Lea分类号 密级

UDC

学 位 论 文

基于深度学习的惯性导航室内定位算法研究

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 作者姓名： | 付萌 | | |
| 指导教师： | 邓庆绪 教授 | | |
|  | 东北大学计算机科学与工程学院 | | |
| 申请学位级别： | 硕士 | 学科类别： | 工学 |
| 学科专业名称： | 计算机软件与理论 | | |
| 论文提交日期： | 2018年12月 | 论文答辩日期： | 2018年12月 |
| 学位授予日期： | 2019年1月 | 答辩委员会主席： |  |
| 评阅人： |  | | |

东 北 大 学

2016年12月

##### A Thesis in Computer Software and Theory

**The Research on Redestrian Dead Reckoning for Indoor Localization based on Deep Learning**

By Fu Meng

Supervisor: Professor Deng Qingxu

**Northeastern University**

**Decemeber 2018**

独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人己经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：

日 期：

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 □ 一年□ 一年半□ 两年□

学位论文作者签名： 导师签名：

签字日期： 签字日期：

摘要

目前因GPS(Global Positioning System)、北斗等室外定位技术因为室内信号较弱、室内空间复杂等问题，在室内定位效果偏差很大，针对室内定位的技术例红外线定位、超声波定位、射频识别定位等对基础设施的依赖很强，灵活性均不足，很难应对极端条件下的室内定位需求。步行者航迹推算是一种基于惯性传感器信息对行人的行动轨迹进行推算的技术，对基础设施的依赖很小，能够在极端环境下体现出更好的鲁棒性。

本文对步行者航迹推算技术的各个步骤进行了研究，细化该技术的流程，包括数据收集、数据滤波、主轴选择、判步、滤步、步长估计、方向估计、高度移动、位置校正以及额外针对小车移动的位置计算，并对流程中每一个部分进行了研究，均尝试使用了不同的方法和参数，并对这些结果进行对比。其中在滤步、步长估计、高度移动中给出可使用深度学习进行判定的接口。本文尝试结合流程中各个部分，寻找定位效果、计算开销综合最佳的室内空间定位策略。

本文中提到的所有方法均已经实现，其中数据收集和数据标记实现在手机客户端，数据处理和存储、参数设定、定位计算、多种方法的对比实验等内容在实现在服务端，能够实时进行室内定位并对流程中各个方法进行对比，定位准确性良好。

**关键词：**室内空间定位；手机惯性传感器；步行者航位推算；深度学习

Abstract

In recent years,

**Keywords:** Indoor positioning;Smartphone inertial sensor;Pedestrian dead reckoning;Deep learning

目录

[独创性声明 I](#_Toc518507856)

[摘要 II](#_Toc518507857)

[Abstract III](#_Toc518507858)

[第 1 章 绪论 7](#_Toc518507859)

[1.1 研究背景与意义 7](#_Toc518507860)

[1.2 国内外研究现状 8](#_Toc518507861)

[1.3 本文主要研究内容 9](#_Toc518507862)

[1.4 论文章节结构 10](#_Toc518507863)

[第 2 章 定位方案与数据处理 11](#_Toc518507864)

[2.1 步行者航迹推算 11](#_Toc518507865)

[2.2 数据收集 12](#_Toc518507866)

[2.2.1 手机传感器 12](#_Toc518507867)

[2.2.2 数据采集与传输 12](#_Toc518507868)

[2.3 前期处理 12](#_Toc518507869)

[2.3.1 数据滤波 12](#_Toc518507870)

[2.3.2 数据储存 12](#_Toc518507871)

[2.4 本章小结 13](#_Toc518507872)

[第 3 章 步数估计 15](#_Toc518507873)

[3.1 主轴选择 15](#_Toc518507874)

[3.1.1 主轴选择的意义 15](#_Toc518507875)

[3.1.2 主轴选择方法 15](#_Toc518507876)

[3.2 步数估计 15](#_Toc518507877)

[3.2.1 步数估计方法 15](#_Toc518507878)

[3.2.2 方法对比 15](#_Toc518507879)

[3.3 错步过滤 15](#_Toc518507880)

[3.4 步数估计与错步过滤的整合 15](#_Toc518507881)

[第 4 章 步长估计 16](#_Toc518507882)

[4.1 固定数值步长估计 16](#_Toc518507883)

[4.2 基于人体规律的步长估计 16](#_Toc518507884)

[4.3 基于加速度的步长估计 16](#_Toc518507885)

[4.4 一般公式与公式族 16](#_Toc518507886)

[4.4.1 一般公式 16](#_Toc518507887)

