本科毕业论文

院系匡亚明学院

专业计算机科学与技术

题目基于超声波和智能手机的室内定位系统

年级2016级学号161240005

学生姓名陈勇虎

指导老师谢磊职称副教授

提交日期2020年5月20日

南京大学本科生毕业论文(设计、作品)中文摘要

题目:基于超声波和智能手机的室内定位系统

院系:匡亚明学院

专业:计算机科学与技术

本科生姓名:陈勇虎

指导老师(姓名、职称):谢磊副教授

摘要:

随着全球定位系统推广使用,人们在定位的精度上追求着更高标准,尤其

在室内定位问题的需求上也在提升。在日常生活中,室内丢失物品的寻找也是

令人困扰的问题,因此室内定位有着很实际的应用需求。

在无线传感网发展的趋势下,科研工作者对声波的研究也越来越深入。超

声波因为其抗干扰等优点,使得以其为载体的定位系统也越来越多,而其定位

精度也在不断提升。与此同时,软硬件技术的发展带来了智能设备的蓬勃发

展,双麦手机的出现,传感器的富集,也为智能手机的应用带来了更多的可

能。基于智能手机的双麦克风和传感器,辅助声波的应用,为其在定位技术的

应用带来了契机。

本文结合目前常见的智能手机,提出了一种利用声波和智能手机进行室内

定位的方案。首先对涉及的相关原理进行分析和阐述,构建了定位算法的数学

模型,随后给出了完整的利用双麦手机及其集成的传感器进行定位的方案,并

提出了离线计算和在线指引两种方式,最后在安卓系统上进行了实现。

本文的主要工作如下:

(1)对到达时延差计算的原理进行阐述和分析,并对双麦智能手机及其集成

的传感器进行介绍,并提出了针对于此的数据处理方式。

(2)提出了利用双麦克风的智能手机辅佐声波进行室内定位的离线计算方案

和在线指引方案,详细说明了其数据处理细节,并通过降维指引的思路为数据

的可视化铺垫了基础。

(3)系统设计并且实现了基于以上方案的定位系统,然后对系统的功能

和精度进行总结和测试,在一组实际实验中,达到了离线定位分量误差为

(1.6671cm,1.9620cm,1.6666cm),在线指引角度误差为1.7877°,对后续工作进行  
了展望。

关键词:声源定位,智能手机,双麦系统,离线计算,在线指引

I

南京大学本科生毕业论文(设计、作品)英文摘要

THESIS: IMU

DEPARTMENT: School of Computer Science

SPECIALIZATION: Computer Science and Technology   
UNDERGRADUATE: Yonghu Chen

MENTOR: Professor Lei Xie

ABSTRACT:

With the popularization and use of the global positioning system, people are pur­

suing higher standards in positioning accuracy, especially in the demand for indoor

positioning problems.In daily life, the search for lost items indoors is also a disturb­

ing problem,so the indoor positioning problems has very practical application require­  
ments.

Under the development trend of wireless sensor networks, scientific researchers

are also deepening their research on sound waves. Because of its anti­interference and

other advantages, ultrasound has made more and more positioning systems using it as

a carrier, and its accuracy is also constantly improving.At the same time, the devel­

opment of hardware and software technology has brought about the vigorous devel­

opment of smart devices. The emergence of dual­mircophone smart phones and the

enrichment of sensors have also brought more possibilities for the application of mo­

bile phones.This article combines a common smartphone at present, and puts forward

a solution for positioning indoors using sound waves and smartphones. Firstly, the re­

lated principles involved are analyzed and elaborated, and the mathematical model of

the positioning algorithm is constructed. Then, a complete positioning scheme using

the dual­mircophone mobile phone and its integrated sensors is given. Two methods of

offline calculation and online guidance are proposed, and finally implemented on the   
Android system.

The main contribution in this paper are as follows:

1.We explain and analyze the principle of arrival delay difference calculation, in­

troduce the sensors of dual­mircophon smartphones and its integrated sensors, and pro­

pose a data processing method for the model.

2.We present an offline calculation solution and an online guidance solution using

a dual­microphone smartphone assisted by sound waves for indoor positioning, explain   
II

毕业论文陈勇虎

the details of its data processing are explained in detail, and propose the idea of dimen­

sionality reduction guidance to lay the foundation for data visualization.

3.We systematically design and implement of the positioning system based on the

above scheme, summarize and test its function and accuracy. In a set of actual experi­

ments, the offline positioning component error is (1.6671cm,1.9620cm,1.6666cm), the

online guidance angle error is 1.7877°, and finnally we prospect the follow­up work.

KEY WORDS: Acoustic source localization, Smart phone, Dual­microphone, Offline   
calculation, Online guidance

III

目录

目录 IV

1绪论1

1.1研究背景及意义1

1.2国内外研究现状1

1.3论文主要工作2

1.4论文的整体结构3

2智能手机感知与定位原理4

2.1双麦克风的节点定位4

2.2智能手机的传感器6

2.2.1陀螺仪7

2.2.2加速度传感器7

2.2.3磁力传感器8

2.2.4屏幕方向传感器8

2.3信号时延计算原理8

2.4基于到达时间差的定位算法设计10

2.4.1二维空间下的定位分析10

2.4.2三维空间下的定位分析11

2.4.3离线计算下的定位算法分析和设计11

2.4.4在线指引下的寻迹方式14

3基于双麦系统智能手机的声源定位方案16

3.1离线数据预处理流程16

3.2数据采集17

3.3声音数据处理20

3.3.1滤波除噪20

3.3.2异常点移除21

3.3.3分窗加帧22

IV

毕业论文陈勇虎

3.3.4端点检测23

3.3.5到达时间差计算23

3.3.6到达时间差处理24

3.4离线处理下的定位方法27

3.5离线计算到在线指引的迁移28

3.5.1概念阐述28

3.5.2在线处理算法模型29

3.5.3状态判别30

3.5.4陀螺仪数据使用31

3.5.5加速计和磁力计的使用31

4模型系统实现与实验分析32

4.1开发环境与平台32

4.2系统设计32

4.2.1多模块设计33

4.2.2界面与运行方式34

4.3系统功能实现36

4.3.1录音模块功能36

4.3.2数据处理模块功能37

4.3.3传感器监听模块功能38

4.3.4显示模块39

4.4系统性能测试和分析39

5总结与展望43

5.1工作总结43

5.2前景展望43

参考文献44

致谢46

V

1.1研究背景及意义

在室内环境(办公室,住所)中想要寻找一个小物品,诸如钥匙,硬币,可

以说是一件令人费神的事情了[1]。在游戏世界和虚幻的电影场景中,我们都或  
多或少接触过类似于"寻宝罗盘"的神奇宝物,它可以类似一个掌上的指南

针,时刻指示"宝物"的方向。随着各式各样移动智能设备的广泛涌现,例如

智能手机,智能手表,这些设备不仅自带了诸多传感器,同时可以为用户提供

很好的 UI界面。因此,如果可以利用这些设备实现类似于寻宝罗盘的功能,

用于寻找我们室内环境中的小物品,无疑是有趣且富有创造性的。

随着定位精度需求的提升,现在的研究者也室内外的定位技术研究也越来

越深入。传统的全球定位系统(Global Positioning System,GPS)[2]无疑是现代定  
位系统的首选,然而,在室内环境中,由于卫星信号会受到建筑物的削弱,遮

