主要有测距、超声波发射接收及显示程序。通过我们可以根据实际需求在驱动程序中实现一些功能函数。

### 3.4 基于 RFID 及超声波定位算法研究及定位实验

如章节 3.2 所述, 信号强度定位算法主要是通过将 RFID 阅读器接收到的信号强度转换成各个标签到 RFID 阅读器的距离值。并且用一定的几何代数算法进行数据分析, 最终确定待测点的估计坐标位置。本实验中将阅读器安装在机器人机体上, 实验的主要工作就是通过测量各个电子标签到阅读器的信号强度值, 以及利用在全局坐标系中已知的各个参考标签坐标。通过数学方法分析计算最终得到 RFID 阅读器的坐标, 即就是室内移动机器人的坐标。

本文中的基于 RFID 定位实验选用的 RFID 阅读器型号为 Jiuray UhfReader JR2030, 其硬件各个接口功能简要介绍如下。

Jiuray UhfReader JR2030 模块通过 USB 接口和 PC 端相连接并且直接供电或者使用 5V 电源适配器进行供电。通过 EN 跳线接口负责模块上 Enable 控制, 当读卡器模块在上电之后, Enable 控制引脚为高电平, 开始进入正常工作的状态。SW-PB 按键负责开始或终止模块读卡的操作。蜂鸣器和指示灯可以指示接上电源时或指示读卡操作。射频 SMA 接口可以为外接更大功率的天线, 我们可以根据具体的环境需求外接适配的天线, 良好的天线选择将为室内机器人定位提供更好的效果, 从而识别更远距离。

#### 3.4.1 信号强度定位算法

本实验中, 我们在室内墙壁的同一条线上每相隔 20cm 贴一个标签, 总共贴 5 个标签。以第一个参考标签为原点, 以这些标签所在的延长线为 X 轴建立全局直角坐标系, 并将这 5 个标签的坐标分别设置为 (0,0)、(20,0)、(40,0)、(60,0)、(80,0)。将 RFID 阅读器分别放置在不同的位置, 阅读器距离墙壁的距离值即为其纵坐标值。每次接收这五个标签的一组信号强度值。若无法接收到的某标签的信号强度时, 则记为 0。为减小实际环境带来的不确定干扰, 在每个位置依次测量 10 组数据, 并且对记录的这些数据求平均值, 作为机器人定位算法的输入数据。

在这五个标签中, 选取距离阅读器最近的一个电子标签, 若两个标签距离阅读器位置相等时则任取一个。这个标签所对应的信号强度值最强, 因此用来估算距离时是这 5 个标签中最准确的。因此, 根据这个距离阅读器最近的标签位置和另外 4 个标签中的任一标签的位置, 根据勾股定理可列下述方程组求解出 RFID 阅读器的坐标。

$$\begin{cases} (x - x_{\min})^2 + (y - y_{\min})^2 = d_{\min}^2 \\ (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2 \end{cases} \quad (3-5)$$

阅读器坐标为  $(x, y)$ ，离阅读器最近的标签坐标为  $(x_{\min}, y_{\min})$ ，之间距离为  $d_{\min}$ 。 $(x_i, y_i)$  为其余标签中第  $i$  个标签坐标，距阅读器  $d_i$ 。因为输入描述位置较差的数据会对最后的坐标估算有很大一部分的干扰性，得到的阅读器的坐标也会相应的出现较大的误差。因此下面设计一种合理的算法来得到最终的待定阅读器的坐标。

### 3.4.2 赋权值比例算法

距离阅读器越近的电子标签用来估算的位置就会越准确，因此引入赋权值比例算法来给距离阅读器越近的标签坐标赋予更多的权重，根据权值函数将不同的权值赋予方程 (3-5) 中用不同位置标签对应计算出的坐标值。距阅读器越远权值越小，越近权值越大。本实验中所使用的权值函数为：

$$w_i = \frac{\frac{1}{d_i - d_{\min}}}{\sum_{i \neq \min} \frac{1}{d_i - d_{\min}}} \quad (3-6)$$

其中， $w_i$  代表第  $i$  个电子标签坐标所对应的权重，距阅读器为  $d_i$ ； $d_{\min}$  为距阅读器最近标签距离。在该赋权值比例算法下的阅读器坐标如下：

$$(x, y) = \left( \sum_{i \neq \min} w_i x_i, \sum_{i \neq \min} w_i y_i \right) \quad (3-7)$$

由于较远距离的估算非常不准确，可以将距离阅读器较远的标签赋予权值为 0，使其不会对最终的坐标结果任何干扰。本文提出了两种实现方案，均可以排除距离较远的点的误差过大影响，从而最终可以得到较为准确的室内移动机器人的定位坐标。

(1) 方案一：只选取距离阅读器 80cm 以内的标签位置

本文提出的第一种实现方案舍弃估算出距离阅读器大于 80cm 的标签坐标，将这些标签的权值赋为 0，即不参与最终的坐标加权求和，各个标签节点的权重函数表达式如式(3-8)所示：

$$w_i = \begin{cases} \frac{\frac{1}{d_i - d_{\min}}}{\sum_{i \neq \min, d_i \leq 80} \frac{1}{d_i - d_{\min}}} & l \leq 80 \\ 0 & l > 80 \end{cases} \quad (3-8)$$

通过编写 Python 语言编写分析处理实验数据的程序，并且利用这种实现方案对实验结果进行了仿真，得到的阅读器的估算定位结果如表 3.1 所示：

表 3.1 方案一下五个标签的 RFID 定位结果

实际坐标	RSSI (dBm)	估算坐标
(0, 30)	(-50, -53, -62, -68, 0)	(1, 19)
(20, 30)	(-49, -44, -52, -58, 0)	(16, 8)
(40, 30)	(-56, -50, -43, -50, -63)	(40, 8)
(60, 30)	(0, -57, -50, -44, -54)	(56, 8)
(80, 30)	(0, -64, -60, -50, -45)	(76, 10)
(80, 40)	(0, -62, -58, -50, -48)	(75, 13)
(60, 40)	(0, -57, -51, -47, -56)	(54, 14)
(40, 40)	(-58, -52, -48, -51, -63)	(42, 15)
(20, 40)	(-51, -47, -52, -61, 0)	(18, 13)
(0, 40)	(-46, -51, -64, -68, 0)	(2, 12)

由上表的实验结果可以看出，使用方案一的赋权值方法估算出来的横坐标与实际横坐标之间的误差可以控制在 5cm 范围以内，但是估算的纵坐标误差受实际环境的各种影响较大，因此单纯使用 RFID 来对室内机器人进行定位时，其纵坐标的误差较大。

## (2) 方案二：基于 KNN 算法选取 K 个标签坐标值

方案二所设计的赋权值的算法的思想为 KNN 算法，即在 n 个样本里，除去电子标签距离阅读器最小的位置坐标外，再取出前 K 个的欧式距离阅读器位置最小的标签点，即找出阅读器的 K 个近邻参考位置，将这 K 个坐标代入到权值函数(3-9)中，求得其对应的权值，距离阅读器大于 80cm 的点赋予权值为 0，最后进行加权求和后可以得到待测机器人的坐标值。

$$w_i = \begin{cases} \frac{1}{d_i - d_{\min}} & l \leq 80 \\ \sum_{i \neq \min, d_i \leq d_k} \frac{1}{d_i - d_{\min}} & \\ 0 & l > 80 \end{cases} \quad (3-9)$$

其中  $d_k$  为与阅读器欧式距离最小的第 k 个标签点的距离值。

通过编写 Python 语言编写分析处理实验数据的程序，对方案二的数据进行了仿真，得到的估算机器人坐标的定位结果如表 3.2 所示：

表 3.2 方案二下五个标签的 RFID 定位结果

实际坐标	RSSI (dBm)	估算坐标 KNN
(0, 30)	(-50, -53, -62, -68, 0)	(-4, 5)
(20, 30)	(-49, -44, -52, -58, 0)	(11, 6)
(40, 30)	(-56, -50, -43, -50, -63)	(31, 7)
(60, 30)	(0, -57, -50, -44, -54)	(90, 34)
(80, 30)	(0, -64, -60, -50, -45)	(104, 23)
(80, 40)	(0, -62, -58, -50, -48)	(99, 14)
(60, 40)	(0, -57, -51, -47-, 56)	(92, 36)
(40, 40)	(-58, -52, -48, -51, -63)	(38, 13)
(20, 40)	(-51, -47, -52, -61, 0)	(10, 8)
(0, 40)	(-46, -51, -64, -68, 0)	(-8, 10)

