

分类号

U D C

密 级

编 号 10486

武汉大学

硕 士 学 位 论 文

基于智能手机的
室内地磁定位系统研究

研 究 生 姓 名 ： 刘佳兴

学 号 ： 2015202160016

指导教师姓名、职称 ： 江聪世 教授

专 业 名 称 ： 软件工程

研 究 方 向 ： 软件工程,室内定位

二〇一八年四月

Research on the Indoor Localization System Using Magnetic Field Based on Smartphone

A Thesis
Submitted to Wuhan University
Master Degree of Software Engineering

By Jiaxing Liu
Supervised by prof. Congshi Jiang

April, 2018

论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者（签名）：

年 月 日

摘 要

论文针对卫星定位和基站定位在室内环境下无法满足实际需求的问题,考虑到地磁场在室内环境的影响下所呈现出的独特分布结构,以及智能手机普遍嵌入了地磁传感器的现状,提出了一种基于智能手机的室内地磁定位系统,在 Android 手机上实现了室内定位。

本文首先对室内地磁场的性质进行了深入分析,验证了室内地磁场具有着独特的差异性分布和良好的稳定性,适合作为室内定位的位置指纹;同时从室内环境、人体和智能手机等几个方面通过实地测量和控制变量法分析了对地磁场和地磁传感器读数产生影响的各类因素及其影响程度,并对地磁数据做时间序列分析和 ARMA 建模。在此基础上,设计了几种室内定位的位置指纹和匹配算法,提出了水平地磁数据、地磁-方向混合数据和地磁变化率三种位置指纹,并针对性的设计了以 Hausdorff 距离或欧几里德距离为基础的定位匹配算法。通过实验对几种定位方式进行分析对比。另外,设计实现了一套基于 C/S 架构的室内定位系统,系统主要包含定位模块、数据处理模块、通信模块、采集模块和显示模块几个部分,客户端程序部署在 Android 系统上。

关键词: 室内定位;地磁场;地磁匹配;Android;传感器

Abstract

For the fact that satellite positioning and base station positioning can't meet actual needs in indoor environment, this paper proposes a method based on geomagnetic field, because it's has unique distribution under the influence of the indoor environment. And considering that smart phone nowadays usually embedded with the geomagnetic sensor, this system realized indoor positioning on the Android smart phone.

In this paper, the characteristics of the indoor geomagnetic field are firstly analyzed in detail, and result verified that the indoor geomagnetic field has a unique difference distribution and good stability, which means suitable as location fingerprint. At the same time, through field measurement and control variables, the effects of indoor environment, human body and smart phones on geomagnetic fields were analyzed, and geomagnetic data was analyzed with time series and ARMA modeling. Based on this, the location fingerprinting and matching algorithm is designed, such as location based on the horizontal geomagnetic data, geomagnetic data with direction data, and geomagnetic change rate data. Then, targeted design matching algorithms, such as those based on Hausdorff distance or Euclidean distance, are then used to analyze and compare several localization methods. In addition, a complete indoor positioning system based on C/S architecture is designed and implemented. The system includes positioning module, data processing module, communication module, acquisition module and display module. The client program is deployed on Android system.

Keywords : Indoor Positioning; Geomagnetic Field; Geomagnetic Matching; Android; Sensor

目 录

摘 要	I
ABSTRACT.....	II
1 绪论	1
1.1 论文研究背景与意义.....	1
1.2 国内外主要研究现状.....	2
1.2.1 国内主要研究现状.....	3
1.2.2 国外主要研究现状.....	5
1.3 研究内容与论文组织结构.....	5
1.3.1 本文主要研究内容.....	5
1.3.2 论文组织结构.....	6
2 室内定位原理与技术	8
2.1 智能手机传感器研究与分析.....	8
2.1.1 常见的智能手机传感器分析.....	8
2.1.2 地磁数据的获取与存储.....	10
2.2 常见室内定位技术分析对比.....	11
2.2.1 常见的有源信号室内定位技术.....	11
2.2.2 常见的无源信号定位技术.....	14
2.2.3 室内定位匹配方法.....	16
2.3 本章小结.....	18
3 室内地磁场研究	19
3.1 室内地磁场的性质.....	19
3.1.1 室内地磁场的差异性研究.....	19
3.1.2 室内地磁场的稳定性研究.....	20
3.2 室内磁场影响因素的研究.....	22
3.2.1 设备型号的影响.....	22
3.2.2 设备形态的影响.....	24
3.2.3 室内环境的影响.....	25
3.3 时间序列分析及建模.....	29
3.4 本章小结.....	34
4 室内地磁定位方式和匹配算法的设计	35
4.1 数据预处理算法设计.....	35

4.1.1 原始数据的滤波处理.....	35
4.1.2 原始数据的坐标转换方法.....	38
4.1.3 一种位置指纹内插算法.....	40
4.2 位置指纹设计.....	41
4.2.1 二维位置指纹.....	42
4.2.2 地磁和方向混合位置指纹.....	43
4.2.3 地磁变化率位置指纹.....	43
4.3 定位算法设计.....	44
4.3.1 最邻近法.....	44
4.3.2 Hausdorff 距离法	47
4.3.3 投票匹配算法.....	49
4.4 本章小结.....	50
5 室内定位系统的设计与实现	51
5.1 室内定位系统的设计.....	51
5.1.1 系统架构设计.....	51
5.1.2 系统详细设计.....	53
5.2 系统实现.....	56
5.2.1 智能手机端实现.....	56
5.2.2 服务器端实现.....	59
5.3 Web 管理系统的设计	62
5.4 本章小结.....	65
6 室内地磁定位实验	66
6.1 实验设计及准备.....	66
6.2 定位实验及结果分析.....	68
6.3 本章小结.....	71
7 总结与展望	72
7.1 总结.....	72
7.2 未来研究展望.....	72
参考文献	74

1 绪论

1.1 论文研究背景与意义

随着经济的发展,城市建设的不断完善,人们的生活越来越多的集中在室内区域,从办公大楼到公寓,从大型商场到地下停车场,日常生活的很大一部分时间都处于室内区域里,而智能终端随着科技的发展和人们生活水平的提高逐渐得到普及,智能手机逐渐融入了我们的生活中,在电子支付、购物、娱乐、聊天和各类生活服务上为我们提供了便利。由此,基于位置的服务(Location Based Service, LBS)也得以迅速发展并呈现出广阔的前景,基于位置的服务不仅能够简单的提供位置信息用于地图定位和导航,还能和智能手机上的各类应用结合,像基于所处位置为用户推送附近的餐饮、购物和娱乐等生活服务信息,基于位置服务的交友、游戏,或是商家基于位置信息的广告精准推送,这一技术在为智能手机时代的生活带来便利的同时,也蕴含着巨大的商业价值。

室外区域下借助卫星和基站提供的位置服务是精准而有效的,但在室内区域内,受限于建筑物对信号的遮挡、在室内区域内信号的多径效应和信号的非视距传播方式等原因,基于 CELL-ID、卫星等的传统室外定位手段存在着信号差、定位不准确等缺陷,无法满足室内定位在定位精度和响应时间等方面的需求,因此,在生活和工业都越来越离不开位置服务的今天,开发设计出适用于室内区域的技术是定位技术研究领域的一大热点问题。

对于室外区域的定位和导航,用户很多时候关心的是前进的方向、目的地的大致方位等信息,在区域面积和空间原本就更小的室内空间,用户的定位需求往往是对某一具体位置、某一精确地点的要求,这就意味着在室内区域,用户对于定位精度、响应时间等的要求要高于室外区域。为了实现这种高精度的定位,在基于卫星或基站等的定位手段原本在室内区域就受到不小干扰,精度受限的前提下,利用在室内区域内有差别性分布的信号源如 WiFi、蓝牙和 RFID 等实现小范围内的位置匹配是一种更为直接有效的方式。这些技术都是利用各自射频信号在室内传播时,信号的某些信息如信号强度在不同位置上呈现的差异,通过待定位设备和区域内的信号源的交互进行匹配和定位得到结果。但要使得信号源覆盖整个室内范围需要事先布置信号发射装置,对于基础设施的要求高,这一点并不利于技术在实际应用上的推广。其中的 WiFi 热点(Access Point, AP)尽管已经广泛

的布置于室内建筑特别是商场和住房等建筑内，但其信号的精度受信号衰减、人体阻挡和多径效应等的影响，单独作为位置指纹也存在着一定的缺陷。

考虑到地球周围空间分布着天然的地球磁场，而在室内区域内，受钢筋混凝土墙体和建筑物结构等因素对磁场带来的干扰，室内区域内的地磁场呈现出独特的分布特点，不同位置的磁场有所不同，这使得利用每个位置独特的地磁信息作为位置指纹进行定位成为了可能。再加上随着智能手机的逐渐普及和智能手机普遍的嵌入了用于收集各类信息的传感器这一现状，利用智能手机上装载的地磁传感器能方便有效的收集室内的地磁信息，这使得在无需另外布置设备的情况下进行室内定位成为了可能。由此，本文通过对智能手机和室内地磁场的分析设计了一种有效的室内地磁定位方法。

基于位置的服务已经广泛的应用在出行、购物和人际交往中，在这个智能手机已经得到普及，而运行于智能手机上的各类应用覆盖面越来越广、内容越来越丰富的时代，利用地磁实现室内定位并设计一种室内定位系统有着广阔的应用价值和前景，具体体现在：

(1) 基于地磁的定位系统提出了结合包括地磁信号在内的数据，在无需另外架设设备的前提下实现了室内定位功能，为室内定位问题提供了一种全新的解决方案，解决了传统的定位方式在室内区域精度不高、反应速度慢的缺点，用户提供室内的地图和定位导航服务，方便使用者在商场、停车场、办公楼等场所的出行和活动，具有着巨大的实用性，为人们的生活增添了方便；

(2) 定位系统同时也具备了巨大的商业价值。室内地磁定位系统能在提供服务的同时帮助商家进行精准的推广，如在商场或购物中心根据用户所处的区域精准的推荐邻近的餐饮购物场所。此外，还能运用于智能手机上的各类社交应用，无论是基于位置的交友和游戏或是和手机联系人实时的共享位置信息。

(3) 尽管现今有不少的室内定位方法和解决方案，本文提出的全新的定位方法为解决室内定位的难题提供了一种切实有效的方案，设计的地磁匹配算法和位置指纹也提供了切实有效的思路。此外，对室内区域内的地磁场性质和智能手机传感器读数的研究分析，也为今后的研究者提供了理论基础。

1.2 国内外主要研究现状

利用地磁场进行定位和导航的研究并非最近几年兴起的，最早的研究主要集中在利用全球磁场进行匹配制导及地磁匹配导航的仿真研究上，地磁场全天候不间断和全地域覆盖的特点使得地磁导航及定位的运用更多的集中在军事上，例如

应用在导弹和潜艇的制导上^{[1][2]}。科技的发展和智能手机的逐渐普及，让地磁信号的感知和捕捉不再局限于通过专门的设备来实现，智能手机搭载的地磁传感器就能够实现地磁数据的采集。近几年，随着室内定位问题，特别是利用智能手机的室内定位问题越来越被重视，基于地磁的室内定位研究也成为了室内定位问题的热点之一。基于智能手机的室内地磁定位不仅局限于使用地磁信号作为一种单独的因子进行定位，很多的研究都以地磁信号为基础，利用智能手机上的多种传感器综合多种信号源进行定位，例如利用惯导辅助地磁进行定位、结合摄像头捕捉的图像和地磁信息进行定位等。在室内定位这一问题的研究上，实现手段和方式趋向于多样化和综合化。

1.2.1国内主要研究现状

国内学者在这一领域的研究从很早时期就开始，取得了成果丰富，在磁场性质、匹配手段、定位方式等多个方面都有着深入的研究。

在对地磁场本身的性质和特性的研究探索上。许多学者在很早以前就开始了区域或全球范围的地磁场的研究，如各类地磁参考场的研究和更新工作，安振昌详细的进行了介绍并分析了解决地磁场模型会产生边界效应的方法^[3]，康国发等则研究分析了从 1690 到 2000 这些年来地表、地核以外区域内地磁场总能量的变化规律^[4]。而在室内区域地磁场的研究上，袁杨辉在研究了地磁场在较长一段时间或是短期这两种情况下的变化后，针对长期变化提出一种数据修正方法，针对短期变化建立了一种日变模型^[5]。

除了针对地磁场性质的研究，在室内地磁定位的指纹构建上，也有不少学者提出了数据采集和指纹图构建的方法，如张聪聪等人提出了一种利用室内地磁场的空间波动来实现即时定位和地图构建的方法^[6]，并针对机器人定位问题改进了粒子滤波算法，并在地磁图的更新上使用了克里金法；而黄鹤等人以 Arduino Mega 2560 板为基础设计了一套采集地磁数据的移动平台，采用了克里金插值算法输出 2cm 间隔大小的栅格地磁图作为定位基准图^{[7][8]}。以上研究集中在对克里金法上，除此外，在室内地磁基准图的构建上，蔡成林等人分析对比了 4 种室内地磁基准图的构建算法^[9]，结果表明协同克里金差值算法精度高，而使用标准高斯回归过程的构建用时最短。

在室内地磁定位的另一个关键技术，地磁定位匹配算法的研究上，有很多研究者基于地磁的性质提出或总结了匹配方法，如邓翠婷等人总结了常见的几类用于导航的匹配算法并做出分析对比^[10]；而谢仕民等人研究了以平均绝对差(Mean Absolute Deviation, MAD)、平均平方差(Mean Square Deviation, MSD)、归一化

积相关(Normalized Product Correlation, NProd)和 Hausdorff 距离等几种原理的匹配方法,并在 MATLAB 上通过仿真实验进行对比和比较,最终结果显示平均绝对差和平均平方差的方法要优于其他方法^[11];姜浩等人也基于 Hausdorff 距离提出了一种用于地磁匹配的算法^[12]。以上的这些研究大多集中在匹配算法的设计和仿真研究上,还有一些研究集中在地磁导航这一问题的研究^{[13]~ [16]},在实际应用方面,不少学者研究和设计了基于智能手机的定位方法,如徐亮^[17]和谢宏伟^[18]都以智能手机为设备提出了地磁定位系统,后者还改进粒子滤波算法使其可靠性得到增强。

地磁定位是室内定位技术中的一种,在室内定位这一大领域,包括陈锐志在内的许多学者都针对室内定位的方法做出综述性的研究,分析室内定位技术的难点并对未来的发展提出了展望^{[19]~ [21]}。也有不少学者在利用地磁信息以外的室内定位方法的研究上有所成就,考虑到智能手机在内的动设备可以采集的各种信号源提出了不同的定位方法,如张明华以 WiFi 为位置指纹,提出了一套系统原型来完成室内定位^[22];陈国平以蓝牙作为位置指纹,通过实地的实验验证定位精度接近 0.2m^[23];李魏峰则以 RFID 为基础提出一种室内定位系统通用三层架构及系统的评价指标体系^[24];马伟则利用无线传感器实现定位,提出了网络节点设计并实现了室内定位^[25];此外,有学者利用红外线和超声波信号达到了同样的效果^[26]。

除了单独利用某种定位技术进行室内定位的研究,融合多种定位方式的研究逐渐成为热点,通过结合包括地磁信息在内的多种信号源,充分利用不同信号源本身的特点,能有效的提高定位精度和定位的准确度。其中的很多研究集中在结合地磁和航位推算进行室内的定位和导航上,如宋镖等人使用惯导技术作为地磁定位的辅助手段,通过组合定位方式显著提高了匹配效率^[27];郭伟龙则使用磁场特征结合曼哈顿距离的方式来估计粒子权重,通过加速度计和电子罗盘检测转向从而实现定位,并提出粒子滤波方法并改进了重采样方式^[28];王超则是提出一种人体航迹推算方法,借助陀螺仪检测方向变化并结合重力加速度计进行航向判定^[29];此外,喻佳宝也在惯导和地磁混合的定位技术上提出一种可靠性增强的卡尔曼滤波^[30]。

结合地磁和其他定位方式的混合定位方法,除了磁场和步行者航位推算的结合,还有通过将 RFID 技术和地磁定位联合的定位方法^[31],或者如李艳华^[32]和李宗骅^[33]等人提出的使用信号接收强度(Received Signal Strength Indication, RSSI)和地磁场的融合定位法。

国内有不少针对采集地磁信号的设备的研宄,如电子罗盘的读数和校准,李艳^[34]和张爱军^[35]等人在电子罗盘的工作原理、磁航向角误差的计算和提高精度的措施等方面深入研宄分析。

1.2.2国外主要研宄现状

近年来国外的有不少完整的室内地磁定位解决方案。

有很多的研究者提出了基于粒子滤波的定位方法, Jianga Shang 等提出了 APFiLoc 定位系统^[36],综合了智能手机上的包括地磁传感器在内的多种传感器信息,并使用增强的粒子滤波器融合数据生成位置指纹; Mengyun Liu 等在此基础上还运用深度学习的场景识别处理智能手机摄像头捕捉的图像^[37];如 Shu 等提出结合 WiFi 信号和地磁信号的 Magicol 室内定位和跟踪系统^[38],通过将连续的磁场向量化来描述定位过程中的粒子分布,并通过融合 Wi-Fi 信号来提高定位精度;而 Mei Zhang 等则借助 WiFi 信号缩小初始定位范围,使用地磁场和改进的粒子滤波算法实现室内位置追踪^[39]。

此外,有不少研究都集中在充分利用智能手机自身实现室内定位,一种常见的方法是结合步行者航位推算来实现,如 Subbu 等提出结合地磁和行人航位推算 (Pedestrian Dead Reckoning, PDR) 方法的 LocateMe 系统^[40],在地磁信号的分类特征的基础上提出一种室内定位解决方案,通过动态时间规划的方法来解决用户行走速度的变化; Xudong Huang 等人提出了一种综合使用信道状态信息和地磁场作为位置指纹的定位算法,通过改进视距识别算法来缩小匹配的范围^[41];除了结合地磁场, Yan Zhou 等人则使用图像的识别来辅助 PDR 实现混合定位^[42];此外, Qiuyun Chen 等提出了一种基于指纹无源众包和无监督聚类的新型室内分区定位方案^[43]。

另外,成立于芬兰的 IndoorAtlas 公司提出的室内地磁定位系统领域在商业化上取得了不错成绩^[44], IndoorAtlas 将其定位服务发布给用户和开发者,为 Baidu 等公司提供服务。

1.3 研宄内容与论文组织结构

1.3.1本文主要研宄内容

本文的工作主要集中在:

- (1) 对室内地磁场和地磁场用作位置指纹的研宄;

使用地磁信号作为位置指纹无需架设额外的设备,但在室内地磁定位的实现上,需要综合考虑地磁场和采集设备的特点和性质。现今的智能设备普遍嵌入的是基于磁通门的三轴地磁传感器,传感器接收到的是以智能手机本身为基准的手机坐标系上的数据,这意味着传感器采集到的数值是和智能手机的姿态密切相关的,设备朝向的变化和自身的翻转等姿态的变化会使得地磁传感器的读数也发生变化,为了准确的进行室内地磁定位,需要尽量减小手机姿态的影响。

除此以外,室内区域内的地磁场受环境变化的影响,本文研究了有哪些因素会对室内的地磁场造成影响,干扰的程度如何,并针对不同类型的影响因素,提出不同的解决方法,例如通过使用地磁变化率的方式减少设备给地磁数据带来的差异。同时,对于一天内的地磁数据序列做时间序列分析,并使用 ARMA 模型对数据进行建模。

(2) 位置指纹的构建和匹配算法的设计;

室内定位依靠的是信号源在不同位置上分布的差异性,室内区域的地磁场也是利用局部室内区域内呈现出的独特分布进行定位。除此以外,智能手机上丰富的传感器能够采集多种信息,因此,研究如何利用智能手机采集到的除地磁信号外的其他信息辅助地磁信号实现更好的定位效果。

地磁定位的实质是对地磁信号的模式匹配,通过实时采集的数据和预先采集的数据集之间的匹配计算,从数据集中选出和待定位数据之间拥有的最高匹配度的一组作为定位结果。本文在定位方式的设计上,如提出一种以一段时间内的地磁数据变化率作为位置指纹的定位方式;在匹配算法的设计上,结合位置指纹设计了不同种类的匹配算法,如基于 Hausdorff 距离和欧式距离等设计了适用于不同定位方法的匹配算法。

(3) 定位系统的设计和实现;

在研究了进行室内地磁定位的理论方法后,设计并实现了完整的室内定位系统来进行实验,系统采用 C/S 架构,包括 Android 上的客户端和服务端,整个系统包括定位模块、数据处理模块、通信模块、采集模块和显示模块几个部分。还根据实际需求提出了一套基于 Web 的管理系统,用于对整个系统中的用户、数据的管理和维护。室内地磁定位系统能够帮助进行对理论设计的实验,也能够作为一套实际应用的解决方案。

1.3.2 论文组织结构

论文章节安排如下。

第一章绪论，主要介绍了室内定位特别是室内地磁定位的背景和研究情况，同时简要介绍了本文的主要研究内容；

第二章室内定位技术原理与技术，介绍了常见的几种室内定位技术，并研究分析了现今的智能手机上搭载的传感器和传感器信息的获取；

第三章室内地磁场研究，分析了室内地磁场的性质和各类影响因素对磁场的影响，并对连续采集的地磁数据做时间序列分析和 ARMA 建模；

第四章定位方式和匹配算法设计，除了提出了几种位置指纹的设计，还包括对原始数据的预处理算法和定位匹配算法的设计，其中对原始数据的预处理包括滤波算法和坐标转换算法；而匹配算法则根据不同的位置指纹针对性的设计；

第五章室内定位系统的设计与实现，主要是本文提出的基于智能手机的室内地磁定位系统的介绍，包括系统的设计、定位系统的界面和相关功能的实现流程等。

第六章室内地磁定位实验，介绍了实验的设计，通过实地的实验，验证了本文提出的系统和方法是有效而可行的，并比较了几种方法的定位结果；

第七章对本文的内容做出总结，并对未来室内定位研究发展的展望。

论文的组织结构如图 1-1 所示。

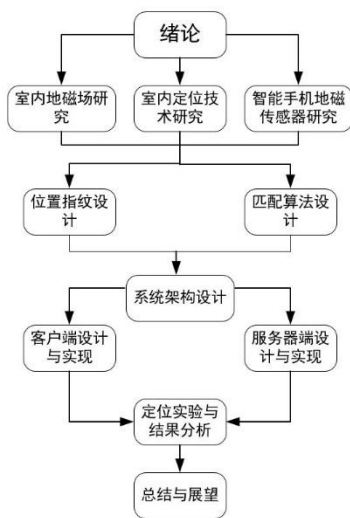


图 1-1 论文组织结构图

2 室内定位原理与技术

本章从智能手机上嵌入的几种常见的传感器开始,就几种常用于室内定位的技术和其定位原理进行介绍。并详细说明了如何获取 Android 手机上的传感器数据。

2.1 智能手机传感器研究与分析

2.1.1 常见的智能手机传感器分析

在介绍常见的室内定位技术前,先分析介绍智能手机上搭载的一些能够用于室内定位的传感器。

Android 官方文档中将系统内的传感器分为了三种:运动传感器、环境传感器和位置传感器。其中运动传感器能够检测手机的运动和姿态的变化,主要包括加速度传感器、重力传感器和陀螺仪等;环境传感器用于对各类环境因素的感知,有气压计,光线传感器和温度计等;而位置传感器能够收集以设备为基准的位置信息,如方向传感器和磁力计。下面是一些常见的,特别是室内定位的应用上常见的几种传感器。

(1) 加速度传感器

加速度传感器利用的是其上的电介质在某个方向上会由于受力变形而极化,通过这点进行加速度的感知,内部主要是一块重物配合压电片^[45],加速度传感器常用于计步和判断手机摆放位置,其功耗低,但精度也不高。图 2-1 为一种加速度传感器的结构图。

