



# 南京大學

## 本科畢業論文

院 系 計算機科學與技術系

專 業 計算機科學與技術

題 目 基於射頻識別的室內目標定位研究與實現

年 級 2012 學 號 121220041

學生姓名 金大字

指導老師 謝磊 職 稱 副教授

論文提交日期 2016 年 6 月 12 日

## 南京大学本科生毕业论文（设计、作品）中文摘要

题目： 基于射频识别的室内目标定位研究与实现

计算机科学与技术 院系 计算机科学与技术 专业 2012 级

本科生姓名： 金大宇

指导教师（姓名、职称）： 谢磊副教授

摘要：

随着以全球定位系统为代表的粗粒度定位的不断完善，人们对细粒度定位，特别是室内细粒度定位的需求也在不断提升。室内细粒度定位在日常生产和生活中，如仓储、零售、物流等需要维护和识别大量中小体积物品的行业与场景中有着广阔的应用前景。

射频识别技术（英文简称 RFID Radio Frequency Identification）是一种非接触式的自动识别技术，通过无线电信号识别对象目标并读写相关数据。随着近年来在相位等方向研究的深入及射频识别系统的完善，RFID 技术应用于细粒度定位逐渐成为可能。

本文综合了前人在 RFID 细粒度定位上的部分研究成果，总结其优点与不足。并在此基础上基于图书定位与管理这一现实应用场景，构建了一套集图书识别、定位等功能于一体的图书定位系统。本文的主要工作有以下几点：

(1) 构建实验，对接收信号强度指示特征和相位特征运用于一维定位的效果做了测试与分析。

(2) 提出了一维定位组合的二维定位方案和基于二维定位组合的收敛定位方案，可以在二维平面上定位物体的绝对位置并进行启发式的自我位置修正。

(3) 系统设计并实现了一套搭载以上方案的图书定位系统，对其功能和定位效果进行了实地测试，总结了当前不足并对下一步工作进行了展望。

关键词：RFID；室内二维定位；相位；图书定位系统

## 南京大学本科毕业论文（设计、作品）英文摘要

THESIS: Indoor Localization Based on Radio Frequency Identification

DEPARTMENT: Computer Science and Technology

SPECIALIZATION: Computer Science and Technology

UNDERGRADUATE: Dayu Jin

MENTOR: Lei Xie

### ABSTRACT:

With the development of coarse-grained localization such as GPS, there is an increasing demand on fine-grained localization, especially indoor fine-grained localization. Indoor fine-grained localization can be widely used in daily production and life, such as warehousing, retail, and logistics which need to identify and maintain a large number of small-volume or medium-volume goods.

Radio Frequency Identification (RFID) is a non-contact automatic identification technology which facilitates radio signals to identify target objects and read or write relevant data. Recently, the development of RFID system and in-depth research on fields like phase make RFID fine-grained localization possible.

This thesis concludes the advantages and shortcomings of previous RFID fine-grained localization methods, and constructs a Book Localization System which can identify and localize books based on the demand of library book management. This thesis focuses on research and work as following:

(1) Experiments on one dimensional (1D) localization based on RSSI and phase are conducted to analyze their performance.

(2) 2D Localization based on 1D Localization Scheme and Convergence Localization based on 2D Localization Scheme are put forward to solve 2D localization problem.

(3) A Book Localization System is designed, implemented, and tested, together with a conclusion of current problems and future prospects.

KEY WORDS: RFID, Indoor 2D Localization, Phase, Book Localization System

## 目录

<b>第一章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 研究现状总结	1
1.2.2 基于RSSI的RFID定位进展	2
1.2.3 基于相位的RFID定位进展	2
1.2.4 联合应用多种感知技术的定位进展	3
1.3 论文的主要工作	3
1.4 论文的整体结构	4
<b>第二章 RFID 相关技术介绍</b>	<b>5</b>
2.1 RFID 技术简介	5
2.2 RFID 发展历史	5
2.3 RFID 系统组建	6
2.4 RFID 技术应用	7
<b>第三章 基于RFID 的一维定位方案</b>	<b>8</b>
3.1 基于RSSI的定位	8
3.1.1 RSSI定位原理	8
3.1.2 RSSI定位方案	8
3.1.3 RSSI定位分析	9
3.2 基于相位的定位	11
3.2.1 相位定位原理	11
3.2.2 相位定位方案	12
3.2.3 相位数据处理	12
<b>第四章 基于RFID 的二维定位方案</b>	<b>16</b>
4.1 二维定位简述	16

4.2	基于一维定位组合的二维定位方案.....	17
4.2.1	方案原理.....	17
4.2.2	方案分析.....	18
4.3	基于二维定位组合的收敛定位方案.....	19
4.3.1	方案原理.....	19
4.3.2	方案分析.....	21
<b>第五章</b>	<b>RFID 图书定位系统设计与实现.....</b>	<b>22</b>
5.1	系统概述.....	22
5.2	系统硬件设计.....	22
5.2.1	硬件模块介绍.....	22
5.2.2	模块间协作.....	25
5.3	系统软件设计.....	26
5.3.1	需求分析.....	26
5.3.2	概要设计.....	26
5.3.3	软件构建.....	28
<b>第六章</b>	<b>RFID 图书定位系统展示与测试.....</b>	<b>32</b>
6.1	系统功能展示.....	32
6.1.1	书籍分布生成.....	32
6.1.2	书籍分布浏览.....	33
6.1.3	指定书籍查询.....	33
6.1.4	错位书籍标记.....	34
6.1.5	书籍精确定位.....	35
6.1.6	书籍内容修改.....	35
6.1.7	书籍分布删除.....	36
6.2	定位效果测试.....	37
6.2.1	实验环境介绍.....	37
6.2.2	实验结果分析.....	37
<b>第七章</b>	<b>结论.....</b>	<b>40</b>
7.1	工作总结.....	40
7.2	前景展望.....	40

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

基于射频识别技术的物体定位和排序一直是人们关注的焦点，在仓储管理，物流管理，零售管理，机场行李管理等问题的优化与解决上具有广阔的应用前景。受限于复杂室内环境中的多径效应及信号衰减等因素，长期以来 RFID 主要应用于粗粒度的定位需求。但随着近年来研究的深入及射频识别设备的发展，特别是相位定位领域的进展，使得 RFID 应用于细粒度定位成为可能。

书籍的位置和顺序错误长期困扰图书馆管理人员，不仅大幅增加了图书馆运营的人力成本和管理成本，也降低了读者的阅览效率与阅读体验。基于 RFID 的室内细粒度定位可以辅助解决这一问题，通过定位所有图书的当前位置并与其正确位置进行校验，找出其中位置错误的图书，在配备机器人的情况下自动纠正错位图书的位置，从而高效低成本的整理书籍。

因此本文基于图书馆书籍定位与排序场景，研究射频识别技术细粒度的定位问题。

### 1.2 国内外研究现状

#### 1.2.1 研究现状总结

基于射频识别（英文简称 RFID Radio Frequency Identification）的定位研究主要有两个角度<sup>[1]</sup>，第一是利用 RFID 技术定位阅读器，这主要应用在机器人行为识别、移动修正等场景；第二是利用 RFID 技术定位标签，因标签成本较低，被广泛应用在各种物体定位场景中。本文的 RFID 定位也基于第二个角度。

在应用 RFID 定位标签这一角度中，常用的特征包括接收信号强度指示（英文简称RSSI Received Signal Strength Indication）和相位。近年来也有利用将 RFID 特征与其余感知特征如光学特征结合定位的例子。下面我们将对基于以上各种特征的定位研究进展做分类介绍。

### 1.2.2 基于 RSSI 的 RFID 定位进展

早期的 RFID 定位研究主要围绕 RSSI 特征展开。Hightower 等研制的 SpotON 系统就是最早的 RFID 位置感知系统之一<sup>[2]</sup>，这个系统应用聚集算法，通过处理 RSSI 信息完成对三维位置的感知。该系统的优点在于适用于三维定位且成本较低，但其也有定位准确率很低，延时较长，需要特殊定制标签等缺点。

Ni 等研制 LANDMARC 系统中引入了参考标签的概念<sup>[3]</sup>。LANDMARC 系统在网络中布置若干已知位置的主动标签作为地标（参考标签），将待追踪的标签放置在网络中，根据其近邻的参考标签位置加权平均出待追踪标签的位置。该系统的优点在于引入了参考标签，不仅大幅度减少了所需阅读器的数量，也在一定程度补偿了环境因素对定位的影响；但其也有定位粒度较粗（米级别），定位效果受参考标签数量和位置影响较大等问题。

Chen 等在定位中使用了成本更低的被动标签替代了主动标签<sup>[4]</sup>，论文从功率角度对被动标签做了分析建模，并基于被动标签的特性提出了搭载自适应功率分级与校准两个可以根据反馈不断修正关键参数的自适应解决方案。该方案的优点在于应用自适应的解决方案，在维持较高精度（31cm）的同时，具有良好的可移植性和扩展性。但其也有需布置多个阅读器成本较高，在复杂环境下受干扰严重等问题。

Chandrasekaran 等利用射频波的路径损耗定位杂乱物品堆中的物体<sup>[5]</sup>，其在论文中分析了射频波通过物品堆过程中波长的变化，并基于物品堆的特征构建了一个距离-波长映射模型。该工作的特点在于从射频波本身出发，提出在复杂干扰环境下的损耗模型与解决方案，缺点在于方案比较复杂，很多参数需要随着环境调整，应用限制较大。

### 1.2.3 基于相位的 RFID 定位进展

近几年来，基于相位特征的 RFID 定位开始被人们关注。和 RSSI 特征相比，相位特征与距离的关系更加稳定，且受环境因素干扰较小，适合进行厘米级的细粒度定位。

Williams 等对相位差定位 RFID 标签的原理做了详细的介绍<sup>[6]</sup>，并设计实验对 RFID 标签静止、移动等各种状态下相位差的曲线做了处理与分析，指出相较 RSSI 特征，相位特征具有更好的精确度，鲁棒性和敏感度。但在论文中并没有给出使用相位特征开展 RFID 定位的实际策略或方法。

Shangguan 等提出了用于定位相对位置的时空相位协议（英文简称 STPP Spatial-Temporal Phase Profiling）<sup>[7]</sup>，STPP 基于连续扫描过程中相位在横向和纵向两个方向的几何变化，给出了单次扫描确定二维平面中标签相对位置的协议方案，在厘米级的粒度上仍可以保持较高的定位准确度，是现阶段比较完善和精确的 RFID 定位方案。STPP 的不足在于其纵向可定位的区域比较狭窄（受限于相位在纵向的数学变化），且暂时还不能支持三维的定位。

#### 1.2.4 联合应用多种感知技术的定位进展

由于 RFID 的各种特征均受室内环境不同程度的影响，一些和其他感知技术联合的方案应运而生。Sample 等运用 LED 联合 RFID 的方案对图书馆中的图书进行定位<sup>[8]</sup>，RFID 负责传递信息给目标标签。目标标签激活其上的 LED，再通过 Kinect 定位被激活的 LED 的位置，从而找到目标。这一方案的缺点在于标签要进行改造，在去除了多径效应对 RFID 感知影响的同时又增加了障碍物与光线对图像识别定位的影响。

### 1.3 论文的主要工作

论文的工作主要有以下三个方面：

(1)构建实验，对接收信号强度指示特征和相位特征运用于一维定位的效果做了测试与分析。

(2)提出了基于一维定位组合的二维定位方案和基于二维定位组合的收敛定位方案，可以在二维平面上定位物体的绝对位置并进行启发式的自我位置修正。

(3)系统设计并实现了一套搭载以上方案的图书定位系统，对其功能和定位效果进行了实地测试，总结了当前不足并对下一步工作进行了展望。



## 1.4 论文的整体结构

本文共分为七个章节，每个章节具体安排如下：

第一章绪论，主要介绍研究的背景意义，国内外 RFID 定位研究的现状，论文主要工作以及整体结构。

第二章 RFID 相关技术介绍，主要介绍 RFID 技术的发展历史，RFID 系统的构建与工作流程以及 RFID 技术在生产和生活中的应用。

第三章基于 RFID 的一维定位方案，主要介绍了 RSSI 定位和相位定位的原理、并构建实验，对他们运用于一维定位的效果做了测试与分析。

第四章基于 RFID 的二维定位方案，主要介绍了论文提出的两种二维定位方案的原理和具体实现算法。

第五章 RFID 图书定位系统的设计与实现，主要从硬件和软件两个角度介绍了系统设计的整体过程以及系统实现所应用的主要技术方法。

第六章 RFID 图书定位系统的测试与分析，主要对系统的功能做了展示，并设计实验对当前系统的定位效果做了分析。

第七章结论，总结了论文的主要工作，并对下一阶段可能的工作方向做了展望。

## 第二章 RFID 相关技术介绍

### 2.1 RFID 技术简介

射频识别技术（英文简称 RFID Radio Frequency Identification）利用射频信号通过空间耦合（交变磁场或电磁场）实现无接触信息传递并通过所传递的信息达到自动识别的目的<sup>[9]</sup>。一个 RFID 系统通常由主动/被动标签，天线和阅读器三部分组成。

RFID 技术有着漫长的发展历程，但直到最近二三十年，技术革新带来的成本下降和功能提升才使得 RFID 技术被企业和研究者们所关注。现如今 RFID 技术已经融入人们的生活，在安全管理、供应链管理、和运动追踪等方面引领者智能生活的变革。