蔽等影响,以及在室内环境下可能出现的,诸如信号反射,折射,透射等造成

的非视距传输和多径效应,导致室内定位误差较大,所以如果在室内环境下,

依然采用卫星系统定位的话,显然是无法满足室内定位精度的需求。

智能设备在软硬件方面的发展也带了传感器,双麦技术等的升级,基于双

麦结点的定位系统也在不断发展中,而利用智能手机的双麦及其内置的传感器

的定位系统还并不常见,因此通过对智能手机的双麦系统以及其内置的诸多传

感器,研究其在定位方面的应用,这在室内定位研究上无疑有着深远的意义。

1.2国内外研究现状

在工业生产和日常生活中,噪声和异响是常见的现象,在很多情况下,这

些声音是令人困扰的。至于如何去解决这些噪声,我们首先需要去识别噪声并

且能够定位出噪声的方向和位置,这就是声源定位问题的一个实例。声源定位

技术是在一个有噪声的环境中,去识别或者计算某一个声源的空间位置的技

术。当然,声源定位技术并不只局限于在噪声方面的定位,在特定的场合中,

声源定位也有着不同的表现。例如在一个有很多参会者的会议室中,定位演讲

者方位也是声源定位技术的一个应用。

1

毕业论文陈勇虎

日常生活中我们似乎很容易根据听到的声音来辨别声源的大致方向,比如

从身边急驶而过的汽车的来向,甚至车辆距离自己大概的距离。经过专业的训

练,我们甚至可以让盲人参与到踢足球的运动中。人类之所以可以做到"听声

辨位",主要是利用了声音到达双耳的时间差,声级差,相位差,音色差等。

这种常见的"听声辨位"尽管有一定的局限性,但是依然可以满足我们生活中

很多的定位需求。声音定位技术通过将麦克风类比人耳,通过处理其捕获的声

音信号求解声源方位,借助于双耳效应的启发,目前的定位技术大多数都是依

靠前面所述的四个参数,其中最常用的还是声音到达人耳的时间差。然而,在

实际生活中,由于环境中的噪声,混响等环境不可控因素的影响,高精度的定

位变得束手无策。而近些年,以声波为载体的定位系统研究也越来越深入,其

应用也越来越广泛。例如在军事应用上,美军的狙击手探测技术,在战争中的

作用无疑是巨大的。此外,现在也有很多的线上的远程视频会议,摄像头也会

检测到演讲中的对象,并进而将摄像头聚焦于该人。鉴于声源定位的思想,结

合室内较安静的环境,本文基于室内环境,研究利用声波进行定位的问题。

在声源定位方面,基于到达时间(TOA),到达时间差(TDOA)的方法越来越  
多。相比较而言,利用到达时间差的方法避开了到达时间中的同步问题,其精

度也更高,所以主流的定位方案中都基于到达时间差。本文也是在此思路上进

行后续的研究。

在现阶段的定位技术中,以超声波为载体的定位技术也非常成熟,超声波

具有抗干扰性强的优点,在现阶段的定位技术中,其精度也到达了厘米级。目

前有很多的定位系统依赖于超声波做媒介,如谢地等[3]利用超声波提出了高精

度的室内定位模型,其中以到达时间(TOA)的思想,通过同步信号进行距离的

测量和定位;乔鑫等[4]利用超声波和对射式测距,最后通过三角定位提出了一

种高精度的超声波定位;徐昆毓[5]通过固定超声波发射点,利用射频信号作为

时间标记,实现了对移动结点的定位;此外,赵予玮[6]的通过将射频识别技术  
(RFID)和超声波结合的方式,提出了一种室内定位算法。

目前到达时间差的的计算主要与时延估计,科研工作者也在努力改进其

精度。

1.3论文主要工作

论文的主要工作主要由以下几个方面:

(1)对到达时延差计算的原理进行阐述和分析,并对双麦智能手机及其集成

2

毕业论文陈勇虎

的传感器进行介绍,并提出了针对于此的数据处理方式。

(2)提出了利用双麦克风的智能手机辅佐声波进行室内定位的离线计算方案

和在线指引方案,详细说明了其数据处理细节,并通过降维指引的思路为数据

的可视化铺垫了基础。

(3)系统设计并且实现了基于以上方案的定位系统,然后对系统的功能

和精度进行总结和测试,在一组实际实验中,达到了离线定位分量误差为

(1.6671cm,1.9620cm,1.6666cm),在线指引角度误差为1.7877°,对后续工作进行  
了展望。

1.4论文的整体结构

本文共分为五个章节,每个章节具体安排如下:

第一章绪论介绍该选题的背景意义,简述了目前国内外基于声波的室内定

位研究现状,以及该论文的主要工作和结构安排。

第二章通过对智能手机和传感器进行介绍,描述了以双麦手机定位的基

础,并介绍了以广义互相关求解信号时延的原理,以及通过到达时间差进行定

位的方案,包括二维的定位和三维空间下的定位,并进而提出论文后续描述的

离线计算和在线指引两种定位方案。

第三章通过对双麦克风手机定位信号处理细节的描述,说明了数据处理流

程,并结合定位方案进行分析和对传感器使用进行说明。

第四章基于前文所描述的方案进行了系统实现和实验结果分析,对系统的

设计和实现细节进行了详细的说明。

第五章总结了本文的主要探究工作,并进而对后续的工作方向进行了

展望。

3

近些年来,以声波为载体的定位方案备受关注,这些定位方案依赖于多个

麦克风,捕获多路信号,通过信号同步并进行后续的信号处理以实现定位方

案。然而考虑到节点的布置的繁琐和设备的昂贵,在很多室内定位系统并不能

很好的投入使用,考虑到其他成本和功耗问题,其定位算法也因此在很多场景

中并不能很好的应用。因此本文提出了一种可以在室内较安静的环境下利用智

能手机进行定位的方案。

随着智能设备的普及以及诸多传感器的集成,智能设备的升级也一直与硬

件技术处于协同发展之中。无论是在 ios系统平台下,还是 Android系统平台下  
的智能设备,其内置传感器也越来越丰富,也为智能设备应用的发展带来了更

多的可能。

本章将会对利用智能手机进行双麦节点定位进行简要描述,并对本文中后

续所涉及的智能手机内置传感器进行讲解,最后系统描述本文中所使用的的一

些定位原理和算法设计。

2.1双麦克风的节点定位

随着可移动智能设备的普及,尤其是智能手机更是走到了每个人的生活

中。自2018年起,大部分的智能手机都开始集成两个甚至多个麦克风。除了位  
于设备底部的通话主麦以外,智能手机的顶部往往还可能有降噪麦,外形是一

个"小孔"(不同的手机可能有所区别,例如 iPhone手机的第二个麦克风常常

在摄像头的附近)(如图21),这就是手机的降噪麦克风,它的主要作用是实现  
有噪声环境下的高质量通话。

4

毕业论文陈勇虎

图21: iPhone8的次麦克风手机位于摄像头附近

手机上设有的两个电容式麦克风尽管作用不同,但是其性能相同,对环境

中声音信号的收集能力基本没有差别。如果利用双麦克风系统的时间同步(主

麦和降噪麦都是集成于同一个设备的,底层数据的收集也是同步录制,故信号

是完全时钟同步的)特性,即使两个麦克风(如图22)之间的距离较短(16cm   
左右,不同手机略有差异),也可以根据双麦采集的信号计算出声源信号到

达两个麦克风的信号时延样本点数,并进而计算出声源到双麦的到达时间差

(TDOA),不仅如此,利用双麦克风系统智能手机也规避了两路信号时钟同步的  
问题。

图22:双麦手机,以三星 S5手机为例

目前国内外也已经有许多基于双麦系统实现以声源定位为基础的有趣的研

5

毕业论文陈勇虎

究成果。例如 Sunke利用双麦克风智能手机进行手势轨迹感知[7];Aarab使用双  
麦克风节点定位的思路测算说话人的位置[8]。

2.2智能手机的传感器

随着科技的发展,智能手机已经不只是一个通信工具,更是一个具有复杂

功能的电子设备。大多数的 ios和 Android设备都有许多内置传感器,用来测量  
屏幕方向,运动和各种环境条件,这些传感器检测环境并捕获高度精度的数据

信息,非常适合用来测量设备的三维移动和定位,以及实时监测周围环境,例

如可以跟踪设备的重力传感器推断用户的手势和动作,同样天气应用中将会使

用设备集成的湿度和温度传感器。智能手机的内置传感器有硬件实现和软件实

现之分[9]。硬件层的传感器是设备内置的物理组件,这类传感器通过直接获取

特定的环境信息(如角度变化,三轴加速度,地磁场强度等)来采集数据。软件  
层的传感器则不是物理设备,其数据则是从一个或者多个硬件传感器中获取,

例如线性加速度传感器。具体可参考表21。本章将会简述实验中涉及使用的  
几种传感器。

表21: Android平台支持的传感器类型

传感器类型说明常见用途

ACCELEROMETER 硬件加速力动态检测

AMBIENT\_TEMPERATURE 硬件环境室温监测气温

GRAVITY 软件或硬件重力动态检测

GYROSCOPE 硬件旋转速率旋转检测

LIGHT 硬件环境光级(照度控制屏幕亮度

LINEAR\_ACCELERATION 软件加速力监测单个轴向上的加速度  
MAGNETIC\_FIELD 硬件环境地磁场创建罗盘

ORIENTATION 软件旋转角度确定设备位置

PRESSURE 硬件环境气压监测气压变化

PROXIMITY 硬件物体到屏幕的距离通话过程中手机的位置

RELATIVE\_HUMIDITY 硬件环境的相对湿度露点,绝对湿度和相对湿度  
ROTATION\_VECTOR 软件或硬件设备动态检测和旋转检测

TEMPERATURE 硬件设备监测温度

在传感器框架下采用三轴坐标系,其坐标系是相对于设备屏幕设定的,其

6

毕业论文陈勇虎

设定如图23所示。在后续的陀螺仪,加速度传感器,地磁场传感器中,上述  
坐标系均试用。

图23:传感器坐标系

2.2.1陀螺仪

陀螺仪,其原理基于角动量守恒定理,是一种用于感知测量和维持方向的

装置。陀螺仪常用于导航,定位等系统。在 Android系统中,陀螺仪测量的是

围绕设备的 x,y与 z轴的旋转速率(弧度/秒)。通常情况下,我们利用陀螺  
仪的输出数据进行关于时间的一次积分,从而获得角度随时间变化累积的转

角。但是,在本文中判定设备是否"静止"的问题上,对陀螺仪的时刻输出设

定一个硬阈值,当输出数据的(绝对值)超过阈值是,即可认为在设备处于运动  
中。从而避免积分中的漂移问题。

2.2.2加速度传感器

加速度传感器又称为加速计,用于测量设备在运动状态下的加速度的传感

器。高灵敏度的加速计用于飞机和导弹的惯性导航系统中,在无人飞行器中,

加速计有利于保持稳定飞行。加速计的应用相当广泛,几乎所有的智能手机都

包含加速计。尽管加速计的数据中包含了重力场的成分,但是在本文的使用中

并不计较其细节,因此我们不对其进行深入解析。目前的智能手机下对加速计

的应用很多,例如常见的计步器,微信"摇一摇"等。

7

毕业论文陈勇虎

2.2.3磁力传感器

磁力传感器又称磁力仪,高斯计,是用于测量地球磁场的仪器。谈及磁力

计,其主要的应用就是手机自带的指南针。在 Android系统中,开发者不仅提  
供了获取磁力值的接口,同时也提供了磁力计与加速计结合获得方向的接口,

因此,通过这方面的应用,将会给用户一个地理方位的指示。

2.2.4屏幕方向传感器

方向传感器属于软件传感器,安卓平台提供方向传感器用于判断设备的位

置。其数据是通过加速度传感器和磁场传感器共同获得的。至于其算法细节我

们不必去关心。由于繁重的处理操作,因此方向传感器的准确度和精确度都是

会降低的。具体而言,方向传感器在倾角为0时才可靠。根据官方文档的描

述,Android2.2(API级别8)已经弃用屏幕方向传感器,Android4.4W(API级别

20)已经弃用屏幕方向传感器类型。因此,Android系统提供了另一种方法来来  
获取屏幕方向值,当我们注册好加速度传感器和地磁场传感器后,即可以通过

调用 getRotationMatrix()方法和 getOrientation()方法来计算屏幕方向值。屏幕方  
向传感器常应用 VR,AR,指南针等应用。

2.3信号时延计算原理

对于具备双麦的智能手机,其主麦和降噪麦都处在"相同"的环境下,因

此采集到的的两路音频信号必然具有较强的相关性。当我们要求解某一个声源

的空间位置时,计算出声源到达两个麦克风的信号时延往往有着重要的作用。

对于到达时间差(TDOA)的获取主要有两种方法。

第一种方法依赖于对信号到达时间(TOA)的测量(或计算),通过信号到达  
时间的差值来求得。基于到达时间的方法对系统的时间同步要求就会很高,但

是在信道传输特性相似的情况下,这种办法可以减少多径效应带来的误差。以

二维空间为例,如图(24),根据信号到达时间可以得到关于到达时间差的方程  
如下:

√

(x − x1)2+(y − y1)2−

√

(x − x3)2+(y − y3)2= c(t1− t3)(21)√  
(x − x2)2+(y − y2)2−

√

(x − x3)2+(y − y3)2= c(t2− t3)(22)

8

毕业论文陈勇虎

由于依赖于 TOA 的值,微小的测量误差或者同步信号误差,就会引起

TOA较大的误差,进而可能导致计算出的 TDOA的精度降低,因此在后续的  
实验中没有采用这种方式求解时延。

图24: TDOA算法示意图

第二种方法是将采集到的信号进行相关运算,从而得到到达时间差

(TDOA)的值。在实际应用中,系统往往很难做到严格的同步,因此在大多数

的定位方案中,也常常用相关估计的方法求解 TDOA的值,再进行后续的定位  
计算。在主流的基于无线传感网的定位方案中,这种方法对网络的要求低,故

而通过该方法测量(计算)更具有实践意义。

广义互相关的基本思想是对已经经过滤波等信号处理的两路信号 x1(t)和

x2(t),求其互相关函数,其原理框架如图(25)所示,其公式表达为:

τdelay = arg max

t∈R

(( f ⋆ g)(t))(23)

9

毕业论文陈勇虎

图25:互相关函数求解时延流程

在利用线性卷积计算时,常常可以借助线性卷积的关系来实现利用频域

FFT的方式计算互相关,这种方法将比传统的时域计算法极大的减少计算量。

根据维纳辛钦定理:平稳信号的自相关函数与其功率谱密度互为傅里叶变换

对,因此相对应的,利用频域下的功率的互功率谱可以计算时域的互相关函

数。最后通过峰值检测器求解出时延。需要说明的是,麦克风采集的信号是离

散的,因此时延可以看做是几个采样点数的差距,通过麦克风的采样率,我们

将可以把计算的采样点数的差距转换成时间的差值。

2.4基于到达时间差的定位算法设计

上一节简要描述了利用互相关估计求解信号时延的方法,这一小节将会描

述利用求解出的到达时间差(TDOA)进行后续的声源定位。

2.4.1二维空间下的定位分析

我们首先从二维空间下进行定位分析。首先可以明确的是,根据到达时间

差,结合声速(vsound)我们可以求解出声源到两个麦克风的距离差(∆d),从而

由方程(24)因此在二维空间下,相对于手机中心和手机坐标系,我们可以得  
到一个以智能手机麦克风节点为焦点的双曲线,而声源则在其中的某一支曲

线上。同理,当我们移动手机至别的位置,那么就又可以得到一支曲线,如图

(26),则两个曲线的交点就是声源的所在位置。

√

(x − mic1x)2+(y − mic1y)2−

√

(x − mic2x)2+(y − mic2y)2

=c ∆t = d1

(24)

10

毕业论文陈勇虎

图26:2维双曲线定位

2.4.2三维空间下的定位分析

拓展至三维空间中,同样,我们可以根据到达时间差,计算出声源到两个

麦克风的距离差,因此在三维空间中,如图(27)我们可以根据公式(25)得  
到一个双叶双曲面,而声源则可以在其中的某一个面上。同理,通过改变位

置,我们可以获得更多的双曲面,进而求解出声源的所在位置。

√

(x − mic1x)2+(y − mic1y)2+(z − mic1z)2−  
√

(x − mic2x)2+(y − mic2y)2+(z − mic2z)2  
=c ∆t = d1

(25)

图27:3维双曲面定位

2.4.3离线计算下的定位算法分析和设计

通过公式24和公式25,不难看出,关于声源位置的方程组是非线性的。

而且,一方面,我们不能保证到达时间差(TDOA)的测量总是不存在误差的,

11

毕业论文陈勇虎

另一方面,我们也知道声速也并非固定不变,正如公式26所描述的那样,因

此对于测量(计算)出的到达时间差,必然会存在或多或少的误差,这对后面

定位精度的影响也是不可预测的。但是,由于我们变换双麦的位置,因此就可

以获得很多组数据,大量数据的冗余,使得该定位问题也就转换成了非线性

的最优化问题。由于二维情况可以看做三维情况下的一种特殊情况,也就是

z = miciz,因此只对三维空间下的情况进行分析。

vs =331.3+0.606∗ Temperature (26)

为缩小搜索空间,在麦克风位置的布置上,可以采用固定其中一个麦克风

结点的方式,如图(28所示,因此根据到达时间差(TDOA),可以得到如下的方  
程组。

r2i =(x − xi)2+(y − yi)2+(z − zi)2(27)

r20=(x − x0)2+(y − y0)2+(z − z0)2(28)

∆ri = ri − r0= c∆ti, i =1,2,3,...,m (29)

式中,ri 为声源到不同位置下的 mic2的距离,∆ri 为声源到固定的 mic1的

距离,c为声波的传播速度,∆ti为不同位置下 mic2与 mic1的到达时间差。

图28:3维结点布置示意

下面简要分析在三维空间下,基于 Chan的到达时间差定位算法[10]。由公  
12

毕业论文陈勇虎

式27和28不难得到:

R2i,0= r

2

i − r20

=(x − xi)2+(y − yi)2+(z − zi)3−(x − x0)2−(y − y0)2−(z − z0)2  
(210)

∆ri = ri,0= ri − r0

=

√

(x − xi)2+(y − yi)2+(z − zi)3−

√

(x − x0)2+(y − y0)2+(z − z0)2

(211)

r2i = Ki −2xix −2yiy −2ziz + x2+ y2+ z2  
Ki = x2i + y

2

i + z

2

i

(212)

而由基本的定义则有:

r2i =(ri,0+ r0)

2(213)

将公式213代入212中,于是有

r2i,0+2ri,0r0+ r

2

0= Ki −2xix −2yiy −2ziz + x2+ y2+ z2=⇒

r2i,0+2ri,0r0+(x − x0)2+(y − y0)2+(z − z0)2= Ki −2xix −2yiy −2ziz + x2+ y2+ z2=⇒

r2i,0+2ri,0r0= Ki −2xix −2yiy −2ziz +2x0x +2y0y +2z0z −(x20+ y20+ z20)= r2i − r20=⇒

r2i,0+2ri,0r0=−2(Xi,0 x + Yi,0 y + Zi,0 z)+ Ki − K0=⇒

Xi,0= xi − x0,Yi,0= yi − y0,Zi,0= zi − z0=⇒  
(214)

将上式转换为矩阵形式

R2i,0= r

2

i − r20=−2

[

Xi,0 Yi,0i Z1,0

]

x

y

z

+ Ki − K0(215)

通过上面所描述的这种转化,可以消除未知数的平方项,而只保留了一次

项,根据 i的不同取值,可以得到了一系列的线性方程组。

13

毕业论文陈勇虎

1

2

∗



R21,0− K1+ K0

R22,0− K2+ K0

...