分析以上两次实验的结果，方案二的横坐标估算坐标结果不如方案一估算的横坐标定位坐标精确，两种方案测得的纵坐标的误差都很大。

本实验还研究了在墙上贴十个标签，并且每个标签间隔 10cm 时的实验数据，并使用了效果较好的方案一的赋权值算法对实验数据进行了加权，最终估算的机器人定位坐标如表 3.3 所示：

表 3.3 方案一下十个标签的 RFID 定位结果

实际坐标	RSSI	估算坐标 L<80
(0, 30)	(-52 -53 -55 -59 -66 -71 0 0 0 0)	(-4, 22)
(10, 30)	(-52 -50 -54 -56 -62 -69 -72 -74 -71 0)	(2, 18)
(20, 30)	(-69 -51 -49 -50 -53 -61 -67 0 0 0)	(20, 18)
(30, 30)	(-61 -53 -50 -49 -51 -56 -64 -72 0 0)	(28, 17)
(40, 30)	(-65 -57 -52 -49 -48 -50 -56 -64 0 0)	(38, 15)
(50, 30)	(0 -64 -59 -53 -50 -49 -52 -55 -61 -72)	(47, 17)
(60, 30)	(-73 -71 -62 -57 -53 -50 -50 -51 -56 0)	(61, 18)

(70, 30)	(0 -71 -68 -65 -59 -54 -52 -50 -51 -58)	(71, 19)
(80, 30)	(0 0 0 0 -67 -60 -54 -51 -49 -53)	(81, 14)
(90, 30)	(0 0 0 -68 -63 -61 -61 -57 -51 -51)	(87, 64)

使用方案二的赋权值方法估算出来的横坐标与实际横坐标之间的误差可以控制在 5cm 范围以内，并且标签间隔放置的越小最终估算的定位结果的误差相对越小。但是估算的纵坐标误差同方案一，受实际环境的各种影响较大，若单一地使用 RFID 来对室内机器人进行定位时，其纵坐标的误差依然较大。本文采用一种改进的算法，将超声波测距模块和 RFID 传感器定位算法结合起来，使用超声波测距精准直接测得室内机器人的纵坐标。

### 3.4.3 RFID 定位与超声波测距的结合

由于单一使用 RFID 传感器对室内移动机器人坐标进行估算时，所得到纵坐标受环境影响较大，所产生的误差较大，无法满足定位精度的要求。因此本文设计了 RFID 传感器与超声波结合定位的方法。将多个超声波传感器放置于室内移动机器人机体的两侧，控制保持机器人平行于墙壁行走，并且因为此时超声波是正对于墙壁的，可以直接测得机器人到墙壁的垂直距离值，此时的垂直距离值就是机器人所在全局坐标系下的纵坐标。机身上布置的超声波模块也是章节 3.3 中所提及的 HC-SR04，因此模块的测距误差可以控制在 2cm 范围之内，可以满足室内机器人纵坐标定位的精度要求。

由于要通过超声波直接测机器人距离墙壁的距离值，因此要控制保持机器人平行于墙壁行走。通过平行安装两个超声波传感器在机器人机体的同一边上，并保证这两个超声波传感器在同一时间测得的距离值相同，就可以保证机器人的行走方向平行于墙壁方向。这时再通过超声波测得的机器人距离墙壁的距离值，即得到此时机器人的纵坐标值。将超声波得到的纵坐标与之前提出的 RFID 定位算法所估算的横坐标共同结合，定位机器人最终的估算坐标值就可以被确定下来。

结合定位实验依然是在墙上贴十个标签，且每个标签之间间隔 10cm 时，并使用了方案一中的赋权值算法对实验数据进行了加权，最终估算的机器人定位坐标如表 3.4 所示：

表 3.4 十个标签的 RFID 与超声波结合定位结果

实际坐标	RSSI	超声波测距值	估算坐标
(0, 30)	(-52 -53 -55 -59 -66 -71 0 0 0 0)	29	(-4, 29)
(10, 30)	(-52 -50 -54 -56 -62 -69 -72 -74 -71 0)	30	(2, 30)
(20, 30)	(-69 -51 -49 -50 -53 -61 -67 0 0 0)	30	(20, 29)

(30, 30)	(-61 -53 -50 -49 -51 -56 -64 -72 0 0)	29	(28, 29)
(40, 30)	(-65 -57 -52 -49 -48 -50 -56 -64 0 0)	30	(38, 30)
(50, 30)	(0 -64 -59 -53 -50 -49 -52 -55 -61 -72)	30	(47, 30)
(60, 30)	(-73 -71 -62 -57 -53 -50 -50 -51 -56 0)	29	(61, 29)
(70, 30)	(0 -71 -68 -65 -59 -54 -52 -50 -51 -58)	31	(71, 31)
(80, 30)	(0 0 0 0 -67 -60 -54 -51 -49 -53)	31	(81, 31)
(90, 30)	(0 0 0 -68 -63 -61 -61 -57 -51 -51)	30	(87, 30)

分析表中数据可知，该结合定位的算法估算出的横坐标误差可以控制在 5cm 范围内，估算出的纵坐标误差可以控制在 2cm 范围内，这种超声波结合 RFID 共同定位的算法可以大大提高原先单一传感器定位的精度，并且减小了定位误差。

#### 3.4.4 基于 RFID 人工路标的辅助定位

由于上述的基于 RFID 及超声波融合定位算法适用于室内较为规则的墙壁旁边或者走廊等环境附近。而在一些特殊的位置区域会有较大的误差，比如室内拐角、房间门口等不规则环境。本文设计了一种将环境信息写入 RFID 标签之中，令其作为人工路标的方法来辅助定位室内移动机器人位置。将各个标签分布于所需要标识的关键区域处，在这些 RFID 标签上写入关于路径规划或者环境信息等有关信息帮助机器人识别分析自身的位置坐标。当机器人车体走过这些被放置路标标签的特殊区域时，就可以自动识别到这些标签中记录的路径规划信息，从而更好的判断自身的位置坐标以及更好的进行路径规划等。

本文设计路标辅助定位可以将环境信息及路径规划信息都提前写入在相应的 RFID 标签里并作为人工路标放置在特殊位置区域，标签里所写的主要信息如下：

(1) 各个标签的识别号，这也是各个标签独一无二的编码，阅读器通过识别该编码号来识别各个标签的身份。

(2) 各个标签的位置信息：将标签在全局地图上的位置坐标写入到各个标签内，当机器人行走到该标签附近时，通过读取标签内记载的全局坐标值，对自身的位置坐标进行校准，可以减少机器人行走过程中所形成的累计误差。

(3) 各个标签所在环境的特征：可以标识出该标签所在地的环境特征如 T 型路口、十字路口等，本论文提出的标签协议为：处于十字路口的标签后四位为 0000，处于 T 型路口的标签的后四位为 0001，处于左 L 型路口的标签后四位为 0002，处于右 L 型路口的标签为 0003 等，放置在各个门口的各个标签后几位编码可以为 9 加门

牌号，如移动机器人行走到位位于 310 房间门口附近，则会识别后四位为 9310 的放置在房间门口的标签。

(4) 各个标签中建议的路径规划信息：用来建议机器人下一步的该做出如何的路径规划，例如放置在右 L 型路口处的标签中，可以应加入建议机器人向右走的指令，例如 `turn_right` 等命令。

根据不同的实际环境，可以为 RFID 阅读器所接收到的信号强度设定一个阈值，当阅读器接受到的信号强度大于等于该阈值时，则可以认为机器人已经移动到该标签附近。通过读取分析该 RFID 标签上的信息，帮助机器人进行路径规划和辅助定位。