本章节后面的三个小节将从 RFID 发展历史、RFID 组件系统和 RFID 技术应用三个角度介绍 RFID 技术。

### 2.2 RFID 发展历史

RFID 从雏形设想到今天广泛应用也已走过了几十年的历程，我们依照其发展的脉络轨迹，参照现有的相关文献<sup>[10]</sup>，分阶段对其做简要介绍。

在 20 世纪初，两种支撑 RFID 的基础技术诞生，第一就是 Ernst F.W. Alexanderson 证实了连续无线电波上无线电信号的生成与传输，为无线电信息传输奠定了基础；第二就是在第二次世界大战中开始应用的雷达技术。

在 1948 年：美国科学家 Harry Stockman 发表的《利用反射功率的通信》一文奠定了射频识别技术的理论基础。但受限于晶体管，集成电路，微处理器，传输网络以及商业运作模式的发展，RFID 的真正繁荣被推迟了很久。

在之后的 20 余年中，RFID 技术主要停留在实验室研究和小规模的应用尝试。其中的代表有用于飞行器识别敌友的长范围转发器系统和用于防范产品被窃的电子物品监控系统等。

自 1970 年起, RFID 开始受到开发者, 公司, 研究院和政府实验室的广泛关注, RFID 技术在 20 世纪 80 年代得到了完整的实现, 射频识别技术及产品进入商业应用阶段, 各种形式的应用开始出现。

自 20 世纪末以来, RFID 技术标准化问题日趋得到重视, RFID 产品得到广泛采用, 逐渐成为人们生活中的一部分, 引领新时代智能生活的变革。

### 2.3 RFID 系统组建

最基本的 RFID 系统通常由标签、阅读器和芯片三部分组成, 至少包含标签和阅读器两个部分。

RFID 标签通常由 CMOS 电路构建, 有时也会应用表面声波设备或调谐振荡器, 这些标签拥有收发器可以与阅读器进行交互。多数标签拥有某种形式的编号, 并有可供读写的内存空间。标签根据其工作能量来源主要分为主动标签和被动标签以及兼顾两者优点的半主动标签三类。主动标签有着自己的能量供应如电池, 因此它可以发射较强的信号以支持 20 到 100 米的远距离通讯; 被动标签通过感应耦合阅读器发出的信号为其电容充电, 当充电到一定程度时, 芯片内的电路开始运作。被动标签有着成本低, 体积小, 易于布置等优点, 但因其能量补给方式的限制, 也受到通讯距离和可储存信息量这些因素的制约。半主动标签综合了以上两者的优点。

RFID 阅读器是用来读取或写入标签的设备, 是 RFID 系统最重要和复杂的部分, 有着不同的分类方式。按频率分类, 可分为低频、高频、超高频、微波等; 按可移动性分类, 可分为固定阅读器、移动阅读器、车载阅读器等。天线同阅读器相连, 用于在标签和阅读器之间传送射频信号, 有时也会和终端设备一起集成在阅读器上。

如 RFID 历史所述, RFID 的一个重要思想启迪就来源于雷达, 因此其工作原理和雷达也十分相似。我们以使用无源 RFID 标签的 RFID 系统为例, 简述其工作流程。如图 2.1 所示, 首先阅读器通过天线向标签发送电磁信号; 接着被动标签接收信号, 通过其内部电容器感应耦合存储电量; 待电容器充电完毕, 将电量慢慢释放给标签线圈; 然后线圈将标签信息编码无线电波发射; 最后阅读器解调从标签传递的信号, 根据实际需求将反馈的信息发送给相应的终端进行处理<sup>[11]</sup>。

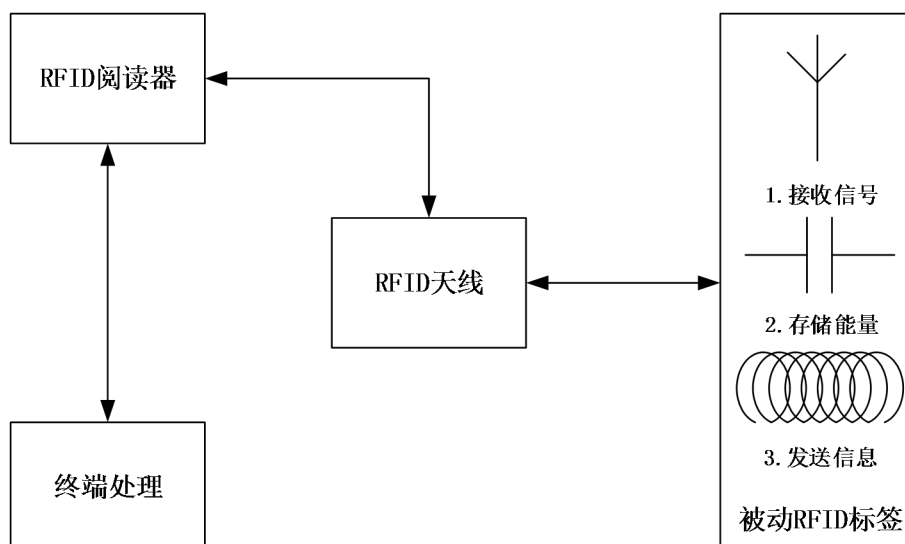


图2.1 被动RFID 标签的工作原理

## 2.4 RFID 技术应用

RFID 已成为我们生活的有机组成部分，应用在生活中的方方面面，如仓库资产管理、供应链自动管理、防伪识别、医疗、管控疏导交通、设置住宅或小区门禁、自动停车、追踪图书馆书籍等。下面我们就 RFID 的几个主要应用领域做详细介绍。

RFID 的第一个主要应用领域是安全管理，由此衍生的应用场景包括金融服务、移动支付、个人身份识别、商品防伪等。2013 年 2 月 5 日，中国金融集成电路(IC)卡规范(PBOC3.0)正式发布，规定将使用 RFID 单芯片卡全面取代现有磁条芯片，单芯片卡自此正式走入大众的生活。而自 RFID 发展起来的近场通讯技术(英文简称 NFC Near Field Communication)，推动了移动支付的发展与变革，已被广泛应用。在安防领域，RFID 开放式门禁系统既具有传统普通门禁系统的全部功能特点，还具有多人快速通过，信息自动采集，使用寿命长等优势。

RFID 的第二个主要应用领域是供应链管理，由此衍生的应用场景包括资产管理、产品追踪、食品药品安全监管、零售出货等。美国药品食品监督管理局支持应用 RFID 技术确保处方药的真实性。沃尔玛公司也致力于将 RFID 标签应用于其所有零售产品中，以建立准确的产品数据库，高效及时的调运货物。

RFID 的第三个主要应用领域是运动追踪，由此衍生的应用场景包括医疗看护、机器人以及游戏等。很多医院已经开始为新生儿佩戴 RFID 标签已确保他们不会被未经授权的人员带出医院，同时一些医疗设备也被装配上 RFID 标签以便快速追踪其现在的准确位置。

### 第三章 基于 RFID 的一维定位方案

#### 3.1 基于 RSSI 的定位

##### 3.1.1 RSSI 定位原理

RSSI，接收信号的强度指示的英文缩写，它的实现是在反向通道基带接收滤波器之后进行的。基于 RSSI 的定位是一种根据接收到的信号强弱，测定信号点与接收点的距离，进而进行位置计算的一种定位方案。

在我们的日常生活中，多数人都有过手机在一些偏远地区信号丢失，无线网络只有在无线路由器附近才可以连接这种体验，这其实是由于信号强度会随着信号传播距离的增加而不断衰减所造成的。也正是信号的这一种特性，使得我们有可能通过其信号衰减的程度判断信号发出点与当前点间的距离。

方震等对 RSSI 的测距原理做了详细的分析<sup>[12]</sup>，并给出了接收信号功率和收发单元之间距离的数学关系式 3-1。其中  $P_R$  是接收信号功率转换为  $dBm$  的表达式， $r$  是收发单元之间的距离， $n$  是取决于无线信号传播环境的传播因子， $A$  可以看作信号传输一米远时的传输功率。从公式中我们可以发现，在传播因子和信号发射端功率不变的情况下，信号强度随传播距离的增加单调衰减，虽然这种衰减趋势不是线性的。

$$P_R(dBm) = A - 10 \cdot n \lg r \quad (3-1)$$

##### 3.1.2 RSSI 定位方案

一维定位问题指的是所有待定位物体的位置可以被一维坐标表示的定位问题。在一维定位的条件下，通过应用连续扫描<sup>[13]</sup>的策略，我们不必知道当前传播环境的传播因子  $n$  和信号传输一米远时的传输功率  $A$ ，也能给出物体在一维坐标轴上的绝对位置。

图 3.1 详细描述了这种基于连续扫描的替换策略，4 个贴有 RFID 被动标签的待定位物体固定在一维坐标系的不同位置，RFID 天线沿着某平行于该一维坐标系的轨道由起点  $s$  向终点  $e$  移动，在移动过程中不断采集 4 个标签的 RSSI 数据。以第二个物体为例，如浅蓝色虚线所示，我们可以发现在 RFID 天线移动的过程中，天线与物体间的距离遵循着先单调减小，到达最小值后再单调增加的规律。

结合上一小节信号强度随距离增加单调衰减的规律，可总结在环境传播因子和信号发射端功率不变的条件下，随着 RFID 天线的连续移动，对某一特定标签，天线所接收到的信号强度会先单调增加，再单调减小，其获得最大值时所在位置的一维坐标即为待定位物体的一维坐标。

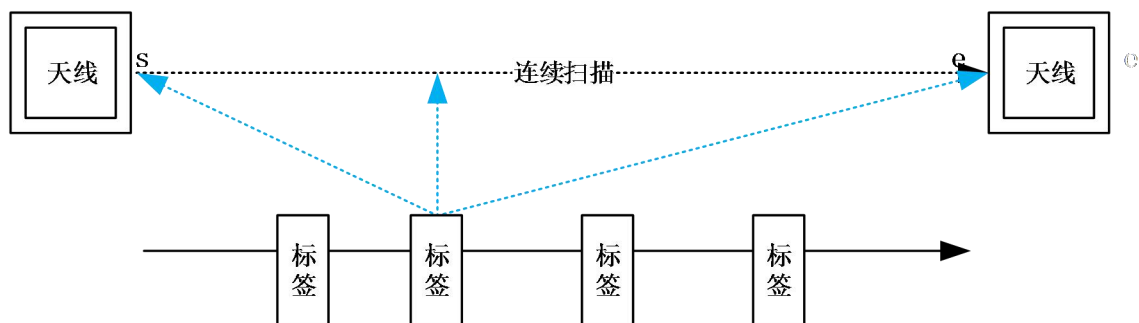


图3.1 RSSI 连续扫描的原理

### 3.1.3 RSSI 定位分析

我们构建了图 3.1 所描述的实验，并综合分析 20 次连续扫描的得到的结果。图 3.2 和图 3.3 是选取了其中两个具有代表性的物体 20 次连续扫描得到的综合数据结果，其中每个图中的横坐标代表天线移动的距离，纵轴代表 RSSI，绿色圆点代表当前物体在一维坐标轴上的实际位置。图 3.2 比较清晰的描述了我们在前文所描述的数学关系，可以看出 RSSI 确实存在先增加、再减少的趋势，并且最大值集中的区域就是物体所处的位置。

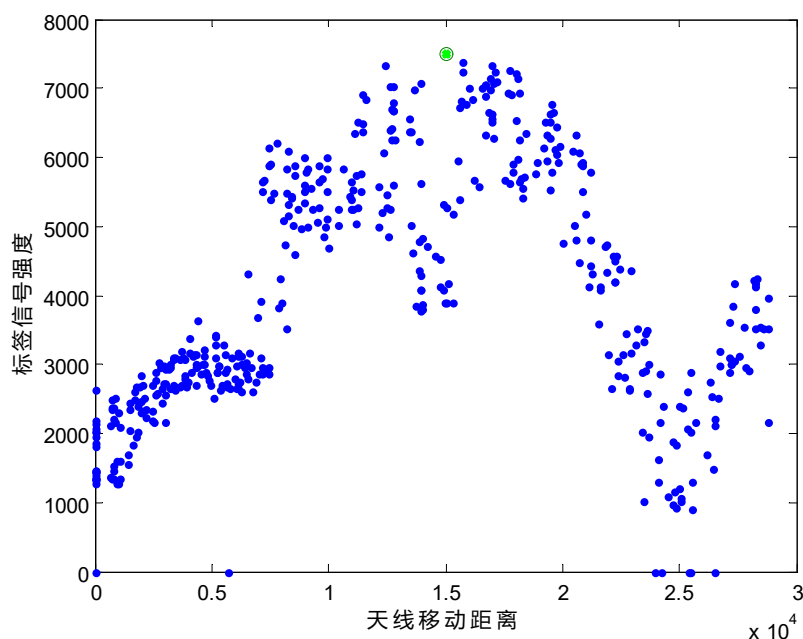


图3.2 连续扫描中 RSSI 变化曲线一

但在图 3.3 中，虽然物体的实际位置和图 3.2 中物体的位置仅差 20cm，但其 RSSI 的变化趋势却比较复杂，不仅存在两个峰值区域，物体所处的位置也在两个峰值区域之间的低谷区域。造成这种现象的原因可能是室内复杂的环境破坏了我们的假设。首先在移动过程中，无线信号传播环境的传播因子是可变的；其次由于多径效应等因素，接收到的 RSSI 可能受到了地面、家具、墙面等反射信号的影响，信号传播的实际路程并不是天线和物体之间距离的 2 倍。