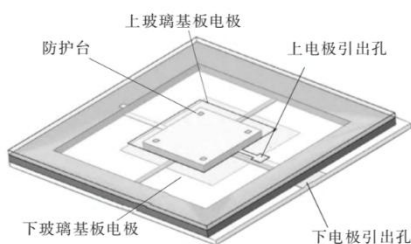


图 2-1 加速度传感器结构图

(2) 陀螺仪

陀螺仪主要根据角动量守恒实现^[46],即陀螺维持着高速旋转时需要外部因素的干扰才能对方向产生影响,智能手机上的陀螺仪由此来确定手机方向的变化。

陀螺仪能检测智能手机的平移、转动和移动，常应用于摇一摇(手机晃动)、视角控制和惯性导航。图 2-2 是通常采用的陀螺阵列方案。

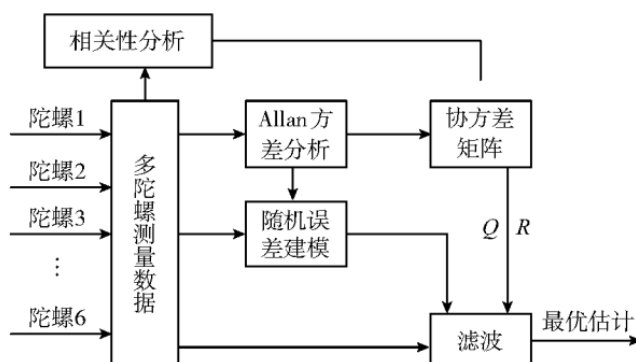


图 2-2 陀螺仪的陀螺阵列方案图

(3) 磁力计

磁力计即地磁传感器，通过将外界因素引起的元件磁性能变化转换成电信号的方式测量磁场强度的传感器^[14]。地磁传感器被 Android 划分为位置传感器的一种，磁力计的信息能够和其他传感器获取的航向信息和部分姿态信息结合，得到完整的设备姿态信息。现今的智能手机大多搭载着三轴地磁传感器，传感器采集到的是磁感应强度的矢量信息，具有大小和方向特征，以比特斯拉(T)更小的单位纳特(nT)表示。下图是一种三轴磁力计的设计。



图 2-3 一种三轴磁力计设计

由这一设计图也可以看到，智能手机采集搭载的磁力计采集到的三个坐标轴的数据是以磁力本身，或是说手机坐标系来表示的，所以在同一个位置，手机朝向、倾角等形态的变化会改变地磁传感器的读数。磁力计采集的数据不仅环境的影响，还与智能手机的型号相关。

除了这三种传感器外，对智能手机上的其他一些传感器做简单的介绍。

重力传感器的实现原理类似于加速度传感器，重力传感器的内部通过压电片和对弹性感应灵敏的元件，通过电触点的感应实现将重力发生的改变转化成电信号。常被用来感知智能手机横竖屏的切换动作，在一些应用如游戏中也会利用重力传感器实现一些交互。

光线传感器内有投光器和受光器，前者将环境光聚焦传输给后者，受光器通过感应器将光的信息转为电信号的变化，由此作为环境光线强度。光线传感器得到的光线强度，常运用在对手机屏幕亮度的条件，不仅能够自动调节适宜的屏幕亮度，也能够节省能耗。

除了智能手机上的传感器设备，智能手机上配备的摄像头能够用来捕捉场景的画面信息，智能手机中的射频芯片等实现了通信技术和射频技术，加上无线适配器等硬件和技术条件，支持包括 WiFi 和蓝牙在内的一系列通信技术，这些技术也能够用于室内定位。

2.1.2 地磁数据的获取与存储

Android 系统的传感器模块如下图所示：

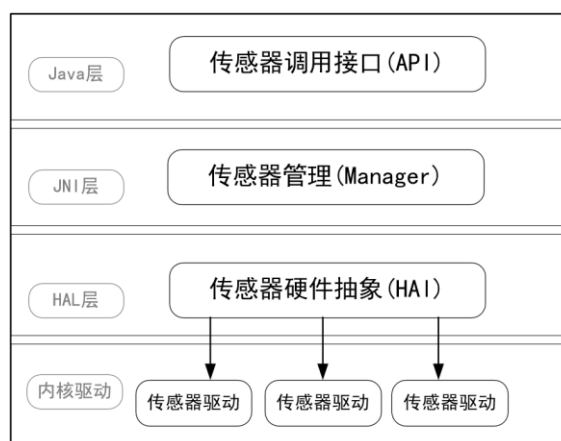


图 2-4 Android 传感器模块架构图

其中内核空间包含各类传感器设备的驱动程序，和具体的硬件相联系；而硬件抽象层 (Hardware Abstraction Layer, HAL) 负责将各类传感器驱动统一组织管理，隐藏各种驱动的细节；JNI (Java Native Interface) 层中包含了对传感器的统一管理，主要包括 `android_hardware_SensorManager.cpp`、`com_android_server_SensorService.cpp` 等文件；而传感器调用接口为用户提供各个相关服务的调用，能够获取传感器相关的服务，其实现依赖 `SensorManager.java`、`SensorListener.java` 和 `SensorEvent.java` 等文件。

对于智能手机传感器信息的读取就依靠对相关接口的调用来实现。

首先是获取管理器对象 `SensorManager`，通过它来取得各个传感器的服务、绑定系统的相关服务，通过下面的语句来实现：

`(SensorManager) getSystemService (SENSOR_SERVICE)。`

接着由管理器对象的 `getDefaultSensor()` 方法，通过传感器的类型名获取具体的传感器对象，常见的几种传感器的类型名称有：地磁传感器用

TYPE_MAGNETIC_FIELD 表示, 方向传感器用 TYPE_ORIENTATION 表示, 加速度传感器用 TYPE_ACCELEROMETER 表示;

然后对与事件 SensorEvent 添加监听器 SensorEventListener(), 其中的方法 onSensorChanged() 指的是对应的值变化时会执行的方法, 在其中通过传感器的类型能够获取不同传感器的数值, 通过 onSensorChanged() 能够在每次需要数据时得到实时的数据信息, 实现了对传感器信息的读取。

接下来是对传感器信息记录的实现, 在本地记录数据首先需要在程序的配置文件中添加程序获取访问文件的权限, 通过 uses-permission android:name="android.permission.WRITE_EXTERNAL_STORAGE" 实现。

拥有了访问和修改文件的权限后, 通过 File() 方法获取文件, 使用 InputStream 流和 OutputStream 流来读取或者写入数据到文件。

如果想要在 Android 程序上直接的写入或者读取 Excel 文件, 需要导入 jxl.jar 这一外部扩展包, 通过 getWorkbook() 方法读入文件, 利用 getSheet() 方法能得到文件的具体工作簿, 单元格使用 Cell 来表示, 能够以其行列作为坐标操作。

以上的一系列步骤能够从智能手机上的传感器信息获取并存储信息。

2. 2常见室内定位技术分析及对比

将室内常见的定位方法按所使用的信号源进行分类, 主要包括: 射频信号、内置传感器和 GNSS^[19]。其中, 射频信号主要包括 WiFi、蓝牙、蜂窝无线信号和近场通信技术 (near field communication, NFC); 而基于传感器的技术有 PDR、地磁定位、视觉定位、红外线定位、LED 可见光定位和超声波定位。本文将定位技术按是否需要事先安装信号源, 分为有源和无源两种类型进行介绍。

2. 2. 1常见的有源信号室内定位技术

有源通常是指由人为布置的发射装置所发出的信号, 如无线接入点。这种定位方式主要是以信号强度或者是达到时间作为位置指纹。使用信号强度作为位置指纹是由于信号传播途中会出现衰减, 从信号源传播到不同的位置, 由于传播距离和传播途径中的影响因素的不同, 在每个位置处接收到的信号强度都会不同于其他位置, 这种差异性可以被利用来进行位置匹配; 而到达时间主要是利用从信号源传播到不同位置所用的时间或是不同信号源到某一个位置的传播时间差来推算位置。常见技术主要有:

(1) WiFi 定位技术

WiFi 是一种利用射频在无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)和设备之间创建连接通道并实现通信的标准。WiFi 技术通常占用的射频频段是 2.4G 特高频无线电波(Ultra High Frequency, UHF)或 5G 超高频(Super High Frequency, SHF) ISM 频段, 对于基于 IEEE 802.11 标准的产品, 使用 WiFi 技术能够有效提高无线产品之间的联系和交互。室内无线局域网利用接入点接入点实现了室内区域无线网络的覆盖和通信任务, 能够将众多的移动终端间建立连接并最终聚合到有线网络。在无线局域网的中的每一个接入点都会持续的向其他接入点发出通信信息, 其中包含着接入点自身的信息如服务集标识码(Service Set Identifier, SSID), 这种技术正是利用移动设备接收的来自不同接入点的信息间的差别来实现位置估计, 主要有信号强度、信噪比等信息^[22]。

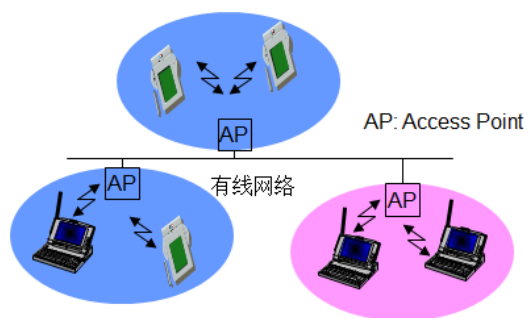


图 2-3 WLAN 基础架构的示意图

WiFi 信号包含多种的信息, 但现今基于 WiFi 的室内定位技术更多的还是集中在以信号的强度作为位置指纹的研究上, 如 ekahau 公司利用 WiFi 信号提出了一套可用于室内定位即导航的 Ekahau Site Survey 系统, 还有一些研究者^[41]利用信道状态信息(Channel State Information, CSI)实现了室内定位且精度得到了有效的提高。但这种技术的发展受限于 WiFi 信号本身易受包括人体在内的众多因素影响, 为了保证数据的有效性从而准确定位, 需要在对数据的维护和更新上耗费更多人力物力。

(2) 蓝牙定位技术

蓝牙(Bluetooth)和 WiFi 相类似的一种技术, 不过使用的是 2.4 到 2.485GHz 的 ISM 波段的 UHF 无线电波, 是一种短距离的数据交换标准。蓝牙实现了在较小的距离内的设备间或是和局域网间的数据交换, 被 IEEE 列为 IEEE 802.15.1 技术标准。苹果(Apple)基于此推出的 iBeacon 技术^[47], 能够在范围内不断广播自身的识别编号, 而智能手机能够通过接收这一数据完成包括定位在内的一系列功能。iBeacon 技术主要根据最邻近的信号发射装置来估计待定位点的位置, 苹果公司也为开发者开放了利用 iBeacon 实现定位服务的专题页面。蓝牙定位技术通

过接收不同设备发出的信号,将信号强度此作为位置指纹建立位置指纹图实现室内定位,有学者利用蓝牙提出的方法达到了 0.2m 的定位精度^[23]。蓝牙设备具有着功耗低、体积小的特点,智能手机也基本都内置了相关技术,这为其推广和使用创造力有利的条件,但蓝牙信号也和 WiFi 信号一样,受人体等因素的干扰,且作为一种短距离通信技术,要想在室内区域实现高精度的定位,设备布置需要较高的投入。

(3) 蜂窝基站定位技术

蜂窝基站定位技术主要是利用智能手机得到来自不同基站的信号的到达时刻(Time of Arrival, TOA)或到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA),根据测量结果结合基站的实际坐标,运算得到智能手机所在位置。现今的蜂窝基站定位技术已经比较成熟,但定位的精度在几十米以上,这远无法满足在室内区域进行定位的精度需求。随着 5G 通信技术的不断发展完善,若 5G 能够得到普遍覆盖,利用 5G 中的宽带带通信号和采用的多天线 MIMO 技术,通过高精度定位和时间同步的方法^[48]能有效的提高定位精度。

(4) 红外线及可见光定位技术

红外线是波长在 1mm 到 760nm,波长大于微波但小于可见光,只要物质温度不低于绝对零度(-273.15℃)都会有红外线的散发。近年来,不少智能手机在摄像头中集成了红外线摄影机以便进行生物识别,这使通过智能手机进行红外线定位成为了可能。Roy Want 等人利用红外线设计了一种 ActiveBadge 系统,通过红外线发射器和接收端,后者接收到前者发出的信号后,先进行解调,后由服务器进行定位,而配备有红外线摄影机的智能手机能够作为红外线接收端^[49]。

可见光定位技术的原理与利用红外线的技术相似,由智能手机上的光敏传感器接收如 LED 灯具的光信号来进行定位。此外,还有研究者利用环境光的时频特性,以此为位置指纹进行匹配定位^[50]。由于大多的室内区域都装有 LED 灯,不再需要额外铺设,也可以被视为一种无源信号。

不论是红外线或是 LED 光,其发射设备都易于安装和维护,但它们也都受限于其传播方式,受人体及室内结构遮挡的影响较大。

(5) 超声波定位技术

超声波的频率高于声波,在 20000 赫兹以上,不仅具有较好的指向性,而且能够穿过很多物质,使得声能集中获取。而超声波中的部分信号能够被麦克风所接收,因此能够被用于室内定位。定位主要是通过安装多个扬声器发送信号,计算各个扬声器到达待定位设备处的时间的间隔来推算其位置。此外,还有方法利用声波发射装置测出从发出信号到接收回波间的时间差,由波速推导出与待测物

品的距离，类似蝙蝠的回声定位机制，但由于现今的智能手机暂未嵌入发射超声波的装置，技术的推广被限制。这种技术实现简单，简单的布置即可获得高精度，但技术受限于需要视距条件下实现。

2.2.2常见的无源信号定位技术

无源信号是指原本就存在与室内区域的、非人为架设的信号信息，比如地磁场、视觉场景等。智能手机上安装的多种的传感器能够捕捉到这些信息并加以利用，从而实现定位，如利用地磁传感器收集磁场的信息，利用摄像头捕捉场景的信息，利用方向传感器感知设备的移动信息等。

（1）地磁定位

地球周围空间分布着天然的地球磁场，在室内区域内，受磁性物质的影响，如建筑物的钢筋混凝土墙体和装潢等，局部室内区域的地磁场呈现出独特的分布，借助智能手机上装载的多种传感器和陀螺仪预先采集信号信息，收集在不同位置上独特的磁场分布讯息实现室内定位。

与大多数的场景分析法一样，地磁定位的方法也由离线训练和在线匹配过程组成。离线训练通过采集数据生成位置指纹，为此需要在指定区域内采集地磁信号，且记录下每次采集时所处的位置。在离线训练阶段得到了位置指纹这一基础上，在线定位这一过程就是进行定位。为此，设计合适的匹配算法，当移动设备采集到当前所处位置的地磁信号等信息并返回后，通过与离线阶段的数据间的计算，得到最为匹配的点作为定位结果返回。

目前关于室内地磁定位的研究有不少，相较于其他位置指纹方式，地磁场有着全天候、全时段和全覆盖的特点，能够很方便的获取，且磁场信号有着良好的识别度，定位实现简单，有利于进行室内定位。

（2）航位推算法

行人航位推算技术利用上一次的位置信息预估经过一段变化后位置的定位导航方法。以移动前的位置信息为基础，通过对移动距离、方向等信息的测量和预估，计算出变化后的位置估计。这种技术最早应用于在大海中航行时推算船只只在海图中的位置，通过船只上的航向传感器和速度传感器得到船只当前的航向和航速。在了解船只在上一个时刻在海图中所处的位置这一前提下，可以根据由船只转动的角度和行驶的距离计算出当前这个时刻船只的位置。这一技术如今以被广泛的应用于室内定位上，微机电系统的更新和发展使得原本较为庞大的各类传感器已经能够嵌入到体积很小的智能手机上，利用加速度计、陀螺仪等智能手机上嵌入的仪器，能够测量出智能手机的移动方向和移动的步数，这就信息能够用

来实现航位推算定位。对于智能手机,利用加速度计来计算前进的步数,利用陀螺仪等获得前进的方向,而通过对步长的估算,可以由步数得到前进的距离,从而算出相对于初始位置的新的位置。

这一方法的一个难度在于需要提前获得初始的位置,因而方法本身更适合作为一种导航方法而非定位方法,另一个难题在于方法存在着误差累计的问题,由于每一次推算的位置都依赖上一次的位置信息,所以每一次推算位置的距离和方向的误差都会影响之后的计算,导致定位结果的偏离越来越大,所以,很多研究都将航位推算法和其他的定位手段相结合,利用其他的定位方式减少误差的累计。误差的累计还与每一次的距离和方向的测量有关,而由于传感器精度的限制和行人每一步距离的不确定性,想要避免误差的累计,准确的估算距离和如何利用传感器精确的测量行进的方向也是减少误差累计的有效手段,特别是航向的判断上,持有手机行进时往往手机会随着人体出现摆动,而室内环境对磁力计的干扰、传感器本身精度存在的限制都使得航向的判断存在很多的影响因素。

(3) 视觉定位技术

视觉定位技术是一个比较宽广的概念,主要指利用智能手机摄像头实现的定位技术,而之前提到的可见光定位技术和红外线的技术也可以包含在此。一种简单直接的定位方式就是将图像信息作为位置指纹,即在每一个位置处拍摄周围的图片,每个位置处四周的环境和视角都不同,拍摄的照片也有着不同于其他位置的独立性,在室内范围内采集各个参考点的图片并标识其位置信息,在进行匹配定位时,将待定位点处拍摄的图像与指纹数据库进行匹配,选出最接近的参考点作为定位结果。这种定位方法已经普遍的运用在了无人机等设备的室内定位和导航。

这一定位方法的关键和难点在于对于图像的识别和匹配过程。图像包含着像素分布及颜色、亮度等信息,需要进行数字图像处理 and 特征点提取,通过和指纹数据库内图像的特征点间的匹配计算,计算主要是一些标识物坐标的交会计算。这种定位技术的一个问题在于图像数据相较于其他指纹信息如地磁和 WiFi 信号,其数据量大,建立位置指纹数据库需要更大的容量,进行匹配计算也要花费更多的内存和时间。除此之外,一旦室内环境内的某些关键标识点出现改变或是被遮挡,会影响整个位置指纹数据库,而在人流较密集的室内场景如商场,如何避免人流的遮挡也是一个难题。

视觉定位技术因图像识别和认知的研究呈现出广阔的发展前景,谷歌的 AR 平台 Tango^[51]中加入的视觉定位服务(Visual Positioning service, VPS)通过视觉定位技术实现,由视觉惯性里程计(Visual Inertial Odometry, VIO)将视

觉特征和惯性数据进行结合测量,通过融合二种传感信息进行定位计算,宣称能够达到毫米级的精度。而人工智能和深度学习的发展也为视觉定位提供新的解决方式,测绘遥感信息工程国家重点实验室的研究人员就利用深度学习工具 caffe 进行场景识别,结合其他定位手段实现室内定位^[42]。

上面提到的有源定位法和无源定位法,每种方法都有其特点,也都有各自的局限性,并没有一种单独的定位方法能够完美的满足室内定位在各个方面的需求,因此,如果能够通过混合使用多种定位方式充分结合不同方法的优点,在定位精度和准确率上就能有明显的提升。当前,综合多种信号源进行混合定位的技术也是室内定位领域的研究热点之一,现如今比较热门的混合定位的方法有:磁场和 WiFi 混合定位;地磁定位和步行者航迹推算的混合定位;图像识别和步行者航迹推算混合定位;多源融合的混合定位。混合定位的技术在进行数据采集时和定位时同时记录多种信号源的信息,或是以不同的权重值综合各类信号源的值进行综合判断,或是以某种定位方式为主,而通过其他的信号源辅助定位,这在未来将会有着广阔的研究前景。而本文的研究,也提出了一种结合地磁信息和方向信息的一种混合定位方法。

2.2.3 室内定位匹配方法

匹配主要通过几何法匹配、近似法计算和场景分析即位置指纹法。

(1) 几何法

几何法是通过几何学原理进行测量和计算,根据测量的数据的不同,利用测量距离进行计算的叫三边测量法,而利用方位进行计算的叫三角测量法。

三边测量法,利用不共线的已知位置点间的距离来推算出需要定位的点在区域内的所在,定位主要是利用距离进行计算得到。而这里用于计算的距离的衡量,现在主要有两种方式:一是通过达到时间,由信号从接入点到终端所用的时间计算。这种方法的原理简单而直观,但考虑到信号是以接近光速在空气中传播的,这要求接入点和智能手机间的时钟能精确同步。二是通过信号传播过程中的变化模型推导,即由信号的传播模型从接收到的信号强度和信号传播的衰减规律推算出待定位点与接入点的距离,这种方法在室内区域内受室内布置、建筑结构和室内物品的摆设等的影响。

三角测量法利用的是达到角度,如下图所示,利用从已知位置点发射的信号到达接收处的角度,由多个角度的信息计算点所处的位置。在室内环境,墙壁、门窗等的遮挡及智能手机本身在信号的接收都会影响到对角度的测量。

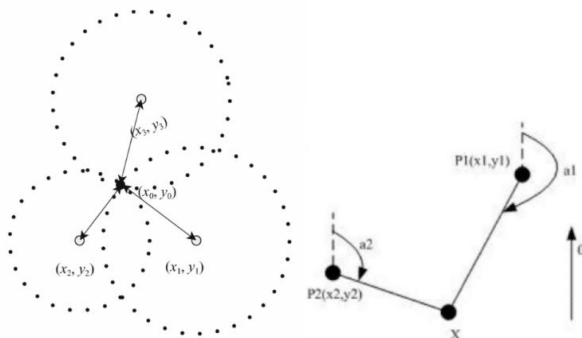


图 2-4 三边测量和三角测量原理图

(2) 近似法

近似法是通过设备感知最接近的已知位置点，由此估计用户的位置，目前主要通过远程认证拨号用户服务

(Remote Authentication Dial-In User Service, RADIUS)或简单网络管理协议(Simple Network Management Protocol, SNMP)等网络管理协议，通过访问接入点上保存的信息得到待定位点相关的信息。这种方法的只能大致的估算位置范围，更适用于特定的情形下使用。

(3) 场景分析法

场景分析法也可以叫做位置指纹法，即将室内某些信息例如智能手机接收到的信号强度作为位置指纹，正如前面所说，信号在传播时会逐渐衰减，这使得在室内不同位置，接受自各个信号点的信号强度将会不同于其他位置。场景分析的定位法，先预先采集室内各个位置独特的信号信息，完成位置指纹图，匹配时通过采集实时的信息，和指纹图之间匹配运算，通过匹配度找出最高的一组作为定位的结果。相较于几何法，位置指纹法利用的是不同位置间信号强度的差异，无需准确的知道各个信号点的位置信息，但这种方式要求预先在待定位区域收集用于辨识位置的信息。本文所提出的室内地磁定位方法也是以场景分析为基础的。

场景分析法的定位方式可以分为：自我定位和远程定位。对于本文使用的智能手机来说，自我定位方法的位置指纹是智能手机上搭载的某种传感器采集到的信息和特征，根据这些特征，通过对特征的匹配计算来进行定位，这种方法也可以是综合多种传感器采集的多种信号特征来进行定位，这时的位置指纹就是多维的。除了接收信息，也可能是智能手机作为信号源向外广播，在已知位置的接收装置处理接收到的信号信息，反过来估计发送信号的位置，这一方法叫远程定位。不论是哪一种方式，其实现原理都把需要确定位置的设备得到的信号特征拿去和指纹图进行计算，找出匹配度最高的数据，以这条数据代表的位置作为定位结果，这个过程可以看作一个模式识别的问题。尽管现今的智能手机已经具备了足够的