### 3.5 基于超声波传感器的地图构建算法

如第二章所述，SLAM 算法是机器人能自主移动技术的关键和前提。因此本文提出了一种利用超声波来进行地图构建的算法，通过先构建局部地图，对原有全局地图更新，实现全局地图创建。

#### 3.5.1 局部地图的构建

在结构化的程度较高的室内环境中，采用几何特征法描绘地图比较合适。本文将实际常见的几种环境特征拟合成简单的集合特征模型，并存储在数据库里。常见的环境模型主要有走廊过道模型、T 型路口模型、十字路口模型、右 L 路口模型、左 L 路口模型、右侧门口模型及左侧门口模型。通过接收相邻多个超声波传感器返回的数据并加以分析，若满足上述模型的特征条件时，就现在在机器人局部坐标系中根据超声波传感器返回距离值画出对应的局部地图。并通过一定的地图融合方式，形成最终的全局地图。

本文中各个超声波传感器按照图 3.6 的排列方式放置在机器人机身上。其中，1、2 号超声波传感器用来分析识别机器人左侧障碍物的距离值，并矫正机器人位姿，让其保持平行于墙壁行走；使用 3、5 号超声波传感器避开机器人侧前方的障碍物；使用 4 号超声波传感器测量正前方障碍物的距离；而 6、7 号超声波传感器用于探测机器人距右侧障碍物并矫正机器人位姿。



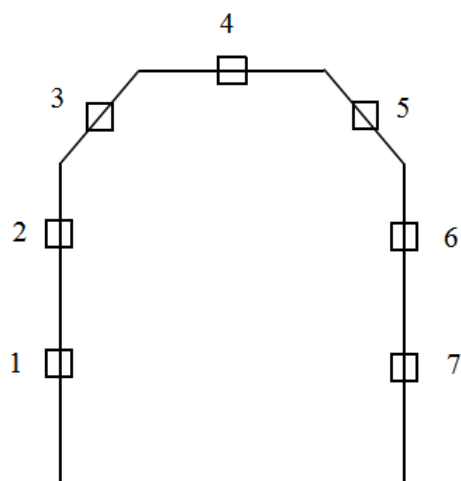


图 3.6 超声波传感器位置图

当一段时间内，左侧的 1、2 号传感器测得的距离差均小于 3cm 时，则认为机器人左侧障碍物是连续的，并且平行左侧墙壁直行。可认为当前机器人左侧为平滑的墙壁。当这两个传感器的距离差大于 50cm 时，则认为是机器人左侧存在断层，一般是左侧存在路口或开启的门口。同理，根据 6、7 号传感器测到的距离差值来判断机器人右侧的障碍物是否连续或断层。机身前方放置的 4 号传感器通过测出前方障碍物的距离值，让机器人避开前方的障碍物。

通过结合相邻的传感器活动的信息就能得到机器人周围的几何特征模型，并且利用程序绘制出机器人一段时间内走过的局部地图。具体判断规则如下表 3.5：

表 3.5 距离与几何模型判断规则

传感器探测距离	几何特征模型
$ d_1 - d_2  < 3\text{cm}$ , $d_4 > \text{aisle}$ , $ d_6 - d_7  < 3\text{cm}$	走廊过道模型
$ d_1 - d_2  > 50\text{cm}$ , $d_4 > \text{aisle}$ , $ d_6 - d_7  > 50\text{cm}$	十字路口模型
$ d_1 - d_2  > 50\text{cm}$ , $d_4 < \text{aisle}$ , $ d_6 - d_7  > 50\text{cm}$	T 型路口模型
$ d_1 - d_2  < 3\text{cm}$ , $d_4 < \text{aisle}$ , $ d_6 - d_7  > 50\text{cm}$	右 L 路口模型
$ d_1 - d_2  > 50\text{cm}$ , $d_4 < \text{aisle}$ , $ d_6 - d_7  < 3\text{cm}$	左 L 路口模型
$ d_1 - d_2  < 3\text{cm}$ , $d_4 > \text{aisle}$ , $ d_6 - d_7  > 50\text{cm}$	右侧出现房间门模型
$ d_1 - d_2  > 50\text{cm}$ , $d_4 > \text{aisle}$ , $ d_6 - d_7  < 3\text{cm}$	左侧出现房间门模型

表中的 aisle 代表实验中的走廊宽度，不同的实际情况可以设置不同的 aisle 值。若超声波传感器探测到的信息符合表中几何特征模型的判断要求，就绘制出对应的局部地图。

### 3.5.2 全局地图的构建

本文构建全局地图的思路为：每间隔一段时间机身上的超声波传感器就发射一组信号，先按照上述算法构建局部的地图，并对原有全局地图更新，实现全局地图最终创建。

若局部地图新绘制的线段在全局地图中完全不存在，将局部地图中新描绘的新线段直接更新至原全局地图中；当局部地图里新描绘出的线段与全局地图重合一部分时，将原全局地图中重合的部分保留下来，并将局部地图新描绘的线段融至全局地图；当局部地图新描绘线段与原全局地图完全重合时，认为新局部地图已存在于原本全局地图之中，不更新当前全局地图。

若实验时所取的间隔时间比较短时，此算法可能会根据绘制出很多重复的局部地图，占用资源且绘制效率较低，同时增加后续创建全局地图时的工作量与难度。因此，本文提出以下规则：当 1、2 号超声波传感器之间的差值发生大于 50cm 的突变时，则认为机器人左侧的环境发生突变；当 6、7 号超声波传感器之间的差值发生大于 50cm 的突变时，则认为机器人右侧的环境发生突变；当 4 号超声波传感器测得的距离发生突变时，则认为机器人前方出现新的障碍物。因此通过检测到以上三种突变情况时，机器人再绘制新的局部地图，这样的方式能减少许多不必要的重复绘制。再将处于这些突变时的局部地图更新至原先全局地图之中，最终完成绘制全局地图。

### 3.6 基于超声波传感器的直行控制算法

RFID 阅读器与标签之间形成的角度是对读取到的信号强度值有一定的影响的。阅读器与标签之间的位置示意图如图 3.7 所示。

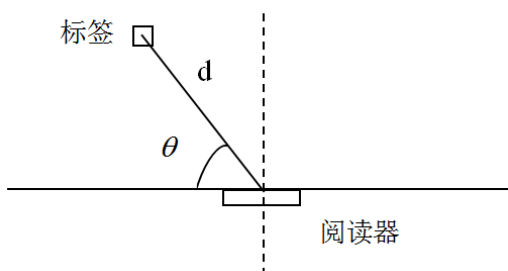


图 3.7 阅读器与标签之间的位置示意图

其中  $\theta$  是 RFID 阅读器所在平面与标签方向形成的角度值，是标签距离阅读器为  $d$ 。我们通过分别选取了不同的  $\theta$  值，并选取固定的  $d$  值，分别测量了多次对应的实际 RSSI 值，并求取平均值。其实验结果如表 3.6 所示：

表 3.6 角度对 RSSI 值的影响对比表

角度 (°)	RSSI 值 (dBm)
0	-52.3
30	-49.1
60	-48
90	-47.5
120	-48.5
150	-48.3
180	-51.1

由上表可以看出，角度对 RSSI 值是有一定的影响的，当标签正对着 RFID 阅读器 ( $\theta=90^\circ$ ) 时，信号强度 RSSI 值最强。

因此为了保证章节 3.4 中的基于 RFID 及超声波定位算法实验中的机器人平行于墙壁行走以及实时的位姿调整，我们在本节设计了机器人直行控制算法。

当机器人两侧的超声波模块测得的距离差的范围分别为  $3\text{cm}<|d_1-d_2|<50\text{cm}$  并且  $3\text{cm}<|d_6-d_7|<50\text{cm}$  时，机器人的运行方向需要进行调整，并让两侧的超声波模块测得的距离差范围重新变为  $|d_1-d_2|<3\text{cm}$  或  $|d_6-d_7|<3\text{cm}$ 。根据在小车上的相邻传感器的位置，本文提出下述的调整规则：