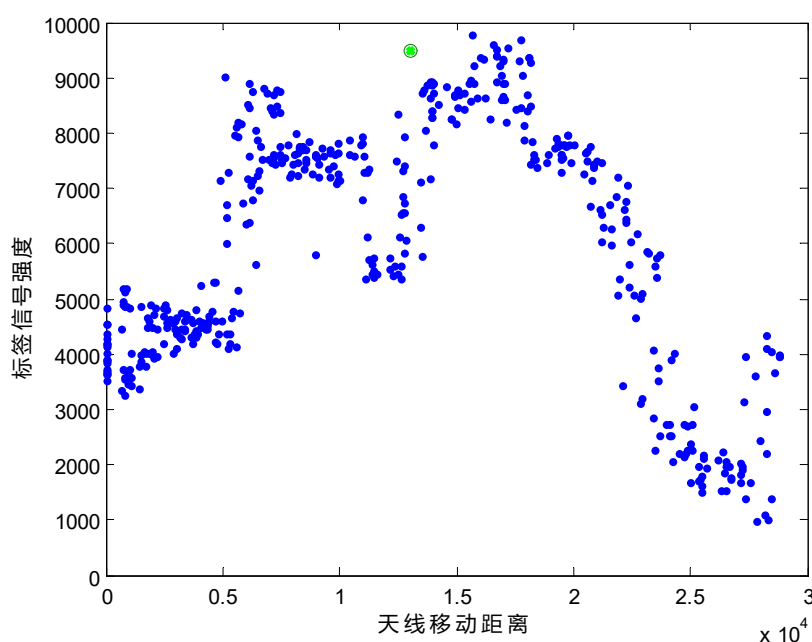


图3.3 连续扫描中 RSSI 变化曲线二

表 3.1 中我们统计了 20 次实验中 10 个物体定位误差的均值和最值，可以看到定位误差的均值为 370.5mm，定位误差的最值为 1107mm，这个结果与现有基于 RSSI 定位工作的精度基本吻合。

表3.1 RSSI 定位效果

物体编号	1	3	6	7	8	11	12	13	14	15	统计
定位误差均值(mm)	211	412	386	255	627	412	329	267	574	232	370.5
定位误差最值(mm)	314	418	476	360	1107	508	410	326	727	349	506.5

## 3.2 基于相位的定位

### 3.2.1 相位定位原理

相位描述的是系统在一个周期的振动或者波动中所处的相对位置。对于一个波，相位是特定时刻在它循环中的位置，一种它是否在波峰、波谷或他们之间某点的标度。

相位定位主要利用的是阅读器发射信号的相位与阅读器接收到标签反射信号的相位两者之间的相位差。胡宏泽等对相位测距的原理进行了详细的分析<sup>[14]</sup>，并总结了在排除多径效应、噪声等因素的干扰，且信号传播过程中相位差变化在一个周期内的理想状况下，单程距离与相位差之间的数学关系如 3-2 所示。其中  $d$  是天线和标签之间的距离， $\Delta\varphi$  是发射信号与接收信号间的相位差， $f_0$  是信号的频率， $c$  是电磁波的传播速度。从中我们可以看出在当距离  $d$  在公式要求的范围内时，距离和相位差之间有着明确的线性关系。

$$d = \frac{c \cdot \Delta\varphi}{4\pi f_0} \quad (d \leq \frac{c}{2f_0}) \quad (3-2)$$

在不限制  $d$  的范围时，完整的数学关系如 3-3 所示，在此时，只有在  $k$  值确定的每个周期内，距离  $d$  和相位差  $\Delta\varphi$  之间有着明确的线性关系。这就引出了使用相位进行绝对定位的一个核心问题，即相位的整周模糊度。对于超高频读写器来说，距离每增加约 17.5cm，其相位差就会展现相同的模式，这让我们难以判断天线和待定位物体之间的真实距离，双频比相位测距等方法可以部分解决这一问题。

$$d = \frac{c \cdot \Delta\varphi}{4\pi f_0} + k \cdot \frac{c}{2f_0} \quad (k = 0, 1, 2 \cdots) \quad (3-3)$$



### 3.2.2 相位定位方案

若要应用相位进行定位，我们首先要解决其整周模糊度的问题。和应用 RSSI 定位时的思路一样，应用相位差定位的核心方法也是连续扫描。

图 3.4 和之前 RSSI 定位时图 3.1 的区别在于在三条蓝色虚线的基础上新增加了两条橙色虚线并标注了  $a, b, c$  三点。 $b$  点为移动过程中天线到物体距离最近时天线所在的位置。当天线在  $b$  点时，可以获得阅读器与当前物体间的相位差  $\varphi_0$ ，此时的  $k$  为某一确定值  $k_0$ 。根据相位的几何性质，在天线移动距离足够长的条件下，在  $b$  点两边，必分别存在对称的  $a$  点和  $c$  点，其到物体的距离等于  $(k_0+1)\lambda$ 。由数学关系 3-3 可知，在  $k$  值确定的一个周期内，距离和相位差之间线性相关，即在从  $a$  点经  $b$  点到  $c$  点的运动过程中，距离和相位差之间线性相关。故距离和相位差都会有先减小，后增加的趋势，即存在一个 U 型的几何变化。

基于类似的分析，在从起点  $s$  到  $a$  点的移动过程中，相位差在每个周期内  $2\pi$  到  $0$  单调递减；在从  $c$  点到终点  $e$  的移动过程中，相位差在每个周期内  $0$  到  $2\pi$  单调递增。因此在天线移动距离足够长的情况下，U 型的几何变化唯一存在，且 U 型的谷底所对应的  $b$  点坐标就是待定位物体在一维坐标系上的坐标。

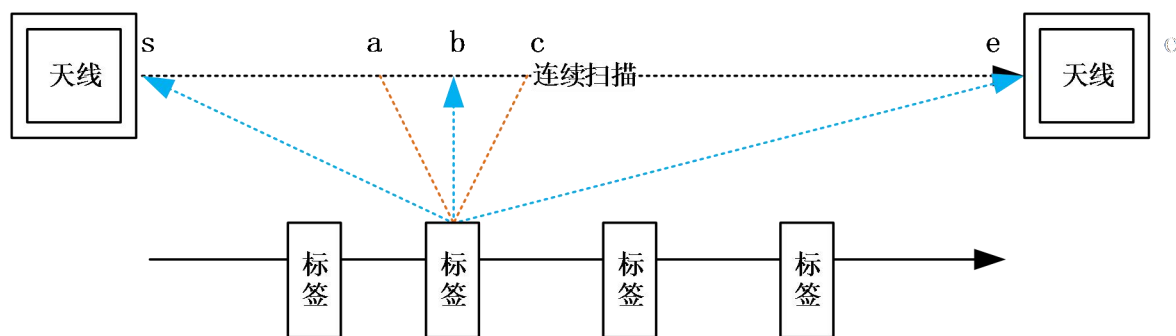


图3.4 相位连续扫描的原理

### 3.2.3 相位数据处理

#### 3.2.3.1 数据处理简述

相位数据处理的目的是从离散的数据点中准确的提取 U 型特征区域，并找出 U 型谷底，从而获得待定位物体的坐标。这部分工作主要分为异常点剔除，特征提取和函数拟合三个部分。

### 3.2.3.2 异常点筛除

因为相位数据不连续，且具有一定的周期性，因此其离散点图中有很多天然的断点，这使得我们在筛除异常点时要准确判断，避免筛除掉正常的数据点，导致数据丢失。在实验中，我们采用阈值法筛除异常点。异常点被定义为与其前后两个点的差值均超过阈值的点。阈值根据经验定为，即十分之一一个周期。异常点去除后的相位图像参见图 3.5。

实验采用的异常点筛除方法较适合筛除独立的异常数据。连续的异常数据未在异常点筛除阶段处理，因大量连续数据的筛除可能会导致数据缺失，影响后期的数据处理。

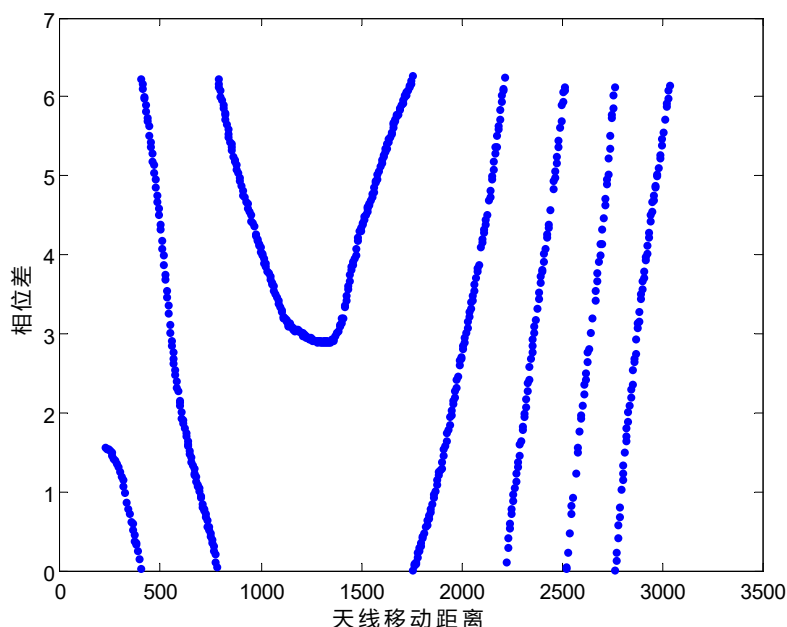


图3.5 经过异常点筛除后的相位曲线

### 3.2.3.3 特征提取

在之前的分析中，我们得到的结论是在天线移动距离足够长的条件下，U型的几何变化唯一存在。但由于相位的周期性，数据中除了U型段之外，还存在若干单调上升段与单调下降段。因此特征提取的工作主要分为两步，第一步将筛除异常点后的数据按相位周期分段，第二步从分段的数据中提取出U型特征段。

第一步采用的方法是阈值法，通过相位数据每个周期期间  $2\pi$  的大幅度跳跃，将数据按周期分段。考虑到数据采集时的误差及筛除异常点时的数据损耗，阈值根据经验定为，即五分之四个周期。

第二步采用的方法是对称法，因 U 型数据段具有天然的几何对称性，而其余数据段都是单调递增或递减，通过计算整个系统对应点间的方差，可以准确的筛选出 U 型数据段。特征提取后的效果参见图 3.6。

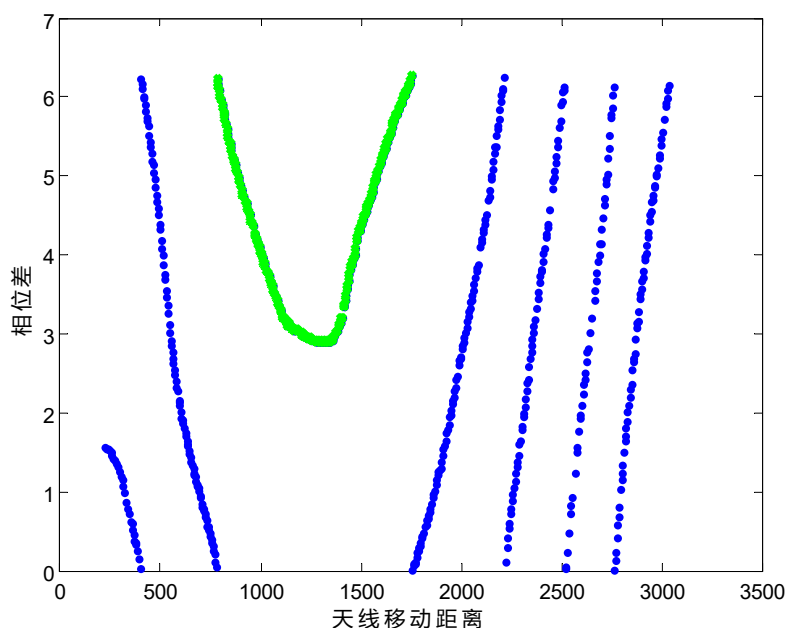


图3.6 相位数据曲线分段与特征提取

#### 3.2.3.4 函数拟合

在特征提取后，U 型数据段已经被提取出来，从理论上讲，只要找出数据段中最小值所对应的坐标即可。但由于实践中数据采集往往存在误差，使得最小值所在坐标与物体真实坐标差距甚远。函数拟合就是旨在综合利用 U 型数据段的数据，避免因少数数据的偏差影响实验效果。在实验中，我们选择具有良好对称性的二次函数对数据进行拟合，最终拟合效果参见图 3.7。对二次函数求导即可得到其极值点，该点即为所求。