=−



X1,0 Y1,0 Z1,0

X2,0 Y2,0 Z2,0

.........

∗



x

y

z



h =

1

2

∗



R21,0− K1+ K0

R22,0− K2+ K0

...

,G =−



X1,0 Y1,0 Z1,0

X2,0 Y2,0 Z2,0

.........

, h = Gz0

(216)

其中 z0即为要求解的值。当然,由于误差的存在,所以 Gz0, h,误差向量

为ϕ= h −Gz0。只需要3个 TDOA测量(计算)值,就可以通过计算得到声源的

位置(x,y,z)。但是可以通过利于冗余数据,从而可以获得更好的拟合值。于是  
通过加权最小二乘法获得初始的估计解,再利用估计解和其他条件进行第二次

加权平均,对得到的估计值进行优化。在 Chan算法定位问题[10]中有具体算法  
的描述和分析,这一方面不是本文的重点,因此不做赘述。

2.4.4在线指引下的寻迹方式

在前一小节中,我们简要描述了离线处理中,通过基于 Chan的到达时间

差算法计算出未知声源的方法。这种方法尽管操作方式复杂,但是却可以获得

较为准确的结果。然而,在实际的定位中,在短距离的室内环境中,我们也不

是对周围的事物"视而不见",因此往往一个简单的方向指引就具有很好的参

考意义。因此,对于三维的空间定位,在一定程度下,仅仅二维的指引就可以

作为较好的参考方向。

如图(29)中,我们获取了一个以麦克风为焦点的双曲线,同样,我们也  
就获得双曲线的渐进方向。而当声源距离麦克风中心较远时,渐进线的方向就

是对声源方位的一个很好的指引。如果我们希望定位方式从离线状态下计算位

置,转移到在线的指引我们去寻找的话,这种方向指引无疑是一种很好的途

径。后文中,我们将对这个问题做具体描述。

14

毕业论文陈勇虎

图29:2维空间指引

15

近些年来,智能设备尤其是智能手机已经普及,智能设备上传感器的集成

和发展,也使得智能手机的功螚越来越丰富。在前面我们已经简述到现阶段的

智能手机,都已经普及使用双麦系统,其中的降噪麦克风也是为了有效抑制我

们在日常通话中的环境噪声,并且也分析到两个麦克风是时钟同步的。因此,

利用智能手机的优势,通过获取同一个手机两个麦克风的声音数据,我们从中

过滤出我们想要的声音信号,就可以得到两路严格同步的声音信号,并进而可

以通过广义互相关的方法求解出声源到两个麦克风的信号时延,对计算出的信

号时延进行后续的处理,就可以实现一些有意义的功能[11]。

在前一章的基础上,本章详细描述数据收集方案,采集到的底层信号的预

处理过程,并分析其特征。因为声音信号的非平稳性,所以预处理操作尤为重

要。本章节将会描述利用双麦克风手机实现定位功能的诸多细节性工作,从而

用于后续的定位分析。

3.1离线数据预处理流程

本小节中,首先介绍离线状态下的数据预处理流程,并逐渐过渡到系统后

续使用的在线指引模型的数据处理流程。由于麦克风收集的信号是一种非平稳

的带宽信号,因此需要对收集的信号进行预处理操作,否则,由于噪声等环境

因素的影响,会使得实验效果很不理想。

在离线数据处理流程中,通过智能手机收集声音文件并记录为一个 wav

文件,通过 MATLAB分析该 wav文件,最终计算出到达时间差。该离线数据  
算法处理流程是为了通过处理一段时间窗口内,设备没有发生大幅度状态变

化(包括角度,位置等参数)的情况下,计算出静态声源相对于该位置的方向

(Speaker Direction Finding (SDF))。在分析阶段,包括滤波,加权移除异常点,

加窗分帧,端点检测等必要操作,在一段时间窗口内的处理流程具体如下图所

示(31).

16

毕业论文陈勇虎

图31:离线数据处理流程

3.2数据采集

本文利用一部具有双麦系统的智能手机(Samsung Galaxy S5)作为信号采

集的设备,在分析阶段,使用 MATLAB科学工具对采集到的声音信号进行处

理和显示。我们利用另一台智能手机(Vivo Y93S)发出了一个频率在2000Hz­

2700Hz变换的线性调频信号,如图32所示,图中蓝色的标记为 LY的数据以及

红色的标记为 RY的数据,分别代指两个麦克风采集的数据。图中的上一部分

图中,横坐标代指数据采样点,纵坐标是对数据进行标准化后的结果,因此无

量纲。但是在下部分图中,横坐标是标准化的频率,单位为π∗radians/sample(频

率标准化的相关概念不做赘述,可以参考[12]),纵坐标为能量谱,这里我们很  
容易看出两个麦克风的采集的数据的能量谱是非常接近的,换句话说,两个麦

克风的采集能力非常接近。这里我们对原始数据取样其中发声部分中连续的

400个样本点。如图33所示,同样我们依然可以看出两个麦克风的采集能力是

非常接近的,另一方面,即便我们暂时无法确定到达时间差(TDOA)的值,但  
是我们可以清晰看出收集到两路声音数据只是差了几个样本点的,因此只要计

17

毕业论文陈勇虎

算出信号相差的样本点数,就可以根据采样率(44.1kHz)进而求解出 TDOA的  
近似的结果。

图32:双麦克风信号

图33:双麦克风信号取样

下表中31展示了测试手机(Samsung Galaxy S5)的参数,后续实验中使用

了华为 mate20手机作为实验设备,S5和华为手机上也都配备了两麦系统,目

前智能手机录音的采样频率主要为44.1kHz,16bit量化。大部分手机都支持包

括8kHz/8bit、11.025kHz/8bit、22.05kHz/16bit 和44.1kHz/16bit,因此两个设备  
并无太大差异。

18

毕业论文陈勇虎

表31: SamSung Galaxy S5测试设备参数

参数描述

麦克风距离16cm

最高采样频率44.1kHz

方向传感器不支持

但是需要补充说明的是,智能手机在录制性能上还是有些许差异的,通过

调研,华为手机(34)在录制方面从频谱低端到大约17kHz都能出色的再现自  
然的声音,而三星手机则在高频端有更好的性能。由于设备的局限性,在后续

声源方面,依然可以通过非超声波作为信号载体实现定位。另一方面,华为手

机的空间感方面性能也更优,对数据采集的灵敏度也高一些。所以在后续实验

中以华为手机作为接收设备,而用普通的 Vivo手机发出声波即可。

图34:华为手机录制性能

本文采用具有双麦系统的 S5手实时采集环境的声音信号,在 Android系统

底层获取的声音数据实际是个一维数组,当然利用 MATLAB进行读取,会转  
换成两个一维数组,分别代表两个麦克风的数据。在原始的底层存储中,一维

数组的值即是采集到的数据。如图35所示,实验中,我们采用16bit的 stero   
的格式进行采集,因此根据图中的存储方式很容易分别获得两个麦克风的数

据,并且两组数据是完全满足时钟同步的。为了区分声源和环境噪声,本文中

对采集的信号设置了一个能量阈值,当每个 buffer中信号的能量超过于该阈值

时,则认为采集到的了声源数据,而当 buffe中的信号能量低于该阈值时,则  
没有采集到的声音数据。最后对采集到的的数据进行后续的信号处理。

19

毕业论文陈勇虎

图35:数据存储方式

3.3声音数据处理

智能手机从底层获得的两路麦克风数据中,既包括了采集到的的声源信

号,尽管室内环境较为安静,但是同时也会有环境噪声以及其他各种异常信

号,本小节将会利用自带的滤波器除噪以降低噪声的影响,同时使用加窗移动

的方式降低数据中的异常值的影响,从而实现对原始录制的信号进行清洗处

理,后续将会进行分窗加帧,端点检测等为后续到达时间差的计算做准备。

3.3.1滤波除噪

由于信号采集中也会含有噪声成分,这对我们声源定位无疑会造成很大的

影响,因此我们应该去除非声源发声的成分,提高声源的成分。常见的去噪方

式就是使用滤波器,这里我们使用带通滤波器,降低环境中噪声的干扰。在

MATLAB通过 filter,designfilter函数我们很容易实现我们需要的功能,在后续

的在线算法处理流程中,因为程序运行在 Java平台上,所以 Android系统方面

可以通过使用 dsp­collection这一个 jar包来满足我们需要的功能。

例如当我们的声源频率范围在2000Hz­2700Hz时,那么在除噪的过程中,

我们就需要通过一个带通滤波器,减益非该频率范围的成分。如图(36)所

示,横纵坐标信息同图(32)。通过滤波,不在制定频率范围的数据被大大减  
益,从而降低环境噪声对实验结果的影响。

20

毕业论文陈勇虎

((a))信号除噪之前((b))信号除噪以后

图36:(a)信号除噪之前。(b)信号除噪以后。

3.3.2异常点移除

对实验结果影响较大的还有异常数据,例如在看似稳定的声音信号中,由

于降噪麦和主麦底层下硬件的问题,仍会有一些突变的声音信号。这里采用对

两路声音信号分开进行处理。值得一提的是,由于采样率高达44.1kHz,所以  
处理过程中去掉一些数据并不会造成较大的影响。这里,我们采用滑动窗口的

方式,使用加权平均移动(WMA [13])的方式进行处理。加权平均移动认为:同一  
个窗口内的不同的数据对目标值都有着不相同的权重因子,因此目标值就可以

看成窗口内数据和一个固定的权重函数的卷积。由于数据本身异常点并不是很

多,并且使用传统的WMA就可以获得较好的效果,因此记 signalt 为 t时刻的数  
据,采用下面的公式更新 t时刻的信号值:

signaltnew =WMAt =

npt +(n −1)pt−1++2p(t−n+2)+ p(t−n+1)

n +(n −1)++2+1

=

n × signal t−1+(n −1)× signalt−1++1× signalt−n+1  
n +(n −1)++2+1

(31)

经过上述处理后,数据变得更加光滑,并且从图37中已经可以隐约可见

到达时间差(TDOA)的大致范围。这里,LSD为第一个麦克风降噪后是数据,

LSignaData代表降噪后数据经过异常点去除操作后的数据。

21

毕业论文陈勇虎

图37:异常点移除后的数据

3.3.3分窗加帧

尽管我们采集到的声音信号并不是平稳的,但是在较小的时间窗口中,比

如几十毫秒级别的时间测度范围下,声音信号依然是近似平稳的。基于这个想

法,可以把采集的声音数据,看做是一帧一帧的小时间窗口范围的信号的组

成,每一帧的信号都可以看成独立的声音信号。在这个思想下,实际就是在声

音数据添加了一个滑动窗口,窗口的移动速度在窗口长度的三分之一左右即

可。如图(38)

图38:数据分帧

由于在信号分帧中,我们基本上是不可能做到对信号的周期性截断,常常

的解决方法是在时域上对信号进行加窗以调制信号,减少信号的频谱泄露。常

见的窗函数有矩形窗,汉宁窗和汉明窗[14]。以 N表示帧长,这三种窗函数的时  
域表达式如下所示。

(1)矩形窗的时域表达式:

22

毕业论文陈勇虎

w(n)=



1,0≤ n ≤ N −1

0, n = else

(32)

(2)汉宁窗和汉明窗的时域表达式:

w(n)= a0−(1− a0) cos(

2πn

N

),0≤ n ≤ N (33)

当 a0=0.5时,为汉宁窗,当 a0=0.54(2546)时,为汉明窗.

对窗函数的性能区别我们不做过多描述,在制定频段的声音下,为了保持

平滑,汉明窗的性能更优,但是由于声源信号是周期有规律的,因此两种窗函

数在实际使用中性能接近。

3.3.4端点检测

尽管我们采集的声音是"连续"采集的,但是仍然有可能部分数据帧中,

并不没有录制到声源的信号,例如智能手机开启麦克风时,底层仍有一个异常

的信号电平,这方面的超过了本文的论述内容,因此不做躲过解释。但是,即

便如此,依然可以在数据处理中通过端点检测查找到有效的声源发源部分。在

前文数据采集中,我们对数据采集设定了一个基于能量的硬阈值,虽然短时能

量可能出现噪声特征值较大,或者声音混淆的情况,但是在实际实验中,由于

室内环境噪声较小,利用短时能量依然可以满足我们的需要。对这方面的优化

依可以通过参考文献[15]中的对数能量特征进行优化。

3.3.5到达时间差计算

本小节基于前期的信号处理后,获取到两个同步的,并且噪声,异常点数

据都得到有效处理的分帧加窗后的数据,随后调用第二章讲解到的 GCC算法

对两路信号进行到达时间差(TDOA)计算(估计)。具体原理已在前文说明,因  
此这里我们不再赘述其原理。

由于接收到的声音信号来自于同一个声源,因此两路信号之间具有较强的

相关性而与噪声无关。通过描述的广义互相关方法,我们可以得到两路信号之

间的时延差。前文中我们也有说明,这里计算出的"时延"实际是两个信号相

差的采样点数,但是,由于采样率为设定好的44.1kHz,因此可以通过计算出相  
差的采样点数,经过转换从而可以得到对应的时延,也就是实际的到达时间差

23

毕业论文陈勇虎

(TDOA),后面我们用相差的采样点数代指到达时间差(TDOA),转换公式无需

赘述。可以明确的是,以 mic2为标准,当 TDOA <0时,mic1先接收到信号,

TDOA >0时,mic1后接收到信号,TDOA =0时,声波同时到达 mic1和 mic2。

降至二维空间下,详情如图(39)所示。需要注意的是,TDOA的正负也是相

对而言的,例如 mic1早于 mic2接收到信号,也就对应了 mic2晚于 mic1接收到  
信号。

图39: TDOA >0, TDOA <0, TDOA =0

3.3.6到达时间差处理

利用双麦手机作为接收设备,计算声波到达手机双麦的时间差,高达

44.1kHz的采样使得我们可以得到大量的声音数据,并且计算出很多个数据段  
的到达时间差。因此鉴于数据量多的优势,那么我们就可以利用此优势进行数

据的筛选。即便我们的某些到达时间差测量并不是足够"精确",但是依然可

以辅助进行方向探测。

回到最初的系统设置,我们设置的采样率44.1kHz,编码为16bit,我们暂

时不考虑高编码编码的精确度,但显然的是,由于使用的 bit数较大,因此数

据量化的范围也更大,因此数据也是更精确的。对于44.1kHz的采样率,麦克

风每手机一秒钟,就可以采样到44.1kHz的采样点。实验中发现,如果将太多  
量的数据一次性进行计算,由于声源功率较小,信号衰减等,大部分测量结果

都是不准确的。然而,另一方面,即便数据过多造成了结果不够准确,但是对

数据分段,对该一秒钟的部分数据进行到达时间差的计算,在原理上也是对整

段数据的到达时间差的估计,因为延迟是"全局"的延迟,通过实验我们也发

现了这一个问题。因此,鉴于这种思想,前文中我们也说明了对信号进行分帧

24

毕业论文陈勇虎

加窗,当然,由于在后续实验中设备会一直处理数据,我们对每 k个连续数据

进行分帧。从而,对两个麦克风相同次序的数据帧进行到达时间差(TDOA)计

算,依然可以得到全局的到达时间差(TDOA),如图(310)。

图310:数据分段示意

数据分帧之后,并进行对应的数据段的到达时间差(TDOA)的计算,从而

可以产生一系列的到达时间差(TDOA)值。在实际计算中,我们设定帧长 k =

2048,很明显的是,对 k的设定是一个 trade­off的问题,若 k值太小,数据点

太少,基本无法得到合理的到达时间差(TDOA)值,如果 k值较大,精度会有

影响,实验中 k暂取用2048。由于1s中可以采集到44100个数据,因此帧移  
改为帧长,从而减少计算量。另一方面需要明确的时,实验中设备的麦克风距

离约为16cm,因此,从采样点的角度看,到达时间差(TDOA)绝对值的最大值  
|TDOA|max应该满足下式(以20℃的环境为例):

|TDOA|max =16/v ∗44100≤16/((331.3+20∗0.606)∗100)∗44100(34)

=16/(34342)∗44100(35)

≈20.546<21(36)

由于采样点误差必然会有0.5个采样点的误差范围,所以 TDOA的范围

应该在­21至21之间,这就是到达时间差采样点角度的合理值的区间。另  
25

毕业论文陈勇虎

一方面,虽然由于离散采样的问题,到达时间差(TDOA)的值最后应该取

整数,但是我们也可以肯定的是,即便有0.5个采样点的误差,∆distance =

0.5/44100∗ v ≤0.5/44100∗34342≈0.389cm,对于16cm的麦克风距离来说,这  
个值微不足道。

前面中我们提及到,每一帧的信号计算出的到达时间差应该符合或者接近

于全局的到达时间差,基于这种原因,我们使用以下的数据筛选方案进行数据

综合数理(下以 TDOA代指采样点角度的到达时间差):