[4.4.2 公式族 16](#_Toc518507888)

[4.4.3 分类方法 16](#_Toc518507889)

[4.5 步长估计方法对比 16](#_Toc518507890)

[4.6 本章小结 16](#_Toc518507891)

[第 5 章 方向判定 17](#_Toc518507892)

[5.1 方向判定方法 17](#_Toc518507893)

[5.2 方向判定对比 17](#_Toc518507894)

[5.3 本章小结 17](#_Toc518507895)

[第 6 章 纵向移动与位置校正 18](#_Toc518507896)

[6.1 纵向移动判定方法 18](#_Toc518507897)

[6.2 方法对比 18](#_Toc518507898)

[6.3 位置校正 18](#_Toc518507899)

[第 7 章 实验测试及结果分析 19](#_Toc518507900)

[第 8 章 总结与展望 20](#_Toc518507901)

[参考文献 21](#_Toc518507902)

[致谢 22](#_Toc518507903)

[攻读硕士期间发表论文和参与项目 23](#_Toc518507904)

# 绪论

## 研究背景与意义

随着时代的飞速变迁，科学技术的快速发展，人们对信息服务的质量和效率的需求不断地提高，鲁棒性良好，精确性高的室内空间定位技术逐渐在科学研究中占有了一席重要之地。在室外，目前随着GPS和北斗定位系统的普及，人们可以享受到较为精确的定位服务。然而这些服务在室内却很难达到让用户满意的程度。其原因在于，室内空间中移动终端能够获得的信号微弱，室内空间的环境较为复杂，由此产生的误差值相对于室内空间而言过大，定位的精确性很低。

为了解决这些问题，目前有一些专门针对室内空间定位的技术，如红外线定位技术、超声波定位技术、射频设别定位技术、蓝牙室内定位技术、Wifi室内定位技术、ZigBee室内定位技术、超宽带室内定位技术等。这些技术能够在室内为用户提供较为精确的定位服务。然而这些技术都需要事先在室内空间建设基础设施或者采集存储相关的位置信息以用于定位。也正因为这样的机制，这些定位系统相对较为脆弱，一旦基础设施受到干扰甚至毁坏，定位的精度会大幅下降甚至难以定位，而这样的情况往往更加需要有定位系统支持。如在一些极端条件或灾害现场，依赖基础设施的定位技术很难为用户提供准确而稳定的定位服务。

步行者航迹推算技术PDR (Pedestrian Dead Reckoning)，是基于惯性导航的自主式技术，其主要思想是根据人体运动学特征，利用加速度传感器、陀螺仪、磁力计等传感器的数据分析行人移动的规律，判断行人移动的起止、移动方向和每一步的位移长度，以初始位置作为起点，通过累加位移的方式进行定位。这是一种完全自主的定位方法，不依赖基础设施的搭建，灵活性良好，并可以满足一些极端环境下的定位需求。

目前，智能手机已经大量普及，在人们的生活中占有重要的地位。智能手机中已经集成诸如加速计、陀螺仪、磁力计等传感器，满足定位系统所需要的条件，为灵活的步行者航迹推算室内空间定位提供了良好的平台。然而目前使用手机传感器的精度有限，进行室内空间定位的流程尚不完善，定位算法的精度仍有很大进步空间。

## 国内外研究现状

本文使用手机内部的惯性传感器数据作为定位基础，使用步行者航迹推算的方法实现行人室内空间定位，在本文所提出的定位流程中，有很多内容参考了国内外相关论文的研究成果。使用整合的手机传感器信息进行室内空间定位首先被提出在2012年微软亚洲研究院的论文[1]，这篇论文初步规划了使用手机传感器进行室内空间定位的流程，并且提出了切实的定位方法。

使用惯性传感器新进行室内空间定位的方法可以分为多个部分，针对每一个部分前人分别有一定的研究。在步数统计过程的主轴选择中，目前以加速度传感器三个轴的数据融合处理结果作为主轴为佳，另有直接使用惯性传感器Z轴数据进行判断的做法。判步过程中，多以数据图像的峰谷周期识别作为判断是否行走了一步的主要思想。在这样的思想之下，衍生出一些更为细节的判断方法，如微软研究院论文的判断峰谷的方法、零点判定方法[2]、采样对比方法、有限状态机方法[3]等。