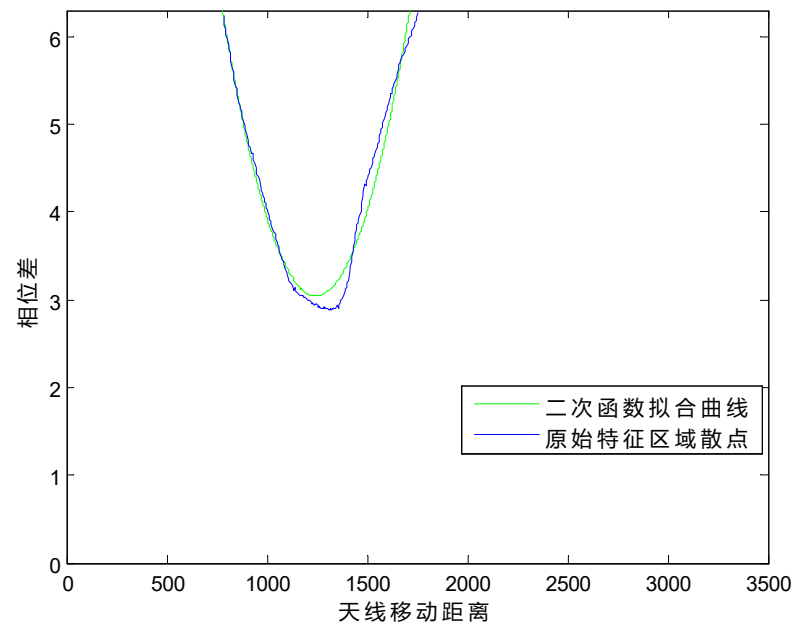


图3.7 二次函数拟合特征曲线段

## 第四章 基于 RFID 的二维定位方案

### 4.1 二维定位简述

二维定位问题指的是所有待定位物体的位置可以被二维坐标表示的定位问题。相较于限制严格的一维定位，二维定位在生产生活中拥有更广泛的应用前景与应用价值，但同时，二维定位也需要更加精细的方案。

直接基于 RSSI 的二维定位通常需要多个天线从不同角度协同工作，运用三角定位法，可以计算出被 RFID 信号覆盖的区域中物体的位置。这种方案的缺点较多，第一运用三角定位法需要至少 2 个或 2 个以上的天线协同工作，成本较高；第二从我们之前对 RSSI 一维定位的分析可知，RSSI 易受室内复杂环境的影响，在室内的表现本来就比较一般，而多个天线的协同定位可能会成倍的放大定位误差。

直接基于相位的二维定位通常需要利用相位的几何特征，在前面对相位一维定位的分析中，我们已经详细介绍了在平行于天线移动方向这一维度上，相位差的几何特征。事实上在垂直于天线移动方向这一维度上，相位差也有其独特的特征。在 Shangguan 等提出的时空相位协议<sup>[7]</sup>中，通过分析 U 型区域底部的高度特征，给出了物体在纵轴上的相对位置；但该协议也有其局限性，第一准确提取 U 型区域底部的高度特征需要天线与物体之间保持较近的距离；第二受限于相位的整周模糊度，U 型区域底部的高度特征每隔 20cm 左右就会重复，故纵向可定位区域较窄；第三在不提供天线与书架当前距离等这些外界参数时，无法给出物体在纵轴的绝对位置，只能像文中一样应用于相对位置的定位。其余利用相位几何特征的定位多数也面临上面列出的问题。

为了规避直接进行二维定位所面临的问题，我们从间接开展二维定位的角度出发，在下一小节提出了基于一维定位组合的二维定位方案。

### 4.2.1 方案原理

我们对以上想法进行推广，如图 4.1 所示，如果天线在两个互不平行的轨道上对物体进行连续扫描，我们就可以分别得到两个天线移动轨道上离物体最近一点  $b_1$  和  $b_2$ ，在排除环境干扰和误差的理想情况下，物体必在过  $b_1$  点的垂线  $L_1$  和过  $b_2$  点的垂线  $L_2$  这两条橙色虚线上。又因为两次一维定位天线所在的轨道互不平行，故两条垂线  $L_1$  和  $L_2$  必有交点，这一交点即为物体位置。在两个天线移动轨道分别与平面直角坐标系的两轴平行时，这一交点坐标即为物体在二维坐标系上的坐标。

图4.1 基于一维定位组合的二维定位方案原理

#### 4.2.2 方案分析

基于以上原理，我们在算法 1 中给出了基于一维定位组合的二维定位方案。

图 4.1 对算法 1 的原理做了解释。

---

#### Algorithm 1 基于一维定位组合的二维定位

---

##### Input:

确定的二维直角坐标系 $xOy$

待定位物体 $P$

##### Output:

$P$  在 $xOy$  中的坐标 $(x,y)$

- 1: 构建平行于 $xOy$  中 $X$  轴的天线移动轨道 $TrackX$ ，确保移动轨道可以完整扫描 $P$
  - 2: 天线在 $TrackX$  上进行一维定位，返回距离 $P$  最近点 $b1$
  - 3: 构建平行于 $xOy$  中 $Y$  轴的天线移动轨道 $TrackY$ ，确保移动轨道可以完整扫描 $P$
  - 4: 天线在 $TrackY$  上进行一维定位，返回距离 $P$  最近点 $b2$
  - 5: 过 $b1$  做垂线 $L1$  交 $xOy$  的 $X$  轴，得到交点横坐标 $x$
  - 6: 过 $b2$  做垂线 $L2$  交 $xOy$  的 $Y$  轴，得到交点纵坐标 $y$
  - 7: 返回 $P$  的估测坐标 $(x,y)$
- 

该方案的第一个特点是其灵活性，基于一维定位组合的二维定位方案并不是一套固定的定位方案，而是为组合一维定位方案开展二维定位提供了一个框架，在这个框架内，任何应用连续扫描技术的一维定位方案都可以嵌入其中。举例来说两次一维定位可以组合第三章介绍的基于 RSSI 的一维定位方案和基于相位的一维定位方案，也可组合其余满足条件的一维定位方案。这为各种实验环境，实验设备，实验条件下开展二维定位提供了灵活的空间。

该方案的第二个特点是其误差可控性，由于每次一维定位之间相互独立，且各天线移动轨道互成直角，如数学关系 4-1 所述，二维定位方案的误差  $e$  不会超过组合中误差最大的一维定位方案误差的倍。这为定位误差控制提供了基础。

$$e \leq \max(e_1, e_2) \quad (4-1)$$

该方案的第三个特点就是其多维扩展性，基于同样的方法， $n$  个天线移动轨道两两垂直的一维定位方案的组合可以完成  $n$  维空间内物体的定位，且如数学关系 4-2 所述，该 $n$  维定位方案的误差  $e$  不会超过组合中误差最大的一维定位方案误差的倍。

$$e \leq \max(e_1, e_2, \dots, e_n) \quad (4-2)$$

## 4.3 基于二维定位组合的收敛定位方案

### 4.3.1 方案原理

在上一小节，我们介绍了一个基于一维定位方案组合的二维定位框架，用于解决二维定位的问题。运用该框架，我们可以期望定位的误差不超过组合中每个一维定位方案的误差最大值的倍。在这种限制下，如果我们想更精确的定位物体，就要尽可能减少每个一维定位方案的最大误差。

图 4.2 展示了天线对物体的两次一维定位，可以发现两次定位天线移动轨道离物体的距离不同。根据现有的资料和实验结果，多数一维定位方案的平均误差会随着天线与待定位物体距离的减小而减少。这一方面是因为随着距离接近，RFID 受到环境干扰的机会就会减少；另一方面随着传播距离的减少，相位以及 RSSI 等 RFID 特征在传播过程中积累的累积误差也会有所减少，这些都会使得实验结果更贴近理论值。因此在条件允许的情况下，我们希望通过缩短天线移动轨道与待定位物体间的距离来减少一维定位方案的误差，从而降低二维定位方案的误差。

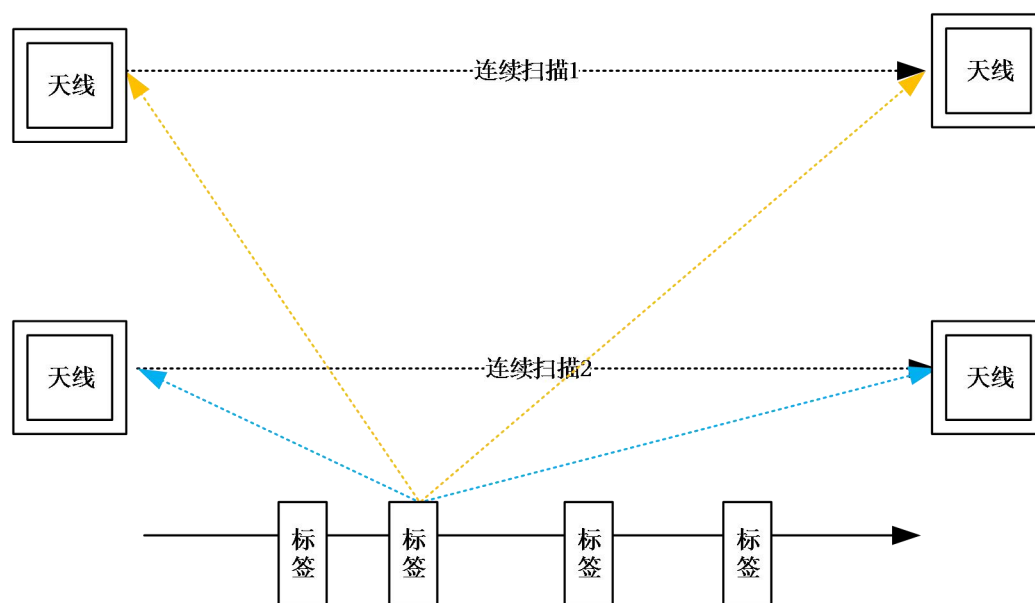


图4.2 天线与物体不同距离下的连续扫描



基于二维定位组合的收敛定位方案就是一套致力于不断缩减天线移动轨道与物体间距离以求减少定位误差的方案。在图 4.3 中，大正方形区域代表待定位物体所在的平面范围，目标代表标签的准确位置，位一、位二和位三这三个小正方形分别代表经过三次二维定位后物体被定位到的位置。因为物体初始位置未知，第一次二维定位时的两条天线移动轨道只能选择正方形区域的中间位置（即橙色轨道），以求最大可能的与物体接近，这次定位估测到的物体位置为位一；第二次二维定位时我们就以上一次估测的物体位置为原点，建立两条互相垂直的天线移动轨道（即绿色轨道），这次定位估测到的物体位置为位二，由于位一和位二间距离差距超过阈值，我们继续进行第三次二维定位；与此前同理经过蓝色轨道定位得到位三，以位三为中心，阈值为半径做圆（即右上角黑色圆周），发现位二在圆内，收敛定位结束，位三即为最终估测得到的位置。

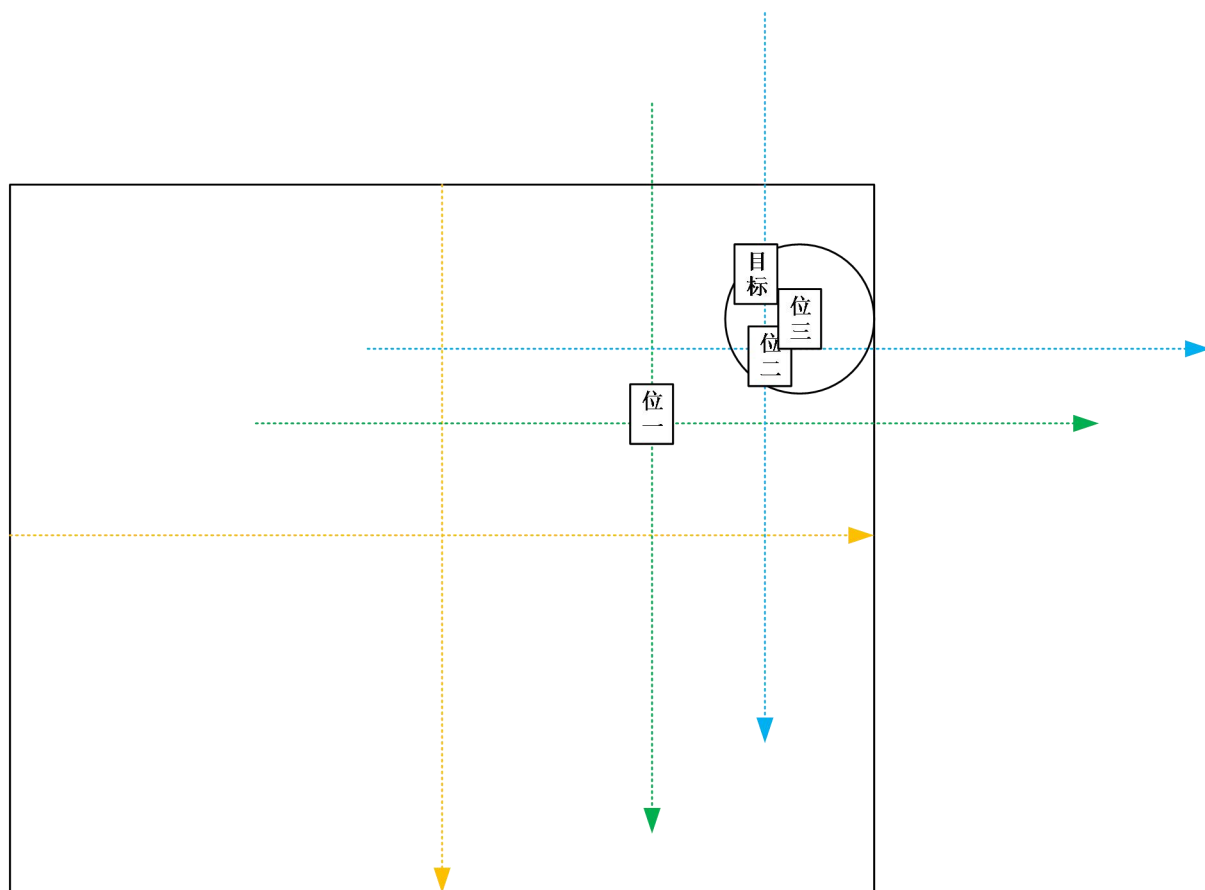


图4.3 二维收敛定位方案示意图

#### 4.3.2 方案分析

基于以上原理，我们在算法 2 中给出了基于二维定位组合的收敛定位方案。

图 4.3 对算法 2 的执行过程做了详细的介绍。

该方案是启发式的，致力于为那些需要通过增加定位次数以提高定位精度的应用场景提供相较多次随机二维定位更有目的性，且综合表现可能更好的二维定位组合方案。和之前基于一维定位组合的二维定位方案一样，该方案也是一个宽泛的框架，且易于向多维定位扩展。但因为该方案是启发式的，我们只能说随着收敛定位的进行，定位误差有逐渐减少的趋势，但无法保证收敛定位执行后的定位误差一定小于单次二维定位；且在一些复杂环境中，过小的阈值设定可能会导致收敛定位过程无法自行停止。

