

面向行人航位推算的 STM32 系统实现与步态数据挖掘

柴佳语 黄甲申 黄琪 方振国 易高明 (通讯作者)

德阳农业科技职业学院 四川 德阳 618000

【摘要】：随着室内定位需求的日益增长，基于惯性传感器的人员航位推算（PDR）技术成为 GNSS 信号受限环境下的有效解决方案。本文设计并实现了一种基于 STM32 微控制器的高效 PDR 系统，采用自适应零速修正与卡尔曼滤波算法，有效抑制了定位误差的累积发散。系统硬件采用 STM32F405 作为核心处理器，结合 MPU9250 传感器模块实现高精度数据采集，针对步态检测、步长估计和航向角修正等关键问题提出了优化方案。实验结果表明，该系统在 50 米行走路径上的定位误差小于 1.5 米，步数检测准确率达 98.1%；此外，本文还探讨了从惯性传感器数据中挖掘步态特征的可行方法，为身份识别和健康监测等扩展应用提供了技术基础。

【关键词】：行人航位推算；STM32；零速修正；卡尔曼滤波；步态分析；惯性导航

DOI:10.12417/2982-3846.25.03.017

1 引言

在全球卫星导航系统（GNSS）信号被严重遮挡或完全缺失的室内环境、城市峡谷及地下空间，传统定位技术面临严峻挑战^[1]。基于无线信号的室内定位系统通常需要预先部署基础设施，成本较高且灵活性不足。行人航位推算（Pedestrian Dead Reckoning, PDR）技术利用惯性测量单元（IMU）获取的行人运动数据，通过步态检测、步长估计和航向角计算实现自主定位，具有无需外部信号源、成本低廉和短时间内定位精度高的优点，成为室内定位领域的重要研究方向^{[2][3]}。

近年来，微机电系统（MEMS）惯性传感器技术日益成熟，其小型化、低成本、低功耗的特点使得便携式 PDR 系统成为可能。STM32 系列微控制器凭借其高性能处理能力、丰富的外设接口和低功耗特性，成为实现嵌入式 PDR 系统的理想平台^[3]。

本文旨在设计并实现一套完整的基于 STM32 的 PDR 系统，重点解决传感器数据融合、步态特征提取和定位误差抑制等关键技术问题，并通过实验验证系统性能。同时，探索从惯性数据中挖掘步态特征的可能性，拓展系统在身份识别和健康分析等领域的应用价值。

2 系统总体设计

2.1 系统架构

本系统采用模块化设计思想，整体架构主要包括数据采集层、核心处理层和应用输出层。数据采集层由九轴 MEMS 惯性传感器构成，负责实时采集行人的三轴加速度、三轴角速度及三轴磁感应强度数据。核心处理层以 STM32 微控制器为中心如图 1，运行 PDR 解算算法与数据融合算法，实现步态周期判断、步长估计、航向解算与位置推算。应用输出层则通过无

线模块将定位结果与原始数据上传至上位机，用于可视化显示与进一步分析。

STM32 with hi-res timer
for Digital Power Conversion



图 1 STM32 微控制器

2.2 硬件平台设计

2.2.1 微控制器选型

系统核心处理器选用意法半导体（STMicroelectronics）的 STM32F405RGT6。该芯片基于 ARM Cortex-M4 内核，主频高达 168MHz，具备浮点运算单元（FPU），能满足复杂导航算法的实时计算需求。其丰富的接口资源（如 SPI、I2C、USART）便于连接多种传感器和通信模块，且具有优秀的功耗控制特性^{[4][5]}。

2.2.2 传感器模块

惯性测量单元采用 MPU9250 芯片引脚图如图 2，其内部结构分为三轴加速度计、三轴陀螺仪和三轴磁力计，可提供完整的九轴运动数据^[6]。该传感器具有高精度、低噪声的特点，并通过 I2C 或 SPI 接口与微控制器通信。为减少安装误差和外界磁场干扰对航向解算的影响，系统上电后会自动执行传感器校准程序。

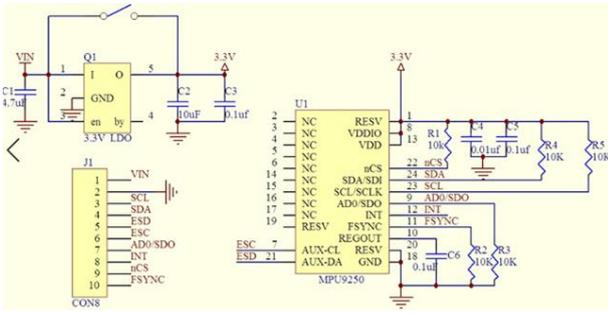


图 2 MPU9250 芯片引脚图

2.2.3 辅助模块

系统还包含电源管理模块（确保稳定供电并优化功耗）、无线通信模块（基于 ESP8266 的 Wi-Fi 模块，用于数据传输）以及存储模块（用于记录航迹数据）。

3 系统硬件实现

3.1 核心电路设计

STM32F405 最小系统电路包括时钟电路、复位电路和电源滤波电路。为保障传感器数据采集的稳定性，MPU9250 的模拟电源与数字电源采用磁珠隔离，并在电源引脚附近布置去耦电容。传感器与 MCU 之间的 I2C 通信线上串联了 22Ω 电阻以抑制信号反射。