对于当前移动方向的估计方法，有读取电子罗盘的数据、主分量分析、AHRS算法、IMU算法以及AHRS和IMU交替使用[4]等方法。对于步长估计，人们提出的方法可以分成以下几种类型：第一种是固定数值或多数时间固定数值的方法，如微软亚洲研究院固定数值0.6m，在此基础之上有转弯时适当减少该数值的思路；第二种是研究人体特征和步长的关系进行步长估计，思路有统计男女步长与身高的参数、统计腿长、腿在移动过程中的角度与步长的关系[5]来进行步长的估计；第三种是根据加速度信息来对步长进行建模并计算，从中衍生出一些准确性很好的模型，如Weinberg方法[6]、Scarlet方法[7]、Kim方法[8]、LinPei的方法[9]等；第四种一般公式的方法，以微软研究院提出的一般方法作为基础进行变形或者处理，对步长进行估计。

此外，室内空间定位的范围从平面也逐渐扩展为三维，目前有一些研究是针对高度变化的检测的研究。高度的位移检测多于平面检测分离，不互相干扰。当前检测高度变化的方法以收集气压计数据进行对比为主。

当下针对深度学习的研究非常火热，使用机器学习、深度学习等方法处理手机传感器的数据的研究较为火热，并且这些新的方法能够有效地提升手机的感知能力[10]。在具体应用方面，使用深度学习和传感器数据进行行为检测、睡眠质量检测[11]等已经有了不错的成果。

## 本文主要研究内容

本文针对使用手机惯性传感器的数据进行室内空间定位的课题进行了研究，设计了使用手机惯性传感器进行室内空间定位更加细致完整的流程，将定位步骤分为数据收集、数据滤波、主轴选择、步数估计、错步过滤、步长估计、方向判定、纵向移动和位置校正九个部分，并分别采用多种方法进行了研究和对比。尝试在各个流程使用不同的方法来整体实现室内空间定位，并分别找出更加适合每一个流程的方法。

本文将步数估计细分为主轴选择、步数估计、错步过滤三个步骤，主要过程为：通过主轴选择选择出作为基准的数据用来判断走一步，针对基准数据通过步数估计方法判断每一步的关键下标，最后通过错步过滤将不是一步的关键下标剔除。本文尝试减轻传统步数估计的计算开销，将步数估计中难以分辨的部分交给错步过滤中进行，减少了步数估计的复杂程度。本文尝试在错步过滤中使用深度学习的方法进行判断，增加了系统整体的准确性

在步长估计中尝试多种步长估计模型对步长进行估计，将步长估计方法细分为固定数值步长估计、基于人体规律的步长估计、基于加速度的步长估计、一般公式四个类型，并尝试将步长估计一般公式的进一步划分，根据设定的划分标准将步长划分为多种长度，进而将一般公式转化为一般公式族，并使用一些简单的机器学习方法来对当前一步进行分类，最终使用更加适合的公式参数对步长进行估计，增加了步长估计的准确性

在方向判定中主要研究了在室内空间定位流程中对行人当前移动方向的判断，主要使用了直接读取电子罗盘数值、IMU算法、AHRS算法等方法，并讨论了不同手机姿态、行人与手机方向不完全相同时、使用手机传感器判断行人前进方向的方法。

在纵向移动中明确将状态分成直行、向上移动、向下移动三类，使用机器学习、深度学习方法对当前状态进行分类，最后结合状态计算纵向的位移，并将纵向位移的计算加入到室内空间定位的流程中，将二维的定位延伸到三维。此外本文简单讨论了使用外部定位信息进行位置校正的基础思路。

本文在研究过程中实现了包括客户端和服务端的完整室内空间定位系统，具有数据采集、解析、设定参数并计算、数据存储、显示等功能，实现较为准确有效的室内空间定位功能，并可以实时对比不同室内空间定位流程中不同方法组合的效果。

## 论文章节结构

本文后序章节采用如下的组织结构方式：

1. 其为“绪论”部分，对文章的研究背景与意义、国内外研究现状、本文的主要研究内容、论文章节结构等内容进行介绍。
2. 为“步行者航迹推算与数据处理”部分。本章主要介绍了使用步行者航迹推算的方法进行室内空间定位的基本思路和方法，并介绍了本文在室内空间定位中对数据的前期处理工作。
3. 为“步数估计”部分。本章主要介绍了在室内空间定位流程中步数估计的方法，将“步数估计”细分为三个部分：主轴选择、步数估计和错步过滤，并分别尝试使用多种方法来更加准确地判断行人的移动的时机。
4. 为“步长估计”部分。本章主要介绍了在室内空间定位流程中平面上位移长度的估计。本文将步长估计的方法分成四类：固定数值步长估计、基于人体规律的步长估计、基于加速度的步长估计、一般公式与公式族，并分别使用多种方案和参数进行行人步长的估计。
5. 为“方向判定”部分。主要研究了在室内空间定位流程中对行人当前移动方向的判断，主要使用了直接读取电子罗盘数值、IMU算法、AHRS算法等方法，并讨论了不同手机姿态、行人与手机方向不完全相同时、使用手机传感器判断行人前进方向的方法。
6. 为“纵向移动与位置校正”部分。主要研究了基于分类思想对每一步进行纵轴移动状态的判断的方法，尝试使用简单的机器学习方法对每一步的状态进行分成直行、向上移动和向下移动三个状态，并结合预设的高度数值实现行人在纵轴上位移估计。本章还提出了在GPS等外部信号足够强的情况下，结合外部信号进行辅助定位的位置校正的基本思路。
7. 为“实验测试与结果分析”部分。主要介绍使用室内空间定位程序进行定位的实验，包括实验程序的架构，实验设计，定位结果分析等，验证了本文提出的室内空间定位流程和方法的可行性。
8. 为“结束语”部分，总结本文工作并展望后续工作。