---

#### Algorithm 2 基于二维定位组合的收敛定位

---

**Input:**

确定的二维直角坐标系 $xOy$   
待定位物体 $P$   
设定阈值 $k$

**Output:**

$P$  在 $xOy$  中的坐标 $(x,y)$

- 1: 初始化待定位物体 $P$  上轮的定位坐标 $P_0(\infty, \infty)$
  - 2: 初始化待定位物体 $P$  当前的定位坐标 $P_1(0, 0)$
  - 3: **while**  $P_1$  与  $P_0$  之间的欧式距离大于 $k$  **do**
  - 4:   过 $P_1$  构建平行于 $X$  轴的直线 $L1$ ，平行于 $Y$  轴的直线 $L2$
  - 5:   构建平行于 $L1$  的移动轨道 $TrackX$ ，使得 $L1$  与 $TrackX$  构成的平面与 $xOy$  垂直
  - 6:   构建平行于 $L2$  的移动轨道 $TrackY$ ，使得 $L2$  与 $TrackY$  构成的平面与 $xOy$  垂直
  - 7:   将 $P_1$  坐标赋给 $P_0$
  - 8:   以 $TrackX, TrackY$  为轨道，执行算法1，返回 $P$  的本轮估测坐标 $P_1(x_0, y_0)$
  - 9: **end while**
  - 10: 将  $P_1$  坐标赋给 $P$
  - 11: 返回 $P$  的估测坐标 $(x,y)$
-

## 第五章 RFID 图书定位系统设计与实现

### 5.1 系统概述

基于前几章得到的实验结果和定位方案，我们为书架上书籍定位这个二维定位问题设计了一套基于 RFID 的图书定位系统，以辅助读者和图书管理员。

这套系统的硬件部分主要由四个模块构成，它们分别是定位模块（包括 RFID 阅读器，天线和标签），移动模块（包括二维移动控制架，蓝牙模块等），目标模块（包括木质网格书架，若干待定位图书等）以及控制模块（包括运行程序的主机，无线适配器，蓝牙适配器等）。在第二节我们将对这些模块及其相互间协作做详细介绍。

这套系统的软件部分的三个基本功能是书籍定位，书籍查询以及书籍内容修改，其余的诸如错位书籍标记、书籍分布阅览、书籍精确定位、添加新书籍等高级功能都是基本功能的完善与组合。在第三节里我们会从需求分析、功能设计、软件构建等角度，对我们的软件系统做详细介绍。

### 5.2 系统硬件设计

#### 5.2.1 硬件模块介绍

##### 5.2.1.1 定位模块

定位模块主要由 RFID 阅读器，天线和标签三个部分组成，是整个系统感知与收集外部信息的媒介，也是完成我们图书定位这一核心功能的重要组件。在第二章中我们已经从宏观的角度介绍了 RFID 技术及 RFID 系统，因此在这里我们主要从实验具体使用的 RFID 系统出发，对其型号功能和配置做简单介绍。

我们在实验过程中先后使用过意联科技公司(Alien Technology)的 ALR-9900 阅读器及配套天线和英频杰公司(Impinj)的 SpeedwayR420 阅读器及配套天线。ALR-9900 阅读器是偏老式的阅读器，支持多天线连接，可以采集 RSSI 特征数据，需要与主机建立 RS-232 串口连接以及 TCP/IP 网络连接。

SpeedwayR420 阅读器是新型的阅读器，现已成为全球销量第一的 RAINRFID 阅读器，支持多天线连接，可以采集包括 RSSI，相位，多普勒频移等多种特征数据，具有业内最高的接收灵敏度（-84dBm）需要与主机建立 TCP/IP 网络连接。我们使用的天线与其阅读器配套，为了使天线在各个方向上均保持敏感，我们在实验中选择了圆极化天线。

最终定位模块的实现是基于 SpeedwayR420 阅读器及其配套天线的，图 5.1 展示了定位模块的各个组件。



图5.1 定位模块示意图

#### 5.2.1.2 移动模块

移动模块主要由水平移动轨道、垂直移动轨道、天线安装板和控制箱四个部分组成，此外还有如垂直移动驱动结构、配重操作台等辅助结构，图 5.2 给出了移动模块的示意图并指出了以上各组件在移动模块中的位置。移动模块主要负责定位全程天线移动轨道的选择与天线在轨道上的移动，是我们所有基于连续扫描原理的定位方案的基础。

移动模块主要通过控制箱中的蓝牙模块与主机进行交互，通过在主机端发送相应指令，可以实现将天线移动到  $3300mm \times 1600mm$  平面上的任意指定位置，并可以设定天线在水平方向和竖直方向上的移动速度。同时为了简化我们在第四章中描述的两个算法的实现，整个移动模块被安放在与目标模块互相平行的位置。

### 5.2.1.3 目标模块

目标模块主要由木质网格书架、贴有 RFID 标签的待定位书籍/物体两部分组成，以求真实地模拟图书管理定位这一实际应用场景。图 5.3 是目标模块的示意图。

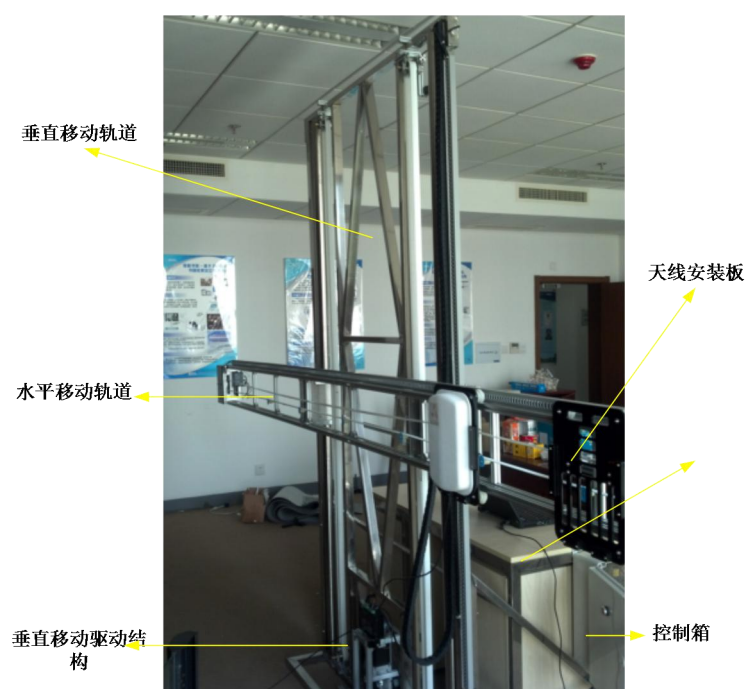


图5.2 移动模块示意图

我们的书架在水平方向上有 5 个网格，网格间距离为  $800mm$ ，竖直方向上有四个网格，网格间的距离为  $600mm$ 。为了减少来自地面和天花板的多径效应影响，我们的待定位书籍离书架顶部和底部均保有一定距离；同时为了在天线移动过程中可以采集到待定位物体完整的数据特征，我们的待定位书籍在书架的两端也留下了一部分空白的区域。故我们实验中实际有效的定位区域面积为  $2000mm \times 1000mm$ 。



图5.3 目标模块示意图

#### 5.2.1.4 控制模块

控制模块可以指代任何支持蓝牙与无线连接，可搭载我们图书定位系统程序，并提供人机交互界面的平台。在实验中我们的控制模块是装配蓝牙适配器的笔记本电脑。

#### 5.2.2 模块间协作

系统主要由控制模块，定位模块，移动模块和目标模块四个部分组成，以完成图书管理定位的各项工作。系统整体工作过程如图 5.4 所示，首先用户和控制模块交互，选择或输入需要完成的操作；控制模块接收到用户命令后，将其拆解成一系列具体的指令交付给移动模块和定位模块完成；移动模块根据指令控制定位模块移动，定位模块根据指令与目标模块进行交互，完成数据的收集与读写，同时控制模块根据各个模块反馈的信息和数据，进行存储、处理和分析；当所有指令均执行完毕后，控制模块将命令执行的效果通过界面展示给用户。

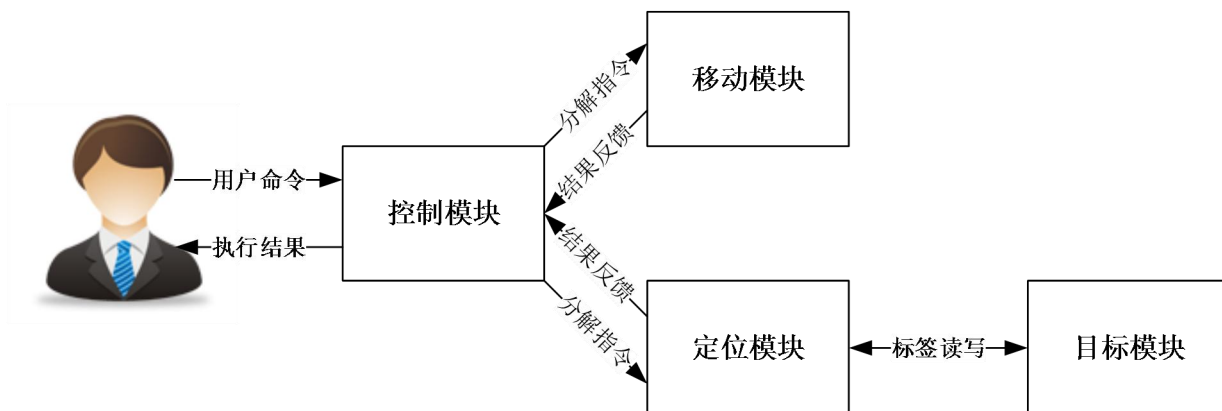


图5.4 模块间协作示意图

## 5.3 系统软件设计

### 5.3.1 需求分析

图书管理一直以来都是一项繁琐而复杂的工作，由于一些读者在阅览图书后不是将图书放入书架旁的手推车里，而是重新插回书架，导致真实的书籍排布情况和理想的书籍排布情况有很大偏差，大大降低了在图书管理系统中查阅图书的准确性，为读者带来很大不便；而纠正这种错误的成本是巨大的，人工遍历数百万本乃至千万本书籍不仅低效，也是对人力浪费。因此我们围绕自动标记错位书籍这一核心需求，着手构建我们的系统。在核心需求之外，我们也致力于增加合适的功能方便用户对书籍的阅览以及管理员对书籍的管理。这部分功能包括显示当前书架上所有图书及其位置并提供阅览，根据书籍索引号查阅书籍是否在当前书架上，对书架上某一本书籍的位置做精确定位，在书架中删除或添加书籍，对书籍的备注内容做修改等。

### 5.3.2 概要设计

#### 5.3.2.1 流程设计

在需求分析一节，我们已经明确了我们软件设计的核心需求及配套辅助需求。其中核心的需求就是错位书籍的标记，配套的辅助需求可以通过书籍分布生成、书籍分布浏览、书籍分布删除、指定书籍查询，书籍精确定位以及书籍内容修改六种功能实现。



以上七种功能之间存在一定的依赖关系，比如未生成书籍分布便不能浏览书籍分布；未查询书籍是否存在便无法对书籍内容进行修改。为了明确以上功能间的依赖与转换关系，将功能更好的组织起来，满足我们预设的需求，我们在图 5.5 中给出了图书定位系统的状态图。可以发现，图 5.5 将书籍分布生成功能作为基础，在成功生成书籍分布后，解锁错位书籍标记、书籍分布浏览、书籍分布删除以及书籍查询四项功能，在成功查询书籍后解锁精确定位和内容修改两项功能。