当  $d_1 > d_2$  且  $d_6 > d_7$ ，机体整体左偏，当  $0\text{cm}<|d_1-d_2|<6\text{cm}$  时，需让机器人向右进行 30 度以内的微调，其调整度数为：

$$\left| \frac{d_1-d_2}{6} \right| \cdot 30 \quad (3-14)$$

当  $6\text{cm}<|d_1-d_2|<15\text{cm}$  时，需让机器人向右进行 30 度到 60 度的调整，其调整度数为：

$$\frac{|d_1-d_2|-6}{9} \cdot 30 + 30 \quad (3-15)$$

当机体太过左偏时，即距离差 ( $d_1-d_2$ ) 大于 15cm 时，让机器人原地向右每旋转 30 度再重新进行一次测量。

同样，当小车右偏时，即  $d_1 < d_2$  且  $d_6 < d_7$  时，此时需让机体向左调整，规则如下：

当  $0\text{cm} < |d_6 - d_7| < 6\text{cm}$  时, 需让机器人向左进行 30 度以内的微调, 其调整度数为:

$$\left| \frac{d_6 - d_7}{6} \right| \cdot 30 \quad (3-17)$$

当  $6\text{cm} < |d_6 - d_7| < 15\text{cm}$  时, 需让机器人向右进行 30 度到 60 度的调整, 其调整度数为:

$$\frac{|d_6 - d_7| - 6}{9} \cdot 30 + 30 \quad (3-17)$$

当机体太过右偏时, 即距离差  $(d_7 - d_6)$  大于 15cm 时, 让机器人原地向左每旋转 30 度再重新进行一次测量。

通过上述提出的直行规则, 可以保证机器人平行于墙壁的行走, 且在直行的过程中绘制出基于几何特征的周围环境的局部地图。这种算法将测得数据和实际地图特征较好地关联起来, 并且整个过程简单方便、建模也清楚易懂。

### 3.7 本章小结

本章首先介绍了 RFID 定位系统的组成; 提出一种基于赋权值比例的 RFID 信号强度定位算法, 并设计了两种赋权值方案并分别进行了实验; 利用了超声波模块的测距原理, 设计了 RFID 融合超声波室内定位算法; 提出了一种在某些特定位置使用 RFID 标签作为人工路标来进行辅助定位算法, 且对写入到 RFID 路标中的信息进行了规范。

为了实现 SLAM 算法, 本章提出了一种使用超声波先局部构建地图的方法, 并对原全局地图更新, 最终完成在全局上对地图的绘制。

最后为了保证机器人平行于墙壁行走以及实时的位姿调整, 我们在本节设计了一种机器人直行控制算法。

## 第四章 基于 ZigBee 定位算法研究

由于在较大范围的室内环境里各种因素的不稳定性，第三章所设计的 RFID 结合超声波定位算法会造成定位的较大误差，并且在相对再远一些的位置就会超出其量程，从而测量不到数据。本章提出的 ZigBee 室内定位算法则可以弥补单纯用 RFID 结合超声波算法进行室内定位的不足，在较大室内环境中，对室内机器人进行定位。

### 4.1 ZigBee 室内机器人定位技术设计

本文选取的 ZigBee 定位系统为 C51RF-CC2431，其组成主要有各个参考节点、盲节点、网关节点和终端监控部分。我们通过仿真器对 CC2431 模块进行程序下载、调试及仿真操作。仿真器的构造也很简单，由 USB 接口、仿真线和复位按钮组成。仿真器拥有硬件断点调试功能，可以实现单步在线调试 DEBUG 的功能。整个系统稳定，干扰噪声小。

CC2431 的定位引擎在室内机器人定位领域上有其独到的优势，高精度定位算法并且运行处理的速度快，几乎不占用处理器的时间。最少可以使用 4 个参考节点就可以进行室内机器人定位，其估算时间小于  $40\mu s$ ，定位估计以 0.25m 为单位，单个定位引擎的定位范围最大可到 64m，定位的误差一般可以控制在 3m 以内。通过在节点上采用分布式计算的方法，可以避免集中计算方法所带来的网络传输延迟的问题。

C51RF-CC2431 定位系统是通过 ZigBee 技术和信号强度值的定位算法结合，从而实现精确定位，可达至一到五米的定位精度。该系统精度及稳定性都很高并且能耗很低。至少要使用三个参考节点，尽可能多的节点会使定位更精确。当选取过少节点进行参考时，每一个参考节点对最终的结果估算影响都很高，可能受环境因素影响的某些稍微偏差较大的信号强度值就会对盲节点坐标的预估产生很大程度的影响。这里所提及的偏差较大的信号强度值多是因为室内环境的多径效应影响或被墙体等各种障碍物阻碍，从而获得与理论值匹配度较差的信号强度值。在参考节点所形成的网络之外的位置区域放置盲节点时，此 ZigBee 定位算法得到的坐标估算结果将会与实际坐标产生很大程度的偏离。所以在布置 ZigBee 定位系统时，尽量将盲节点的运动区域限制在整个网络之内。

本文的 ZigBee 室内机器人定位设计主要利用 IAR Embedded Workbench 对 ZigBee 模块进行集成开发。该软件可以进行编译 C/C++ 代码、建立工程等操作。

#### 4.1.1 定位实现过程

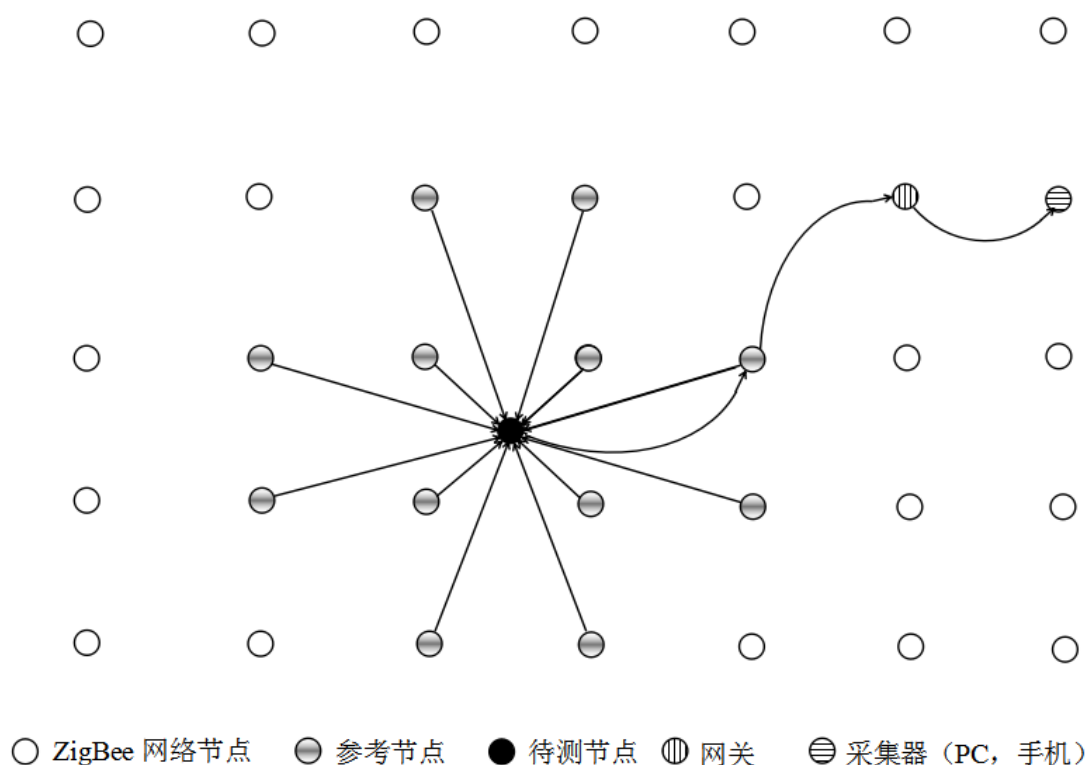


图 4.1 定位系统节点分布图

定位的实现过程及节点分布如图 4.1 所示，整个通信网络是由参考节点、待测节点（也称盲节点、移动节点）、网关、采集器（PC、手机等终端）构成。网关作为整个网络的起点，它组建了 ZigBeeWSN 网络，并在其中充当协调器角色，管理网络中其他设备。也是通信 ZigBee 和采集器（PC，手机等）的桥梁，将盲节点坐标和外界环境参数都传至主机，将接收到的各个节点配置数据转发给相应的节点，并发送各个节点有效的反馈数据给监控软件。