计算能力,为了提高计算速度并提升系统的灵活性,对于自我定位的方式,智能手机也可以把检测到的信号特征传达给网络中的服务器节点,由服务器利用这些信息计算,得到定位结果,接着把定位结果返回给智能手机,这样一来能够减少手机端的工作量,且定位计算在服务器端实现,这样匹配计算的更新、部署也更为方便简单。

2.3本章小结

本章主要介绍几种智能手机上的传感器和常见的室内定位技术,同时介绍了如何获取和存储 Android 智能手机上的传感器信息,这些研究为实现室内地磁定位提供了理论的基础。

3 室内地磁场研究

3.1 室内地磁场的性质

地磁场是产生于地球的球体内的一种天然磁性现象,可以看做是以地球作为磁偶极(Magnetic Dipole),地磁南极位于通常定义的北极区域,而地磁北极则位于南极区域。通过南北磁极的人为假设的磁轴与自转轴间约有 11.3 度的夹角^[3]。地球内部产生的磁场向地表伸出形成的磁圈引也被称做地球磁场。而人类生活的环境正处于地球磁场之中,我们所处的室内环境也被地球磁场所完全覆盖。

在上一章中已经介绍了室内地磁定位的基本原理,如果要使用地磁场作为位置指纹进行定位,则需要地磁场在区域内各个位置的分布具有差异性,而且需要保持相对的稳定,下面先从差异性和稳定性两个方面探究室内区域的地磁场。

3.1.1 室内地磁场的差异性研究

研究表明,磁场是由电荷或电场的变化产生,是一种传递电荷或是电流的在运动时的互相干扰的一种场,也是一种连续分布在一定的空间区域内的一种向量场,同时,磁场还会对其范围内的其它运动电荷或电流发生力的作用。能对磁场产生影响的主要因素是磁性材料,其定义就是能对磁场作出某种方式的反应的各种材料的一种统称,通常指的是具有强磁性的材料,其中的含铁或是亚铁的被称作强磁性物质,对附近区域的磁场会产生较为显著的影响。此外,由电生磁形成的电磁场也会对一定范围内的磁场产生干扰。在室内区域,建筑的钢筋混凝土墙体、室内的各类电子设备和一些物品,由于其中包含的磁性物质,会对室内区域的地磁场造成干扰,此外,电线线路和电气设备等都会产生电磁场,也会对小范围的磁场造成干扰,这些干扰的叠加使得在某一局部室内环境下的地磁场呈现独特的分布,每一个位置的地磁场都区别于其他的位置,利用这种独特性,可以通过采集当前智能手机上的地磁场读数来判断当前手机所在的位置。

为了验证室内地磁场是否适合用做室内定位及智能手机是否适用于作为地磁信号的采集设备,设计了如下的实验:选定一个场景,利用智能手机绕该区域一圈,沿途用智能手机采集地磁信号,分析对比各个位置的信号间的差异程度。选取武汉大学信息学部图书馆二楼东为实验的区域,平面图如图 3-1 所示,



图 3-1 实验场所平面图

持有型号为坚果 pro 的 Android 智能手机作为采集设备,其上内嵌有三轴的地磁传感器,绕整个室内区域一圈,沿途每走一步记录一次地磁传感器的读数,采集过程中始终保持设备在水平状态,移动过程中读数的变化如图 3-2 所示,图中左上角的图代表着矢量的模、右上角的图代表 X 轴数据的数值、左下角的图是 Y 轴的数值、右下角则是 Z 轴的数值。

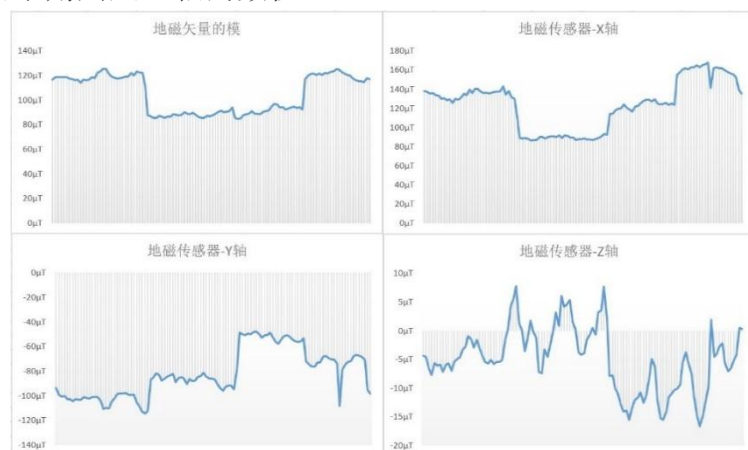


图 3-2 绕室内区域磁场采集图

由这幅图可以看到,随着设备在室内区域各个位置间不断移动,无论是地磁数据的大小即地磁数据矢量的模,还是地磁传感器的每一个分量的值,都在不断的变化着,这也意味着对于每一个位置来说,其地磁传感器的数值都有着不同于其他位置的特点,这也验证了利用智能手机采集的磁场信息具有着进行定位的可能。

3.1.2 室内地磁场的稳定性研究

地磁场能否作为位置指纹,磁场能否随时间内保持稳定也是十分重要的,否则,即使地磁场有着良好的辨识度,磁场一旦发生变化,在此之前采集到的地磁

数据将不能准确的反映位置信息,使得定位的准确度下降,只能够通过不断的及时更新地磁指纹数据库的数据来保证当前的数据能够准确代表这一室内区域的地磁场分布情况。地球磁场本身也在不断的变化着,但是这种变化是细微且有着一定规律的,如文献^{[3][4]}介绍了全球磁场模型,并研究了其变动规律,球体外的磁场在近百年来的主要能量的改变是其总能量、北方和垂直方向为衰减态势,而东向则呈现逐渐增加的趋势。

设计了如下一个实验,放置智能手机在某一固定位置保持不变,设计自动采集的方法,使智能手机每隔一段时间自动的记录当前时刻的地磁数据信息,如此记录下一段时间如一天、一周或一个月内的地磁场数据,观察数据的波动情况。选取了武汉大学国际软件学院 C3 为实验地点,使用坚果 pro 作为实验设备,将智能手机固定在室内的某一位置,使其每 5 分钟自动采集一次地磁数据存储,在一天 24 小时内一共采集了 187 次的数据,传感器的数值变化如图 3-3 所示:

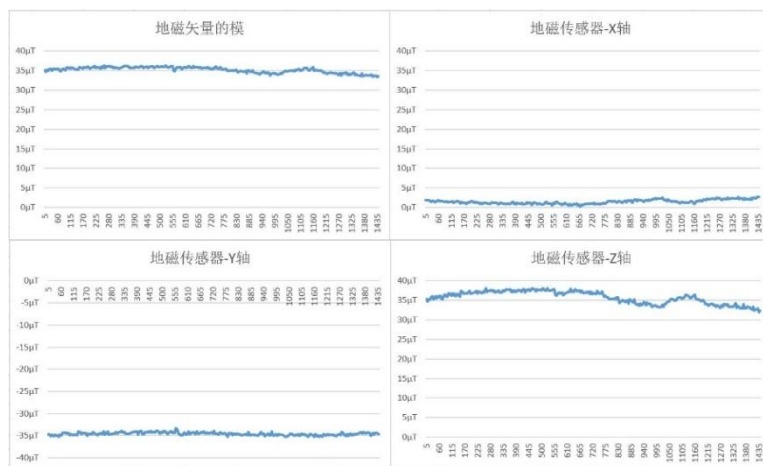


图 3-3 地磁场一天变化曲线图

此外,在实验场所的某张桌子上固定划定了一个位置,持有该设备,每隔约 1 天在这一位置采集一次数据,一共采集了 14 次供 98 条数据,首先对同一天多次采集的数据计算其中值,一共得到 14 条数据,代表着数据在 14 天内的变化情况,其地磁矢量的模及地磁传感器的各个轴的数值变化情况如下图 3-4 所示:

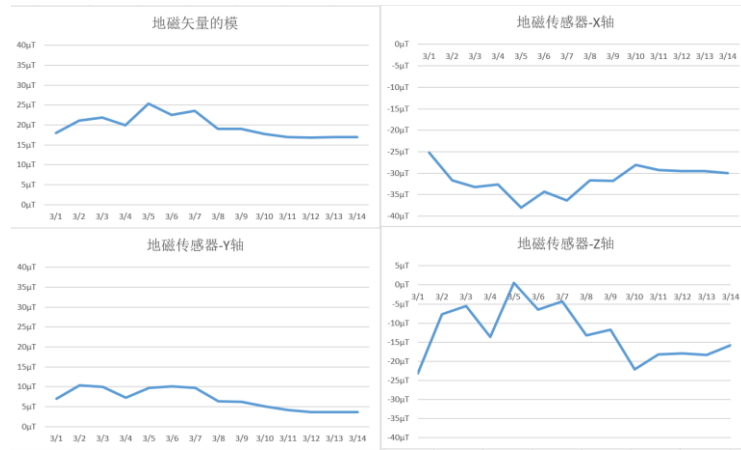


图 3-4 地磁场两周变化曲线图

由以上的实验可以看出，尽管室内地磁场受很多的因素干扰，其数值可能会出现波动，特别是图 2-8 中传感器 Z 轴的数值在一个星期内出现了比较大的变化，但就整体的变化趋势特别是地磁矢量数据的模的变化来看，室内的磁场在一段时间内还是能够保持相对的稳定的，而这也验证了使用地磁场进行定位的可行性和可能性，相对的稳定代表着在采集了室内的地磁场信息后，一段时间内是能够有效的作为位置指纹图的。当然，考虑到磁场受到干扰后可能会产生的变化，研究磁场可能的影响因素并分析其特点，能够帮助维护采集到的地磁指纹数据的有效时长，从而大大减轻维护位置指纹及定位系统的工作量，有助于地磁定位的应用和推广。

3. 2室内磁场影响因素的研究

正是由于室内磁场易受干扰的特点造就了室内独特的磁场分布，但这一特点也使得室内的磁场分布易受到干扰而出现变化，使得预先采集的地磁数据无法准确的代表当前室内的地磁场分布特点，影响了定位的准确度。对室内磁场影响因素的研究具有着重要的意义，如果能够分析了解不同的影响因素对室内地磁场，特别是智能手机上的地磁传感器的读数的影响，就能够根据当前的条件估算、推算出地磁传感器的读数和预先采集数据时相比发生的变化，从而动态的调整位置指纹数据库中的数据，避免一旦有影响磁场的条件发生变化就需要重新采集室内磁场数据的困扰。针对室内磁场的研究，按对磁场影响条件的类型，分为设备型号的影响、设备形态的影响和环境的影响三个方面进行分析。

3. 2. 1设备型号的影响

不同型号的智能手机可能搭载着不同的地磁传感器，而不同型号的传感器的读数可能会有一定的差异。同时，不同的手机型号，手机内部的构造如各类元件

的相对位置、材质等也有所不同，这也会影响搭载在智能手机上的地磁传感器的读数，为此，分析不同的设备对读数带来的影响。

设计了如下的一个实验来分析不同型号的设备采集的数据间的差异，分别选取型号为三星 S4 和坚果 pro 的两部 Android 系统的智能手机，沿同一条路径，每次在同一位置用两部设备分别采集地磁数据，并尽量在采集时保持设备的姿态等信息相一致，采集的结果如图 3-5 所示：

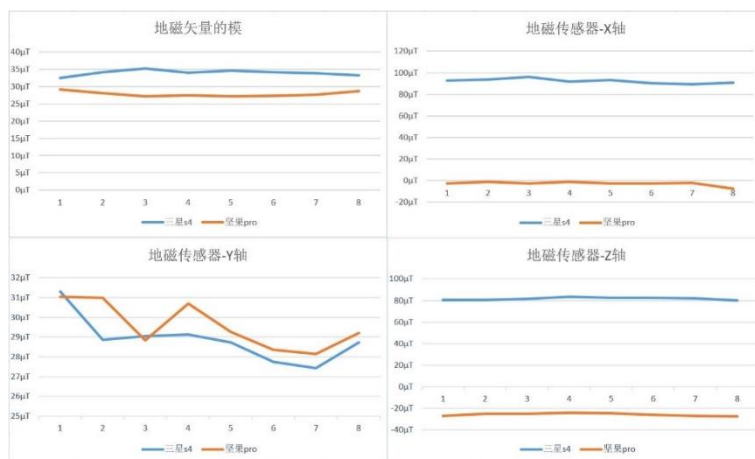


图 3-5 不同设备地磁数据对比

对结果进行分析，可以看到，两者的变化趋势大体相同，而且除了地磁传感器的 Z 轴外其他几项数据也是总体上接近的。但考虑到在进行室内地磁定位时，数据上的一点偏差也会对地磁匹配的结果会产生比较大的偏差，更何况从上面的数据上来看，尽管二者实际上代表的值可能相近，但在读数的表示上分别在最高点和最低点，相差很大，所以，如何减少设备带来的差异是一个颇探讨意义的问题。

针对不同型号的设备采集的数据存在的差异，有研究者提出了一种将智能手机上的地磁传感器数据进行转换的公式^[30]：

$$B_{magnetic} = W * k * B_{phone-m} \quad (3-1)$$

（其中 $B_{magnetic}$ 代表实际的地磁场数值，W 是影响磁场的干扰因素的综合因子，而 k 为设备的影响系数， $B_{phone-m}$ 为智能手机上的地磁传感器的数值）

这一公式的关键就在于干扰因素 W 和设备影响系数 k 的判定。对于干扰因素 W 来说，需要判断其包括哪些影响内容，每种影响因素占整个干扰因素的权重，以及如何验证；而对于设备的影响系数 k 来说，同样的，不同设备的系数 k 的判定也是关键因素。如果能够就这一问题进行充分的研究，分析出不同设备对于采集的地磁数据会有怎样的干扰，干扰的强度是多少，那么通过对不同手机的干扰因素 W 的测算，能够很好的消除设备的差异对采集到的地磁数据的影响。然而，无论是实际磁场数值的测算还是系数 W 和 k 的推算，在现今的条件下由于设备本

身结构的复杂性、设备型号的多样性和设备获取的困难，对于设备造成的影响及如何消除这一影响的研究是颇有难度的，在现阶段都是比较难实现的。

设备型号的不同对于数据的影响是显而易见的，基于此，消除设备型号带来的影响的一种方法是，每一种设备采集到的数据都会有所不同，可以针对当前市场占有率较高的一些设备，在室内区域内分别用各种设备采集多组数据，在进行定位时，根据设备的型号，选取对应的一组位置指纹图。同时，可以依照设备对采集的地磁数据的不同将设备进行分组，其中每一组的设备其采集的地磁数据大体上是相同或相近的，这样一来能够减少采集的工作量，只需要按设备的读数划分好几个类别，每一种类别分别采集一次数据作为这一类别所包含的设备类型的位置指纹。

然而，即使用这样的分组方法，这种方法仍然只能覆盖一部分的移动设备，且这样一来每次采集的工作量也成倍的增加，对于一个室内区域，有多少种的设备分类，就需要进行多少次的地磁信号采集。因此，提出一种新的方法，即在位置指纹的设计上，利用地磁数据的变化率进行定位匹配操作，因为，尽管不同的设备采集的数据可能会存在着一些差异，但地磁传感器的读数是基于室内区域的磁场的，室内区域的地磁分布对于所有的设备来说都是相同的，不同设备采集到的数据间的差异是相对固定的一个数值，因此以地磁数据的变化率作为位置指纹的成分之一，能够有效的规避不同设备数值上的差异给定位匹配带来的影响。

3.2.2 设备形态的影响

如 2.1 中提到的，地磁传感器采集的数据是以手机本身作为参考坐标的，而手机在室内空间的形态和地球坐标系分别如图 3-6 和 3-7 所示。

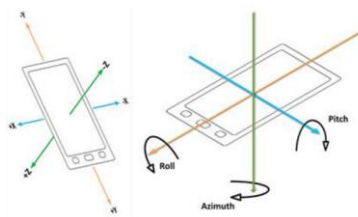


图 3-6 手机坐标系

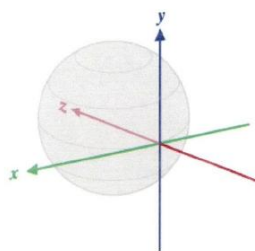


图 3-7 地球坐标系

而手机上的地磁传感器采集到的数据是以当时的手机坐标系为基准表示的，并不是这一位置上以地球坐标系为基准的数值。这种表示方式意味着在同一个位置，随手机的翻转、转动或倾斜，地磁传感器的坐标系发生相对的变化，这意味着地磁传感器的数值也会发生变化，使得在同一个位置，随着设备的不断变化，会有无数组的地磁数据。

对于地磁传感器的三个轴,其中 y 轴为设备顶端朝前, x 轴为智能手机朝右,而 z 轴为垂直屏幕向上,这和智能手机坐标系的定义是相一致的。而需要注意的是,随着手机姿态的变化,无论是地磁矢量的模,还是传感器采集到的三个坐标轴的数值都发生了较明显的变化,在同一位置上的地磁读数也随着智能手机姿态出现很大的不确定性。

要想利用地磁场进行室内定位,无法对使用者的智能手机姿态作出准确的要求,意味着在一个位置上必然会有多样的地磁数据,如何利用这种和手机姿态相关的数据作为位置指纹是一个需要解决的问题。

在这一问题上,有研究者通过手机姿态信息将手机坐标系下的地磁场数据转换到地球坐标系^[18],主要是利用手机地磁传感器采集的数据和手机方向信息进行坐标变换,地磁传感器的数据为 $B_{phone-m}: (x, y, z)$, 而方向传感器的数据为 $B_{phone-o}: (x, y, z)$, 其中 x, y, z 三者依次表示手机与地球坐标系三个维度的夹角 yaw, pitch 和 roll, 而相应的三维空间上的数据转换公式为:

$$B_{magnetic} = R(yaw) * R(pitch) * R(roll) * B_{phone-m} \quad (3-2)$$

其中 $R(yaw)$ 、 $R(pitch)$ 、和 $R(roll)$ 分别表示三个维度上的旋转矩阵。

具体的分析,其中智能手机上地磁传感器的读数 $B_{phone-m}$ 是由地磁场、室内干扰场叠加而成,且还受智能手机本身结构中的磁性物质和软铁效应的影响,因此,智能手机上的地磁的地磁传感器的读数 $B_{phone-m}$ 可以表示为:

$$B_{phone-m} = B_{geomagnetic} + B_{disturbance} + V \quad (3-3)$$

其中 $B_{geomagnetic}$ 表示地球磁场, $B_{disturbance}$ 代表室内干扰场,而 V 表示设备自身带来的影响因素,也能够用一个三维的向量来表示。

目前,针对手机姿态的不同对传读数带来的改变,不少研究人员根据姿态信息提出了坐标的转换公式,以得到基于地球坐标系的磁场矢量^{[52] [53]}。不过,考虑到现今的智能手机搭载的陀螺仪等传感器对手机姿态信息的感知更多的是偏向于其姿态变化和变化趋势,而无法获取精确的手机姿态信息,这意味着基于传感器姿态的坐标转换法由于姿态信息上的偏差,不仅无法正确的得到以地球坐标系为基准的磁场信息,还可能会造成误差的累加,从而影响地磁定位的准确度。

基于这一点,本文的研究中,人为的规定将智能手机水平放置,在尽可能保持设备水平的前提下进行数据的采集和定位操作,这样一来在一个位置上手机只存在方向的不同,能够减少设备形态带来的影响,而通过位置指纹的设计也能很好的解决同一位置上手机朝向,即方向信息带来的影响,从而保证定位的准确度。

3.2.3 室内环境的影响

(1) 电子设备对室内室内磁场的影响

电子设备的影响可以分为两种,一种是电子设备带有的磁性物质对室内磁场的影响,另一种是电子设备运转时电流周围会产生磁场,从而影响智能手机上传感器的数值。

首先研究现今人们普遍使用的智能设备如智能电脑对磁场的影响,而需要考虑到的是,现如今人们习惯随时携带着智能手机,随身携带智能手机本身就是人们的一种习惯,在利用实验研究人体和智能手机对室内磁场带来的影响时,把二者结合起来一起研究是一种更好的选择,在这里,先记录在没有持有智能设备时,人的靠近是否会影响智能手机上地磁传感器的读数,接着由人携带电子设备重复刚刚的动作,观察地磁传感器的读数变化。

实验采用坚果 pro 固定在桌上收集地磁传感器的数据,保持在固定的位置不动,先由为携带电子设备的实验人员从远处走到智能手机附近,记录下读数的变化,接着,实验人员手持着电子设备,实验中选用的是苹果的 iPhoneX 手机作为变化的因素,沿相同的路径走至智能手机附近,记录下读数的变化。智能手机上地磁传感器读数在两次中的变化如图 3-8 所示,其中蓝色的线代表的是未携带电子设备时的变化情况,橙色的线表示的是携带着电子设备靠近时的变化情况。

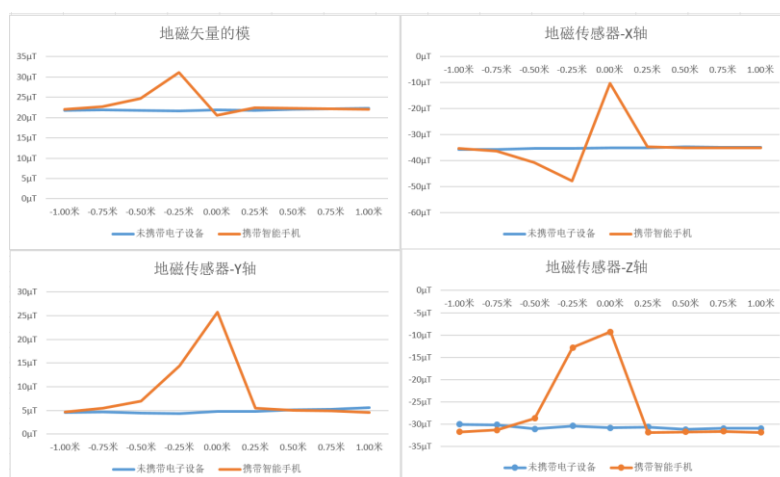


图 3-8 电子设备对磁场的影响

由蓝色线的变化情况可以看出单个人体对智能手机读数的影响是有限的、可忽略的,人体在靠近或远离正在采集中的设备时,读数并未发生明显的改变,而智能手机在内的电子设备的确会对地磁传感器造成干扰,但其影响的距离很近,考虑到人与人之间一般存在的空间间隔,这一影响因素是可以忽略不计的。

此外,如电灯等照明设备,其运行是包含着电路的变化,也可能给室内地磁场带来一定的影响,为了探究照明设备是否会对智能手机上的地磁传感器读数造成影响,先在电灯关闭的条件下由实验人员手持智能手机由远向近的采集一组数据,之后打开电灯,再次重复上述实验步骤,比较两次采集的数据,如图 3-9 所示:

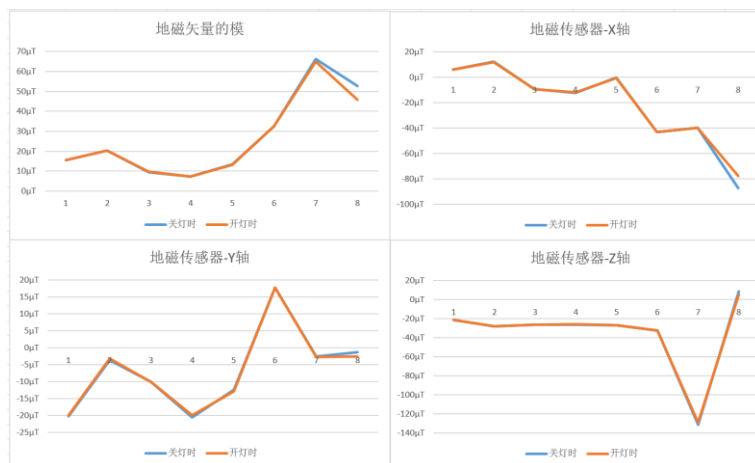


图 3-9 照明设备对磁场的影响

可以看到室内是否开启了照明设备对于智能手机上地磁传感器的读数并未造成影响，这使得在考虑室内环境变化对磁场的影响时，可以将照明设备带来的影响忽略不计。

(2) 人体对室内磁场的影响

在上一节的研究中可以看到，人体对于地磁传感器的影响是可以忽略的，除了人体对于室内磁场的影响，需要考虑到的是，设备的姿态会影响地磁传感器的读数，因此持有设备的人的不同，可能会使得设备的姿态不同，影响地磁传感器的读数。