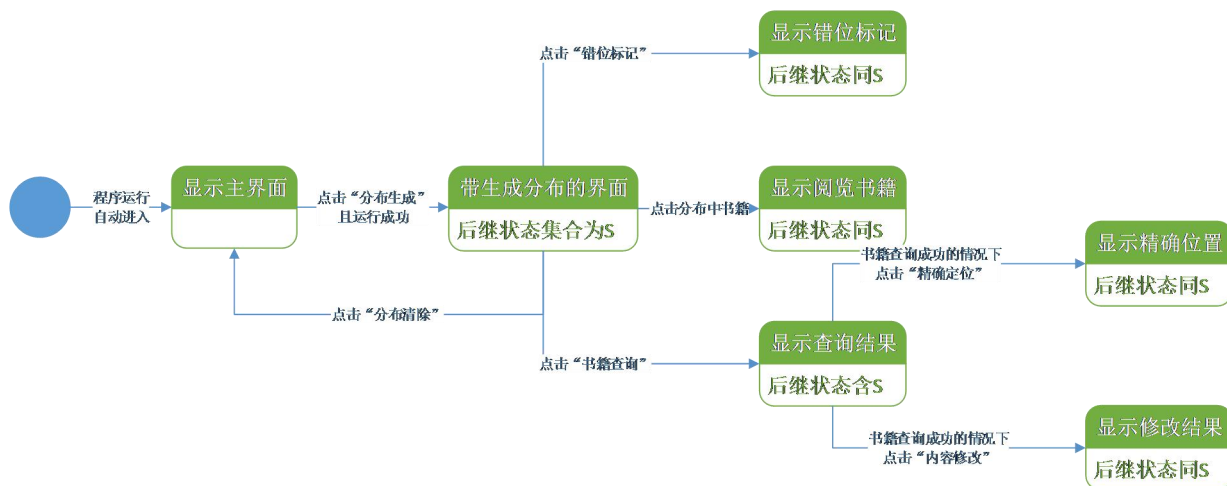


图5.5 系统状态转换图

图 5.5 为了更加清晰的表述状态之间的关系，避免过多的状态转换影响视图效果，我们将“带生成分布的界面”的四个后继状态（显示错位标记、显示浏览书籍、显示查询结果和显示主界面）定义为后继状态集合  $S$ 。其余标注“后继状态同  $S$ ”的状态虽然为了视图效果没有画出连线，但也存在集合  $S$  里的四个后继状态；至于标注“后继状态含  $S$ ”的状态则代表除了已经画出的后继状态外，还存在集合  $S$  里的四个后继状态。

### 5.3.2.2 结构设计

在对软件的控制流程进行设计后，为了更好地完成原型的构建，我们在这一小节对软件的整体结构也进行了设计。在上一节中，我们将硬件系统分为了控制模块，移动模块，定位模块和目标模块四个模块，除了目标模块与软件部分基本无关外，其余三个部分的工作都需要软件的支持，因此在我们设计我们程序的结构时，也保持了与系统结构一致的风格。



图 5.6 给出了程序中使用的 8 个类及其成员函数的概括介绍。控制模块由 Form 类和 DataController 类 2 个类共同负责，Form 类负责维护与用户的界面交互以及程序的流程管理，DataController 类则负责所有数据的存储，处理与分析；移动模块和定位模块分别由 ShelfController 类和 ImpinjController 类负责，它们接收控制模块的指令，适当处理后传递给相应模块执行，并将结果返回控制模块。其余的 4 个类分别规定了程序的入口，静态的参数，数学工具与数学形式等内容，属于辅助的类，在此不多做介绍。



图5.6 软件核心类的设计

### 5.3.3 软件构建

#### 5.3.3.1 软件构建简述

图书定位系统的软件基于 Microsoft Visual Studio Express 2013 平台构建，使用 C#编程语言进行编写，代码量为 2820 行。在下面的三个小节中，我们将对构建控制模块、移动模块、定位模块的过程做简要介绍，并指出构建过程中应用的核心技术方法及解决的主要技术问题。

### 5.3.3.2 控制模块构建

流程控制是控制模块一个核心功能，由 **Form** 类负责完成。在上一节的图 5.5 中，已经给出了 7 个功能之间的依赖关系与运行顺序。这一小节我们要做的就是将其在技术上实现。

流程控制运用的核心思想是状态机的思想，每个功能的结果作为一个状态，状态之间按照图 5.5 的规定进行转换。我们的实现如图 5.7 所示，在图 5.7(a)中，我们通过按钮控件对每个功能进行封装，由于按钮控件自身带有 **Enabled** 属性（即按钮是否可以和用户交互，若不能，则按钮显示为灰色），因此状态间转换可以自然地通过在每个按钮控件的代码中设定其余按钮控件的 **Enabled** 属性完成，图 5.7(b)和图 5.7(c)以“显示主界面”这一状态为例，分别展示了该状态在状态图、真实用户界面中和其他状态之间的转换关系，可以发现两者是统一的。

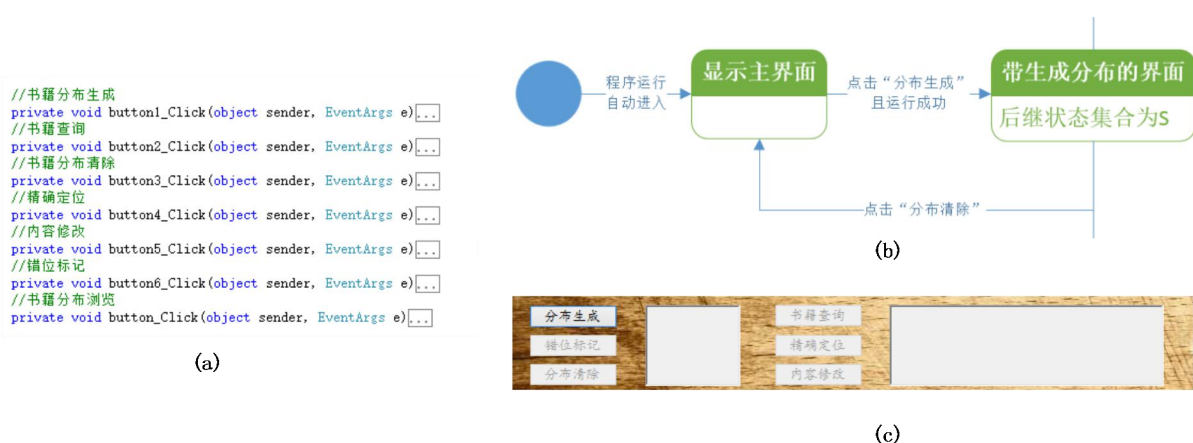


图5.7 控制模块中流程控制的实现方法与样例

通过按钮自带属性实现状态机的一个潜在的好处在于简化了用户的交互。置灰当前不能转换到的状态减少了用户每一步操作时的选项数量，进而提高了用户的体验。

数据处理是控制模块的另一个核心功能，由 **DataController** 类负责完成。数据处理工作的目的是将定位模块采集到的诸如相位、信号强度等特征的原始数据转换为可供控制模块直接使用的位置分布与标签内容等信息。

数据处理的核心过程如图 5.8 所示，第一步在 C#内存数据库中建立原始数据表，将所有定位模块采集到的原始数据插入其中；第二步为每一个不同的标签代码生成子数据表，将原始数据表中该标签代码的数据插入其中；第三步进行的就相位数据的处理工作，这部分内容我们已在论文第三章中做过具体的介绍，处理后得到该标签的定位位置等加工信息；第四步将每一个标签的加工信息插入到分布信息表中，作为数据处理的结果供其他模块调用。

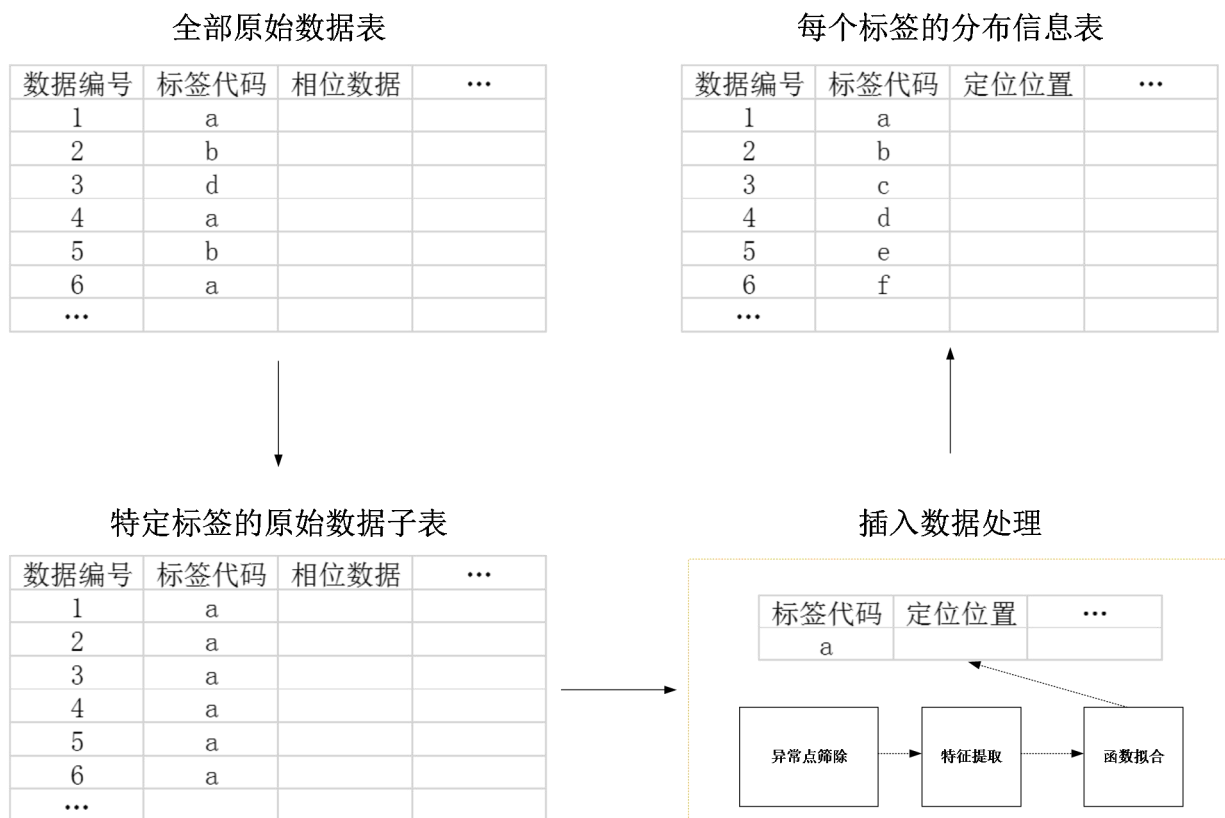


图5.8 控制模块中数据处理过程示意图

### 5.3.3.3 移动模块构建

ShelfController 类是移动模块在软件端的管理类，如图 5.9 所示，它的核心功能主要体现在两个方面，一是为控制模块提供可以调用的接口，控制端可以通过这些接口操纵天线移动的轨迹与行为；二是通过蓝牙端口和移动模块中的硬件组件进行交互，将控制模块的指令分解处理后交由硬件执行，并将执行结果反馈给控制模块。

```

/*为控制模块提供调用接口*/
//移动
public void move(Command cmd, int speed, int distance)...
//停止
public void stop(Command cmd)...
//初始化
public void init(Command cmd)...

/*负责与移动模块终端交互*/
//蓝牙连接判断
public bool _isConnected()...
//速度合法性检查
private bool _checkSpeed(Command cmd, int speed) ...
//端口写
private void _portWrite(byte[] frame)...
//端口读
private void _portRead(byte[] b)...
    
```

图5.9 移动模块软件端的主要函数

### 5.3.3.4 定位模块构建

ImpinjController 类是定位模块在软件端的管理类，它为控制模块提供了多种获取标签数据的途径。如图 5.10 所示，注册 OnTagsReported 事件可以让天线在工作时获取到所有标签的原始特征数据，这是控制模块开展数据处理的基础。而注册 OnTagOpComplete 事件则可以让天线在工作时对标签进行多种操作，这其中就包括我们需要的标签内容读取及写入操作。值得注意的是，在标签读取操作中，有多种可供选择的设置，使其可以支持单个指定标签，单个随机标签或全体标签的内容读取，这些不同类型的读写操作支持了控制模块的各项功能。

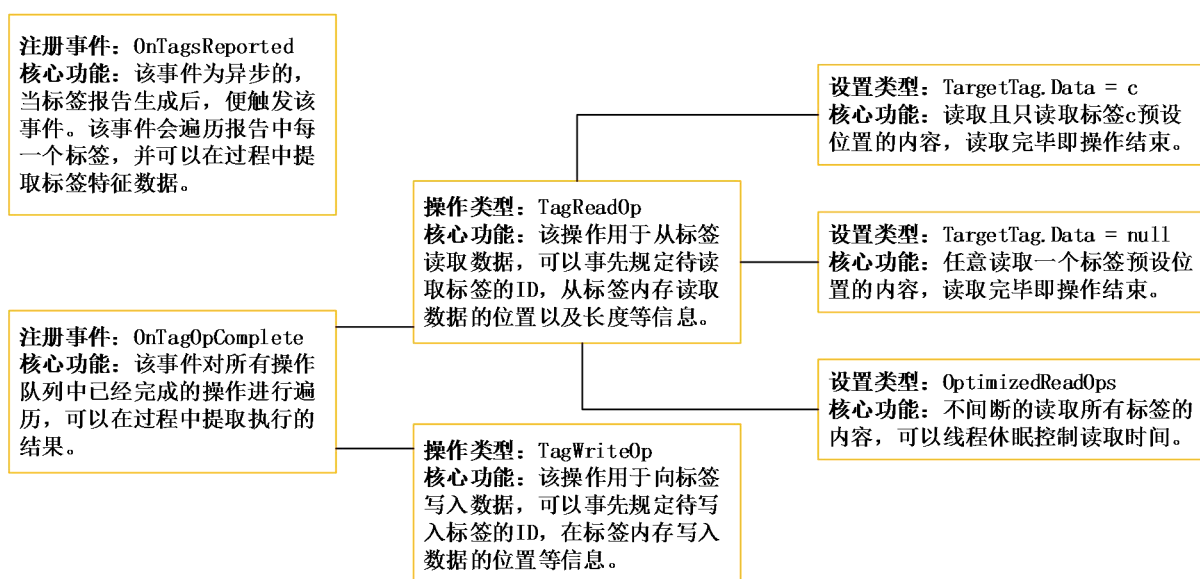


图5.10 定位模块软件端的主要功能

## 第六章 RFID 图书定位系统展示与测试

### 6.1 系统功能展示

#### 6.1.1 书籍分布生成

“书籍分布生成”是 RFID 图书定位系统的基础功能，其余各项功能都需在生成书籍分布后才能解锁。图 6.1 展示了“书籍分布生成”工作的整个流程。图 6.1 (a)是用户进入程序后看到的第一个界面；选择“生成分布”后，如图 6.1(b)和图 6.1(c)所示，RFID 天线先后在横向轨道和纵向轨道上对待定位区域进行连续扫描；经数据的处理与分析后，最终生成的书籍分布如图 6.1(d)所示。