参考节点为盲节点提供信号强度值和坐标参考，同时也形成了整个网络的通信链路。每一个参考节点都具有路由的功能，它们也可以作为路由器来使用，参考节点都有它们自身的坐标信息，这些坐标信息为盲节点提供计算位置的参考。通俗的讲，参考节点处于静止状态并且其位置坐标已知。所有的参考节点都必须正确配置在定位区域中，它们为盲节点提供自身的横纵坐标及相应的 RSSI 值。

盲节点也称为移动节点，拥有路由器及终端设备的功能。当作为路由器使用时，盲节点的实时性更好。而当做终端设备使用时，盲节点的低能耗性更好，能源也可以更合理的应用。盲节点内部安装有定位引擎，可根据各参考节点所提供的坐标位置和 RSSI 等信息估算出自身的坐标位置。最后，将估算的坐标与自身的标志号一并发送至网关节点，通过网关和 PC 形成另一个直观的系统。

下面给出了一个定位算法的示例，在平面二维坐标系中的 X、Y 方向上每隔  $n\text{ m}$

放置一个参考节点。因为此定位系统的量程范围是  $64\text{ m} \times 64\text{ m}$ ，精度为  $0.25\text{ m}$ 。因此  $n$  取  $64\text{ m}$  之内的数值。通过检测各个节点的信号强度值并择优选出信号最好的前 8 个参考节点。若检测得到的节点数小于 8 个，则在可以检测的范围中，尽量选择全部的参考节点。

第 1 步，将盲节点放置在参考节点形成的网络网格之内。采集各个参考节点的信号强度值并筛选出其中数值最高的一个参考节点。算出此参考节点距离整个  $64\text{ m} \times 64\text{ m}$  覆盖范围中心的偏移值。并且又测量得到该参考节点的 RSSI 值，因此可以得到盲节点与此节点之间的距离值。

第 2 步，筛选出除第一步中 RSSI 最强的节点外，其他可参与估算的参考节点，使用这些节点信息按第一步算出偏移值，并且逐步修正盲节点位置信息。

第 3 步，将所有参与运算的参考节点的数据发送至定位引擎，计算出最终的盲节点位置坐标，并将补偿值添加到盲节点坐标里。在步骤之后，就确定了盲节点在全局网格中的坐标。

### 4.1.2 盲节点坐标的计算流程和方法

本实验利用 CC2431 的定位引擎来实现盲节点的坐标估算，通过提供给定位引擎各类参数，就可以使用引擎硬件直接计算出盲节点坐标。并且将估算出的坐标数据存放在相应的寄存器里。盲节点估算坐标的流程如下：

盲节点给周围节点发送估算坐标的请求信息。当这些参考节点收到该次估算请求后，测量并记录此次请求信息中所携带的 RSSI 值信息，重复多次这样的过程并将这多次获取到的 RSSI 值求均值，最后计算出的均值协同自身的坐标信息一并发送给盲节点。

收到周围参考节点所传递的信息后，盲节点挑选出至少三个信号最好的参考节点，记录并分析这些节点坐标及 RSSI 等信息。设置当前环境下的参数  $A$  和  $N$ ，参数  $A$  和  $N$  都是射频参数，共同描述当前网络环境。在全向模式中，参数  $A$  是无符号定点的一个数值， $A$  值代表为盲节点距参考节点一米处的 RSSI 的绝对值。例如在距一米处的参考节点上盲节点所测的 RSSI 值为  $-35\text{ dBm}$ ，当前的实际环境的参数  $A$  即为 35。 $A$  的期望参数区间为  $[0.0, 50.0]$ ，精度为 0.5，LSB 位为小数，而其余位均为整数位。在常见的室内环境搭建 ZigBee 网络下， $A$  一般取值为 40.0。

$N$  称为射频参数，其定义为路径损失指数。 $N$  值代表为盲节点远离参考节点一米后衰减的 RSSI 值。这个参数反应了 RSSI 随距离越远而递减的规律，同时描述了信号的能量衰减的速率，RSSI 值的衰减和  $d^{-n}$  成比例。 $N$  大小同样依赖于具体的实际环境，比如穿透墙壁产生的衰减或其他实际环境因素都会在很大程度上影响其取值大小，只能靠经验来取值。在定位引擎中， $N$  值被  $n\_index$  代替参与运算。由于  $N$  值在

各种实际应用的环境里实时变化，为了找出当前环境下  $N$  的最优值，最直接的方法是将所有参考节点布置好，再代入不同的  $n\_index$  值计算它们的 RSSI 值，与理论值对比选出最适合的  $N$  值。一般常见的室内环境中， $N$  值可使用 15~25 之间的值会产生较好的估算结果。

$N$  与  $n\_index$  二者间的转换关系表如下。该表可以降低整个硬件系统的执行复杂度。

表 4.1  $N$  和  $n\_index$  转换表

$n\_index$	$N$	$n\_index$	$N$
0	1.000	16	3.375
1	1.250	17	3.500
2	1.500	18	3.625
3	1.750	19	3.750
4	1.875	20	3.875
5	2.000	21	4.000
6	2.125	22	4.125
7	2.250	23	4.250
8	2.375	24	4.375
9	2.500	25	4.500
10	2.625	26	4.625
11	2.750	27	5.000
12	2.875	28	5.500
13	3.000	29	6.000
14	3.125	30	7.000
15	3.250	31	8.000

由上表可以看出参数  $N$  一般的取值范围是 1.0——8.0。盲节点收到的 RSSI 值是关于  $N$  与距离值的函数，其 RSSI 表示如下：

$$RSSI = -(10N \cdot \lg d + A) \quad (4-1)$$

上式中的  $N$  和  $A$  是之前提及的射频参数；发射器距接收器为  $d$ ，其数值与  $N$  值的衰减速率比例。

最后启动定位引擎，计算位置信息。估算出的盲节点坐标是以米为单位，估算区间为 [0.0, 63.75]，精度为 0.25m。使用最低有效位 LSB (Least Significant Bit) 作为



小数部分。估算盲节点坐标的读取时间根据搜索边界参数的不同而不同，一般读取时间范围在  $50\mu s$  到  $13ms$  之内。盲节点的估计横纵坐标分别从寄存器 LOCX 和 LOCY 中读取。其中纵坐标可以直接读取，但是 X 的坐标虽然从 LOCX 给出，但其中包含了一个偏移值，要想获得正确的横坐标值，必须删除该偏移值。删除的过程在读 LOCX 之后再执行，实际的 X 值获取公式为：

$$X = (X_{LOCX} - x_{\min} + 1) \% (x_{\delta} + 1) + x_{\min} \quad (4-2)$$

其中  $X_{LOCX}$  是从 LOCX 寄存器中读出的值（含偏移值）， $x_{\min}$  和  $x_{\delta}$  是限制搜索的边界参数。通过设置搜索边界可以减少误差和估算时间，提高效率。我们可以定位的 X、Y 最大区域在  $[0.0, 63.75]$  米内，CC2431 的定位引擎搜索限制界定在坐标  $[x_{\min}, y_{\min}]$  和  $[x_{\max}, y_{\max}]$  的矩形区域内。则四个搜索边界参数的输入顺序为：

$$x_{\min}, x_{\delta}, y_{\min}, y_{\delta} \quad (4-3)$$

其中：

$$\begin{aligned} x_{\delta} &= x_{\max} - x_{\min} \\ y_{\delta} &= y_{\max} - y_{\min} \end{aligned} \quad (4-4)$$

注意，这些坐标在必须输入为整个空间的坐标，即下面的数值：0.0, 63.75, 0.0, 63.75。因为如果一些输入参数被忽略时，CC2431 的定位引擎将不能正常工作计算。

## 4.2 ZigBee 定位算法研究及定位实验

ZigBee 定位算法与第三章中 RFID 定位算法相同，均以 RSSI 定位算法为基础。本论文实验中盲节点是安装在机器人机身上的，所以本章主要工作就是通过全局坐标系中已知的参考节点位置以及与各个参考节点之间的信号强度，通过分析计算得到盲节点的坐标位置，即就是室内移动机器人当前的坐标位置。