由于实验已经人为规定在进行数据采集和定位时均将智能手机水平放置，这里考虑到的是，人体的高度不同，尽管智能手机水平放置，不同身高的人手中的智能手机在室内空间中的位置也有所不同，为此，分别将手机放置在距水平地面约 1.2m 和 1.5m 的地方，即身高较矮和身高较高的两类人胸口附近的位置，观察采集的读数是否存在不同，实验时沿着一条相同的路径，在沿途相同的几个位置，分别采集了不同身高下地磁传感器的一组数据，二者的对比结果如图 3-10 所示：

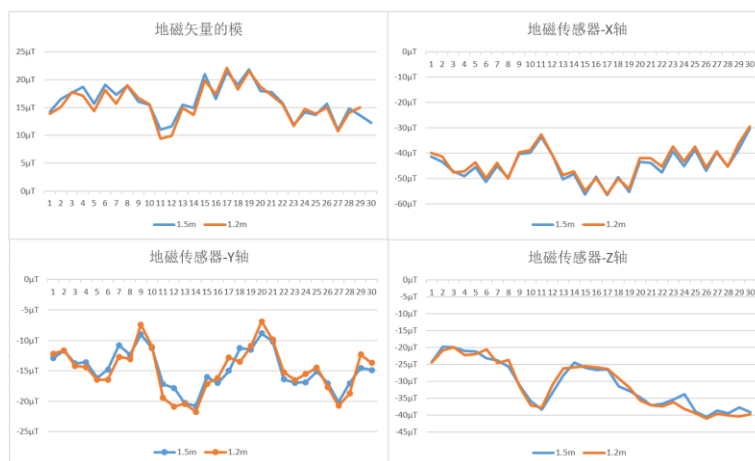


图 3-10 不同身高下地磁传感器读数

有实验结果看出，两个高度下采集的地磁数据具有着较高的相似性，这意味着人的高度对与定位的影响是比较小的。

(3) 室内物品、陈设变化对室内磁场的影响

室内物品对地磁场的影响主要是体现在室内物品中含有的磁性物质，其位置的改变对室内地磁场带来的干扰的改变。相关的研究显示，工字钢梁，这一建造的主要材料对于磁场的干扰效果最为明显，智能手机读数在靠近时的变化达到了 $7.1\mu\text{T/m}^{[15]}$ ，而除此以外，螺纹钢筋混凝土结构也对地磁场有比较明显的影响，此外，一些电器设备如电梯、空调等同样能够对地磁场产生干扰。考虑到对于大部分室内区域来说，室内陈设是相对稳定、变化较小的，相对而言，室外区域特别是可供停车的区域，车辆的停放变化较大，因此，通过实验来研究室外停放的车辆是否会对室内的磁场产生影响，为此，手持智能手机在道路旁保持不变，在附近恰好只有一辆车经过而无其他车辆或人流的干扰时记录下车辆经过时智能手机上地磁传感器读数的变化情况，如图 3-11 所示，需要提到的是，由于在采集时无法精确的控制车辆的速度和相对的位置，这里的一组数据是在估算和预判车辆相对采集人员的距离的情况下采集的，数据本身反映的更多的是车辆靠近设备时的变化趋势。

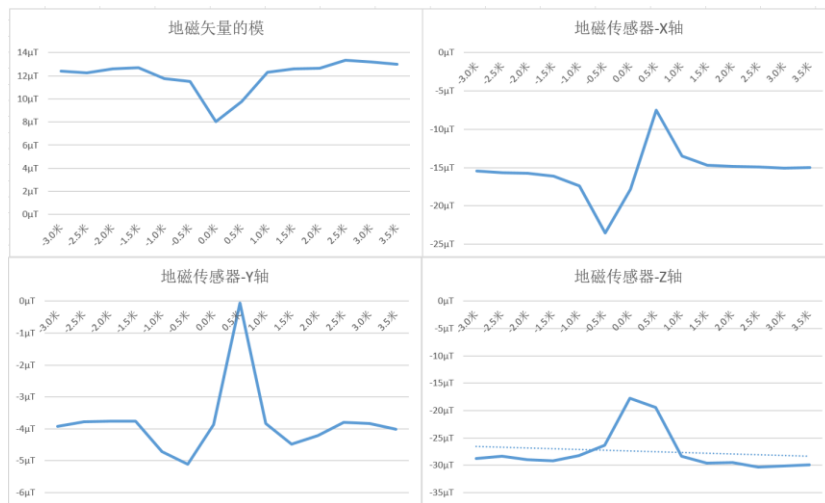


图 3-11 车辆接近时地磁传感器读数变化

可以看到，传感器的数值在车辆经过时确实发生了变化，会对读数产生影响，但和电子设备造成的影响相类似，也需要车辆在靠近智能手机 0.5m 以内时读数才会有明显的波动，在车辆离采集设备有一定距离时，对读数的影响较小，考虑到一般室外停放的车辆和室内场所间的距离，故室外停放的车辆对室内地磁场的影响是可以忽略的。

由以上的研究不难看出，在对智能手机上的地磁传感器的影响上，像电子设备等因素的影响都是有限的，需要在足够近的距离才会干扰到智能手机上的读数，

但诸如智能手机型号和智能手机形态等因素带来的影响是直接而又难以消除的。在研究室内定位的不同实现方式和智能手机上的各类传感器后,结合智能其他传感器信息设计位置指纹是减少这样影响因素对定位带来的干扰的一种方法。

3.3 时间序列分析及建模

时间序列分析是以间隔不变的条件收集一个点或一个区域不同时间下的状态的集合,利用这一组动态数据研究变动规律并对未来做出预测。考虑到地磁数据的变化序列是与时间有关的,而线性回归观察结果独立的假设在不能成立,因此选用时间序列分析方法对地磁数据进行分析。

建模的过程主要如下图所示:

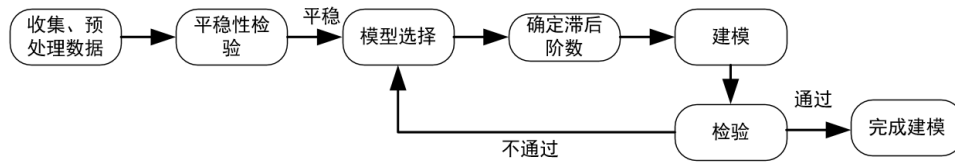


图 3-12 时间序列分析和建模流程图

在对地磁数据进行分析和建模前,先介绍随机性分析和平稳性分析的原理。

(1) 随机性分析原理

对地磁数据的随机性的分析是一种验证数据中的数值是否随机生成的方法,又叫游程检验(Run Test),通过将数据按序列排列后,将同一元素连续排列的一组定义为游程,得到数据中的游程信息,利用游程的总数和其中的最大游程分析结果是否具有随机性。一组数据中游程的数量用 R 来代表, R 能够说明在这一二元序列中的元素交叉出现的频率,其值等于序列中元素交替轮换的总次数加 1。

对于随机性的分析,如果研究需要判断数据是否具有随机性,那么有如下的双侧备择:

$$H_0: \text{数据随机出现} \leftrightarrow H_1: \text{数据非随机出现} \quad (3-4)$$

此外,还能建立单侧备择来描述序列变化的倾向:

$$H_0: \text{数据随机出现} \leftrightarrow H_1: \text{序列呈现混合倾向} \quad (3-5)$$

或:

$$H_0: \text{数据随机出现} \leftrightarrow H_1: \text{序列呈现成群倾向} \quad (3-6)$$

需要注明的是,为了要进行判断,样本观测值需转换成两种类型符号表示。此外,对于序列倾向的判断上,如果 R 过小,意味着其中有一段或多段元素是连续排列的,即有多个相同的元素连续排列,故这一组数据有着聚集的可能;而 R

过大也说明很多情况下都是二种元素交替出现，这组数据很可能是混合排列的，因而能够通过对 R 的数量的分析来检验这组数据的分布情况。

通过 R 的分布来进行判断，设二元序列为 $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N)$ ，其中 N 代表整组数据里元素的个数，而两种元素用 0 和 1 表示，其个数分别为 i 和 j，对于建立的双侧备择，在 H_0 成立时游程个数 R 服从 $X_1 \sim b(1, p)$ 的正态分布，p 表示元素 1 出现的概率，可知 p 与 m 和 n 有关，p 也和游程个数 R 相关，在 m 和 n 确定的情况下，R 和 p 之间将不相关，出现任何一种不同结构序列的概率 p 表示为：

$$\frac{1}{\binom{N}{n}} = \frac{1}{\binom{N}{m}} \quad (3-7)$$

分别考虑当游程个数为奇数或偶数时的情况：

当 $R=2k$ ，则 R 的分布表示为：

$$P(R = 2k) = \frac{2 \binom{m-1}{k-1} \binom{n-1}{k-1}}{\binom{N}{n}} \quad (3-8)$$

当 $R=2k+1$ ，则 R 的分布表示为：

$$P(R = 2k + 1) = \frac{\binom{m-1}{k} \binom{n-1}{k} + \binom{m-1}{k-1} \binom{n-1}{k-1}}{\binom{N}{n}} \quad (3-9)$$

能够使用抽样分布得到 $P(R \geq r)$ 或 $P(R \leq r)$ 的值，使得有 $P(R \leq r_1) \leq \alpha$ 和 $P(R \geq r_2) \leq \alpha$ ，其中 α 是这一概率是否显著的定义，人为设定用于验证拒绝域。

计算的方式可以根据二元序列的长度来判断，如果数据量不大，可以由查正态分布表的形式确定临界值 r 的取值 r_1 和 r_2 。

当数据量很大时，假设数据量趋近于无穷，则根据精确分布性计算方差和期望，有：

$$Z = \frac{R - E(R)}{\sqrt{Var(R)}} \rightarrow N(0,1) \quad (3-10)$$

其中 p 值和检验结果可以通过搜寻正态分布表得到。

对于二元序列是否满足随机性的判断由 p 值和 α 的对比进行，若 $p < \alpha$ ，说明数据不具有随机性；若 $p > \alpha$ ，则认为数据随机出现。

(2) 平稳性分析原理

对于一个序列的平稳性判断主要是观察是否存在某种变化趋势或是各时间间隔内是否存在，另外一种定义是若具有随机性的序列，在时间过程内，序列的均值和方差都是常量，并且协方差的计算在整个过程中都与时间无关，认为具有

平稳性。判断是否具有平稳性一种简便的方法是绘制出序列的散点图，但这种方法只能较为粗略的观察明显的趋势，此外，可以通过单位根检验的形式来验证。单位根检验的定义很简单，就是判断一组数据是否存在单位根。如果一组时间序列中存在，那么认为这一组数据是不平稳的，能够建立下面的备择关系：

$$H_0: \text{序列存在单位根} \leftrightarrow H_1: \text{序列平稳} \quad (3-11)$$

ADF (Augmented Dickey-Fuller) 检验是其中一种常见的检验方法。

DF (Dickey-Fuller) 检验方法中设数据是由一阶回归步骤生成，且有均匀分布的白噪声掺入，但这一假设在实际中并非普遍存在。而 ADF 方法就是在此基础上融合了滞后差分项，使得高阶序列相关得到了限制，其含趋势向的表示为：

$$\Delta X_t = \alpha + \gamma X_{t-1} + \sum_{i=1}^p \beta_i \Delta X_{t-1} + ct + \varepsilon_t \quad (3-12)$$

其中 p 为滞后阶数，对于模型，有着如下备择假设：

$$H_0: \text{序列存在单位根} \leftrightarrow H_1: \gamma < 0 \quad (3-13)$$

取 X_{t-1} 项中的 t 检验值作为 ADF 的统计结果，如果这一结果能够小于临界值，那么能够证明结果足够小，因而推翻了原假设，即这一序列中不存在单位根，具有稳定性。由此，在 ADF 检验中，通过返回结果的信息和在给定性显著水平下的边界值进行判断。

(3) 建模及检验

实验的步骤如下，使用的工具为 Eviews 软件，置信水平用 0.05，首先将待处理的数据输入到 Workfile 中，这里以地磁传感器的 x 轴上的数据举例说明。

读入原始数据后绘制出数据的折线图，处理前的数值图及一阶差分后的数值图如下图所示：

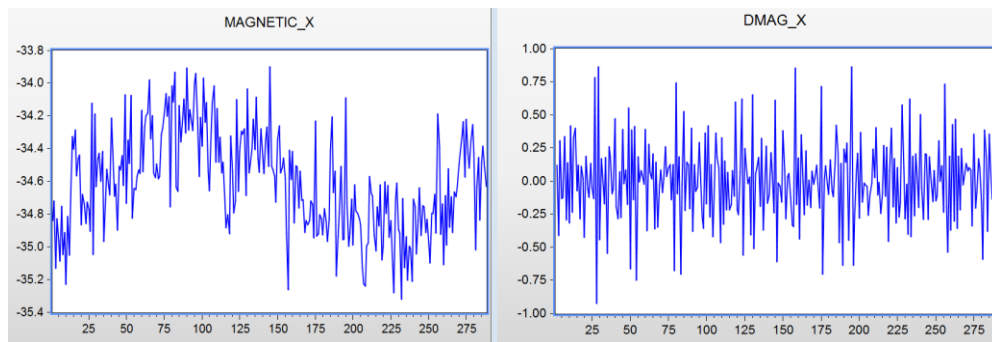


图 3-13 数据折线图

同时，对数据做 Correlations 互相关分析和单位根 ADF 检测，对数据的统计分析结果如下图所示：

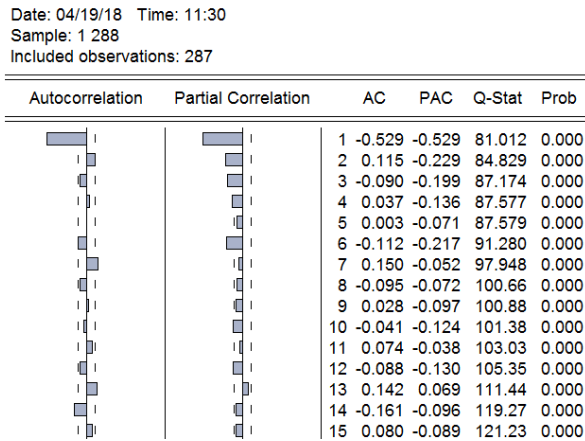


图 3-14 相关性分析结果

对结果进行分析, 由图 3-14 可知, 在各阶延迟下, Q 统计量 Q-stat 的 P 值 Prob 均小于置信水平 0.05, 因此序列是纯随机的假设不成立, 序列是非白噪声, 即不随机。

接下来进行平稳性的分析, 选择单位根检验 (Unit Root Test), 使用 ADF 检验法, 对原始数据一阶差分后的 ADF 检验结果如下图:

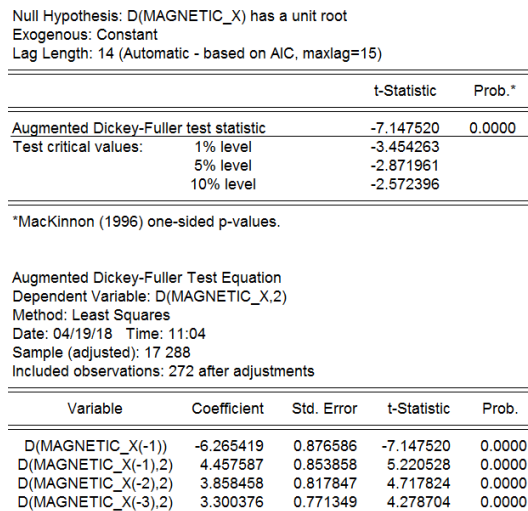


图 3-15 数据 ADF 检验

可以看到, 单位根的 ADF 统计量为-7.15, 这一数值小于在给出的三个水平下的临界值, 因而原假设能被推翻, 数据具有平稳性, 能够建立模型

自回归滑动平均(auto regressive moving average, ARMA)模型是研究平稳随机过程的一类常用方法, 包含三种基本的模型, 分别是自回归(auto regressive model, AR)模型与滑动平均(moving average, MA)模型和自回归滑动平均模型。

AR 模型主要衡量的是数据存在着的递推的线性回归关系, p 阶的模型 AR(p) 的定义如下:

$$\begin{cases} x_t = \phi_0 + \phi_1 x_{t-1} + \cdots + \phi_p x_{t-p} + \varepsilon_t \\ \phi_p \neq 0 \\ E(\varepsilon_t) = 0, Var(\varepsilon_t) = \delta_\varepsilon^2, E(\varepsilon_t \varepsilon_s) = 0, s \neq t \\ \forall s < t, E(x_s \varepsilon_t) = 0 \end{cases} \quad (3-14)$$

而滑动平均模型(MA)的 q 阶自回归模型 MA(q) 定义如下:

$$\begin{cases} x_t = u + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \cdots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \\ \theta_q \neq 0 \\ E(\varepsilon_t) = 0, Var(\varepsilon_t) = \delta_\varepsilon^2, E(\varepsilon_t \varepsilon_s) = 0, s \neq t \end{cases} \quad (3-15)$$

自回归滑动平均模型 (ARMA) 的定义如下:

$$\begin{cases} x_t = \phi_0 + \phi_1 x_{t-1} + \cdots + \phi_p x_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \cdots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \\ \phi_p \neq 0, \theta_q \neq 0 \\ E(\varepsilon_t) = 0, Var(\varepsilon_t) = \delta_\varepsilon^2, E(\varepsilon_t \varepsilon_s) = 0, s \neq t \\ \forall s < t, E(x_s \varepsilon_t) = 0 \end{cases} \quad (3-16)$$

对于选用那种方式, 则可以通过图 3-14 中两组收敛情况初步判断, 随后尝试多种建模方法后选取效果最好的一种。

由图 3-14 的分析结果, 左边一栏的自相关系数, 波动在 2 阶后全部控制在 2 倍的标准差区域内, 但非 0 的数值一直连续存在, 因而认为系数拖尾; 而偏自相关系数则在 6 阶后收敛, 判断为截尾, 因而初步判断选择使用 AR(2) 模型。

接着建立建立多种模型, 比较赤池信息准则(Akaike info criterion, AIC), AIC 用于判断滞后阶数, 是模型判优的一项重要因素, 值越小表示模型越优, 比较后得出 AR(2) 的 AIC 值最小, 其结果如下图所示:

Dependent Variable: DMAG_X				
Method: ARMA Maximum Likelihood (BFGS)				
Date: 04/19/18 Time: 15:22				
Sample: 2 288				
Included observations: 287				
Convergence achieved after 3 iterations				
Coefficient covariance computed using outer product of gradients				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.000947	0.008044	0.117746	0.9064
AR(1)	-0.648382	0.055886	-11.60196	0.0000
AR(2)	-0.228799	0.056547	-4.046197	0.0001
SIGMASQ	0.064053	0.005238	12.22887	0.0000
R-squared	0.317495	Mean dependent var		0.000723
Adjusted R-squared	0.310260	S.D. dependent var		0.306883
S.E. of regression	0.254868	Akaike info criterion		0.119211
Sum squared resid	18.38307	Schwarz criterion		0.170214
Log likelihood	-13.10679	Hannan-Quinn criter.		0.139652
F-statistic	43.88297	Durbin-Watson stat		2.092702
Prob(F-statistic)	0.000000			
Inverted AR Roots	-.32-.35i	-.32+.35i		

图 3-16 AR 模型输出

因而其一阶差分后的 AR(2) 模型可以表示为:

$$x_t = -0.6484x_{t-1} - 0.2288x_{t-2} + 0.0026 \quad (3-17)$$

3.4本章小结

本章主要介绍了在室内区域内地磁场的一些基本性质,同时通过控制变量的方式研究了室内地磁场和智能手机地磁传感器读数的影响因素,得出对地磁传感器读数影响较大的是手机姿态、手机型号等设备带来的影响,为定位方式的设计奠定了基础;同时针对一段时间内的地磁信号做了时间序列分析,证明了序列具有平稳性,并使用 AR 模型对序列进行建模。

4 室内地磁定位方式和匹配算法的设计

实现室内地磁定位系统需要设计相应的定位方式和匹配方法。本章的内容包括对智能手机采集的原始数据的处理方法、设计定位系统的定位方式和匹配算法。

4.1 数据预处理算法设计

智能手机上的传感器所采集的原始数据,可能因为采集时人为的误差比如设备的抖动、倾斜等造成采集数据的异常,而为了保证采集数据的准确性和有效性,进行实验和采集时会多次采集,每次一组数据中会包含多条数据,为此,设计了滤波算法进行数据处理。同时,预处理还包括对原始数据的坐标转换处理,将数据转换成位置指纹所需要的形式。

4.1.1 原始数据的滤波处理

移动设备在实际采集数据的过程中由于移动设备的状态不稳定如突然的抖动和倾斜,地磁数据指纹中可能会出现波动过大的点,这会影响定位的准确度和精度,为此,设计滤波算法来剔除地磁数据中的异常点。

数据集 W_i 表示点*i*处采集的所有地磁信号数据,处理过程分别对原始数据中的每一个分量进行计算,这里以二维的地磁信号为例,信号数据用 (M_x, M_y) 表示, n 为 W_i 中数据的条数。

对于其中的 M_x 分量,计算前后两点间的差值及差值的均值 Avg_i :

$$Avg_x^i = \sum_{k=1}^{n-1} (M_x^{k+1} - M_x^k) / n \quad (4-1)$$

假设精确度为 Acc ,若前后两点间的差值 $|M_x^{k+1} - M_x^k| - Acc > Avg_x^i$,则认为该次采集的数据波动异常,将其从原始数据中剔除。

对 M_y 分量的处理过程同理。

而整个滤波处理的算法过程如下所示:

表 4-1 差值滤波算法

输入: 数据所在文件的地址, 数据的精度 m_fDif ;

输出: 差值滤波处理后的文件

功能: 剔除一组数据中波动过大的部分。

Begin

1. 通过文件地址读取文件
2. For Sheet 中还有未读取的行, do
3. 读取 Sheet 表中的一行数据。

```

4. If 这行数据不为空
5. {将这行数据存入数据集 W; }
6. Else /* 表示 W 中已经完整的存储了一个点处多次采集的数据 */
7. {计算 W 中每个点和上一个点间的差值 dif;
8. 得到包含所有相邻点差值的数据集 D 和所有差值的和 sum;
9. 通过 sum 计算差值的平均值 avg;
10. For D 中每一个差值 do
11. If 差值和 avg 的差超出了精度范围
12. {从原有数据中将该差值所代表的点删除}
13. EndFor /*表示处理完一个点处数据的滤波 */
14. EndFor /* 最终处理完文件中所有点的滤波 */
    
```