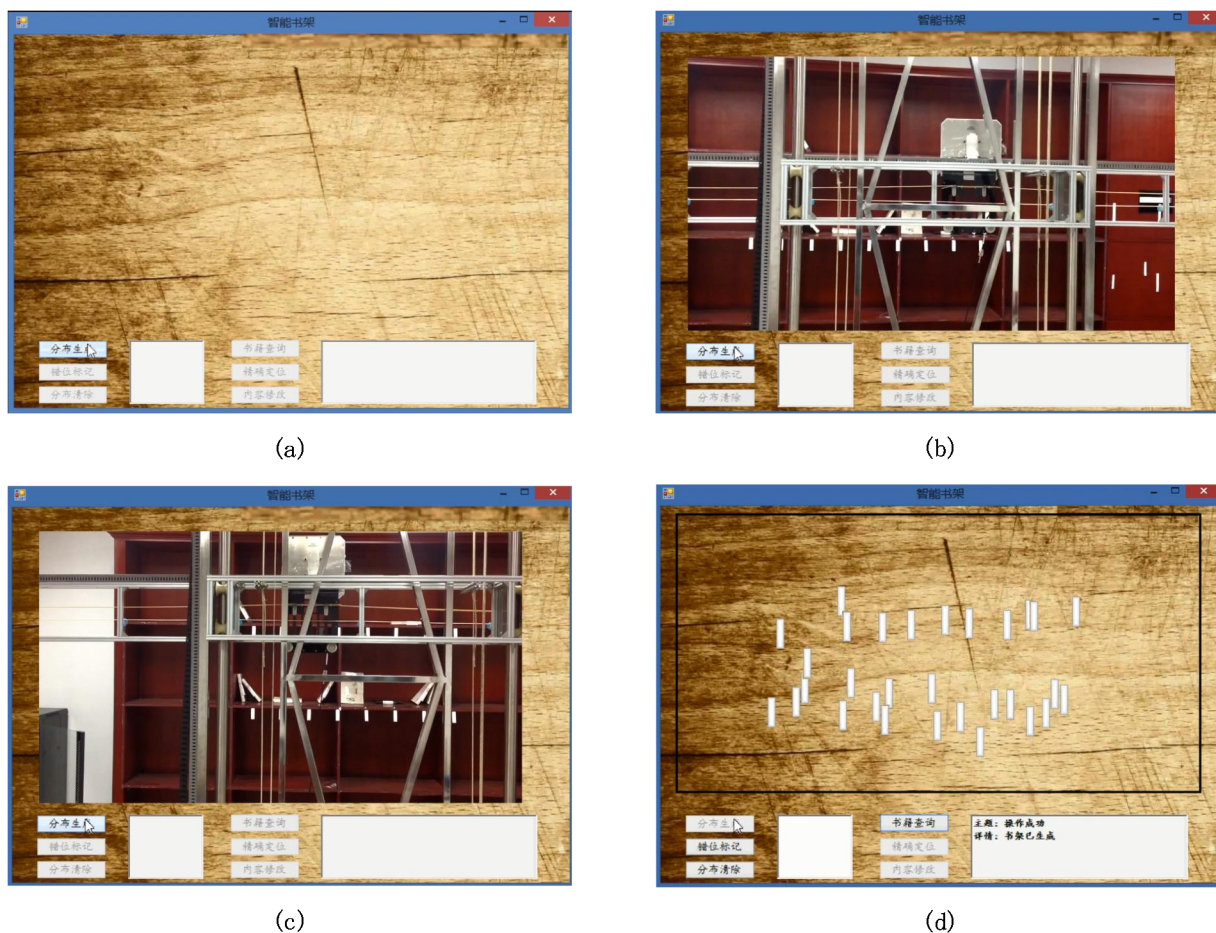


图6.1 书籍分布生成演示图



### 6.1.2 书籍分布浏览

图 6.2 展示了 RFID 图书定位系统的“书籍分布浏览”功能，在生成书籍分布后，点击屏幕上代表书籍的白色按钮，在右下角的对话框中即显示该书籍的编号，坐标，内容等信息。该功能旨在模拟读者在没有明确阅读目的时，在书架上随意翻看书籍这一场景。

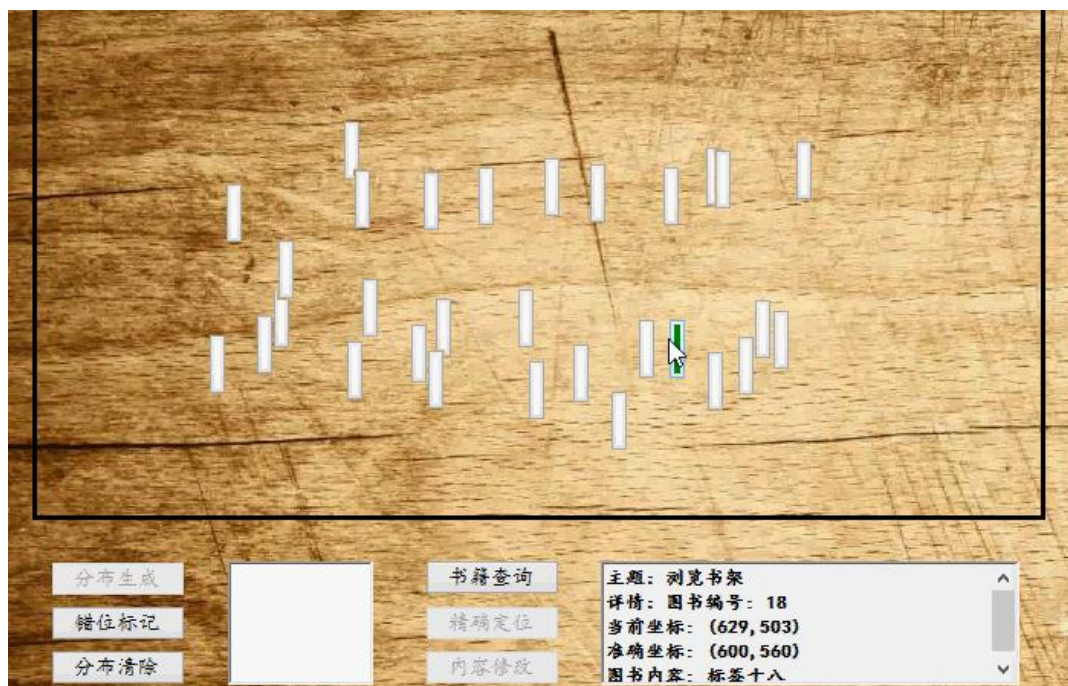


图6.2 书籍分布浏览演示图

### 6.1.3 指定书籍查询

图 6.3 展示了 RFID 图书定位系统的“指定书籍查询”功能，和“书籍分布浏览”功能的目的相反，该功能旨在为有明确阅读目标的读者提供快速便捷的查询服务。在左下角输入框中输入书籍编号，点击书籍查询，若书籍在书架上，则在右下角对话框提示读者所查询图书的当前位置和图书内容；如书籍不在书架上，则会提示读者当前书籍已被借阅。

#### 6.1.4 错位书籍标记

图 6.4 展示了 RFID 图书定位系统的“错位书籍标记”功能，这一功能旨在帮助图书管理员辨别当前书架中可能被错放的书籍，以降低人工排错的成本。在点击错位标记按钮后，屏幕上的三个按钮颜色变红，表示书架上有三本图书的位置可能被读者错误放置。

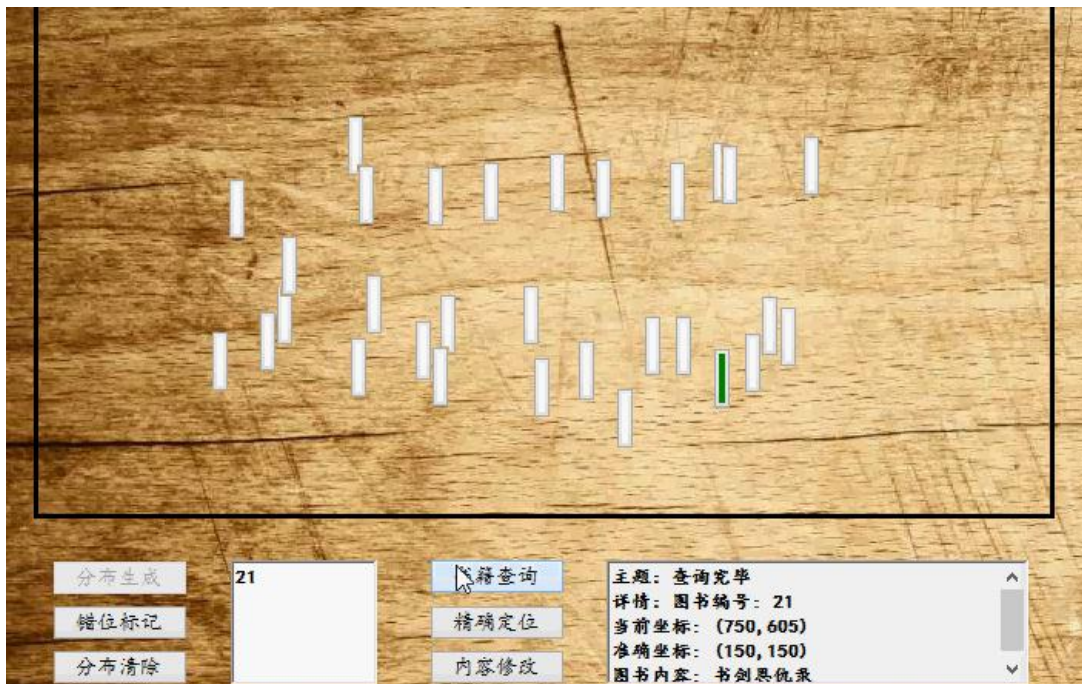


图6.3 指定书籍查询演示图

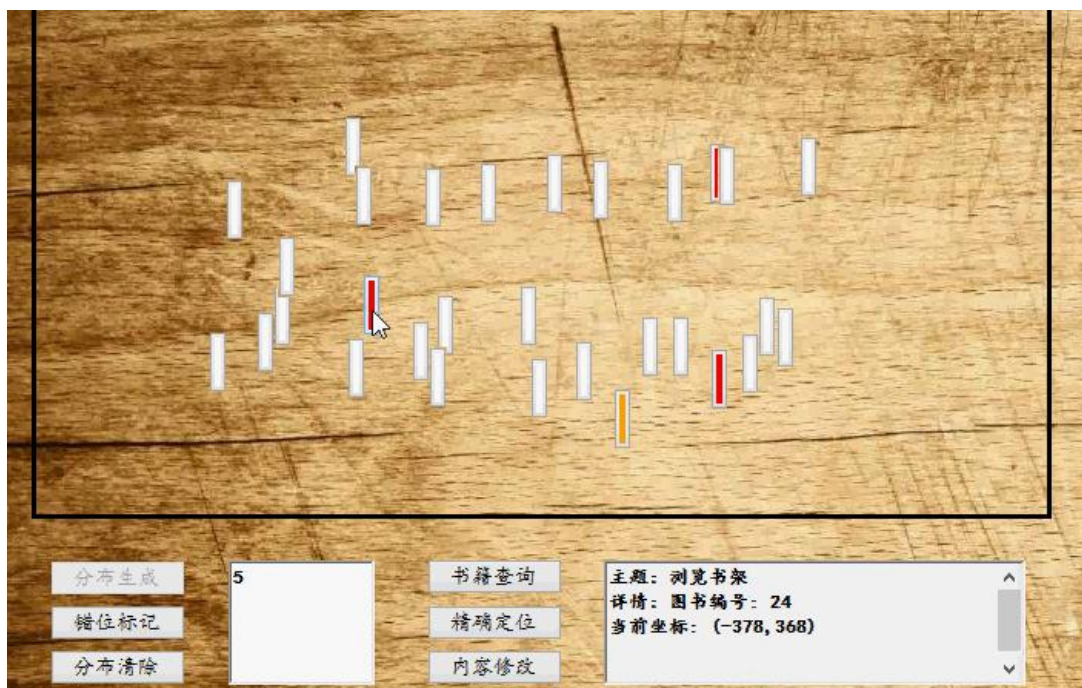


图6.4 错位书籍标记演示图

### 6.1.5 书籍精确定位

图 6.5 展示了 RFID 图书定位系统的“书籍精确定位”功能，这一功能搭载了我们的“基于二维定位组合的收敛定位方案”这一启发式的定位方案，旨在通过若干次二维定位，不断精确待定位目标的预判位置。在实践中，除了满足特定读者或管理员对图书精确位置的需求外，该功能还可以用于辅助错位书籍的判断，通过对被标记错位的书籍进行精确定位，可以筛除部分由于定位误差而被错误标记的书籍，进一步减少人力成本。