(1)每 m秒中,准确来说,应该是每⌊44100∗ m/2048⌋∗2048个数据,进  
行一个到达时间差的计算,在这一次的计算中,按照前文叙述的方法,每

k(k=2048)个数据计算一次 TDOA的计算,因此可以产生个⌊44100∗m/2048⌋个  
TDOA的值。

(2)对于这些计算出的 TDOA的值,如果有超过一半的值相同并且介于前

面所说的合理值区间,那么我们就可以认定计算的 TDOA有效,并且其符号包  
括数值都可以用于后续的处理算法中。

(3)如果无法满足(2)的条件,但是大部分值甚至所有值都是大于0或者小

于0,或者等于0,只有极少的符号与整体不一致,这里我们定义极少为占比不

超过1/7,那么仍然可以认为该组 TDOA有效,不过此时我们只使用 TDOA的符  
号,也就是大部分值的的符号,用于后续的方位判断。对于特殊情况,我们考

察这些数值的众数,如果只有一个众数,如果众数在"大部分值"占比超过一

半,那么我们使用该众数作为 TDOA的数值;如果存在多个众数,并且数值差

值不超过2,并且所有众数在"大部分值"中的占比超过一半,我们可以使用

这些众数的均值作为 TDOA的数值使用,否则,在(3)中,我们只使用 TDOA   
的符号。

(4)如果(2)(3)的处理条件都无法满足的话,则认为这一次计算的结果  
无效。

但是,当 TDOA不为0的时候,信号能量会有较为明显的对比,因此对于

符号的判断基本都可以保证,因此大部分测量结果至少可以返回一个合理的

TDOA符号,因此大致方向可以确定。并且在离线处理中,取 m=1,就可以满  
足我们的实验需求。

26

毕业论文陈勇虎

3.4离线处理下的定位方法

图(39)中,如果我们以mic1为左,以mic2为右,根据到达时间差的符号

(0,­1,1)实际可以确定对于声源与中心关系,这里我们只简单定义为左,前,右  
三个方向。后续说明方位的时候,我们所指方向就是这里说明的左,前,后。

由到达时间差(TDOA)我们很容易确定一个双曲线方程,对于双曲线的渐

近线方向,就是对声源的很好一个指示,至少在2D的范围中是很好的一个标

准。这里我们根据到达时间差(TDOA)的值和麦克风距离,就可以计算出渐近

线的角度(方向),前文中我们对此进行了较为详细的描述。后续说明角度的时  
候,我们所指角度就是这里说明的角度。

在室内环境(图311)下,我们需要在整个空间坐标系下确定每次设备的

所处的位置,也就是说,已经确定了图311中 Positioni 的位置,随后我们在  
每个位置下录取一段音频,并进行到达时间差的计算,由于设备在三维空间

中可以有很多的位置,因此,我们可以得到一系列的 Positioni,以及对应的

Xi,Yi,Zi,T DOAi。我们利用已经比较成熟的前文所描述的 Chan算法即可计算出  
后续的结果,然而在实际操作中,由于位置精度测量本身的误差,因此可以尽

可能的固定其中一个麦克风的位置,既方便与计算,同时其误差也小于变换位

置后的测量误差。

图311:室内环境

27

毕业论文陈勇虎

3.5离线计算到在线指引的迁移

前面已经描述离线计算的定位犯法,正如第二章描述的那样,适当的方向

指引依然有很强的指示作用。这一节讲解在线指引模型,通过降低对精度的要

求,实现在线平台下的指引方案。

3.5.1概念阐述

对数据的离线处理和定位计算尽管可以获得更为精确的结果,但是在实际

操作中过于复杂,并且在实际寻找的过程中,我们也并不是"视而不见",简

单的提示信息或许就可以帮助我们的进行探测,因此我们降低了实际需求,从

精确到3D指引降至2.5D的探测范围。因此在离线定位算法的处理的基础上,

我们提出了数据在线的处理流程。

这里我们需要更新之前的处理流程,因为在数据在线处理流程中,麦克风

处于一直的录音状态,因此有效声音提取部分也就不是那么重要,在前面的讲

解中,我们指出无效声音段并不是声音信号的主体,因此可以直接抛弃一些数

据。尽管数据的在线处理流程也可以看做多个离线处理的组成,但是在实际操

作中,我们还是不希望在寻找过程中,在一个位置上长期停留,后续,我们引

入一些机制进行一些状态的判断。

首先,我们需要提出一种降维的思想。如图312,记智能手机屏幕所在平

面为 P1,声源实际位置 S与两个麦克风 mic1,mic2所在平面为 P2,记 P1和 P2构

成二面角为α,在 P2中,声源位置 S与智能手机中心的连线 l1与麦克风所在直  
线 l2夹角为β,声源在平面 P1的投影 S

′

与智能手机中心的连线 l3与麦克风所在

直线 l2夹角为γ.显然很容易得到 tan γ= cosα tan β.图中 l4为平面 P1上与麦克

风所在直线 l2夹角为β的直线。尽管α的值我们无法获知,但是计算出一个粗

略的β,依然有一定的指导意义,因为在平面 P1上,声源投影的位置 S

′

的方向

角γ= arctan(cosα tan β)。

28

毕业论文陈勇虎

图312:3D降维指引

如果在平面 P1上仍使用β作为指引的方向,那么,这里就会产生一个角度

上偏离误差∆θ=β− arctan(cosα tan β),显然当α越大时,误差∆θ越大(这里

α不超过90度)。显然在实际运行过程中,我们并不需要考虑这种情况。这是  
因为实际过程中,智能手机并非是固定不动的,因此,稍微的转动就可以使得

二面角发生较大的变化。如图313所示,当手机位于 Loc1时,二面角α达到90

度,但是只要稍微转动至 Loc2处,就可以获得一个新的α,甚至我们可以把手

机移动到 Loc3处。当手机的转动已经不能造成二面角α较大的变化时,我们也  
就来到了声源投影位置的附近区域,这样,声源的位置我们也就大致获得了。

图313:手机状态改变

3.5.2在线处理算法模型

在在线指引算法的模型下,我们需要引入一些机制,因为在在线指引的模

型下,我们需要一个低要求的方向指引,而不再是准确的三维坐标。而且,在

寻迹中,智能手机是动态移动的,而我们在计算到达时间差的过程中,必然是

29

毕业论文陈勇虎

要保证麦克风位置时不变的。因此对于状态的判断就显得尤为重要。其次为了

能够给予较好的方向指引,我们混合了地理方向等判断。

前文中我们提到了麦克风采样率为44.1kHz,因此在到达时间差和方向计

算下,我们依然用滑动窗口的方式,窗口长度为5s,而窗口移动的速度则设

置为1s,因此,第从5s开始后,系统将会每一秒反馈一个计算出的结果进行  
指引。

3.5.3状态判别

在手机状态判别问题上,主要包括静止状态判定,声源位置方位判定。

一方面,在静止状态判定问题上,我们自然可以采用时域下某个指标积分

后的结果进行衡量,但是由于 Android自带的传感器必然存在温差,零漂的问  
题,因此,我们采用陀螺仪瞬时值进行衡量。

另一方面,在声源位置方位判断上,只是为了粗略估计声源是否发生了位

置移动。在前文中,我们提及了声源相当于手机中心的"左右"位置关系,因

此在在线指引的模型下,我们通过对"左右"关系进行检测,如图(314)所

示,当我们等待过程中,如果系统反馈的声源方向在"左"(T ′0)"右"(T0)关  
系上不恒定,那么我们将认为声源的位置在改变。尽管在后续实验中并不会出

现这种情况,但是这是对实际应用下系统性能的优化。

图314:状态判别

30

毕业论文陈勇虎

3.5.4陀螺仪数据使用

首先我们需要确定手机处于"静止"状态,这里,尽管可以围绕麦克风所

在直线旋转,但是在在线指引的模型下,我们不需要有这种操作,因此我们把

这种状态也当做"非静止"的状态进行处理。以下给出一组围绕 X轴依次旋转

90,180,270,360度的采集到的数据,如图(315),分别表示三轴采集到的陀螺  
仪数据,横坐标为采样点,纵坐标陀螺仪数据,单位为弧度。从中可以看出,

在设备绕 x轴旋转的过程中,y,z两轴同样会有数据的波动,但是,即便存在数

据的波动,依然维持在0的附近,而发生运动的过程时,陀螺仪的数据就会有

很大的波动,因此为了实际的应用场景,我们对三轴设定一个硬阈值,当陀螺

仪数据(的绝对值)超过阈值时,则判定为设备发生了运动。

图315:陀螺仪三轴数据

3.5.5加速计和磁力计的使用

随后,为了辅助与实际方向结合,因此借用 Android 的加速计和磁力

计,其实现细节不做过多描述。当我们在 Android 设备下注册了加速计和磁

力计两个传感器后,就可以通过对 SensorManager调用 getRotationMatrix以及

getOrientation,即可获得屏幕朝向与磁极的夹角,从而获取当前的方向,因此  
在过程中,并没有对加速计和磁力计数据的直接使用。

31

本系统是对前文所述的基于双麦克风手机的声源定位方案的实现,系统包

括在线指引功能,离线计算等。离线计算的呈现方式是采取手机录音和 matlab

计算相结合的方式,在线指引的方式是制作成一个 Android系统下的智能手机

应用。此外,在声源方面,也是使用了一个自制的 Android系统下的智能手机  
应用,该应用可以发出指定的声波,用于区分声源。

4.1开发环境与平台

1.硬件条件:

1.1.声源设备使用的是:Vivo Y93s

1.2.录音设备使用的是:华为Mate20

2.系统平台:

2.1.录音软件,声源发生软件都运行在 Android系统下,

2.2.离线计算相关程序运行在Windows环境中,以Maltab程序的方式呈现  
3.开发工具:

3.1.手机应用开发平台

3.1.1. Android Studio,版本号:2.3.3

3.1.2. JRE:1.8.0\_112

3.1.3. JVM: OpenJDK 64­Bit Server VM by JetBrains s.r.o

3.2. Matlab版本:9.4.0.813654(R2018a)

4.2系统设计

在系统实现上有两种版本,正如前文描述的那样,一个版本是通过在指定

位置下进行录音并保存音频为 wav文件,然后通过将录音位置和波形文件导入

的 matlab中进行线下的计算,以定位声源的位置;另一个版本则是在手机屏幕  
上实时进行录音和方向反馈,通过不断的方向指引帮助我们去寻找声源。由于

第一种版本除了录音阶段在智能手机上运行,其他阶段在都在 matlab上运行,

32

毕业论文陈勇虎

而且两种版本实现方式有一定的重合部分,因此会在一起进行介绍,尤以第二

个版本为重。

4.2.1多模块设计

在系统运行中,各个模块功能的并行运行是突出的。因此对在线指引系统

中,系统涵盖的模块可以分为:传感器监听模块,录音模块,数据处理模块,

显示模块等。

传感器监听模块:Android的开发者已经对传感器提供了很好的接口,系统

可以通过实例化一个 SensorManager对象对传感器进行监听和数据读取。在系  
统中注册了加速计,磁力计,陀螺仪三个传感器,并且实时监听器数据。系统

运行时,从 SensorEvent对象中读取传感器数据,在重写 onSensorChanged方法  
中,根据数据进行相应的处理。

录音模块:需要说明的是,Android 6.0以后为了用户隐私,将一些权限的  
申请放在了应用运行的时候去申请,所以申请麦克风权限也需要进行动态申

请。当获取麦克风权限后进行录音,该模块会将录取的数据进行声道的分离,

并将数据拷贝用于后续到达时间差的计算。

数据处理模块:该模块主要用于对录音数据进行到达时间差的计算,并且

反馈指引所需的角度和状态判别。通过对指定长度的录音数据进行截取,先后

经过滤波处理等清洗操作,最后调用自定义的 Correlation进行计算。在滤波操

作中需要借助 dsp­collection这一个 jar包的帮助。最后计算的结果会传入到显  
示模块。

显示模块:显示模块通过传入的结果进行方向的绘制,主要依赖于 graphics   
库进行界面的绘制。该模块的显示界面包括了方向指示,同时也会和地理方向

相结合,方便用户寻找方向,相关的数据会反馈在界面上。

此外,对于发声的设备,主要就是通过捕获用户的输入,从而产生相应的

声波,由于实现难度并不是很大,所以不做过多的介绍。在前面所描述的系统

核心和数据处理流程简图如下图(41)所示。

33

毕业论文陈勇虎

图41:系统流程和数据流简图

4.2.2界面与运行方式

下面给出系统给出的实时指引的应用界面,具体如下图(42,43)所示。

简要介绍应用功能,在图(42)中,通过选择波形和对应的频率数据,点

击 PLAY键将可以单声道播放对应的音频,点击 PAUSE即可暂停播放。

34

毕业论文陈勇虎

图42:发声 app界面

在图(43(a))中,通过选择录音,并且选择是否产生 wav文件进行录音,

期间可以绘制前一秒中部分的数据波形,在此界面下通过选择"产生 wav文

件"生成相对应的录音文件并保存在手机存储中,通过多个位置的操作,从而

可以获得一系列的 wav文件,这些文件将应用于后期的离线计算。

在在线指引的模型下,如图(43(b)),系统会默认打开麦克风并开始采集  
数据,当手机状态"静止时"才会收集有效数据,当产生一定量的有效数据

后,系统后台将会计算出目前声源相对应手机中心的方向,也就是图中的青绿

色线,并且显示与手机 y轴的夹角与当前的方向(如图中"西"所示),轮盘则是  
对应的地理方向,从而方便我们寻迹。

((a))离线采集数据界面((b))在线指引界面

图43:(a)离线采集数据界面,(b)在线指引界面

35

毕业论文陈勇虎

4.3系统功能实现

4.3.1录音模块功能

数据采集阶段核心代码如算法4.1所示.手机调用双麦不断捕获周围环境中

声波信号,当一个信号帧中的平均能量高于预先设定的阈值,认为可能接收到

了声源信号,并且将捕获的两路声音数据进行声道分离,从而进行数据清洗等

操作。

算法4.1双麦智能手机的信号采集

1: mAudioRecord.startRecording()

2://系统捕获环境中的音频数据

3: while in recording do

4://数据帧读入音频数据

5: read = mAudioRecord.read(mBuffer,0, BUFFER\_SIZE)

6: if read <=0 then

7: return false

8: else

9://硬阈值初始判断

10: sum = accumulate()

11://达到设定的阈值

12: if sum > threshold \* read then

13://两路信号分离

14: index =0

15: for i =0 to mBuffer.length/2 do   
16: if i %2==0 then

17: System.arraycopy(mBuffer, i \*2, mBuffer1,0,2)

18: LY[index]=((mBuffer1[0]&0x000000FF)|(((int)mBuffer1[1])«8))/

32768.0

19: LYList.add(LY[index])]

20: index = i /2

21: else

22: System.arraycopy(mBuffer, i \*2, mBuffer2,0,2)

23: RY[index]=((mBuffer2[0]&0x000000FF)|(((int)mBuffer2[1])«8))/

36

毕业论文陈勇虎

32768.0

24: RYList.add(RY[index])]

25: end if

26: end for

27: end if

28://other code for further data­processing   
29: end if

30: end while

4.3.2数据处理模块功能

通过麦克风采集获取的数据,将要经过滤波等清洗后并分帧进行计算。其

处理流程如伪代码4.2所示。

算法4.2 data­processing(数据处理功能)

1://数据清洗

1.1://filter(dsp)滤波

LSignalData = filter(bpFilt,LY)

RSignalData = filter(bpFilt,RY)

1.2://RemoveOutliers异常点移除

LSD = RemoveOutliers(LSignalData,m)

RSD = RemoveOutliers(RSignalData,m);  
2://分帧加窗

2.1: LY\_enframe = my\_enframe(LSD, frameLen, overLoap,’rect’)

2.2: RY\_enframe = my\_enframe(RSD, frameLen, overLoap,’rect’)

3://端点检测

3.1:[VSDst,VSDed]= myVSD(LSD,RSD,Unit,m)

3.2: VLSD = LSD(VSDst:VSDed)

3.3: VRSD = RSD(VSDst:VSDed)

4://到达时间差计算

4.1://状态检测

4.2://调用自定义的 Tdoa函数对两路信号进行计算

4.3:[TDOA,Sign]= myTdoa(VLSD,VRSD,N,"True")

5://方向角度计算与显示

37

毕业论文陈勇虎

4.3.3传感器监听模块功能

通过注册和监听传感器,并实时获取传感器数据进行处理。其处理如伪代

码(4.3)所示。

算法4.3 sensor­listering(传感器监听)

1://传感器注册

2://传感器管理器对象

3: mSensorManager =(SensorManager)getSystemService(SENSOR\_SERVICE)

4://传感器对象

5: mGyroscope = mSensorManager.getDefaultSensor(GYROSCOPE...)

6: mAccelerometer = mSensorManager.getDefaultSensor(ACCELEROMETER...)

7: mMagneticField = mSensorManager.getDefaultSensor(MAGNETIC\_FIELD...)

8://传感器监听器注册

9: mSensorListener = new SensorEventListener(){...}

10://监听器方法重写

11://陀螺仪数据

12: gyroscopeValues = event.values

13://设备动态监测

14: IsMove(gyroscopeValues)

15://加速计数据

16: accelerometerValues = event.values   
17://磁力计数据

18: magneticFieldValues = event.values   
19://获取方向

20: getRotationMatrix(rotation, null, accelerometerValues,magneticFieldValues)

21: getOrientation(rotation, orientation)

22://获取方向,并更新界面

23: chaosCompassView.changeVal(orientation[0],degree)

24://传感器监听

25: mSensorManager.registerListener(mSensorListener, mGyroscope,...)

26: mSensorManager.registerListener(mSensorListener, mAccelerometer,...)

27: mSensorManager.registerListener(mSensorListener, mMagneticField,...)