End

算法的流程图如下图所示：

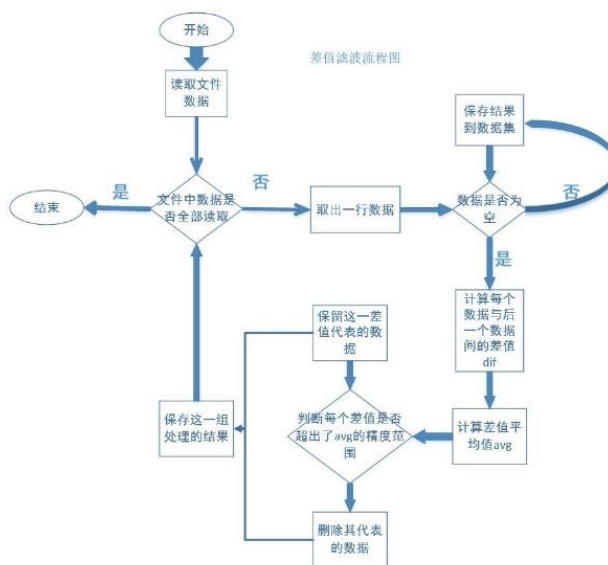


图 4-1 差值滤波流程图

此外，利用中值滤波实现平滑处理，这一技术使用排序将一组信号值用排序得到的中值进行表示。主要步骤为：先对待处理的一组数据按数值大小进行排序，找出大小处处于中间位置的数值，用这一数值作为这一整组数据的中值。这种处理方法使得掺杂在原始数据内的噪声对整组数据的干扰被降低，另一个优点在于处理的结果是原始数据中的一条，这样在消除噪声干扰的条件下还较好的减少了对数据的影响。整个算法的流程如下所示：

表 4-2 中值滤波算法

输入：数据所在文件的地址，数据的精度 m_fMid ；

输出：每个点中值滤波后得到的数字集 Ave；

功能：计算一组数据的中值

Begin

1. 通过文件地址读取文件
2. For Sheet 中还有未读取的行，do
3. 读取 Sheet 表中的一行数据。
4. If 这行数据不为空
5. {将这行数据存入数据集 W；}
6. Else /* 表示 W 中已经完整的存储了一个点处多次采集的数据*/
7. {计算 W 中所有数据的和 Sum；
8. 均值 $average = Sum / W$ 中点的数量；}
9. 输出这个点中值滤波的结果到 Ave；
10. EndFor /* 最终处理完文件中所有点的滤波*/

End

算法流程图如图 4-2：

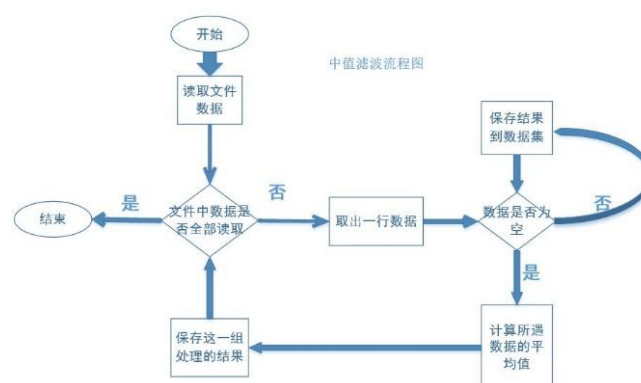


图 4-2 中值滤波流程图

4.1.2 原始数据的坐标转换方法

即对采集到的原始数据做转换,将以手机坐标系为基准的原始地磁数据转换为以地球坐标系为基准的标准数据,尽管这一方式在当前条件下并不能很好的解决智能手机姿态对数据带来的干扰,但仍是一种直接而简单的解决思路。

对原始数据的水平化处理方法主要有两种:

(1) 利用全球地磁信息处理

这一方法利用所在区域的磁偏角和磁倾角信息,将3维的地磁数据转换成2维的数据存储。

转换公式: 设数据精度 m_{fAcc} , 中值法精度 m_{fMid} , 差值法精度 m_{fDif} , M_x 、 M_y 、 M_z 分别表示地磁传感器采集 x、y、z 坐标轴上的数值, 磁偏角为 dec , 磁倾角为 inc 。则处理公式为:

$$\begin{cases} MagHor_x = m_{fAcc} * \\ (M_x * \cos inc + M_y * \sin inc * \sin dec - M_z * \sin inc * \cos dec) \\ MagHor_y = m_{fAcc} * \\ (M_y * \cos dec + M_z * \sin dec) \end{cases} \quad (4-2)$$

(2) 利用传感器数据处理

这样方法则是在采集地磁场数据同时采集加速度传感器的数据,通过坐标转换将数据进行二维化。

设地磁传感器采集的原始数据分别为 Mag_x 、 Mag_y 、 Mag_z , 陀螺仪采集的数据为 Dir_x 、 Dir_y 、 Dir_z , 而 M_x 、 M_y 和 M_z 是临时变量。

先求 X 轴方向上的地磁分量 $MagHor_x$, 其值为原始数据三个分量 Mag_x 、 Mag_y 和 Mag_z 分别在 x 水平方向上的分量的总和, 如下所示:

分别计算原始数据在 x 方向上的分量:

$$\begin{cases} M_x = Mag_x * \\ (\cos Dir_x * \cos Dir_y + \sin Dir_z * \sin Dir_x * \sin Dir_y) \\ M_y = -1 * Mag_y * \sin Dir_z * \cos Dir_x \\ M_z = Mag_z * \\ ((-1 * \cos Dir_z * \sin Dir_y) + \sin Dir_z * \sin Dir_x * \cos Dir_y) \end{cases} \quad (4-3)$$

则水平分量 $MagHor_x$ 的值是上面三者之和:

$$MagHor_x = M_x + M_y + M_z \quad (4-4)$$

在 Y 轴方向上的地磁分量 $MagHor_y$ 同理可得:

$$\begin{cases} M_x = Mag_x * \\ \left((sin Dir_z * cos Dir_y) - cos Dir_z * sin Dir_x * sin Dir_y \right) \\ M_y = Mag_y * cos Dir_x * cos Dir_z \\ M_z = -1 * Mag_z * \\ \left((sin Dir_z * sin Dir_y) + (cos Dir_z * sin Dir_x * cos Dir_y) \right) \end{cases} \quad (4-5)$$

则MagHor_y的值为:

$$MagHor_y = M_x + M_y + M_z \quad (4-6)$$

对于两种方法,虽然水平化的方式不同,但处理的流程是一致的,下面是对采集的文件进行水平化处理的流程:

表 4-3 水平化处理算法

<p>输入: 数据所在文件的地址, 处理的精度 m_fAcc。</p> <p>输出: 保存经过处理后数据的新文件。</p> <p>功能: 对原始数据进行坐标转换。</p> <p>Begin</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 通过文件地址读取文件, 读入原始的地磁数据, 得到磁偏角 dec 和磁倾角数据 inc 或是方向传感器的读数; 2. 设定处理的精度, 得到当前需要处理的数据的总行数 Num; 3. For 表中还有行未读 do 4. 读取新的一行数据 5. If 这行数据不为空 6. {表中这一行数据表示一组完整的传感器数据 (M_x, M_y, M_z); 7. 按转换的公式进行计算, 得到的两个值即为处理后的结果 (MagHor_x, MagHor_y); 8. 将处理后的数据(MagHor_x, MagHor_y)保存到文件; } 9. Else 10. {在新文件中插入一行空白行} 11. EndFor <p>End</p>
--

数据处理算法的流程图如下:

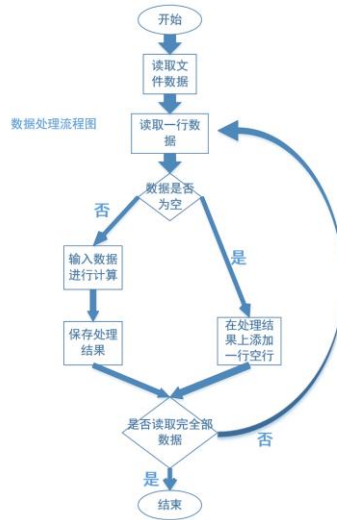


图 4-3 数据处理程图

完成了以上步骤后，将采原始数据的每一条都变换成了 (M_x, M_y) 结构的数据，而这一文件是一个室内区域的所有位置数据的集合，能够作为位置指纹图使用。

4. 1. 3一种位置指纹内插算法

在对原始数据的采集时，出于采集时出现的遗漏或采集路径的设计，可能会出现采集的数据无法完全覆盖整个平面图的情况，对于设定区域内未收集到原始数据的区域，设计了一种基于克里金差值法的内插算法，用来覆盖未采集到数据的区域。

空间内插是将测量值为离散分布的数据，由已知数据的信息推算在邻近的未知数据的值，将数据转换成连续分布形式的过程。常见的内插方法有：反距离加权差值(Inverse Distance Weighted, IDW)，克里金插值法，自然邻接点(Natural Neighbour)插值法等。考虑到室内地磁场存在着空间波动，并非具有完全的位置相关性，用反距离加权差值会存在错误估计的情况，这里选取克里金插值法对地磁指纹数据做处理。

克里金法的原理主要是参考了已知点和变异函数各自组成上的性质，对待推导的数据用线性无偏和最优估计，根据待推导点在范围内的数值，通过在值的大小、结构和所处位置的考量，加上对所有未知数据间在空间位置上的关系以及变异函数中整个组成的信息，做出了最优的估计。其中无偏是指偏差期望是零，最优则是使得推算的值与真实数值差的平方总合最小。假设研究区域内的已知位置上的属性值表示为变量 $Z(x_i)$ ，中 $i=1\sim n$ ， n 为已知采样点的总个数，对需要推导的点 x_0 进行克里金插值的公式表示为：

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (4-7)$$

其中的 λ_i 表示的是点 i 的权重值。

由于估计是线性无偏的，且有与真实数值差的平方总和最小，权重值 λ_i 满足如下关系：

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (\text{其中, } i \text{ 为 } 1 \text{ 到 } n \text{ 的整数}) \quad (4-8)$$

又由于无偏这一点，有如下的求解 λ_i 的方程组：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i, x_j) + \mu = C(x_0, x_j) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (4-9)$$

其中 $C(x_i, x_j)$ 表示的是 x_i 和 x_j 处点属性值的协方差函数，而 j 为 1 到 n 的整数。

运用在对地磁指纹图的插值处理上，则已知采样点的熟悉值 $Z(x)$ 即为地磁数据，而已知点的总数量 n 即表示划分的网格的数量。

4.2 位置指纹设计

位置指纹是室内定位技术的关键，所谓位置指纹和指纹的概念类似，是指不同的位置上具有的能够区别于其他位置的特性信息，就像不同的人有着不同的指纹一样，位置指纹是不同位置上具有的独一无二的“指纹”信息。如果能够事先确定每一个位置上的位置指纹的信息，建立位置指纹数据库，输入待定位的一条数据后，能够通过和指纹数据库内的指纹信息的匹配来确定位置，实现定位。位置指纹可以是单独利用某种方法，也可以是包含多种信息的多维数据，只要数据存在这“位置独特”的特点，能够用来和其他位置做区分，这一特征都能作为一种单独的位置指纹或是位置指纹的一部分。这些信息中最常见的是接收信号强度，包括一些区域内的固有信息如磁场强度和一些固定的发送设备发射的信号信息如 WiFi 信号，此外，信号的结构、对信号发射点的感应、信号传播时间或延迟等都能够作为位置指纹。

位置指纹的设计需要使得位置指纹具有良好的区分度，对于指纹信息来说，如果指纹的区分度不够高，那么匹配错误的可能性就会增高，特别是当区域面积较大、建立的位置指纹包含较多的条数的时候，区分度低意味着定位的不准确率高，而在室内定位中，定位的准确度是至关重要的因素。在利用智能手机实现室内定位时，充分利用智能手机上搭载的各类传感器，综合多种指纹数据，能够显著的提高位置指纹的区分度，本文以地磁数据作为基础，结合智能手机上收集的其他信息设计了几种位置指纹。

4.2.1 二维位置指纹

在 3.1.2 中,介绍了两种进行水平化处理的方法,其中第一中水平化的处理中用到的是所在地区的磁偏角和磁倾角信息,这一数据可以通过世界地磁场模型(World Magnetic Model, WMM)中获取^[54],使用的是 WMM2015 的数据,由美国的国家地球物理资料中心(National Geophysical Data Center, NGDC)发布,其示意图如 4-4 所示。

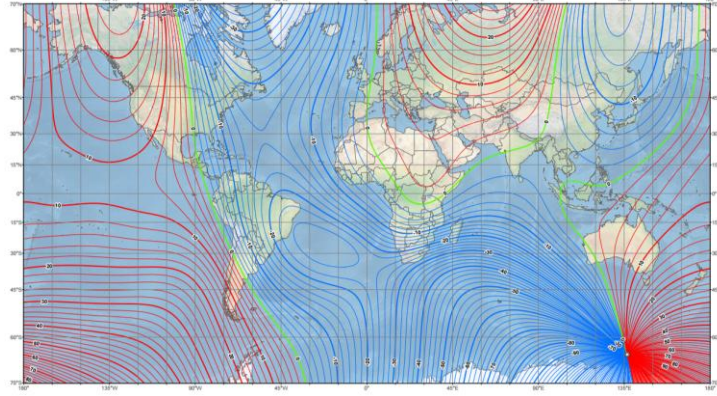


图 4-4 世界地磁场模型 (WMM2015)

然而这种处理方法得到的是一个地区的磁倾角信息,对于小区域内的定位而言,数据的精度低,水平化处理无法得到满足精度的信息。考虑到在记录下地磁数据的同时,智能手机也能够记录下陀螺仪的信息,Android 系统中陀螺仪的读数正代表着手机相较水平面的偏转^[30],因此,采用另一种基于智能手机姿态信息进行水平化的处理方法,借助陀螺仪得到的手机偏转信息将地磁数据投影到水平坐标系:

通过这种处理后,每一个位置处得到形式为 (M_x, M_y) 的一条数据,所有位置数据的集合作为:

$$\left\{ \begin{array}{l} (Loc^1, M_x^1, M_y^1), \\ (Loc^2, M_x^2, M_y^2), \\ \dots \\ (Loc^n, M_x^n, M_y^n) \end{array} \right\} \quad (4-10)$$

其中 n 代表整个室内区域采集的点的个数, Loc 表示的是该条数据实际的位置信息。以此作为定位的位置指纹图供后续定位使用。

这种处理方法每个位置只需存储一条数据,且位置指纹不依赖于手机在这个位置处的偏转和朝向,当然,在将原本传感器采集的三维数据转换成二维数据,在加快了定位计算速度的同时也降低了数据的区分度。而且经试验,陀螺仪采集

的数据的准确度还不足以准确的反应出手机的实际形态,这使得上述计算中用到的各个方向角信息不够准确,使经过综合处理后的位置指纹有着较大的误差。

4.2.2 地磁和方向混合位置指纹

进行水平转换的处理会降低原有地磁数据的辨识度,且这样处理的位置指纹要求获得智能手机形态的精确值,这为位置指纹的搭建带来了困扰。我们在要求定位时智能手机保持相对地面水平的前提下,可以只考虑手机的朝向,即方向,结合地磁数据进行定位。

智能手机方向的判定可以通过手机内搭载的陀螺仪或方向传感器得到。

位置指纹以公式 4-11 所示构建,存储为:

$$\left\{ \begin{array}{l} (Loc^1, Ori^1, M_x^1, M_y^1, M_z^1), \\ (Loc^2, Ori^2, M_x^2, M_y^2, M_z^2), \\ \dots \\ (Loc^i, Ori^i, M_x^i, M_y^i, M_z^i), \\ \dots \\ (Loc^n, Ori^n, M_x^n, M_y^n, M_z^n) \end{array} \right\} \quad (4-11)$$

其中 n 是整个地磁指纹库中数据的条数, i 为 1 到 n 之间的任意整数,每一行代表着一条地磁指纹数据。

对于每一行数据, Loc 表示这条数据在地图上的位置, Ori^i 为手机的方向信息; M_x^i, M_y^i, M_z^i 分别为三轴地磁传感器采集到的数据,而所有位置数据组成了地磁指纹图供后续定位使用。

这种处理方法在完整保存原始地磁数据的同时又能够结合手机的方向信息做判断,在进行数据采集时,在每个位置,持智能手机绕原地旋转一周,记录下手机在不同方向时的地磁场信息,在进行定位计算时,通过调节方向信息和地磁信息的权重值达到最好效果。这种方法的缺点在于在每一个位置都需要采集足够的的数据,在室内区域较大,需要采集的点够多的时候,需要更长的时间来进行计算。此外,实际的采集过程中,如果是由人来操作,在旋转的过程中比较难把握住手机方向的细微变化。

4.2.3 地磁变化率位置指纹

考虑到不同设备采集的地磁数据的数值存在着一定的差异,但整个区域内地磁数据的变化趋势却能够被所有的智能手机正确的捕捉,设计了一种基于地磁变化率的位置指纹。

首先,根据室内区域的平面图,设定区域内的不同的轨迹路线,这些轨迹路线应该能够覆盖整个区域内人的活动范围,对于每一条轨迹,沿着轨迹行走,

途中手持智能手机，每一步记录一次数据。最终，记录下平面图中所有路径上的数据变化情况。

接着对数据进行处理，一条路径上包含着如下的数据集：

$$\begin{pmatrix} (M_x^1, M_y^1, M_z^1) \\ (M_x^2, M_y^2, M_z^2) \\ \vdots \\ (M_x^n, M_y^n, M_z^n) \end{pmatrix} \text{ (其中 } n \text{ 代表路径上包含数据的条数)} \quad (4-12)$$

先计算每一条地磁矢量的模，令：

$$|M^i| = \sqrt{(M_x^i)^2 + (M_y^i)^2 + (M_z^i)^2} \quad (4-13)$$

得到如下所示的数据集：

$$\begin{pmatrix} (|M^1|, M_x^1, M_y^1, M_z^1) \\ (|M^2|, M_x^2, M_y^2, M_z^2) \\ \vdots \\ (|M^n|, M_x^n, M_y^n, M_z^n) \end{pmatrix} \text{ (其中 } n \text{ 代表路径上包含数据的条数)} \quad (4-14)$$

分别计算

$$\begin{cases} \Delta|M^i| = (|M^{i+1}| - |M^i|)/|M^i| \\ \Delta M_x^i = (M_x^{i+1} - M_x^i)/M_x^i \\ \Delta M_y^i = (M_y^{i+1} - M_y^i)/M_y^i \\ \Delta M_z^i = (M_z^{i+1} - M_z^i)/M_z^i \\ M_x^i \neq 0, M_y^i \neq 0, M_z^i \neq 0 \end{cases} \quad ((i \text{ 为 } 1 \text{ 到 } n-1 \text{ 间的整数})) \quad (4-15)$$

而 $(\Delta|M^i|, \Delta M_x^i, \Delta M_y^i, \Delta M_z^i)$ 就是以地磁变化率为位置指纹的数据库中的一条数据，知道这一条数据属于区域内的哪一条路径，由 i 的取值也能够推出这一点在路径中的位置，利用这一数据能够实现定位。当然，在实际的定位计算中，往往是预先采集一整条路径上的变化情况，由这一段的变化情况进行定位。

4. 3定位算法设计

4. 3. 1最邻近法

最邻近法是一种简单而又直接的匹配方法，适用于多种位置指纹。邻近算法也可以看作是 k 最邻近法 (KNN) 的一种特殊情况，假定待计算的数值能够用欧式空间里的点来表示，根据最优解判断准则，选择欧式空间，即欧几里德空间中和待匹配点之间距离最近的点作为结果。

最邻近法中计算主要以欧几里德度量为标准，即欧式距离，是一种通用的定义距离的方法，能够代表某一确定维度中所处的两个点的实际的距离。最邻近法

通过欧式距离来进行衡量，是一种确定性的匹配。作为一种度量空间，欧几里德空间可以被扩展到任何维度，适用于本文所提出的二维或是更多维的位置指纹，其计算分别如下。

(1) 适用于二维位置指纹的情形

针对进行坐标转换后数据格式为 (M_x, M_y) 的位置指纹，位置指纹数据库中的数据可以表示为：

$$\begin{pmatrix} (M_x^1, M_y^1) \\ (M_x^2, M_y^2) \\ \vdots \\ (M_x^n, M_y^n) \end{pmatrix} \text{ (其中 } n \text{ 代表地磁矢量图中点的总数)} \quad (4-16)$$

计算待定位数据和位置指纹图中每条数据间的欧式距离 L_i ：

$$L_i = \sqrt{(M_x - M_x^i)^2 + (M_y - M_y^i)^2} \quad (4-17)$$

找出 $L_{min} = \min\{L_i\}$ 其中 i 为 1 到 n 之间的任意整数

此时 L_{min} 对应的点作为定位的结果。

(2) 适用于三维位置指纹的情形

针对数据格式为 (M_x, M_y, M_z) 的位置指纹，位置指纹数据库中存储的数据可以表示为：

$$\begin{pmatrix} (M_x^1, M_y^1, M_z^1) \\ (M_x^2, M_y^2, M_z^2) \\ \vdots \\ (M_x^n, M_y^n, M_z^n) \end{pmatrix} \text{ (其中 } n \text{ 代表地磁矢量图中点的总数)} \quad (4-18)$$

计算待定位数据和位置指纹图中每条数据间的欧式距离 L_i ：

$$L_i = \sqrt{(M_x - M_x^i)^2 + (M_y - M_y^i)^2 + (M_z - M_z^i)^2} \quad (4-19)$$

找出 $L_{min} = \min\{L_i\}$ 其中 i 为 1 到 n 之间的任意整数

此时 L_{min} 对应的点作为定位的结果。

算法流程如下：

表 4-4 最邻近法算法流程

输入：地磁传感器和方向传感器实时收集的数据，地磁指纹图 V ；

输出：定位结果 loc ；

功能：利用计算欧式距离的方法进行定位。

Begin

1. 智能手机采集当前位置的信息，通过连接发送到服务器；
2. 服务器接受消息，拆分得到地磁数据 magx、magy、magz 和方向数据 orix、oriy 和 oriz；
3. 对原始数据水平化，得到数据 Mx、My；/*若采集了多次，则先进行滤波处理*/
4. For 地磁指纹图中每个点 do
5. 计算地磁指纹上的点与待定位点间的欧式距离；
6. If 当前的距离值小于之前所有点计算的值；
7. {待定位点的位置用当前的点来表示；}
8. End If
9. End For
10. 结束循环后，得到与待定位点间欧式距离最小的点 x；
11. 将 x 的信息作为定位结果 loc 返回；
12. 在客户端显示定位结果；

End

对上述方法进行改进，提出一种范围搜寻定位算法。

对于结合了方向和地磁数据的位置指纹，其格式为 (Loc, Ori, Mx, My, Mz)，地磁矢量图存储的数据集 V 可以表示为：

$$\begin{pmatrix} (Loc^1, Ori^1, M_x^1, M_y^1, M_z^1) \\ (Loc^1, Ori^2, M_x^2, M_y^2, M_z^2) \\ \dots \\ (Loc^m, Ori^n, M_x^n, M_y^n, M_z^n) \end{pmatrix} \quad (4-20)$$

其中 m 代表地磁矢量图中点的总数，而 n 为整个位置指纹数据库中数据的条数，一个位置信息 Loc^k 代表这 m 个点中的一个，它对应着方向信息 Ori 和地磁信息 M_x, M_y, M_z 不同的多条数据。

在匹配时，智能手机采集的数据为 $(Ori^0, M_x^0, M_y^0, M_z^0)$ ，先根据待定位数据的方向信息 Ori^0 ，筛选出在一定阈值内的数据，再计算三维欧式距离进行定位。

算法流程如下：

表 4-5 范围搜寻算法

输入：地磁传感器和方向传感器实时收集的数据，位置指纹图 V；

输出：定位结果 loc；

功能：最邻近法结合范围搜寻进行匹配计算。

Begin

1. 智能手机采集当前位置的信息，通过连接发送到服务器；
2. 服务器接受消息，拆分得到地磁数据 magx、magy、magz 和方向数据 orix、oriy 和 oriz；

3. For 地磁指纹图 V 中每条数据 do

If 该条数据位置信息 Ori^i 与匹配位置信息 Ori^0 间存在：

$$|Ori^0 - Ori^i| < \lambda \quad (4-21)$$

(其中 λ 为预先设定的阈值，i 为从 1 到 n 的整数)