实验一中，以相隔 6 米的间距在室内网格状地布置四个参考节点，建立适当的坐标系，并已知这些参考节点的坐标为  $(0, 0)$ ， $(6, 0)$ ， $(0, 6)$ ， $(6, 6)$ 。将盲节点放在不同的位置，每次可以通过程序直接计算出盲节点的坐标位置信息。在实验里，为了减小环境带来的不确定影响因素，室内机器人移动到每个点处，共测量 10 组数据，并对这些记录的数据求平均值。各个节点的位置信息图如 4.2 所示，其中

白色圆点代表参考节点所在的位置，黑色圆点代表盲节点所在的位置。

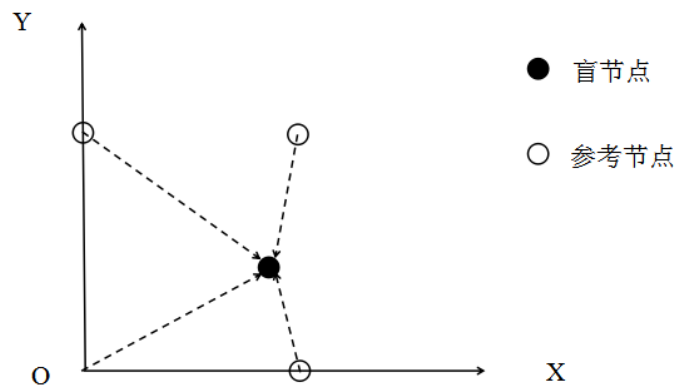


图 4.2 实验一节点位置信息图

在实验一里，共记录了 12 组盲节点的位置信息数据，如表 4.2 所示，实际坐标和实验定位坐标的对比表格。其中，实验定位坐标是 10 次测量坐标求平均值得到的数据。

表 4.2 实验一中实际坐标与实验定位坐标对比表

实际坐标	实验定位坐标
(0, 0)	(0.5, 0)
(2, 0)	(2.25, 0)
(4, 0)	(3.75, 0)
(6, 0)	(6, 0)
(0, 3)	(0.25, 2)
(2, 3)	(2.25, 2.75)
(4, 3)	(3.25, 2)
(6, 3)	(5.5, 2.25)
(0, 6)	(1.25, 6.25)
(2, 6)	(2.5, 6)
(4, 6)	(3, 7)
(6, 6)	(5, 6.25)

实验二中，以相隔 6 米的间距在室内网格状地固定 6 个参考节点，建立适当的全局坐标系。设置这些参考节点的坐标分别是 (0, 0)、(0, 6)、(6, 0)、(6, 6)、(0, 10) 和 (6, 10)。与实验一同步骤，将盲节点放置在不同的位置，每次可以通过程序直接计算出盲节点的坐标位置信息。并且选取一些 ZigBee 形成的网络之外的

位置来测量盲节点运动位置在网络区域外时对定位坐标的影响。同样，在实验二里，为了减小环境带来的不确定影响因素，当机器人移动至各个位置时，测量多组数据，并对这些数据求均值。各个节点的位置信息图如 4.3 所示，图中白点表示参考节点所处位置，黑点表示盲节点所处位置。

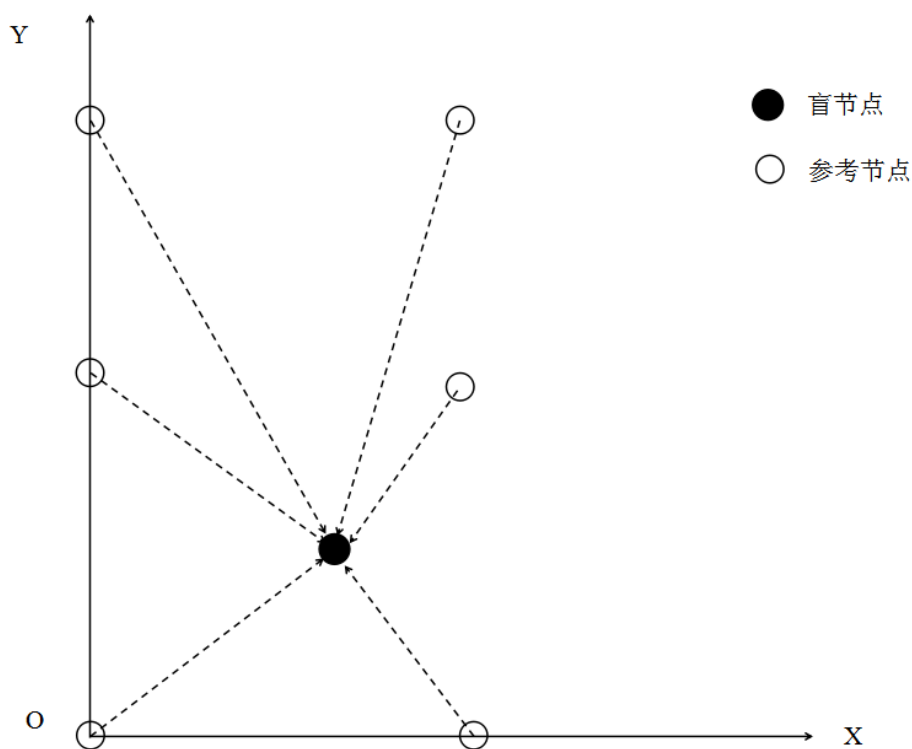


图 4.3 实验二节点信息位置图

在实验二中，我们一共取了 20 组在参考节点的网络之内时的盲节点位置数据以及 5 组在参考节点的网格之外时的盲节点位置数据，如表 4.3 所示，20 处在参考节点的网络之内时的实际坐标和实验坐标的对比表格。其中，实验定位坐标是 10 次测量坐标求平均值得到的数据。

表 4.3 实验二在参考节点的网络之内时的实际坐标和实验坐标对比表

实际坐标	实验定位坐标
(0, 0)	(0.5, 0)
(2, 0)	(2.5, 0)
(4, 0)	(3, 1.75)
(6, 0)	(6.25, 0.25)
(0, 3)	(0.25, 3.25)
(2, 3)	(2.25, 3.25)

(4, 3)	(4.25, 2.25)
(6, 3)	(6.5, 2.25)
(0, 6)	(0.5, 5.25)
(2, 6)	(4, 5.25)
(4, 6)	(3.5, 4.75)
(6, 6)	(5.5, 6)
(0, 9)	(0.5, 10)
(2, 9)	(2, 9.5)
(4, 9)	(3.75, 8.75)
(6, 9)	(6, 10.25)
(0, 10)	(0.75, 10.25)
(2, 10)	(2.75, 10.5)
(4, 10)	(3.5, 10.75)
(6, 10)	(6.75, 10)

表 4.4 中的数据则是 5 处盲节点处于与参考节点网格之外时的实验数据与实际数据的对比。

表 4.4 实验二中在参考节点的网络之外时的实际坐标和实验坐标对比表

实际坐标	定位坐标
(6.5, 0)	(8, 0)
(6.5, 3)	(8.5, 3.25)
(6.5, 6)	(8, 4.75)
(6.5, 9)	(7.5, 10)
(6.5, 10)	(8.25, 10)

对比实验一以及实验二中的数据,当盲节点位置处于参考节点形成的通信网络之内时,ZigBee 定位算法对其坐标的估算较为精准。相反地,当盲节点运动到参考节点形成的网络网格之外时,该算法估算的盲节点坐标结果将会与实际的坐标有极大的偏差。因此尽量选择参考节点网格在室内更优化的布局,不建议跟踪参考节点网格之外的对象。

由第三章 RFID 结合超声波定位算法的特性可以得知,在较小范围内对距离的估算较为准确,误差也在室内定位允许误差之内,并且我们可以将 RFID 标签放置于墙壁四周。相对于上述实验结论,可以利用 RFID 结合超声波定位算法弥补在 ZigBee 定位算法不容易监控的网格周围或者网格之外的边缘位置定位误差。