# 定位方案与数据处理

## 步行者航迹推算

步行者航迹推算技术是本文使用手机惯性传感器进行室内空间定位的核心方法，本文对步行者航迹推算技术进行了细化，并在一些流程中引入了新的方法。步行者航迹推算技术作为一种自包含传感器的定位方法，利用加速度传感器、陀螺仪和磁力计的数据进行处理、计算并实现定位。这是一种针对行人行走的特征和规律制定的定位方法：行人在行走过程中每一步均遵循一定的规律，在行走过程中加速度信息具有一定周期性，通过分析行人行走过程中加速度的变化情况，可以判断行人在某一时刻是否行走了一步。如果行人行走了一步，就根据两步之间的传感器信息估计这一步的步长，判断这一步的移动方向，从而推断行人这一步的位移。在实现过程中常利用加速度传感器数据判断出行人一步的发生，融合三种传感器数据判定这一步移动的方向，结合数学模型估算行人这一步的位移步长长度，最后将位移叠加在已知的初始位置，得到行人每一步的位置，其基本的递推公式参见公式(2.1)所示。

 (2.1)

其中，x和y分别是在东北天坐标系之下的以正东和正北为正方向的坐标，即在平面上以初始位置作为基础的当前坐标；SL为结合这一步过程中数据估计出来的步长长度；θ为结合数据判断出的这一步的移动方向；k为当前这一步的下标，同时记录着步数。在这个递推公式中没有关于行人在纵向位移的计算，关于纵向位移的估计会在本文后文中有所提及。

由上述说明可知：步行者航迹推算技术是一种利用相对位置进行定位的技术，与需要步架设基础设施的室内空间定位技术如红外线定位技术、超声波定位技术、蓝牙定位技术、Wi-Fi定位技术、超宽带定位技术等技术相比，对基础设施的依赖性极少，具有更好的自主性，满足在极端条件下的定位需求的能力更加强大。其劣势在于初始位置难以自主获得，需依赖其他定位方案；因完全自主产生的累积误差会随定位时间的增长而增加，在条件允许的情况下，需要每隔一段时间使用其他定位方案进行位置校正。

## 数据收集

本文使用步行者航迹推算作为核心研究更细致而准确的室内空间定位流程和方法，并设计实现了一套完整的室内空间定位实验系统。整个系统呈客户端/服务端结构，通过安装在手机客户端进行数据收集，并在服务端进行数据处理和定位计算。

### 手机传感器

为了获取进行定位计算必要的参数信息，本文收集智能手机内置的加速度传感器、陀螺仪、磁力计数据作为基础数据进行计算。智能手机中的九轴惯性传感器包括三轴加速度传感器、三轴陀螺仪和三轴磁力计，其三个轴向与手机的关系如图2.1所示。手机正面平放在桌面上时，Z轴指向上方，X和Y轴分别为平面坐标系的横轴和纵轴，满足右手坐标系。智能手机中配备的九轴惯性传感器常为micro electro mechanical systems(MEMS)，具有质量体积均较小、集成方便并且能耗较低等特点，因而被大量应用在便携的智能设备中，在机器人、汽车电子、导航等领域均有较为广泛的应用。

图2.1手机传感器三轴方向

加速度传感器是一种惯性传感器，通常由质量块、阻尼器、弹性元件、敏感元件、适调电路等部分组成，原理依据于牛顿运动定律，用于检测手机各个轴向上的加速度数据，其测量单位为m/s2。陀螺仪是一种用于测量方向的元器件，依据于角动量原理，用于测量手机X、Y、Z轴的角速度，单位为rad/s。在实际定位系统中，常常与加速度传感器的数据结合在一起推导出更加精准的翻滚角、俯仰角和偏航角的角度信息。磁力计用于测量地磁场强度和方向，单位为micro tesla。在定位系统中用于校正陀螺仪和加速度传感器计算出的当前方向。