4. {将这一条数据加入这次计算的数据集 V' ；}

5. End If

6. End For

7. For 数据集 V' 中的每一条数据 do

8. 计算与待定位数据间的欧式距离；

$$L_i = \sqrt{(M_x^0 - M_x^i)^2 + (M_y^0 - M_y^i)^2 + (M_z^0 - M_z^i)^2} \quad (4-22)$$

9. If 数据集 V' 中的第一条数据进行计算

10. {令最小值 $L_{min} = L_1$ }

11. Else If 这一次的计算结果 $L_i < L_{min}$

12. {令最小值 $L_{min} = L_i$ }

13. End If

14. End For

15. 结束循环后 L_{min} 所代表的点作为定位匹配的结果；

16. 将 x 的信息作为定位结果 loc 返回；

17. 在客户端显示定位结果；

End

4. 3. 2 Hausdorff 距离法

Hausdorff 距离即豪斯多夫距离^[12]，主要计算的是空间内真子集之间的距离，对于欧式空间内的两个点集 $A = \{a_1, a_2, \dots\}$ 和 $B = \{b_1, b_2, \dots\}$ ，其 Hausdorff 距离表示为：

$$H(A, B) = \max(d(A, B), d(B, A)) \quad (4-23)$$

其中, $d(A,B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\|$, $d(B,A) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\|$, 而 $\|\cdot\|$ 表示距离范

数如欧式范数

Hausdorff 距离作为表示最大和最小的距离的方法, 能够对两个集合的匹配度进行度量, 度量的是子集间的最大不匹配, 这种方法较为稳定, 且可靠性较高, 适用于定位的匹配计算中, 如有学者在 TERCOM 算法中引入了 Hausdorff 距离, 有效的提升了在水下利用地磁进行导航的精确度和可靠性^[1], 或是和地磁熵结合实现地磁辅助惯性导航^[55]。

利用 Hausdorff 距离的流程如下所示:

表 4-6 Hausdorff 定位算法

输入: 地磁传感器和方向传感器实时收集的数据, 位置指纹图 V ;

输出: 定位结果 loc ;

功能: 使用 Hausdorff 距离进行匹配计算。

Begin

1. 智能手机采集当前位置的信息, 通过连接发送到服务器;

服务器接受消息, 拆分得到一组数据集 A , A 可以表示为:

$$\begin{pmatrix} (M_x^1, M_y^1, M_z^1) \\ (M_x^2, M_y^2, M_z^2) \\ \vdots \\ (M_x^n, M_y^n, M_z^n) \end{pmatrix} \quad (4-24)$$

2. For 数据集 A 中的每一条数据 $a(i) = (M_x^i, M_y^i, M_z^i)$

3. For 地磁指纹图 V 中每条数据 do

4. //计算 Hausdorff 距离 $h(A, V)$

5. 计算这条数据和 $a(i)$ 间的欧式距离

6. If 数据集 V 中的第一条数据进行计算

7. {令最小值 $L_{min} = L_1$ }

8. Else If 这一次的计算结果 $L_i < L_{min}$

9. {令最小值 $L_{min} = L_i$ }

10. End If

11. End For, 得到 $L_{min}^i = L_{min}$

12. End For, 令 $h(A, V) = \min\{L_{min}^i\}$, i 属于 1 到 n ,

13. For 地磁指纹图 V 中每条数据 $v(i) = (M_x^i, M_y^i, M_z^i)$


```

14.   For 数据集 A 中的每一条数据 do
15.     //计算 Hausdorff 距离 $h(V, A)$ 
16.     计算这条数据和 $a(i)$ 间的欧式距离
17.     If 数据集 $V$  中的第一条数据进行计算
18.       {令最小值 $L_{min} = L_1$ }
19.     Else If 这一次的计算结果 $L_i < L_{min}$ 
20.       {令最小值 $L_{min} = L_i$ }
21.     End If
22.   End For, 得到 $L_{min}^i = L_{min}$ 
23. End For, 令 $h(V, A) = \min\{L_{min}^i\}$ ,  $i$  属于 1 到  $n$ ,
24. 而  $H(A, V) = \max\{h(V, A), h(A, V)\}$ ,  $V$  中的这一条数据所
    代表的实际位置的点就是匹配的结果

```

End

考虑到在利用地磁数据的变化率进行定位时,采集的到的地磁的变化情况同样是一个数据集,通过和地磁指纹数据集之间的匹配进行定位,因此,也可以将 Hausdorff 距离的测算运用在以地磁变化率为位置指纹的定位方式上,这里的数据集 A 是智能手机在一段路径上采集的地磁数据处理得到的, $A = \{a1, a2, \dots\}$, 其中每一条数据的格式为 $(\Delta|M^i|, \Delta M_x^i, \Delta M_y^i, \Delta M_z^i)$ 。

4.3.3 投票匹配算法

考虑到的是地磁数据存在着容易受干扰和设备间存在差异的情况,除了利用地磁的变化率作为位置指纹进行定位,设计了一种非确定性的匹配算法-投票匹配定位法,通过综合考虑待定位数据的各个分量和地磁指纹数据之间的匹配程度来进行定位。投票匹配算法主要包括两个步骤,一是投票过程,通过待定位数据中的每个分量和位置指纹库中每条数据相对应的分量间的匹配,如果符合条件则投一票,二是投票结束后的判断过程,包括对投票结果的排序和投票数最高的点多于一个是的判定,这里通过计算欧式距离的方式从中选出一条作为定位结果。

算法的流程图如下所示:

表 4-7 投票定位算法

```

输入: 地磁传感器和方向传感器实时收集的数据, 地磁指纹图  $V$ ;
输出: 定位结果;
功能: 利用投票法进行定位匹配。
Begin

```

```

1. 智能手机采集当前位置的信息，通过连接发送到服务器；
2. 服务器接受消息，拆分得到地磁数据 magx、magy、magz 和方向
   数据 orix、oriy 和 oriz；
3. 对原始数据做滤波处理，得到 (Mx, My, Mz) 形式的数据；
4. For 地磁指纹图中每个参考点 do
5.     得到每个参考点处，x y z 三个轴的数值范围；
6.     For (Mx, My, Mz) 中的每个轴 do；
7.         If 其数值在参考点的区间内；
8.             {投这个参考点一票；}
9.     EndFor /*判断一个点*/
10. EndFor /*投票结束*/
11. If 票数最多的点不唯一；
12.     {For 每个得票数最多的点 do
13.         计算与待定位点的欧式距离；
14.     EndFor
15.     从中取欧式距离最小的点为定位结果}；
16. Else
17. {取得票最高的点为定位结果；}
18. 服务器向客户端返回定位结果；
19. 在客户端显示定位结果；

```

End

投票匹配法的优点在于通过模糊判断的方法减少了原始数据变化、设备差异等因素带来的影响，而且直接考虑了各个分量的匹配程度，但当室内区域的范围较大，包含的点较多时，投票法的效率会有所降低。

4.4 本章小结

本章主要介绍的是在室内进行地磁定位时涉及的算法。主要包括原始数据的处理、定位方法即位置指纹的设计和匹配算法的设计。

5 室内定位系统的设计与实现

5.1 室内定位系统设计

5.1.1 系统架构设计

定位系统利用的主要是区域内磁场信息的差异性。这种差异性代表着不同区域具有各自区别于其它区域的地磁场特征，利用该特征我们可以通过移动端采集所在的位置指纹实现室内定位功能。本文中的定位过程也能看做是地磁匹配的过程，这种通过计算待测数据和基准图之间的相关性程度的方法称作相关分析方法^[10]。定位过程分为离线训练和在线匹配两个阶段，其具体的过程在图 5-1 中：

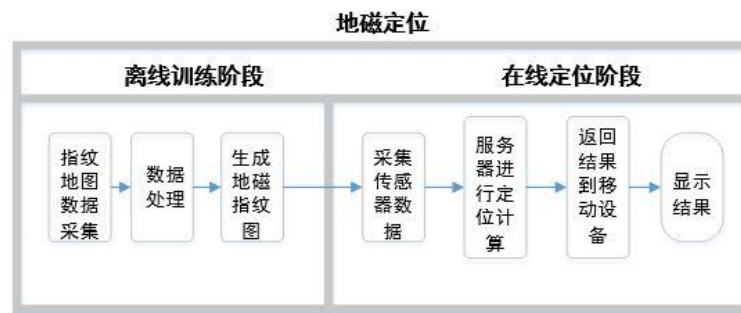


图 5-1 地磁定位流程图

离线训练的目的是生成位置指纹。为此需要在指定区域内采集地磁数据等匹配信息，且记录下每次采集时所处的位置，多次的测量后通过滤波算法、坐标转换等方式减少误差以提高数据的精度。在得到了位置指纹图的基础上，进行在线的定位。选取合适的匹配算法，当移动设备采集到当前所处位置的地磁信号等信息并返回后，通过匹配计算，得到定位结果并返回。

而室内地磁定位系统可以分为测量模块、数据处理模块、匹配运算模块和显示模块几个部分构成，其示意图如图 5-2 所示：

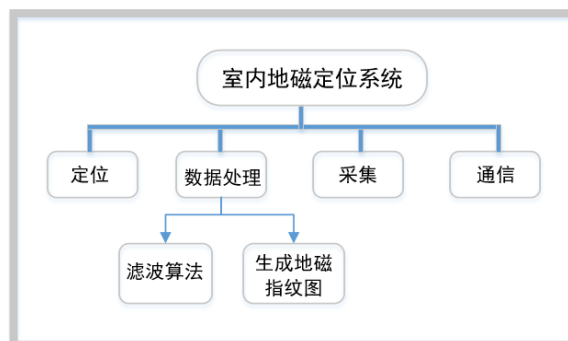


图 5-2 功能模块示意图

测量模块在数据预采集时和定位时通过智能手机采集当前位置下地磁传感器等的数值；

数据处理模块则负责对智能手机收集到的数据进行一些处理，通过滤波算法等方法减少误差；

匹配运算模块则在接收到智能手机传输的待定位数据后进行匹配计算，得到定位结果并返回；

而显示模块主要是进行数据采集时地图和采集位置的显示、定位界面及定位结果的显示。

整个定位系统进行定位的步骤主要为：

（1）在需要进行定位的室内区域建立坐标系，在平面图的基础上将平面信息以数字网格的形式绘制，同时对于每一个网格，在室内区域相对应的实际位置，按设计的位置指纹采集数据，对于每一个网格，也就是定位的坐标参考点，处理并存储采集到的数据，构成整个定位系统的位置指纹图；

（2）通过智能手机上的地磁传感器，能够获取当前智能手机所处位置的读数的实时值，在需要进行定位时，智能手机记录当前时刻包括地磁传感器在内的传感器的值，并通过网络发送给服务器；

（3）服务器在接收到数据后进行定位，定位阶段运用相关匹配算法，通过设计的匹配算法将智能手机发送信息和位置指纹数据库中的信息进行比较和匹配，根据匹配算法找出位置指纹数据库中和智能手机发送的信息匹配度最高的一组，以这一组数据作为用户在室内区域中的最佳匹配位置；

（4）服务器返回结果并在手机端输出。

整个系统的定位流程如图 5-3 所示：

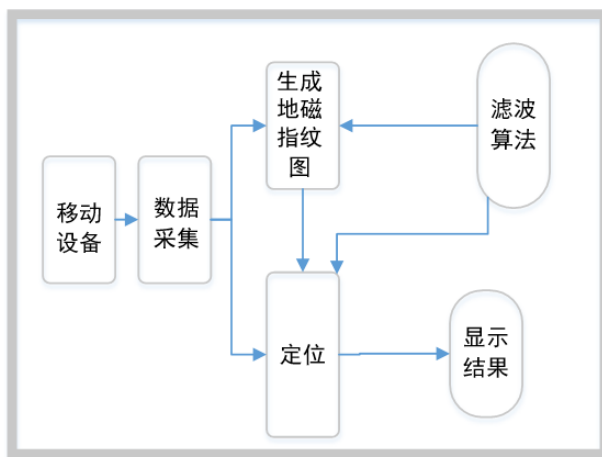


图 5-3 系统流程示意图

5.1.2 系统详细设计

系统详细设计主要是本室内地磁定位系统中各个模块的详细设计。

(1) 定位模块

定位模块主要是进行定位计算，由服务端实现，当输入当前客户端传感器的数值后，通过和地图数据的匹配算法进行运算，最后得到定位的结果。

1) 点击“定位”后定位客户端通过 socket 的形式将待定位数据发送到服务器端；

2) 在接收到数据后，先对待定位数据进行一些预处理；

3) 进行定位计算，得到匹配度最高的点作为结果；

4) 服务器端显示并将结果发送到智能手机。

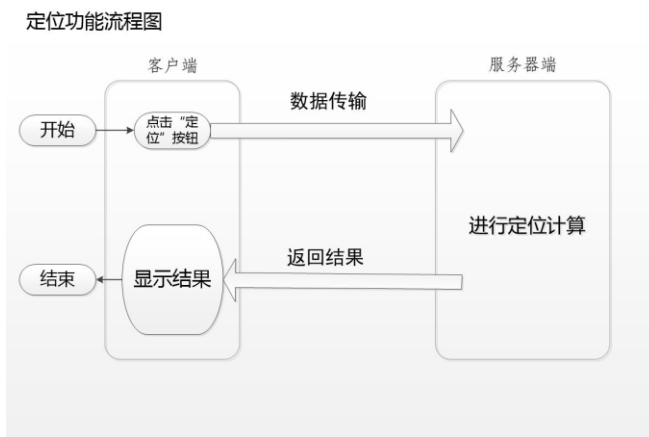


图 5-4 定位流程示意图

(2) 数据处理模块

数据处理模块用于对采集的数据进行处理，由服务端实现，主要的内容包括：通过滤波处理剔除一些波动过大的点，通过数据预处理将原始数据转换成适合定位的形式。数据处理模块的实现流程如下：

首先输入需要进行处理的文件路径，读取文件的信息；接着根据需要进行的处理方法，一次读入一条数据或是一组数据；对读入的数据进行处理并写入文件；判断是否还有数据需要处理，若有，则再次读入数据；知道处理完所有的数据，保存文件。其流程示意图如图 5-5 所示

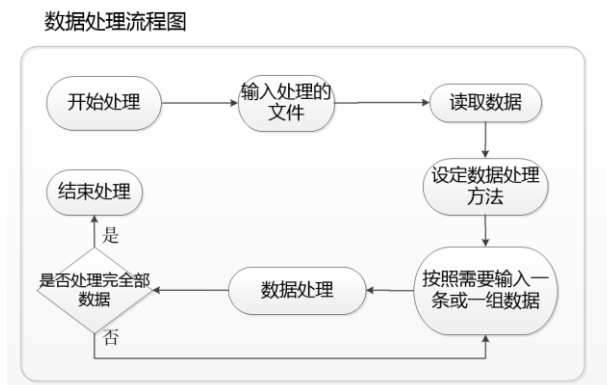


图 5-5 处理流程示意图

(3) 地图数据采集模块

地图数据采集模块主要用于预先制作指定区域内的地磁数据图，或称地磁指纹图，先在智能手机上采集室内各处的数据并保存，接着由服务端生成指纹图后将结果保存。这里涉及到数据的存储问题。

数据预采集流程图：

- 1) 在区域内相应位置，由“采集”功能存储数据，可多次进行；
- 2) 采集到足够的数据后，点击“移动到下一个点”，开始记录下个位置的传感器数据，同时将设备移动到该位置；
- 3) 重复上述两步操作直到采集完所有的点；
- 4) 采集完后的数据先需要进行处理。

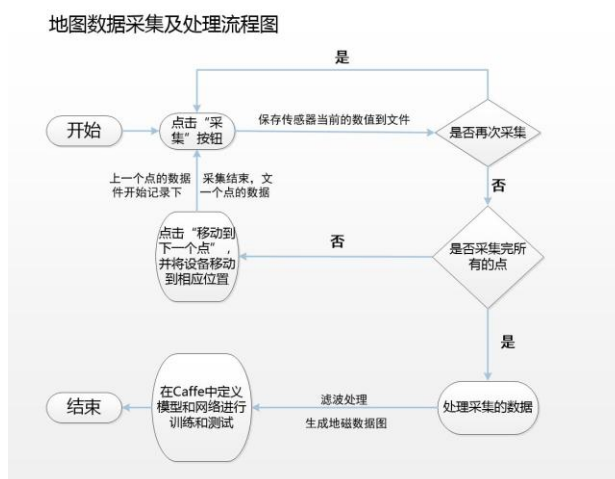


图 5-6 采集流程示意图

(4) 通信模块

通信模块主要是前后端的连接和传输问题，主要是采集的数据和定位结果的传输。当前版本的程序，需要二者连接在同一个网络内是建立点对点的连接。后

续能够通过部署服务器的方式解除对网络的限制,客户端可以通过任意网络连接的方式和服务端之间建立连接。

当前通过 Socket 建立链接。Socket 是一组接口,是应用层与 TCP/IP 协议族之间进行通讯功能的实现,它把协议汇总的一些复杂的操作抽象化,我们能够通过简单的调用其提供的接口实现在网络中的相互通信,Socket 的通信原理和通信的流程如图 5-7 所示。

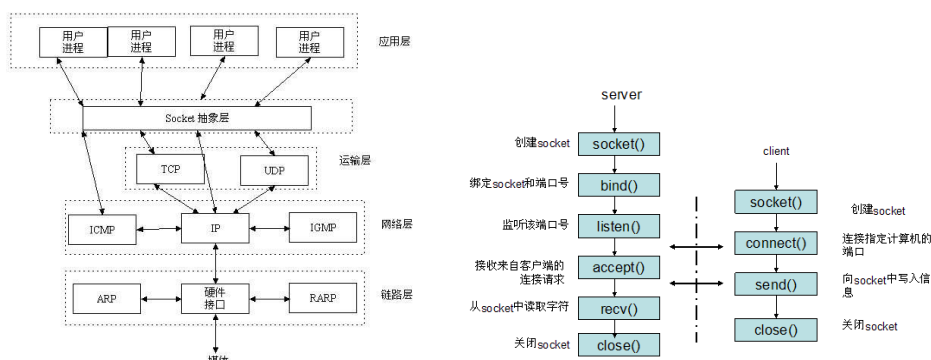


图 5-7 Socket 通信原理及通信流程图

本文基于的通信功能通过 Socket 实现,服务器端创建 Socket,在进入定位页面并点击定位按钮后,客户端发起连接请求,与创建的 Socket 连接,随后把这次定位所需要的内容传输给实现定位的后台进行定位计算,之后同样利用两者间的连接将定位结果发回给应用,在界面上进行定位位置的展示,随后二者断开连接,完成这一次定位的过程,其示意图如图 5-8 所示。

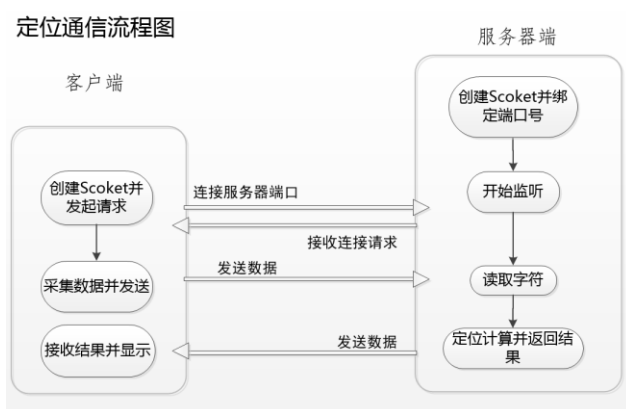


图 5-8 定位通信流程图

5. 2系统实现

5. 2. 1智能手机端实现

智能手机端使用 Android Studio 实现，选用 Android Studio 作为开发工具的一个重要因素是其作为获得 Android 官方也就是 Google 公司支持的开发工具，其和 Android 系统的适应性和贴合性优秀，而且工具的使用简单方便，支持与 GitHub 的同步且有着功能强大的各种插件。在开发时选用 Android Studio 3.1 (build 173.4670197) 版本，在调试时使用 Genymotion 模拟器和坚果 pro 手机相结合进行调试。

Genymotion 是当前主流的一种模拟器，其功能强大又节省资源，部署前先完成模拟器的安装，之后在 Android Studio 的 Preferences 中点击 Plugins，搜索 Genymotion，安装插件，之后菜单栏中会出现小图标，点击即可进入模拟器启动页面，可以选择设备启动或是管理虚拟的设备，这一流程如下图所示：

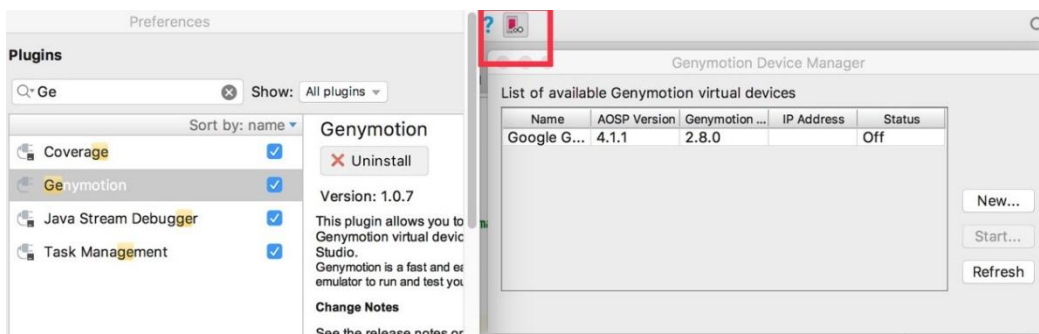


图 5-9 Genymotion 安装及使用

客户端程序的版本属性等在 build.gradle 中保存，而程序自身的一些关键设置和配置如 APP 的权限控制等则在 AndroidManifest.xml 文件中存储。本系统的客户端程序对于 Android 系统的要求为：目标版本 targetSdkVersion 为 24，即 Android 7.0 牛轧糖；而最低兼容版本 minSdkVersion 为 17，即 Android 4.2。

智能手机端主要包括数据的采集和定位功能页面，搭载在 Android 平台上，系统的首页及主要功能页面如下图所示：



图 5-10 手机端主要页面

在首页及其他的子页面的右下角中都有一个玫红色的返回悬浮按钮，由 Android 中的 `FloatingActionButton` 部件实现。点击按钮时，在定位或采集的子页面中，点击这一按钮后通过调用 `Activity` 的 `finish()` 方法回到首页，而在首页点击这一按钮，则新建 `AlertDialog` 的确认选择框，让用户选择是否退出程序，这在许多的安卓手机都取消了返回实体键的情况下能够方便用户的操作。

在选择存储路径时，通过新建属性为 `ACTION_GET_CONTENT` 的 `Intent`，跳转到系统自带的文件管理系统，选择文件后由 `addCategory(Intent.CATEGORY_OPENABLE)` 方法得到选择的文件路径，这使得在进行文件采集时文件存储的选择更为灵活。

首页上通过竖排的形式展示对应定位区域的图片，可以通过点击图片的形式跳转到相应的定位页面，分别点击首页的图书馆图片和实验大楼图片，跳转的页面如下图所示：



图 5-11 手机端定位页面

点击定位按钮,智能手机上的手机端收集当前的各项数据,发送给服务器端,手机和服务端端的连接需要通过 IP 地址,为了方便服务器和客户端之间的连接,将 IP 地址存储在一个 properties 文件中,通过 FileInputStream 和 FileWriter 实现对配置文件的读写。