而在较大范围，RFID 结合超声波定位算法会因为各种环境因素而造成定位的较大误差，在相对再远一些的位置就会测量不到数据。而 ZigBee 室内定位算法则可以弥补单纯用 RFID 结合超声波室内定位的不足，它可以测量到室内较大范围的距离。

因此可以将 RFID 结合超声波定位再与 ZigBee 传感器共同结合起来，先在室内大范围进行 ZigBee 传感器定位，再根据室内 RFID 标签来进行更细致的小范围精准定位。我们可以根据实际的室内机器人定位需求，来设定某一个阈值，当范围大于该阈值时，我们使用 ZigBee 定位算法来进行大范围的位置坐标计算，而范围小于该阈值时，我们使用 RFID 定位算法来进行更精确的位置坐标计算。

两种定位方法互补了各自的缺点，在室内机器人定位中能达到更好的应用。同时我们还可以将一些路标信息写入到 RFID 标签内来进行辅助定位，在一些特定的室内环境位置可以将一些位置信息提前录入到 RFID 的标签内，比如走廊拐角、房间门出入口、T 型路口、十字路口、右 L 型路口及左 L 型路口等特殊位置。当机器人行走走到这些特定位置时，通过读取标签内的路标信息，矫正自身的定位过程中累计误差，并读取该各个标签路标所记录的建议路径规划信息，更优地做出下一步移动判断及路径规划。

### 4.3 本章小结

本章研究了基于信号强度的 ZigBee 定位算法，并提出了单独使用 ZigBee 进行室内定位的缺点，并且进行了实验研究和数据分析。最后提出了 ZigBee 和 RFID 传感器结合的机器人室内定位算法，讨论了与 RFID 结合超声波定位算法融合起来共同定位的优点，为以后的基于多传感器的室内机器人定位算法研究奠定了进一步的基础。



## 第五章 总结与展望

### 5.1 本文工作总结

本文主要讨论了基于多传感器的室内机器人定位算法,由于单一传感器的容错性低、受环境干扰因素很大,因此使用多传感器对机器人位置共同进行描述的作用和效率也会提升很多。本文基于当前机器人的三大问题:自定位问题、地图创建问题及路径规划问题做出的研究工作如下:

(1) 本文设计了一种基于 **RFID** 结合超声波传感器共同对室内机器人进行定位的方法,并利用赋权值比例算法得到机器人的坐标信息,提出了两种赋权值的实现方案并进行了实验结果比较。分别用 **RFID** 和超声波估算机器人的横纵坐标值。此方法相较于单纯用 **RFID** 来进行室内机器人定位时,大大提升了定位算法的精度。

(2) 本文设计了一种将路径规划及环境特征写入各个 **RFID** 标签当做人工路标对机器人进行辅助定位的方法,并且本文对 **RFID** 中被写入的信息进行了一系列规范。利用特殊区域布置的标签中提前写入的路径规划信息,帮助机器人更精确地实现自我定位,矫正消除了机器人在移动的过程中产生的累积误差。

(3) 本文提出了一种使用超声波传感器构建机器人局部地图的方法,并且逐步更新融合,最终绘制出全局地图。

(4) 本文提出了一种室内机器人直行控制的算法以及算法中的控制规则,以保证基于 **RFID** 及超声波定位算法实验中的机器人平行于墙壁行走以及实时的位姿调整。

(5) 本文使用 **CC2431** 作为盲节点并将其放置在室内移动机器人机身上,与其他的参考节点共同构建出室内机器人定位所需要的无线网络。当单独使用 **ZigBee** 定位算法时来进行室内机器人定位时,可以在 **ZigBee** 网络内较为精确的估算盲节点坐标,但是在边缘或者网络外,则会有一定的误差。

(6) 本文提出了在使用 **ZigBee** 结合 **RFID** 进行室内定位时,弥补了 **RFID** 单独室内定位时的不足,由于 **ZigBee** 在室内机器人定位过程中覆盖面积大且功耗很低,弥补了 **RFID** 定位距离较短的缺憾。反之, **RFID** 也弥补 **ZigBee** 的在边缘处位置定位的精确性问题。

### 5.2 未来研究展望

本文基于当前机器人的自定位问题、地图创建问题及路径规划问题做了一定的研究工作,在整个研究的过程中也存在着一些考虑欠缺的地方,很多方面还需今后工作

的进一步的完善和发展。

(1) 本文所研究的超声波地图的创建算法中的环境是结构化较强、几何特征简单明了室内环境。若室内环境较为复杂时，则需要通过对几何特征模板库进行扩充，这样的过程会增加计算的复杂度。且若使用单一的超声波模块来进行地图绘制时，在机器人计算绘制所产生的时延内，机器人是在不断地运动的，因此可能会产生一部分误差影响。因此若想进一步地对地图实时绘制，需要采用更高性能的处理器的图像处理算法。

(2) 本文在对 RFID 的定位算法研究中，阅读器能识别的最远量程较近，并且能准确读取的范围也较小，导致后期的定位难度增加。因此在今后的研究中可以考虑采用量程范围更大、性能更高的阅读器以达到更好的机器人定位效果。并且还可以考虑为 RFID 安装更大功率的天线，提高定位效率及精度。

(3) 本文提出的人工路标对机器人进行辅助定位的方法中，需要我们提前对环境进行路径规划，若环境变动则需要重新布置标签的位置。在以后的研究中可以将构建地图和标签信息更新相结合，让机器人识别到新的环境信息时，将内容写入 RFID 的标签内，以便下一次识别。

(4) 本文使用的 ZigBee 定位系统在实际应用中会存在以下两个问题：问题一是由于该定位引擎量程为 64m，当实际应用大于该值时，我们就需要对该定位区域进行一系列的扩展。若要扩大 ZigBee 室内定位范围，需要更优化的算法来实现；问题二是 CC2431 的无线定位引擎得到的只是二维坐标，当我们要用于三维定位时，则要对参考节点水平层逐个分析。首先确定距盲节点最近的参考节点，并测量该节点的水平值。这个水平值即可近似为盲节点所在的水平层，只要控制盲节点只记录同层节点的信息到引擎当中即可，但这种方法存在着一定的误差。因此若要将 ZigBee 模块用于三维坐标定位时，我们需要通过更好的方法处理。



## 参考文献

- [1] 陈毛倩. 基于多移动智能机器人编队控制任务的研究[D]. 中原工学院, 2015.
- [2] 胡风珍.汽车 GPS 卫星导航全球定位系统技术研究与应用[J].石油仪器,2007,21(4): 46~48.
- [3] Elliott, D.Kaplan 著.邱致和,王万义译. GPS 原理与应用[M].北京:电子工业出版社, 2002.
- [4] 甘仲民,张更新.卫星通信技术的新发展[C].通信学报, 2006, 27(8):2-9.
- [5] S.Dan. Real-time navigation using the Global Positioning System[J], IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1995, 5:31-37.
- [6] P. Sever, M. Rosu. A new approach for health care monitoring[J]. E-Health and Bio engineering Conference (EHB),2013,10:1109.
- [7] T. Alhmiedat, F. Omar, A. Abu Taleb et al. Road Safety and Energy Saving Proposed System: A ZigBee WSN Approach[J]. International Journal of Online Engineering, 2015(11):2.
- [8] N. Miguel, T. Davis, Y. Liang et al. ASWP: a long term WSN deployment for environmental monitoring[R]. Proceedings of the 12th international conference on Information processing in sensor networks:ACM, 2013.
- [9] 张明华,张申生,曹健.无线局域网中基于信号强度的室内定位[J].计算机科学, 2007(6):68-71,75.
- [10]赵娜,李丹.浅谈蓝牙室内无线定位系统的技术实现[J].中小企业管理与科技,2012, (03):269-270.
- [11]Wu J Q, Lu T. Localization algorithm for wireless sensor network based on RSSI[J]. Microelectronics&Computer, 2014, 31(5): 49-52, 57.
- [12] Fang Z, Zhao Z, Guo P. Analysis of distance measurement based on RSSI[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(11): 2526-2530.
- [13]Halder S J, Giri P, Kim W. Advanced smoothing approach of RSSI and LQI for indoor localization system[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, (2015): 1-11.
- [14]张璐阳. 基于超声波测距的 RFID 监控方案 信息通信 2011(3): 99-100.
- [15]张晖, 王东辉. RFID 技术及其应用的研究[J]. 微计算机信息, 2007, 23(4Z):252-254.
- [16]Muhammad Jawad Hussain; Li Lu; Shan Gao.An RFID Based Smart phone Proximity Absence Alert System[J].IEEE Transactions on Mobile Computing,2017, 16(5): 1246-1257.
- [17]Feng Zhu; Bin Xiao; Jia Liu et al.Exploring Tag Distribution in Multi-Reader RFID Systems[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2017, 16(5):1300 – 1314.
- [18]蒲泓全, 贾军营, 张小娇等. (2013). Zigbee 网络技术研究综述①[J]. 计算机系统应用, 22(9), 6-11.