图6.5 书籍精确定位演示图

### 6.1.6 书籍内容修改

图 6.6 展示了 RFID 图书定位系统的“书籍内容修改”功能，该功能旨在为图书管理员提供便捷的书籍管理与维护手段。通过“书籍内容修改”功能可以修改的部分包括书籍位置与书籍内容。通过修改书籍位置，可以将一本书籍加入书架，迁出书架，或改变其在书架中所处的具体位置；通过修改书籍内容，可以修改书籍名称并添加备注。在图 6.6 中，一本新书被备注为“射雕英雄传”并加入到书架中。



### 6.1.7 书籍分布删除

图 6.7 展示了 RFID 图书定位系统的“书籍分布删除”功能，在书籍分布删除后，软件和硬件都被重置为初始状态，等待用户再次生成分布或退出程序。

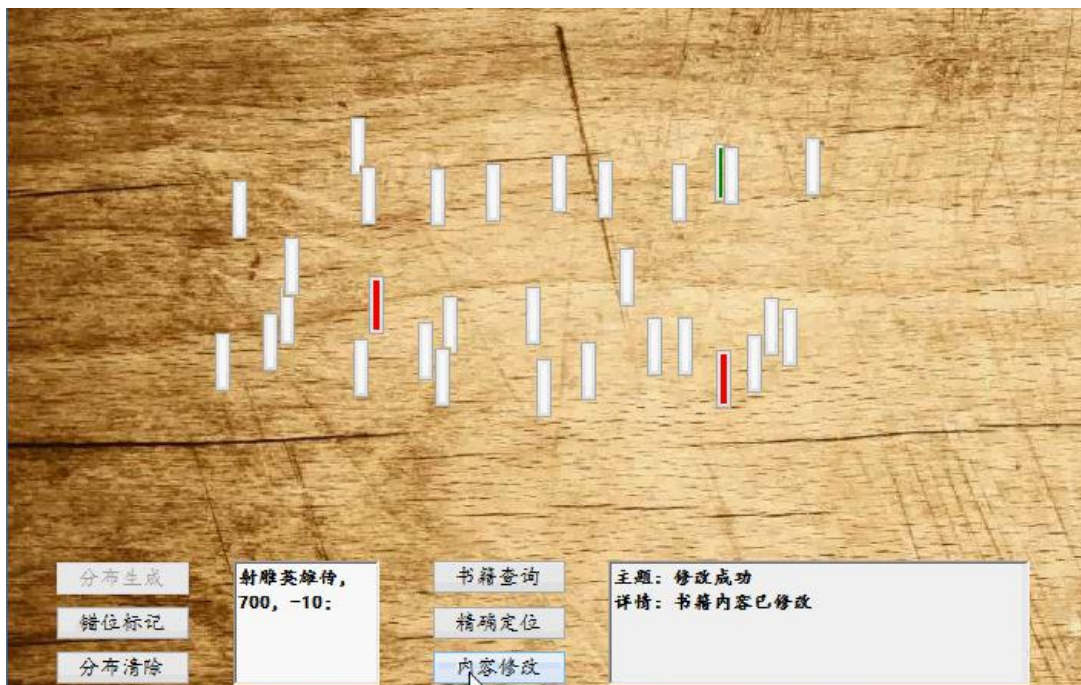


图6.6 书籍内容修改演示图



图6.7 书籍分布删除演示图

## 6.2 定位效果测试

### 6.2.1 实验环境介绍

为了测试 RFID 图书定位系统的定位效果，我们构建了如图 6.8 所示的实验环境，其中 20 个无源 RFID 标签分两排布置，间隔 56cm；每排各有 10 个标签，标签间隔 20cm。实验采用第四章设计的“基于一维定位组合的二维定位方案”，其中参与组合的两个一维定位方案选择第三章详述的“基于相位的一维定位方案”。实验所需的软硬件支持如第五章所述。



图6.8 标签布置图

### 6.2.2 实验结果分析

我们在以上实验环境中执行了 10 次二维定位方案，获得了 20 个标签的 200 次定位数据，我们对每次定位数据计算定位位置与真实位置间的定位误差，对其进行排序，并以 5%为梯度绘制了图 6.9。可以发现 200 次定位数据中 95%的定位误差在 20cm 以下，80%的定位误差在 10cm 以下，40%的定位误差在 5cm 以下，基本可以满足图书馆内书籍管理的需求。

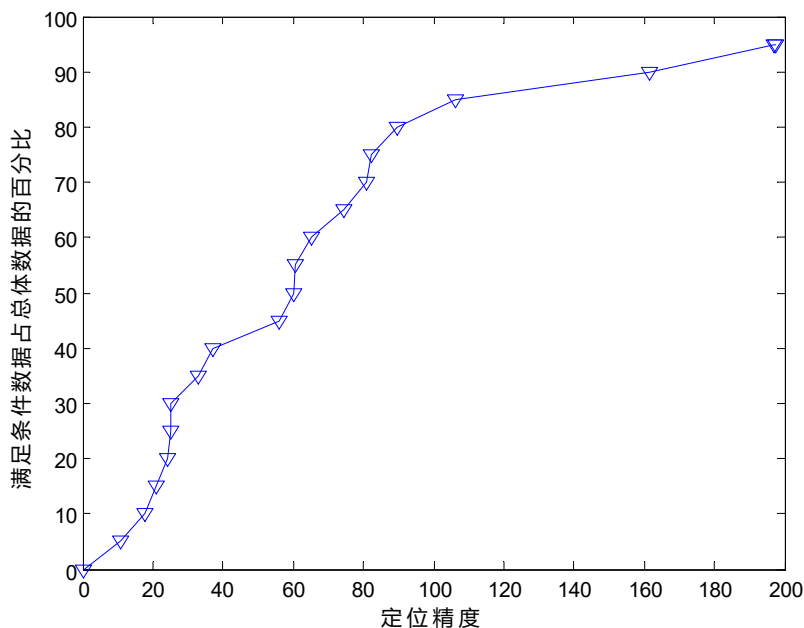


图6.9 二维定位方案定位效果

此外，为了说明“基于二维定位组合的收敛定位方案”这一启发式方案的合理性，如图 6.10 所示，上面一排标签的高度与天线所在高度一致（即标签处在离天线移动轨道最近的位置），而下面一排标签的高度比天线所在高度低了 56cm，两排标签的定位误差如图 6.11 所示，可以看到与天线同一高度这排标签整体的定位效果（由蓝色曲线表示）显著优于另一排标签整体的定位效果（由绿色曲线表示）。这支持了我们启发式方案的核心想法，即随着天线移动轨道不断靠近标签，所受到的环境干扰及相位数据的损失会随之减少，从而可以期望获得更精确的定位结果。



图6.10 标签与天线相对位置图

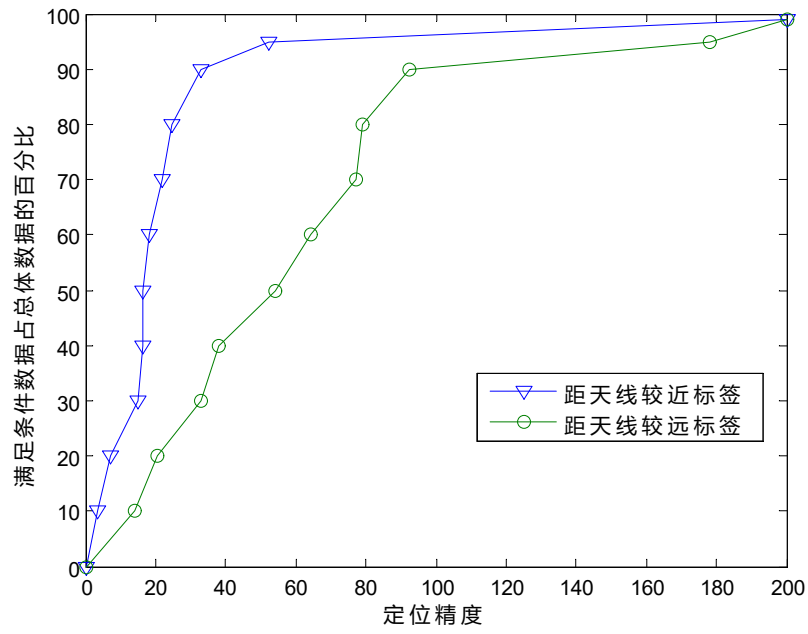


图6.11 标签与天线距离不同对定位的影响

## 第七章 结论

### 7.1 工作总结

论文围绕 RFID 细粒度定位这一问题展开，调研了前人在这方面所做的工作，设计实验测试了应用 RSSI 和相位两个特征进行室内一维定位的效果；并在此基础上提出了“基于一维定位组合的二维定位方案”和“基于二维定位组合的收敛定位方案”两套二维定位方案。同时论文依托图书定位这一具体场景，从软件和硬件两个角度，设计并构建了搭载以上二维定位方案的 RFID 图书定位系统。经实地实验测试，该系统的二维定位误差 80%在 10cm 之内，95%在 20cm 之内。

### 7.2 前景展望

论文中提出的两套二维定位方案最终的定位效果取决于方案中各一维定位方案的定位效果，因此搭载定位效果更好的一维定位方案会有效改善系统的表现。同时论文中搭载天线的移动架有移动速度慢，移动范围受限，价格昂贵，位置固定等缺点，未来可以考虑将天线搭载在真人或机器人上。此外由于误差主要来源于室内复杂环境的干扰，可以减少或者规避环境干扰的解决方案也将改善整个系统的定位效果。

## 参考文献

- [1] T Sanpechuda and L Kovavisaruch. A review of rfid localization: Applications and techniques. In *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2008. ECTI-CON 2008. 5th International Conference on*, volume 2, pages 769–772. IEEE, 2008.
- [2] Jeffrey Hightower, Roy Want, and Gaetano Borriello. Spoton: An indoor 3d location sensing technology based on rf signal strength. *UW CSE 00-02-02, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle, WA*, 1, 2000.
- [3] Lionel M Ni, Yunhao Liu, Yiu Cho Lau, and Abhishek P Patil. Landmarc: indoor location sensing using active rfid. *Wireless networks*, 10(6):701–710, 2004.
- [4] Xi Chen, Lei Xie, Chuyu Wang, and Sanglu Lu. Adaptive accurate indoor-localization using passive rfid. In *Parallel and Distributed Systems (ICPADS), 2013 International Conference on*, pages 249–256. IEEE, 2013.
- [5] Vishal Chandrasekaran, Keshav Narayan, Romil Kumar Vasani, and Vidhya Balasubramanian. Inplace rfid: Indoor path loss translation for object localization in cluttered environments. In *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 2015 IEEE Tenth International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2015.
- [6] Cory Hekimian-Williams, Brandon Grant, Xiuwen Liu, Zhenghao Zhang, and Piyush Kumar. Accurate localization of rfid tags using phase difference. In *RFID, 2010 IEEE International Conference on*, pages 89–96. IEEE, 2010.
- [7] Longfei Shangguan, Zheng Yang, Alex X Liu, Zimu Zhou, and Yunhao Liu. Relative localization of rfid tags using spatial-temporal phase profiling. In *12th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 15)*, pages 251–263, 2015.
- [8] Alanson P Sample, Craig Macomber, Liang-Ting Jiang, and Joshua R Smith. Optical localization of passive uhf rfid tags with integrated leds. In *RFID (RFID), 2012 IEEE International Conference on*, pages 116–123. IEEE, 2012.

- [9] 刘云浩. 物联网导论, volume 201. 科学出版社, 2010.
- [10] Jeremy Landt. The history of rfid. *Potentials, IEEE*, 24(4):8–11, 2005.
- [11] Ron Weinstein. Rfid: a technical overview and its application to the enterprise. *IT professional*, 7(3):27–33, 2005.
- [12] 方震, 赵湛, 郭鹏, 张玉国. 基于 rssi 测距分析. *传感技术学报*, (11):2526–2530, 2008.
- [13] Lei Xie, Qun Li, Xi Chen, Sanglu Lu, and Daoxu Chen. Continuous scanning with mobile reader in rfid systems: an experimental study. In *Proceedings of the fourteenth ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 11–20. ACM, 2013.
- [14] 胡宏泽, 章勇, 贾虹. 一种基于频域的相位差无源标签测距方法. *数据采集与处理*, 30(3):617–626, 2015.

## 致谢

对于这次毕业论文的撰写，首先要感谢的是谢磊老师。谢磊老师在毕业设计的整个过程中给予了我充分的帮助与支持，从选题，到探索性实验，到方案的构思设计，到系统的设计与实现，再到最终的论文撰写，都离不开谢老师耐心的指导和宝贵的建议。在此借论文完成之际，表示由衷的感谢与敬意。

同时感谢分布计算与并行处理实验室的各位师兄师姐提供的资源、经验与帮助，这包括实验室相关工作的论文，实验设备与环境配置的参考文档，组会上提供的思路与想法以及后期毕业设计展示视频的制作等等。也要感谢这篇论文涉及到的各位学者，各位学者文章中的思路与想法所带给我的帮助与启发，是完成本次毕业设计毕业论文的关键所在。

最后要感谢所有在毕业设计过程中给予我帮助、鼓励和支持的老师与同学。由于我的学术水平有限，所写论文难免有不足之处，恳请各位老师和同学批评斧正！