38

毕业论文陈勇虎

4.3.4显示模块

显示模块通过在界面已经展示,由于其实现细节主要就是对 graphics库应  
用,与本文主要内容无关,因此在此不做描述。

4.4系统性能测试和分析

本文工作的过程伴随着大量的数据分析和实验验证,下面对基于完整的双

麦定位实验,以离线的定位计算模型为例,给出数据展示和分析。

在离线的定位计算模型下,在前文的定位分析下,可以如图(44)所示放

置智能手机和声源手机,并进行录音,其中 mic1为主麦,mic2k 为降噪麦依次  
部署的位置示意,喇叭即为声源手机放置的位置,需要说明的是,为了测量高

度,因此在多次放置中,必须存在节点与其他节点不在同一平面内,如图中的

mic2i节点即表示位置高于水平面。

图44:设备放置示意

随后,在三维空间下,mic1为坐标原点建立坐标系。在室内环境下,环境

非常安静,异常噪声也很少,因此数据的波动很小。通过发声手机进行周期声

音的播放,并且在不同位置下进行录音。我们捕获了其中收集到一组数据,如

图(45)所示。其中 LY,RY代指两路麦克风收集到的信号,从中看出,尽管  
39

毕业论文陈勇虎

信号受到底层录音设备和微弱的噪声影响,会出现信号波动,但是我们仍然可

以看出原始信号的周期性。利益方面,通过实际距离检测,该声源位置的空间

坐标约为(200,300,117),其到达两个麦克风的距离差为8.1995cm,约为8.20cm。

图45:底层原始数据部分采样

根据我们在第四章的处理细节,对信号依次进行滤波加噪,异常点移

除操作,对数据进行清洗,数据如图(46,47)所示。图中 LSignalData,

RsignalData代指经过滤波除噪后的两路信号,LSD,RSD代指异常点移除后的  
数据。

图46:滤波除噪后数据采样

40

毕业论文陈勇虎

图47:异常点移除数据采样

随后,对清洗后的数据进行分帧加窗等操作,最后进行到达时间差的计

算。这一组数据计算的到达时间差为11个采样点,且符号正确。由于室内温度

必然存在误差,前文中我们以公式(26)代入计算,以室内20℃代入,则声速

vspeed ≈343.42 m / s =34342 cm / s,因此根据计算方案求解出的到达距离差为:

11/44100∗34342≈8.566cm,与实际距离相比误差为0.366cm。

最后通过 matlab 的计算,将多组数据进行整合计算,计算坐标为 X =

198.3329cm, Y =298.0380cm, Z =115.3334cm,与实际坐标 X0=200cm, Y0=300cm,

Z0=117cm相比,误差为∆X

′=1.6671cm,∆Y ′=1.9620cm,∆Z′=1.6666cm。

综合多次测量的结果,在离线计算模型下,90%以上计算的"左右"关系

正确,到达时间差由于其必然是整数个采样点,因此很难测出准确值,但是

在上面的数据我们也看出,实际误差0.366cm并没有超过一个采样点对应的距

离,而70%系统计算的到达时间点采样值误差也并不超过1个采样点,而最终  
计算的坐标误差,每个坐标轴的分量误差不超过10%.

在在线指引的模型下,以前面采集的数据为例,求解的到达距离差为

8.566cm,因此,根据第四章提出的降维指引的思路,那么此阶段的指引方向角  
为 arctan(8

2−4.12

4.1)= arctan(1.6755)=1.0327rad =59.1694d,而实际的方向在水平

面投影的方向则为 arctan(300192)= arctan(1.5625)=1.0015rad =57.3817d,角度误  
差为1.7877d。

由于在在线指引的模型下,手机发声的功率是个很大的影响,但是由于在

室内环境下,依然可以在室内较小的尺度下获得足以区分的音频强度。在大部

分实验测量中,该算法都可以获得较为准确的到达时间差,尤其在3m以内的

41

毕业论文陈勇虎

尺度下,测量的值会更准确,测量的方向角度误差在2°以内。此外,在"左

右"问题的指标上,计算结果95%以上都是正确的,因此对在线指引的及时纠  
正起到了很好的检测作用。

42

5.1工作总结

本文给出了关于利用具备双麦系统的智能手机实现室内定位的方案,首先

对定位原理,信号时延计算原理进行阐述,又对双麦系统和智能手机及其内

置传感器进行了介绍,并进而提出了离线计算和在线指引两种模型,最后在

matlab和 Android系统上进行了实现。本文工作涵盖了对定位方案的阐述和系  
统实现,以便于实验探究和后续开发。

5.2前景展望

基于智能手机的应用研究会越来越深,对内置传感器的研究越来越深入,

软硬件的协同发展无疑为二维空间乃至三维空间的定位和追踪带来了无限可

能。除此以外,对惯性导航系统的应用也是现阶段比较热门的研究,因此将惯

性系统和双麦相结合也有着广阔的发展空间。

本文是一个基础性的探究性工作,虽然在室内定位方面做出了一定的贡

献,但他仍然有一些不足,例如在离线定位的部署精度问题,对噪声的处理局

限于室内低噪环境,在线指引的指引过程会是"离散"的指引过程,因此在这

些方面都有待提高。

也相信未来对智能手机双麦系统和内置传感器的研究,能够让室内定位乃

至室外定位更加精确和用户友好,在这方面的研究工作也会更上一层楼。

43

参考文献

[1] HONGZI Z, YUXIAO Z, ZIFAN L, et al. HyperEar: Indoor Remote Object Find­

ing with a Single Phone[J]. IEEE 39th International Conference on Distributed

Computing SysTems(ICDCS), 2019.

[2] Wikipedia contributors. Global Positioning System[EB/OL].Wikipedia, The Free

Encyclopedia,2020(2020/4/2)[2020/5/20].

https://en.wikipedia.org/wiki/Global\_Positioning\_System.

[3]谢地,鲁照权,丁浩峰, et al.基于超声波测距的高精度室内定位系统[J].传  
感器与微系统,2019(10).

[4]乔鑫,李晓梅,肖岱云.基于超声波测距的室内定位设计[J].电子设计工程,

2019,27(22):102-105.

[5]徐昆毓.基于超声技术的室内定位设计[J].技术与市场,2019,026(009):

10-12.

[6]赵予玮.基于 RFID 及超声波的室内定位算法[J].物联网技术,2019,

009(006):12-13.

[7] KE S, TING Z, WEI W, et al. VSkin: Sensing Touch Gestures on Surfaces of

Mobile Devices Using Acoustic Signals[J]. ACM MobiCom,2018.

[8] AARABI P. The Fusion of Distributed Microphone Arrays for Sound Localiza­

tion[J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing,2003,2003(4):338-

447.

[9] Google Inc. Android Developers Sensors Overview[EB/OL].2020[2020/5/20].

https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors\_overview.html.

[10]李招华,汪毓铎,邵青.基于 Chan的 TDOA三维定位算法[J].现代电信科  
技,2014,44(11):36-40+4.

[11]周鑫.基于双麦克风手机的声源定位研究[D].[S.l.]:大连理工大学,2019.

44

毕业论文陈勇虎

[12] Wikipedia contributors. Normalized frequency[EB/OL]. Wikipedia, The Free En­

cyclopedia,2020(2017/7/16)[2020/5/20].

https://en.wikipedia.org/wiki/Normalized\_frequency\_(unit).

[13] Wikipedia contributors. Moving average[EB/OL]. Wikipedia, The Free Encyclo­

pedia,2020(2020/2/19)[2020/5/20].

https://en.wikipedia.org/wiki/Moving\_average.

[14] Wikipedia contributors. Window function[EB/OL]. Wikipedia, The Free Ency­

clopedia,2020(2020/4/18)[2020/5/20].

https://en.wikipedia.org/wiki/Window\_function.

[15]肖述才,王作英.端点检测中的一种新的对数能量特征[J].电声技术,,

2004(6):37-41.

45

致谢

非常感谢在 Dislab实验室度过的两年时光,让我在实验室里拓宽眼界的同  
时,也不断纠正了自己的学习方法和学习态度。我的毕业论文撰写和系统实现

中,也或多或少的遇到许多困难,也走过很多弯路。我很感谢我的导师谢磊副

教授,从我毕设选题阶段,到我研究工作的开展,再到最后的论文撰写中,谢

老师都给予了我细心的指导和点拨,给我纠正了很多错误的方向,避免我走了

很多弯路。在实验室的两年,谢磊老师也给我的研究工作不断指引方向,在

此,我向谢磊老师致以最真挚的谢意。

同样,我也要感谢在 Dislab实验室的同一课题组的各位师兄师姐,鲁欣然  
师兄在我的成长道路上指引了很多,从细节方面给予我帮助,王楚豫师兄同

样,给了我研究工作上的很多帮助,让我的研究工作变的富有创新,也是他们

给我提出的宝贵建议,让我可以不断改进自己。

感谢大学四年来四种相伴的同学和朋友,因为你们的存在,我的大学才会

在忙碌中透露出精彩。感谢每一位悉心教导我的老师,感谢钱柱中教授的指

引,让我能够有机会参与到香港游学中增长知识和阅历,让我在问题求解的课

程中感受到计算机和算法的魅力。最后感谢科比先生,也是我一生的标杆。

46