后台进行定位计算后,将结果返回,设计了 showLocate() 方法,通过定位的结果,结合定位区域的网格分布推算出定位结果所处的位置,进而推算出定位结果在平面图上的坐标,接着新建一个 Bitmap 类型的变量代表屏幕上显示的地图的区域,利用 Canvas 画布的 drawBitmap() 方法,以区域平面图作为背景,在定位结果的坐标处绘制定位标记,将 Bitmap 类型的结果存储并在页面上刷新,通过把平面图和定位标记绘制到一个画布上的形式实现了定位结果在屏幕的显示。

定位结果的显示如图 5-12 所示:



图 5-12 手机端定位结果显示

从首页的右上角,能够进入数据采集页面,数据采集页面能够选择相应的文件、采集哪个位置的数据,数据采集的步骤如下:

- (1) 打开智能手机端的 APP,进入需要进行定位的室内区域;
- (2) 根据区域内预先设定的地图,选择对应的存储路径,在每个参考坐标点处标记当前所在的点,记录下当前智能手机的读数,数据保存在 Excel 表格中;
- (3) 在一个点处可以多次采集数据,每次成功采集数据后会有弹窗提示;
- (4) 当完成这一位置的信息收集后,移动到下一个位置,输入点的序号,再次进行数据的采集;
- (5) 采集完所有点处的数据后,将 Excel 文件放到服务端的电脑目录下,手机采集及采集结果如图 5-13 所示:



图 5-13 手机端采集过程

整个手机端主要负责的是对传感器数据的收集和定位结果的显示，而定位计算和一些数据的处理都在后台有服务器端实现。

5.2.2 服务器端实现

服务器端主要的功能包括对数据的一些预处理和定位的计算，使用 JAVA 语言实现。

数据处理的主要步骤如下：

(1) 数据提取

这一步是从采集的原始数据中取出有用的部分。尽管不同的位置指纹所用到的数据并不一致，采集时记录的数据的格式如下：

参考点	地磁传感器			方向传感器		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	138.1592	-93.3685	-4.37164	268.6605	-7.73611	0.025074
1	137.056	-99.1364	-4.55627	264.8271	-12.6522	2.565385

图 5-14 原始数据格式图

如果在采集数据时遗漏了某些位置，采用 4.1.3 中提到的内插算法进行计算。为了和其他的处理过程集成，这里通过 Java 语言实现，通过导入实现克里金插值法的包文件 jk3d.jar，在配置文件 jk3d.par 中定义输入文件 data.dat、输出路径，以及 $(-nx, xmn, xsiz)$ 、 $(-ny, ymn, ysiz)$ 和 $(-nz, zmn, zsiz)$ 等划定范围的参数，接着输入待处理结果，运行代码：jk3d j=new jk3d(path)，其中 Path 表示文件的位置，输出路径中存储的就是处理后结果。

本文设计的内插方法适用于对地磁数据的内插，由于室内区域的地磁场分布是受环境中磁性物质的影响，没有这些影响因素在室内的分布及影响程度的度量，

插值得到的结果并不能很好的代替实际的地磁数据，特别是需要进行插值的区域较大时，插值结果用做位置指纹的效果并不好，因此，在实际实验时，通过对室内平面分布和采集路径的合理规划，尽量避免出现遗漏或是无法采集数据的情况。

从原始数据中提取出需要的数据后，按照不同位置指纹的设计进行滤波的处理。

（2）滤波处理

对于滤波处理，首先是将读取需要处理的数据。差值滤波处理的主要作用是提出一组连续的数据中波动过大的点，而中值滤波处理则从一组数据中找出一条数据，在处理时分开考虑数据的地磁传感器的三个分量。

读入一组待处理的数据后，差值滤波处理先计算出这组数据相邻的两者之间的差，得到数据间差值的平均值，随后依次进行筛选，若相邻两条数据的差值和平均差值距离的绝对值大于预先设定的阈值，即 $|M_x^{k+1} - M_x^k| - Acc > Avg_x^i$ ，那认定这条数据的波动过大，将其移除。

这种处理方法考虑到的是，对于在一个位置处多次采集的数据或是连续采集的一组数据，其数值的变化应是相对的平滑的，当数据的波动过大时，很可能是在采集时人为的误差引起的，这一方法一是适用于在当手机保持固定采集了多组数据后，进一步的剔除其中偏离过大的点，或是对于在一段路径或轨迹上连续采集的一组数据，排除掉其中可能因为行走过程中的设备姿态变化等因素对采集的数据带来的影响。

图 5-15 是进行差值处理时的过程截图，上面展示的是在对二维位置指纹进行处理的过程。

```
<terminated> DataProcess [Java Application] C:\Program Files\Java\jre1.8.0_101\bin\javaw.exe (2018年4月8日 下午4:47:34)
从C:\temp\data.xls中读取数据共49条
处理第1个点处的数据
ave_diff_x:0.9347991943359375
ave_diff_y:1.850759560546675
存储数据到:c:\temp\dataresult.xls成功
处理第2个点处的数据
ave_diff_x:-0.530181884765625
ave_diff_y:0.5418180985884233
存储数据到:c:\temp\dataresult.xls成功
处理第3个点处的数据
ave_diff_x:0.7224993024553571
ave_diff_y:0.7224993024553571
差值滤波:将第:9行数据剔除
差值滤波:将第:10行数据剔除
ave_diff_x:0.3934167226155599
ave_diff_y:0.3934167226155599
存储数据到:c:\temp\dataresult.xls成功
处理第4个点处的数据
ave_diff_x:5.729499816894531
ave_diff_y:0.7224993024553571
差值滤波:将第:0行数据剔除
差值滤波:将第:2行数据剔除
ave_diff_x:-1.7690010070800781
ave_diff_y:-1.7690010070800781
存储数据到:c:\temp\dataresult.xls成功
```

图 5-15 差值滤波处理过程图

中值滤波处理最终的结果是从多条数据中挑选出一条来代表这一组数据，主要分为两步，先计算整组数据的平均数，把与这个值的差距过大的点剔除，接着，这组数据进行排序，选则中间的一条或是中间两条数据的平均值作为中值，中值滤波能够在不损失数据原有信息的前提下从多条数据中提取一条数据。

（3）数据格式转换

并非所有的数据都要进行数据格式的转换,其中坐标变换这一处理针对的是二维位置指纹这种定位方式,本文中提出并介绍了进行水平化处理的流程和伪代码。在这一步中的处理就是对于输入的所有数据,每一条都包括地磁传感器采集和方向传感器采集的数据,利用公式(4-3)到(4-6)对每一条数据进行水平化处理,得到一条(x,y)形式的数据,将结果并保存,具体流程如图5-16。

```

133 for (int i = 0; i < listSD.size(); i++) {
134     SensorData sdhor = new SensorData();
135     // 先将数据处理的 一条数据,并提取出其中的待处理元素
136     sdhor = listSD.get(i);
137     float M_MagneticX = sdhor.getM_MagneticX();
138     float M_MagneticY = sdhor.getM_MagneticY();
139     float M_MagneticZ = sdhor.getM_MagneticZ();
140     float M_OriX = sdhor.getM_OriX();
141     float M_OriY = sdhor.getM_OriY();
142     float M_OriZ = sdhor.getM_OriZ();
143     // 处理后的数据
144     float n_MagX, n_MagY;
145     n_MagX = (float) (M_MagneticX * Math.cos(M_OriX)
146                     + M_MagneticY * Math.sin(M_OriX) * Math.sin(M_OriY) - M_MagneticZ
147                     * Math.sin(M_OriX) * Math.cos(M_OriY));
148     n_MagY = (float) (M_MagneticY * Math.cos(M_OriY) + M_MagneticZ
149                     * Math.sin(M_OriY));
150     System.out.println("X:" + M_MagneticX + ",Y:" + M_MagneticY + "处理后的结果为: " + ("n_MagX"
151     listSD.get(i).setM_MagX(n_MagX);
152     listSD.get(i).setM_MagY(n_MagY);
153 }

```

图 5-16 水平化坐标转换示意图

对于混合方向和地磁信息的位置指纹,在对数据进行滤波处理后无需再对数据进行转换;对于以地磁变化率作为位置指纹的定位方式,依次计算每一条路径上采集的地磁数据变化率的变化情况,再按路径将变化率进行存储。

(4) 生成位置指纹图

按照不同类别的位置指纹的设计,对于经过了滤波和数据格式转换后的存储的文件,将文件中的数据和实际地图上的位置关联起来,如对于下图所示的平面,通过将整个的定位区域划分成网格,规定了以网格左上角开始标记,为整个平面图上的每一个网格进行编号,而这个编号和采集的数据中记录的点的编号相匹配,这些采集并处理的数据和整张平面图的各个位置的匹配关系就构成了定位的位置指纹图,位置指纹可以以文件的形式,如保存在 Excel 文件或 CSV 文件中,也可以存储在数据库当中,在进行定位计算时,需要使用哪一套位置指纹图,就提取出相应的数据,而定位结束后得到的定位结果,通过这条数据和平面图的对应关系就能确定定位结果在图上的位置。利用平面区域对平面的网格化及编号过程如图 5-17 所示。

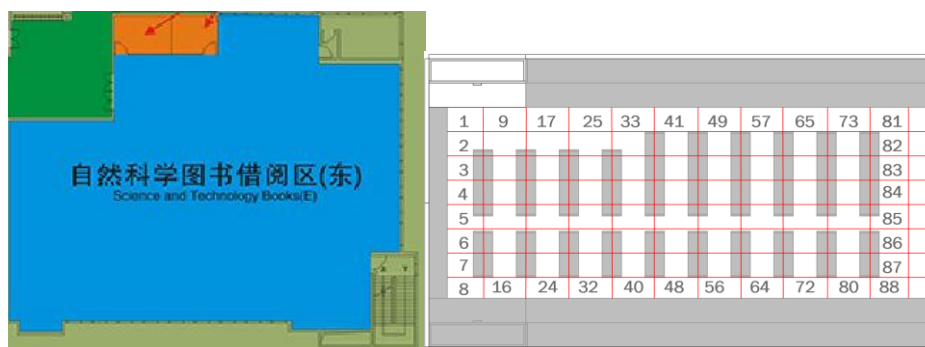


图 5-17 位置指纹与平面图的匹配

(4) 定位计算

定位计算的主要步骤如下：

首先，开启定位服务，载入位置指纹图；定位服务的开启即开始相应的定位线程，线程启动后一直处于运行状态，一旦监听到有客户端发送的消息，立即调用相应的方法处理数据并进行定位；

接着接收数据，进行计算；先将接收的消息进行拆解，从中提取出需要的传感器数据信息，根据地磁指纹图和选定的匹配算法进行计算；

计算结束后，将定位结果通过 Scket 返回。

处理完一次的定位计算后，又进入监听中，下一次定位请求到来后再唤醒并重复计算，这样一来只要客户端一直处于运行状态，就能实时的监听定位的请求并及时返回定位结果，整个过程如图 5-18 所示。

```
Server starting..
进入等待
client connected..
get input..内容: 3.315,-20.26,-13.807,194.43909,-8.803922,5.325963
startTime1493087653677
点进行5次对比
Num: 28.385283093451815 minEuclidean:1
所处位置为:1
endTime1493087653677
时间0
write msg..定位结果为点:1 success
进入等待
```

图 5-18 客户端定位功能

5.3 Web 管理系统的设计

整个系统的功能在 C/S 架构下实现，考虑到缺少相应的可视化界面来管理位置指纹和各类定位的服务，为此设计了一套 WEB 端的室内定位管理系统，管理系统的主要功能是对定位区域和位置指纹的管理与维护，同时，还设计了针对定位用户和定位结果分析的模块，当系统投入实际的运行使用时，这能为整个系统的管理带来方便。

整个 WEB 端包括系统运行概览、指纹图管理、用户管理和用户分析四个子模块；

其中系统概览中通过图表显示包括系统运行情况，实时定位情况和系统资源概览等内容，方便定位系统的管理者了解当前定位系统的运行情况。首页的上方是对整个系统资源的状况的监控，左下方则是对于所有提供定位服务的区域的整体状况的健康，右下方则能够显示某一选中的区域或是范围内的消息队列。这样部分的界面设计如下图所示：

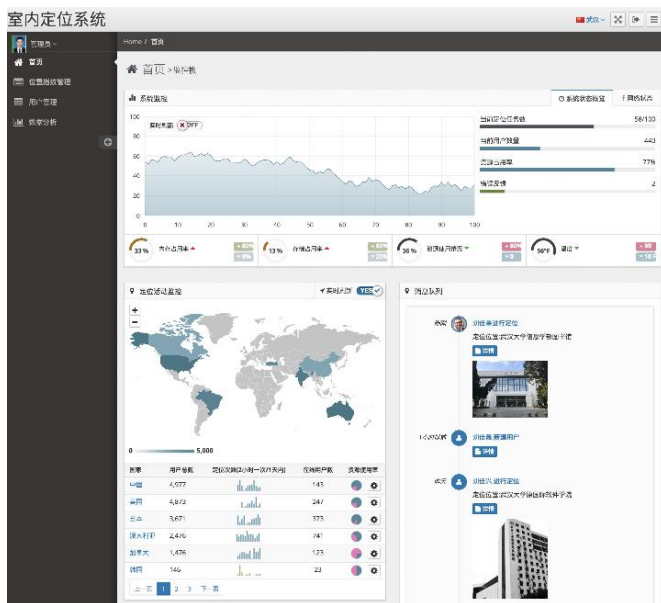


图 5-19 定位系统首页

而指纹图管理页面主要是系统包含的各个可定位的室内区域的区域平面图和区域内采集到的包括地磁传感器在内的各类信息，同时，也停供了对位置指纹图的修改和增删等操作，通过点击每张指纹图的第一行的启动、停止、更新和删除按钮，能够对这一位置指纹进行相应的操作，Web 端将会调用服务器中的相应功能来对指纹图进行相应的处理，其页面如下图所示：

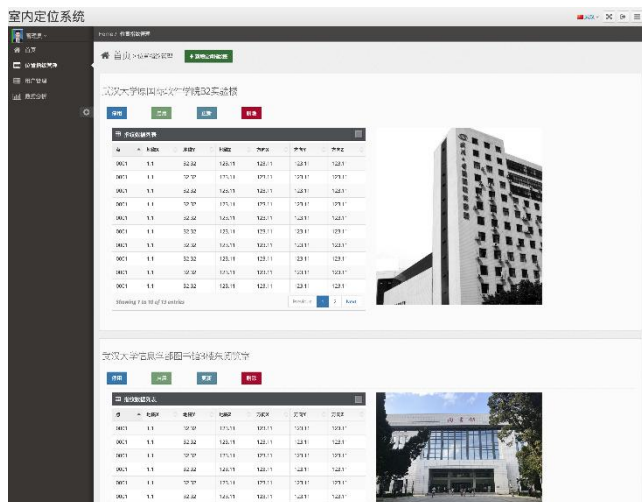


图 5-20 位置指纹管理页面

用户管理页面用来管理能够连接服务器端进行定位的用户的管理和维护,包括新用户的注册和用户管理,从列表中能够看到注册的信息和使用定位服务的记录;

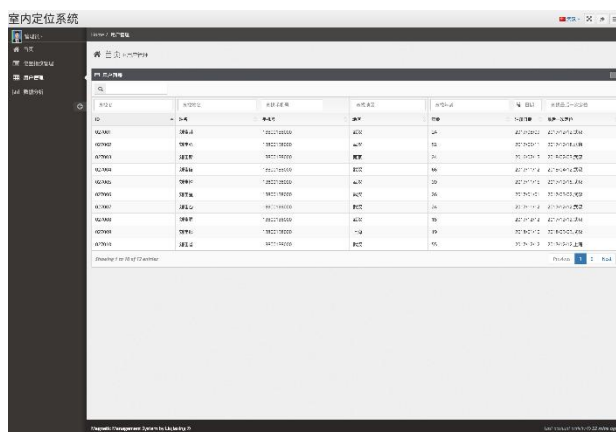


图 5-21 用户管理页面

用户分析页面是考虑到随着使用人数和定位记录的累计,这些定位信息也蕴含着巨大的价值,我们能够通过对单个用户定位记录的分析,得到其路径轨迹并结合位置的实际信息分析个人喜好,同时,能够针对室内区域内使用定位服务的定位历史分析该主要的活动轨迹,此外,不同室内区域使用人数的热度也能够反映出该区域内活动人数的多少。对于定位信息的记录和分析能够结合数据挖掘技术得到很多有用的信息,让系统更具商业价值。这样一种分析功能的页面设想如下图所示。

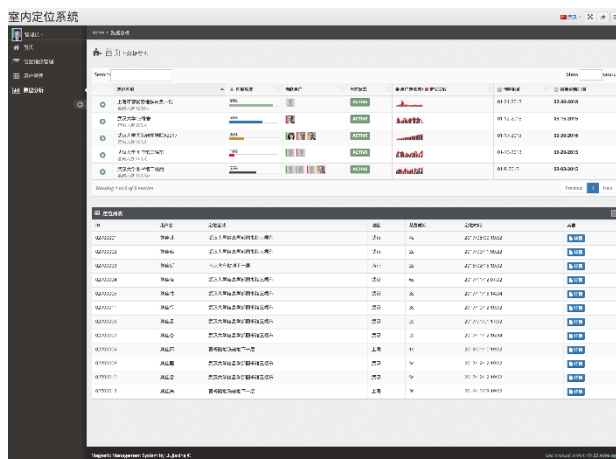


图 5-22 用户分析页面

5.4 本章小结

本章描述的是本文提出的系统的设计与实现。

首先介绍了整个室内地磁定位系统的架构和模块的设计。

其后介绍了系统客户端和服务端端的实现情况和每个功能的实现流程, 展示了定位系统中主要的功能的实现过程和实际效果, 并从需求出发设计了一套用于管理和维护定位服务的 Web 系统。

6 室内地磁定位实验

6.1 实验设计及准备

为了验证本文提出的地磁数据处理算法和地磁定位算法的性能,设计实验进行全面的评估。实验地点选择武汉大学信息学部图书馆三楼的东阅览室,如下图所示。因图书馆有精确的平面图,能准确获取每个馆室的长宽信息,利于精确计算定位的精度,且图书馆整齐摆放的书架为选取定位参考点提供了便利。选取了室内定位的实验区域后,先根据室内的平面图,绘制用于定位和计算的示意图,并将示意图划分成 11×8 的网格,如图 6-1 所示,定位结果以网格为最终的定位的单位,数据的采集和定位结果的显示都以网格为基本单位。实验主要分为两步,先在区域内采集数据,建立位置指纹图,接着在该区域进行定位实验并记录实验的结果,本文的实验设备为 Android 下坚果 pro,手机上搭载着三轴磁传感器等常见组件。

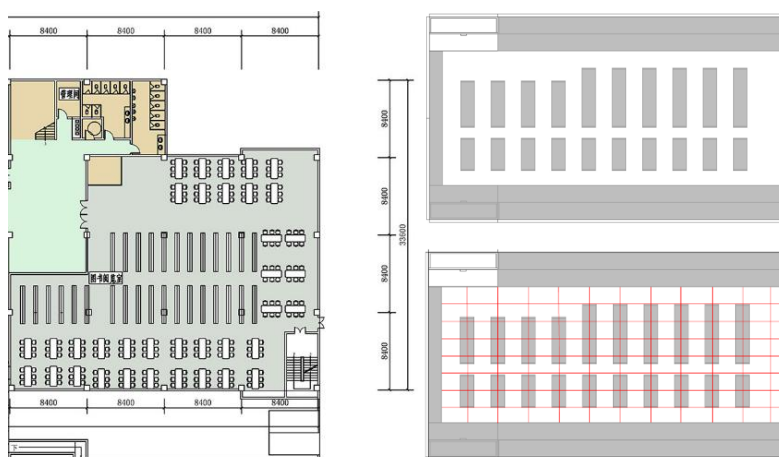


图 6-1 实验平面图

确定了定位区域和平面图后,在实验所在区域,对照着平面图找到图片上每个网格所对应的实际位置,在每个网格的中心处持安装了客户端程序的智能手机采集数据,采集时,打开应用程序,选择对应的存储路径,采集时手机尽量保持水平采集的过程和采集的数据的形式如图 6-2 所示,采集的数据记录的是手机上传感器的完整读数。



1	参考点	地磁传感器			方向传感器		
2		X	Y	Z	X	Y	Z
3	1	-41.275	-12.9196	-24.3073	102.1728	-5.76677	1.548859
4	1	-39.917	-12.1964	-24.4049	103.3704	-5.70008	0.235311
5	2	-43.4464	-11.676	-19.7586	103.5144	-3.70694	2.067806
6	2	-41.1972	-11.6562	-20.8817	103.7293	-3.94863	-0.66732
7	3	-47.0367	-13.7894	-19.9173	104.5512	-5.17406	0.743638
8	3	-47.5204	-14.1815	-19.9249	103.8743	-5.79116	0.495175
9	4	-48.9914	-13.5803	-20.9503	103.297	-4.96615	0.878903
10	4	-47.1237	-14.3936	-22.1985	104.742	-5.51359	-0.75386
11	5	-45.5399	-16.1713	-21.0724	107.6011	-4.65484	1.603382
12	5	-43.6783	-16.4673	-21.8597	107.939	-6.30116	-0.66377
13	6	-51.2222	-14.7736	-23.1369	103.6917	-5.48191	1.020169
14	6	-49.7391	-16.4658	-20.4178	104.9383	-8.43174	2.06858
15	7	-45.015	-10.8185	-23.851	101.2458	-4.77326	1.353293
16	7	-43.721	-12.6938	-24.5468	101.5435	-8.84564	0.10468
17	8	-49.6857	-12.3657	-25.6027	100.5545	-5.93609	0.56896
18	8	-49.9725	-13.0417	-23.5657	101.92	-6.98366	1.564075
19	9	-40.3381	-9.04083	-31.0806	98.00867	-6.15433	0.808379
20	9	-39.5752	-7.42188	-31.6254	95.15155	-7.18588	-0.0069
21	10	-39.8163	-11.2793	-35.878	99.37576	-6.50955	0.258966
22	10	-38.8397	-11.0596	-37.1201	99.13562	-7.39149	-0.64276
23	11	-33.6823	-17.2043	-38.2935	114.1729	-2.63256	0.107579
24	11	-32.5806	-19.4336	-37.7441	114.6325	-5.48288	-0.88116
25	12	-40.6189	-17.8207	-33.226	110.3395	-4.28303	-0.70105

图 6-2 数据采集示意图

不同的位置指纹，采集的方式也会有一些不同，对于由水平化处理生成的二维位置指纹，智能手机在每一个位置处多次采集信息；对于结合了方向和地磁的混合指纹，在网格的中心处握着智能手机旋转一圈，一边旋转手机，一边记录数据，每一个位置上记录一组数据。这两种位置指纹在进行采集时，按照图 5-3 所示的路径移动，在途经的每个网格采集数据。

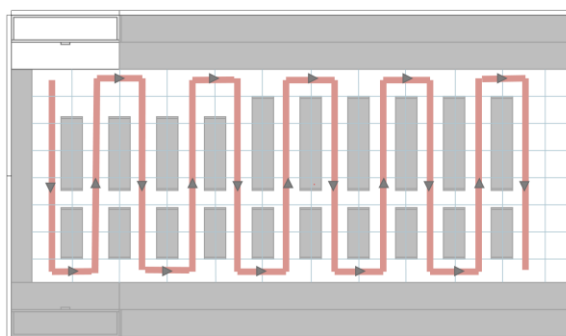


图 6-3 一种位置指纹采集路线图

对于基于变化率的位置指纹，数据的采集主要按照路径，在每条路径上行走，每移动一步记录一次，其采集的路径如图 6-4 所示。

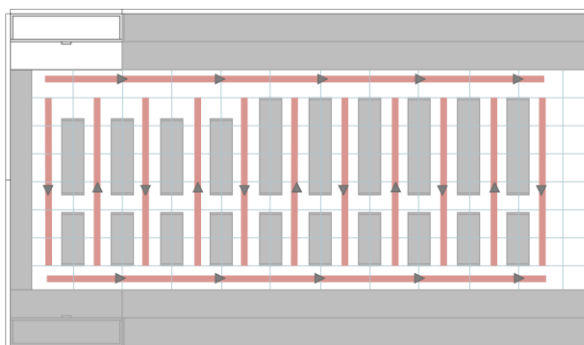


图 6-4 地磁变化率采集路线图

采集完所有位置的传感器数据后，使用个人电脑架设服务器，对地磁指纹图进行滤波处理，按照需要从原始数据中提取出位置指纹的信息，将地磁指纹图存储，如图 6-5 所示。至此，定位系统建立所需的步骤已完成，后续是定位实验。