- [19] 杨剑, 杨铭熙, 李腊元. 增强安全性的 IEEE802.15.4 协议研究[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(12):136-139.
- [20] 庄严. ZigBee 网络结构及协议分析[J]. 电子技术与软件工程, 2014(9):26-26.
- [21] 周武斌, 罗大庸. ZigBee 路由协议的研究[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(6):12-14.
- [22] 刘欣茹. ZigBee 无线窗控系统的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [23] 丁雪莲. ZigBee 协议栈浅析[J]. 电脑与信息技术, 2013, 21(5):18-21.
- [24] 李昊生, 王汝传, 沙超. 基于 CC2431 的无线传感器网络节点的设计[J]. 信息化研究, 2008, 34(12):63-67.
- [25] Zhang Z, Meng M Q H, Wu F, et al. Design of WSN node based on CC2431 applicable to lunar surface environment[C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. IEEE Computer Society, 2009:1087-1092.
- [26] 王宏健;傅桂霞;边信黔等.基于 SRCKF 的移动机器人同步定位与地图构建[J].机器人,2013(2):1.
- [27] 张胜宾, 赵祚喜. 基于卡尔曼滤波的轮式移动机器人定位实验研究[J]. 机电工程技术, 2010, 39(2):44-45.
- [28] 冯肖维. 基于多传感器信息融合的移动机器人位姿计算方法研究[D]. 上海: 上海大学, 2011.
- [29] Benedetto F, Giunta G, Guzzon E. Enhanced TOA-based indoor-positioning algorithm for mobile LTE cellular systems//Positioning Navigation and Communication (WPNC), 2011 8<sup>th</sup> Workshop on. IEEE, 2011:137-142.
- [30] Wang T. Novel Sensor Location Scheme Using Time-of-Arrival Estimates [J]. JET Signal Processing. 2012,6(1): 8-13.
- [31] Huang Y C, Brennan PV, Seeds A. Active RFID Location System Based on Time Difference Measurement Using A Linear FM Chirp Tag Signal[C]. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Cannes: IEEE, 2008:1-5.
- [32] Bocquet M, Loyez C, Benlarbi-Delai A. Using enhanced-TDOA measurement for indoor positioning[J]. Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, 2005, 15(10): 612-614.
- [33] 陈锡剑, 程良伦. 基于 RSSI 的功率匹配定位算法的研究与实现[J]. 传感技术学报, 2013, 26(5):709-714.
- [34] Roshanaei M, Maleki M. Dynamic KNN: A Novel Locating Method in WLAN Based on Angle of Arrival[C]. Kuala Lumpur: Industrial Electronics and Applications, IEEE, 2009:722-726
- [35] Akgul F O, Pahlavan K. AOA assisted NLOS error mitigation for TOA-based indoor positioning systems[C]. Orlando, Florida: Military Communications Conference: IEEE, 2007:1-5
- [36] 彭树萍. AUV 动力学模型辅助的航位推算方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011
- [37] 罗荣华, 洪炳镕. 移动机器人同时定位与地图创建研究进展[J]. 机器人, 2004, 26(2):182-186.

- [38] 孙阳. 基于移动机器人 ekf-slam 方法的一致性问题的研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.
- [39] 宣秀彬. 基于 Wi-Fi 和航位推算的室内定位方法研究[D]. 河北: 燕山大学, 2013.
- [40] 李静, 刘琚. 用卡尔曼滤波器消除 TOA 中 NLOS 误差的三种方法[J]. 通信学报, 2005, 26(1):130-135.
- [41] 杨丹. 卡尔曼滤波器设计及其应用研究[D]. 湖南: 湘潭大学, 2014.
- [42] 江宝安, 卢焕章. 粒子滤波器及其在目标跟踪中的应用[J]. 雷达科学与技术, 2003, 1(3):170-174.
- [43] Sturtevant N R. Benchmarks for Grid-Based Path finding[J]. Computational Intelligence & Ai in Games IEEE Transactions on, 2012, 4(2):144-148.
- [44] Arbeiter G, Bormann R, Fischer J, et al. Towards geometric mapping for semi-autonomous mobile robots[C]. Springer-Verlag: International Conference on Spatial Cognition Viii. , 2012:114-127.
- [45] Kuipers B, Byun Y. A robot exploration and mapping strategy based on a semantic hierarchy of spatial representations[J]. Robotics & Autonomous Systems, 1991, 8(1):47-63.
- [46] P.Buschka, A.Saffiotti. Some notes on the use of hybrid maps for mobile robots[C]. Proc. of the 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems, 2004:547-556.
- [47] 戈新生, 刘松. 机器人动力学分析的完全笛卡尔坐标方法[J]. 机械设计, 2001, 18(10):13-15.
- [48] 王勇, 陈卫东, 王景川, 等. 面向动态高遮挡环境的移动机器人自适应位姿跟踪算法[J]. 机器人, 2015, 37(1):112-121.
- [49] 王爱东, 乔兰柱. 关于工业机器人运动学中建立坐标转换矩阵的讨论[J]. 河北工业科技, 2002, 19(4):16-18.
- [50] 陈海彬. 浅谈射频识别技术[J]. 当代青年月刊, 2015(5):267-267.
- [51] 王殿君, 任福君, 兰云峰, 等. 基于有源射频识别信号强度的室内移动机器人测距方法[J]. 科技导报, 2009, 27(15):76-79.
- [52] 唐晓鹏, 谢兴生. 利用集成 HC-SR04 模块设计对射式测距系统[J]. 微型机与应用, 2014(22):90-93.



## 致谢

本论文是在李颖导师和郭旭东老师的悉心指导下完成的，从论文的选题到论文的撰写，无不渗透着导师的心血。

首先感谢李颖老师，李颖老师不仅在学习上给予我指导，而且像一盏灯塔照亮我偶尔迷失方向的路。李颖老师是良师也是益友，告诫我做科研要一步步踏踏实实向前走，要相信自己的实力并为之努力，使我更有前进的动力。

感谢郭旭东老师，时时敦促我，为我毕设指引方向。郭老师风趣幽默，和蔼可亲，在我毕设研究过程中遇到问题和困惑时，帮我理清问题的思路，使我受益良多。

感谢实验室的各位同学在生活和学习上对我的照顾，让我感受到整个科研团体的温暖与融洽。感谢我的父母和朋友，正是你们的鼓励和陪伴让我能够心无旁骛的研究学习。

值此论文完稿之际，谨对导师的辛勤培育以及谆谆教诲表示最衷心的感谢！



## 作者简介

### 1. 基本情况

赵予玮，女，陕西西安人，1992年8月出生，西安电子科技大学通信工程学院通信工程专业2014级硕士研究生。

### 2. 教育背景

2010.08~2014.07 西安电子科技大学，本科，专业：通信工程专业

2014.08~            西安电子科技大学，硕士研究生，专业：通信工程专业

### 3. 攻读硕士学位期间的研究成果

#### 3.1 申请专利

[1] 李颖, 赵予玮, 郭旭东, 鲁瑞颖等. 基于多点 RFID 结合超声波的室内机器人定位方法: CN,201610561414.0[P]. 2016年7月15日.

#### 3.2 参与科研项目及获奖

[1] 智能家用机器人项目, 2015.10-至今, 正在进行, 负责设计并实现基于多传感器的机器人室内定位算法, 设计室内传感器部署方案以实现机器人室内自定位及路径规划。