### 数据采集与传输

利用手机惯性传感器进行室内空间定位以手机传感器的数据作为计算基础，这些数据均来自于手机客户端。因为行人的移动速度和频率不会过高，所以手机客户端收集数据和发送数据、服务端处理收据和显示数据的计算间隔无须太小。手机客户端以较低的频率采集数据，默认数据收集频率为20HZ。客户端以设定的频率向服务端发送数据包，默认发送频率为2HZ。

手机客户端向服务端发送的数据包中分别包含：加速度传感器三轴数据、陀螺仪三轴数据、磁力计三轴数据、电子罗盘测定的当前方向、GPS坐标信息(如果无法获取GPS信息则经纬度均为0)、采样时间戳、在客户端使用AHRS算法和IMU算法得到的当前方向、当前移动状态行止标记和当前移动状态纵向移动标记。

其中以加速度、陀螺仪、磁力计三轴数据作为最基本的计算数据，本文的主体为针对这些数据的处理方法的研究。电子罗盘数据和GPS坐标信息为辅助定位的数据，可以不准确或者数据为空。本文分别在手机客户端和服务端实现了AHRS算法和IMU算法，针对本文的结构，考虑到客户端计算AHRS算法和IMU算法的开销小于在服务端计算，所以将这两个算法转移到了手机客户端进行计算。当前移动状态的行止标记和纵向移动的标记为在客户端由实验者手动进行标记的数据，这些数据将会在服务端作为平面移动状态和纵向移动状态的分类依据构建机器学习和深度学习所需要的数据集。

## 前期处理

### 数据滤波

### 数据储存

## 本章小结

# 步数估计

## 主轴选择

### 主轴选择的意义

### 主轴选择方法

## 步数估计

### 步数估计方法

### 方法对比

## 错步过滤

## 步数估计与错步过滤的整合

# 步长估计

## 固定数值步长估计

## 基于人体规律的步长估计

## 基于加速度的步长估计

## 一般公式与公式族

### 一般公式

### 公式族

### 分类方法

## 步长估计方法对比

## 本章小结

# 方向判定

## 方向判定方法

## 方向判定对比

## 本章小结

# 纵向移动与位置校正

## 纵向移动判定方法

## 方法对比

## 位置校正

# 实验测试及结果分析

# 总结与展望

参考文献

1. Li F, Zhao C, Ding G, et al. A reliable and accurate indoor localization method using phone inertial sensors[C]// ACM Conference on Ubiquitous Computing. ACM, 2012:421-430.
2. Pratama A R, Widyawan, Hidayat R. Smartphone-based Pedestrian Dead Reckoning as an indoor positioning system[C]// International Conference on System Engineering and Technology. IEEE, 2012:1-6.
3. 周瑞, 罗磊, 李志强,等. 一种基于智能手机传感器的行人室内定位算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(11):22-26.
4. Qian J, Pei L, Ma J, et al. Vector Graph Assisted Pedestrian Dead Reckoning Using an Unconstrained Smartphone[J]. Sensors, 2015, 15(3):5032-57.
5. Zijlstra W, Hof A L. Displacement of the pelvis during human walking: Experimental data and model predictions[J]. Gait & Posture, 1997, 6(3):249-262.
6. H.Weinberg, “Using the ADXL202 in Pedometer and Personal Navigation Applications,” Analog Devices AN-602 Application Note,2002.
7. J.Scarlet, “Enhancing the Performance of Pedometers Using a Single Accelerometer,” Analog Devices AN-900 Application Note, 2005.
8. J. W. Kim, H. J. Jang, D-H. Hwang, and C. Park, “A Step, Stride and Heading Determination for the Pedestrian Navigation System,” Journal of Global Positioning Systems, pp. 273-279, 2004
9. Ruizhi Chen, Ling Pei, Yuwei Chen,”A Smart Phone Based PDR Solution for Indoor Navigatio,” Navigation," Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011), pp. 1404-1408
10. Lane N D, Georgiev P. Can Deep Learning Revolutionize Mobile Sensing?[J]. 2015:117-122.
11. Sathyanarayana A, Joty S, Fernandezluque L, et al. Correction of: Sleep Quality Prediction From Wearable Data Using Deep Learning[J]. Jmir Mhealth & Uhealth, 2016, 4(4).

致谢

感谢大吸神教，让我长生不老！

攻读硕士期间发表论文和参与项目

攻读硕士期间参与项目：