点	地磁X	地磁Y	地磁Z	方向X	方向Y	方向Z
0001	1.1	32.32	123.11	123.11	123.11	123.11
0001	1.1	32.32	123.11	123.11	123.11	123.11
0001	1.1	32.32	123.11	123.11	123.11	123.11
0001	1.1	32.32	123.11	123.11	123.11	123.11
0001	1.1	32.32	123.11	123.11	123.11	123.11
0001	1.1	32.32	123.11	123.11	123.11	123.11
0001	1.1	32.32	123.11	123.11	123.11	123.11
0001	1.1	32.32	123.11	123.11	123.11	123.11
0001	1.1	32.32	123.11	123.11	123.11	123.11
0001	1.1	32.32	123.11	123.11	123.11	123.11
0001	1.1	32.32	123.11	123.11	123.11	123.11
0001	1.1	32.32	123.11	123.11	123.11	123.11

Showing 1 to 10 of 13 entries

Previous 1 2 Next

图 6-5 数据采集示意图

6.2 定位实验及结果分析

定位实验的主要内容是在选定的室内区域，在任意的位置上使用智能手机进行定位，判断结果是否和定位时实际位置相一致，记录下每一次的实验。

具体的实验步骤为：智能手机通过网络与服务器建立连接，在预先采集并制作了地磁指纹图的室内区域，手持安装地磁定位程序的智能手机，在任意位置点击移动设备上的定位按钮进行定位，进行定位时应当保持智能手机水平放置，移动设备通过网络将采集的数据发送至服务器，随后显示定位情况，记录下和实际位置是否一致，整个如图 6-6 所示。

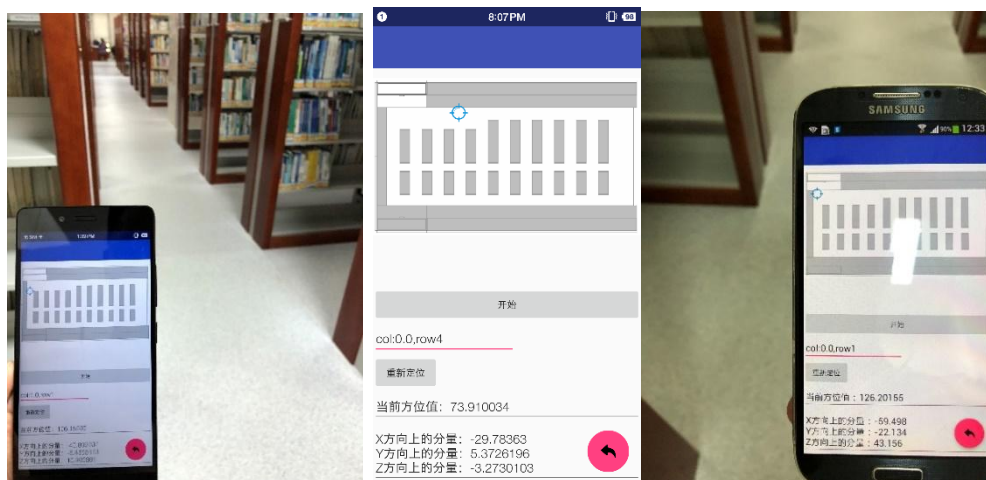


图 6-6 室内定位实验图

对于不同的位置指纹和定位方法,通过在后台分别设置采用不同的定位方法,调用不同的位置指纹文件来实现,分别记录并计算采用不同的定位方法时定位的结果。图 6-7 反映的是两种不同的位置指纹位进行定位,在进行最终实验时,为了方便实验的调试,位置指纹和匹配算法的选取和更改都在服务器端进行更改,定位的页面则保持相对的固定。

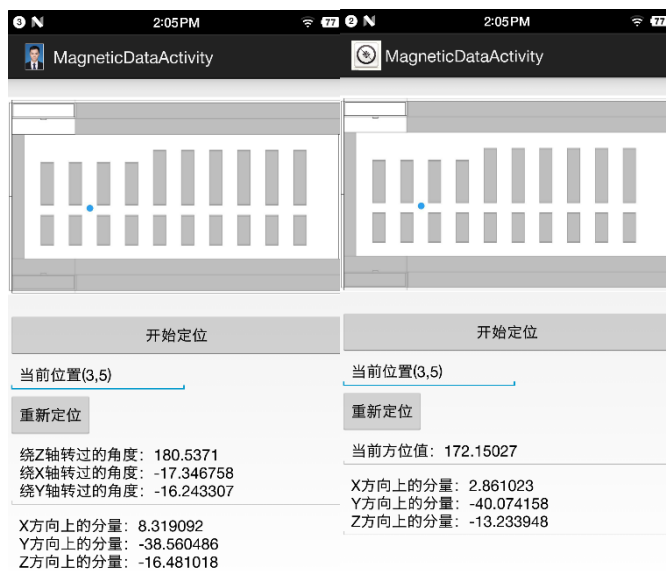


图 6-7 两种地磁定位方法的显示页面

在这一区域内进行足够多次的定位实验,收集定位的结果。

分别以水平化处理的位置指纹、基于地磁和方向的混合位置指纹和基于地磁变化率的位置指纹三者作为位置指纹进行三次实验,其中水平化处理的位置指纹以及地磁和方向混合位置指纹都以最邻近法作为定位匹配方法,而使用变化率的位置指纹使用 Hausdorff 距离。实验的定位区域划分成了 88 个小网格,实验人员进行实验时,对于前两种位置指纹,沿着采集时的路径行走,边走边沿途点击定位按钮进行定位实验,由于图书馆书架的存在,能够很好的判断每次采集时实际所处的网格,利于实验结果的判定;而对于以地磁变化率为位置指纹的定位方式,考虑到实际定位时如果依靠用户手动的记录下路途中的变化率,不仅操作不方便且用户所记录的路径也因个人习惯存在较大的差别,因此设定设备每一秒自动记录一次数据,用 8s 中采集 8 次数据作为一组,记录这一组数据的变化率进行匹配。

定位结果的记录如下图所示:

```

实际位置在第1点
内容: 48.597, -4.443, -82.934, 271.76846, -4.012324, -1.6980592
点的位置为 (93.91281, 1.7877922)
共进行88次对比
Num: 7.351618814740424 minEuclidean:4
所处位置在第4点
实际位置在第1点
内容: 45.191, 6.466, -91.517, 284.0526, -3.0492954, -0.044940002
点的位置为 (97.267075, 13.309628)
共进行88次对比
Num: 19.06511215834715 minEuclidean:1
所处位置在第1点
实际位置在第1点
内容: 44.554, 6.114, -91.18, 286.49387, -4.616817, 0.4598745
点的位置为 (96.60669, 12.933351)
共进行88次对比
Num: 5.529580207883547 minEuclidean:1
所处位置在第1点
实际位置在第2点
内容: 23.757, -6.626, -90.165, 269.4249, -4.028071, 6.8499217
点的位置为 (82.41247, 0.15310836)
共进行88次对比
Num: 12.6883242542449 minEuclidean:2
所处位置在第2点
实际位置在第2点
内容: 24.526, -5.975, -90.824, 270.29068, -3.8463464, 3.6822753
点的位置为 (83.38152, 0.85168666)
共进行88次对比
Num: 6.3002592723151984 minEuclidean:9
所处位置在第9点

```

图 6-8 定位结果记录示意图

一共进行了三组的实验，三次实验分别使用三种位置指纹进行定位，记录并统计了三次实验的定位的结果，如下表所示：

表 6-1 地磁定位实验的结果表：

位置指纹	由水平化处理的 位置指纹	方向与地磁信息 混合指纹	基于地磁变化 率的位置指纹
准确率	53.79%(71/132)	79.17%(95/120)	75%(12/16)
定位精度	1 米	1 米	2 米
定位计算时间	1 毫秒	1 毫秒	1 毫秒
网络传输时间	2 毫秒	2 毫秒	2 毫秒

其中，定位的准确率是实验过程中定位结果和实际所在的位置相一致的次数和定位总次数间的比率，定位的精度是定位所划分的网格相邻中心点间的距离，定位的计算时间指服务器接受到智能手机传来的数据到计算出定位结果的时间，而网络传输时间由智能手机端发送数据到接收到服务器返回的结果的时间间隔减去定位计算时间得到。

从表中可以发现，几种方式都成功的借助地磁数据实现了室内定位，而在网络良好的情况下定位的速度也能满足实时性的要求。结果显示，水平化处理方法的定位准确率并不高，只有 54%，这一方面是这种水平化的处理方法抹去了原始数据中的很多差异化信息，降低了位置指纹的区分度，此外手机形态的变化是由陀螺仪得到的，并不能非常准确的代表智能手机当前的形态，这使得计算时用到的陀螺仪的数据信息原本就有较大的误差。

对于方向与地磁混合的位置指纹的定位结果，接近 80%的定位准确率已经能够满足室内定位的实际需求了，进一步分析每次定位时实际进行定位的位置在划

分的网格中的相对位置，进行 50 次定位实验，其中，有 11 条是在靠近网格中心处进行的，有 12 条是在靠近网格边缘处进行的，有 27 条是在二者之间的区域。

表 6-2 相对网格不同位置的定位结果表：

所处的相对位置	定位准确率
网格中心	90.91%(10/11)
网格边缘	41.67%(5/12)
其他	81.48%(22/27)

可以看到定位时若处于网格中心区域，其定位的准确率高于处于网格间边缘处的准确率，即越靠近预先采集数据的位置越能准确定位。这说明将区域划分成网格的位置指纹生成法，虽然减少了需要采集的数据，简化了地磁指纹生成的流程，但网格中心处的数据无法准确的反映网格边缘处的信息。

6.3 本章小结

本章主要是设计和进行实地的定位实验，通过使用本文提出并实现的系统进行定位，证实了系统的有效性和可行性，同时对比了几种位置指纹和定位算法的准确度等信息，其中基于地磁和方向的混合位置指纹的定位精度最高，在 1m 的定位精度下有 80%的准确率。更进一步就定位结果进行分析，分析了将定位区域网格化后处于网格中不同位置进行定位的差别。

7 总结与展望

7.1 总结

本文通过对室内地磁的定位系统的研究,实现了利用智能手机在室内区域的定位,为室内定位问题提出一种新的解决方案。

在用地磁场作为位置指纹的研究上,首先通过环绕区域采集地磁信息的方式验证了室内的磁场分别具有着良好的区分性。通过采集一段时间内同一位置的地磁信息,也验证了地磁数据能够保持相对的稳定性,并通过时间序列分析验证了数据的平稳性,对数据进行了建模。接着,利用控制变量的方式,找出了包括设备自身的差异、设备姿态的差异等静态因素对于地磁数据的影响较大,而电子设备对于智能手机地磁传感器上的读数也有较大的影响,但其影响范围较小,为此提出了包括利用地磁变化率作为位置指纹的处理方式。

同时,结合智能手机和室内地磁场的特点,设计了三种不同的定位方式:二维位置指纹、三维位置指纹、地磁和方向混合位置指纹和地磁变化率位置指纹,并通过实验证实了地磁和方向混合位置指纹在定位准确率上优于其他几种,而基于地磁变化率的位置指纹则能更好的减少设备型号不同带来的影响,也验证了本文提出的定位解决方案的可行性。

通过将室内区域划分成网格并采集每一个网格内的地磁信息等数据,建立区域的位置指纹图,利用实时采集的信息和指纹图的匹配计算实现了对移动设备在室内的实时定位。按照网格的划分情况,定位的精度约为 1m,且定位的准确率约 80%,在室内区域,当卫星定位等定位方式受限时,能作为一种很好的补充手段。

此外,本文所提出的基于智能手机的室内定位系统,在 C/S 架构下利用运行在智能手机端的程序进行数据的采集和信息的显示,在服务器端进行数据的处理、计算和存储,不仅适用于室内地磁定位,也能够融入多种的室内定位方式,是一种具有良好适用性和可扩展性的系统设计。

7.2 未来研究展望

本文已经针对室内地磁场的分布和影响因素做了简单的研究,但更多的是通过已经形成的影响进行总结分析,但关于室内地磁场分布模型和各类影响因素的

干扰的衡量上还需要进一步的研究分析。与此相关的就是对定位方式和匹配方法的研究,除了本文所提到的利用地磁传感器和方向传感器,智能手机上还搭载着多种传感器,还可以进一步利用其他多种传感器采集的信息扩展定位方法,比如本文现在的定位针对的是室内的某一个区域,而一栋现代建筑包含许多的楼层,包含着多个定位区域,先利用如气压计等传感器来实现对楼层的定位,再结合地磁实现每一楼层的定位。此外,在匹配方法上,本文提出了基于欧几里德距离和 Hausdorff 距离的匹配方法,在人工智能和数据挖掘技术得到广泛研究运用的今天,设想,如果能将地磁匹配问题转换成对于地磁信息的分类或识别,就能使用深度学习等方法来实现定位。

在有了一定的理论和方法的支撑下,应用和系统的设计与实现是定位方法能否得到广泛运用的一个重要因素,本文提出的定位系统是着力于定位方法和位置指纹的研究而设计,考虑到定位系统进行大规模的部署和应用时,需要同时满足大量移动设备的定位请求,无论是后台处理的完善还是连接方式的改善都是很有必要的,系统的架构和应用界面的重构和优化是地磁室内定位在实用化上颇具意义的研究内容。

参考文献

- [1]. 赵建虎, 王胜平, 王爱学. 一种改进型 TERCOM 水下地磁匹配导航算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(11):1320-1323.
- [2]. 李素敏, 张万清. 地磁场资源在匹配制导中的应用研究[J]. 制导与引信, 2004(03):21-23.
- [3]. 安振昌. 区域和全球地磁场模型[J]. 地球物理学进展, 1995(03):63-65+67-73.
- [4]. 康国发, 白春华, 李伟, 吴小平, 胡家富. 1690~2000 年地磁场能量的三维分布及其长期变化[J]. 地球物理学进展, 2007(01):80-86.
- [5]. 袁杨辉. 地磁导航中地磁变化场的研究[D]. 华中科技大学, 2012.
- [6]. 张聪聪, 王新珩, 董育宁. 基于地磁场的室内定位和地图构建[J]. 仪器仪表学报, 2015, 01:181-186.
- [7]. 黄鹤, 赵焰, 王春来, 于广涛. 地磁室内定位基准图数据采集系统设计[J]. 测绘通报, 2017(02):54-59.
- [8]. 于广涛. 地磁室内定位基准图数据采集系统研究[D]. 北京建筑大学, 2016.
- [9]. 蔡成林, 曹振强, 张炘, 李思民. 室内地磁基准图构建的优化算法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, (6):647-650. DOI:10.14075/j. jgg. 2017. 06. 019.
- [10]. 邓翠婷, 黄朝艳, 赵华, 田海冬. 地磁匹配导航算法综述[J]. 科学技术与工程, 2012, 24:6125-6131.
- [11]. 谢仕民, 李邦清, 李文耀, 王黎斌, 周祖洋. 地磁匹配技术及其基本匹配算法仿真研究[J]. 航天控制, 2008, 05:55-59+68.
- [12]. 姜浩, 黄鹤, 赵焰, 杨军星. 利用 Hausdorff 距离地磁匹配算法的室内定位方法[J]. 科技传播, 2016, 8(07):157-158.
- [13]. 郭才发, 胡正东, 张士峰, 蔡洪. 地磁导航综述[J]. 宇航学报, 2009, 04:1314-1319+1389.
- [14]. 傅慷, 余杰, 钱富. 地磁导航的相关技术研究[J]. 船电技术, 2013, 04:31-33.
- [15]. 李兴城, 张慧心, 张双彪. 地磁导航技术的发展现状[J]. 飞航导弹, 2013, 10:80-83.
- [16]. 寇义民. 地磁导航关键技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- [17]. 徐亮. 基于地磁导航的室内定位算法研究与实现[D]. 南京邮电大学, 2015.
- [18]. 谢宏伟. 基于智能手机平台的地磁室内定位系统[D]. 南京大学, 2015.
- [19]. 陈锐志, 陈亮. 基于智能手机的室内定位技术的发展现状和挑战[J]. 测绘学报, 2017, 46(10):1316-1326.
- [20]. 王杨, 赵红东. 室内定位技术综述及发展前景展望[J]. 测控技术, 2016, 07:1-3+8.

- [21]. 阮陵, 张翎, 许越, 郑星雨. 室内定位: 分类、方法与应用综述[J]. 地理信息世界, 2015, 02: 8-14+30.
- [22]. 张明华. 基于 WLAN 的室内定位技术研究[D]. 上海交通大学, 2009.
- [23]. 陈国平, 马耀辉, 张百珂, 基于指纹技术的蓝牙室内定位系统[J]. 电子技术应用, 2013, 39(3)
- [24]. 李魏峰. 基于 RFID 的室内定位技术研究[D]. 上海交通大学, 2010.
- [25]. 马伟. 基于无线传感器网络的室内定位系统节点的设计与实现[D]. 电子科技大学, 2013.
- [26]. 原玉磊, 王安健, 蒋理兴. 一种使用红外线和超声波的定位技术[J]. 电子测量技术, 2008, 10: 15-17.
- [27]. 宋鏢, 程磊, 周明达, 吴怀宇, 陈洋. 基于惯导辅助地磁的手机室内定位系统设计[J]. 传感技术学报, 2015, 08: 1249-1254.
- [28]. 郭伟龙. 融合多源信息的室内定位算法研究[D]. 浙江大学, 2016.
- [29]. 王超. 基于手机传感器的室内导航定位研究[D]. 中国地质大学(北京), 2017.
- [30]. 喻佳宝. 基于智能手机的室内地磁定位方法研究[D]. 深圳大学, 2017.
- [31]. 张文杰. 基于 RFID 和地磁场联合的室内定位技术研究[D]. 南京邮电大学, 2015.
- [32]. 李艳华. 基于 RSSI 与地磁场的室内混合指纹定位算法研究[D]. 湖南师范大学, 2015.
- [33]. 李宗骅. 基于 RSSI 和地磁场特征融合的室内定位算法设计与研究[D]. 南京理工大学, 2015.
- [34]. 李艳, 管斌, 王成宾, 白云超. 电子磁罗盘航向角误差推导及分析[J]. 仪器仪表学报, 2013, 07: 127-133.
- [35]. 张爱军, 王昌明, 赵辉. 三轴电子罗盘的磁航向角误差补偿研究[J]. 传感器与微系统, 2008, 08: 33-35.
- [36]. Jianga Shang, Fuqiang Gu, Xuke Hu and Allison Kealy. APFiLoc: An Infrastructure-Free Indoor Localization Method Fusing Smartphone Inertial Sensors, Landmarks and Map Information. SENSORS; OCT 2015, 15 10, p27251-p27272, 22p.
- [37]. Mengyun Liu, Ruizhi Chen, Deren Li, Yujin Chen, Guangyi Guo, Zhipeng Cao and Yuanjin Pan. Scene Recognition for Indoor Localization Using a Multi-Sensor Fusion Approach. Sensors. Dec2017, Vol. 17 Issue 12, p1-20. 20p.
- [38]. Shu, Y.C.G.C.L.F. (2015). "Magicol: Indoor Localization Using Pervasive Magnetic Field and Opportunistic WiFi Sensing." IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS 33(7): 1443-1458.

- [39].Mei Zhang, Tingting Qing, Jinhui Zhu, Wenbo Shen, Indoor positioning tracking with magnetic field and improved particle filter, International Journal of Distributed Sensor Networks 2017, Vol. 13(11).
- [40].Subbu, K. B. R. (2013). "LocateMe: Magnetic-Fields-Based Indoor Localization Using Smartphones." ACM TRANSACTIONS ON INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGY 4(4): -27.
- [41].Xudong Huang, Songtao Guo, Yan Wu, Yuanyuan Yang, A fine-grained indoor fingerprinting localization based on magnetic field strength and channel state information, Pervasive and Mobile Computing, Volume 41, October 2017, Pages 150-165.
- [42].Yan Zhou, Xianwei Zheng, Ruizhi Chen, Hanjiang Xiong and Sheng Guo. Image-Based Localization Aided Indoor Pedestrian Trajectory Estimation Using Smartphones. Sensors. Jan2018, Vol. 18 Issue 1, p1-19. 19p.
- [43].Qiuyun Chen and Bang Wang. FinCCM: Fingerprint Crowdsourcing, Clustering and Matching for Indoor Subarea Localization. IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS LETTERS; DEC 2015, 4 6, p677-p680, 4p.
- [44]., .<https://www.indooratlas.com/>.
- [45].任建军, 石云波, 唐军, 冯恒振, 杜文略. 电容式加速度传感器设计及工艺加工[J]. 微纳电子技术, 2017, 54(07):472-478.
- [46].沈强, 刘洁瑜, 汪立新, 王琪. MEMS 陀螺阵列技术研究进展[J]. 导航与控制, 2017, 16(05):97-103+46.
- [47]., .<https://developer.apple.com/ibeacon/Getting-Started-with-iBeacon.pdf>.
- [48].Koivisto, Mike, Joint Device Positioning and Clock Synchronization in 5G Ultra-Dense Networks, IEEE transactions on wireless communications Volume: 16 Issue 5 (2017) ISSN: 1536-1276.
- [49].Want,Roy.The active badge location system.ACM Transactions on Information Systems Volume: 10 Issue 1 (1992) ISSN: 1046-8188 Online ISSN: 1558-2868.
- [50].GANICK A, RYAN D. Light Positioning System Using Digital Pulse Recognition,US,8248467[P].2012-08-21.
- [51]., . <https://developers.google.cn/ar/>
- [52].Valérie Renaudin, Muhammad Haris Afzal, and Gérard Lachapelle, Complete Triaxis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain, Journal of Sensors, vol.2010.

- [53]. Vasconcelos, José and Elkaim, G and Silvestre, Carlos and Oliveira, Paulo and Cardeira, Bruno. Geometric Approach to Strapdown Magnetometer Calibration in Sensor Frame[J]. Aerospace & Electronic Systems IEEE Transactions on, 2011, 47(2):1293-1306.
- [54]., . <https://www.ngdc.noaa.gov>.
- [55]. 柳明, 王海军. 基于地磁熵和 Hausdorff 距离的地磁辅助惯性导航[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(04):1764-1768.

致谢

值此成文之际，感谢武汉大学，包括国际软件学院和遥感信息工程学院这些年来对我的培养，从本科到现在已经在武大度过了近七年，将来无论在哪里都会记得在武大学习生活的时光。

在此，首先要感谢的是我的指导老师江聪世教授，感谢江老师从本科开始，到我读硕士的这些年里对我学习、研究的悉心指导，是老师为我指引了学习研究的方向，同时，在江老师指导下我的认识能力和研究能力都得到了很大的提高。从我的研究方向出发，江老师为我的论文选题进行指导，并给了我许多论文的修改意见使我的论文变得更加完善。

感谢实验室的各位同学，大家在实验室会议上分享各自的学习心得，给我很大的启发，也感谢各位给我的许多建议和帮助。

最后，还要感谢我的同学和爱我的家人们，特别是我的父母亲，你们在学习生活中给了我很大的帮助，让我充满勇气和希望的面对学习和生活。