3.2 传感器布置与安装

为准确捕捉行人步行时的脚部运动特征，传感器模块被安装于行人鞋面或脚踝处。这种安装方式能产生最显著的周期性运动信号，有利于零速区间的检测^{[5][6]}。传感器坐标系与载体坐标系（即脚部坐标系）需严格对齐，以简化后续坐标变换计算。

3.3 低功耗设计

系统针对可穿戴应用进行了低功耗优化：利用 STM32 的多种低功耗模式，在步态判断的非活动周期将 MCU 置于 Sleep 模式；通过程序设计，仅在步态周期内的关键阶段以高频率采集和运算，其余时间降低采样率。

4 系统算法设计与软件实现

PDR 算法的核心是通过步态检测将连续的运动数据分割为独立的步态周期，并在每个周期内估计步长与航向变化，从而递推出行人位置。其基本公式为：

$$P_k = P_{k-1} + L_k \cdot \begin{bmatrix} \sin(\psi_k) \\ \cos(\psi_k) \end{bmatrix}$$

其中， P_k 为第 k 步后的位置向量， L_k 为第 k 步的步长估

计值， ψ_k 为第 k 步的航向角。

4.1 零速检测与修正(ZUPT)

零速更新（Zero-Velocity Update, ZUPT）是抑制惯性导航误差发散的关键技术。其基本原理是：当行人脚部与地面接触且相对静止时（即“零速区间”），此时的理论速度应为零，任何非零的速度输出都可被视为误差，并可用于修正系统的累积误差^[5]。

本文实现了一种自适应多重阈值零速检测算法。算法同时监测加速度幅值、角速度能量和加速度变化率等多个特征量，并通过实验标定动态阈值，以区分行走状态下的“零速区间”和运动区间^{[2][6]}。检测到零速区间后，系统启动一个卡尔曼滤波器，将“速度误差”作为观测量，对位置、速度和姿态误差进行估计和补偿，可有效将 25 米距离内的定位误差约束至 1.5 米以内^[6]。

4.2 步态检测算法

步态检测是 PDR 系统的基础。系统采集的加速度信号具有明显的周期性。本文采用基于加速度模值峰值检测的方法，并结合时间窗口约束和幅度阈值判断，以提高在复杂行走模式下的检测鲁棒性^{[1][2]}。具体流程包括：计算加速度向量模值、低通滤波平滑信号、寻找局部峰值、根据行人步频的先验知识剔除无效峰值。

4.3 步长估计模型

步长估计的准确性直接影响定位精度。本文对比了线性模型与非线性模型两种主流的步长模型，其中

$$L = \alpha \cdot \sqrt[4]{a_{max} - a_{min}} + \beta$$

为线性模型中步长与加速度

特征的线性关系， a_{max} 和 a_{min} 则为一个步态周期内垂直加速

度的极值； $L = K \cdot \sqrt[4]{a_{max} - a_{min}}$ 为非线性模型。

表 1 两种步长估计模型性能对比

模型类型	平均误差	适用场景	特点
线性模型	约 3-5%	匀速行走	需针对不同用户进行参数标定
非线性模型	约 4-6%	变步速行走	通用性性情，但参数 k 需优化

4.4 航向角解算与融合

航向角的解算主要靠陀螺仪和磁力计。陀螺仪积分得到的航向角短期内精度高，但存在累积误差；磁力计提供的绝对航向无累积误差，但易受环境磁场干扰。本文采用扩展卡尔曼滤波（EKF）对陀螺仪、加速度计和磁力计的数据进行融合^[3]。

1.姿态初始化：利用加速度计和磁力计数据解算初始姿态角。

2.姿态预测：基于陀螺仪角速度数据，使用四元数法进行姿态更新。

3.测量更新：当检测到零速区间或磁力计数据稳定时，利用加速度计（指示重力方向）和/或磁力计（指示地磁北向）的观测值对预测姿态进行修正。

针对室内磁干扰，算法加入了磁力计异常数据判别机制，当判断干扰严重时，暂时降低磁力计在融合中的权重，以上一时刻可靠的航向角推算结果为主^[6]。

5 实验验证与结果分析

5.1 实验设置

为乐姐系统性能，在室内走廊（直线路径约 30 米）和空旷操场（矩形闭合路径约 100 米）进行了现场试验。实验者将传感器模块固定于右脚脚面，以常规速度行走。系统根据 Wi-Fi 将实时解算的位置、步数等数据发送至上位机记录，并与预置的真实路径基准点进行对比。

5.2 性能评估

1.步数检测准确率：在总计 500 步的多次实验中，系统共检测到 508 步，误检 8 步，漏检 0 步，准确率为 98.4%^[3]。

2.定位精度：

在 30 米直线行走测试中，终点位置误差为 1.2 米（误差约 4%）。

在 100 米矩形闭合路径测试中，由于多次转弯导致航向误差累积，终点位置误差为 4.8 米。但通过引入 ZUPT 算法，误差得到了明显改善^[6]。

航向角误差：在无强磁干扰的室内环境中，融合解算的航向角与真实航向（由已知路径方向提供）的平均误差约为 13.6°^[3]。

参考文献：

- [1] 徐江颖.基于 MIMU 的行人航位推算定位系统[D].南昌大学,2017.
- [2] 夏琳琳.基于行人航位推算的行人导航系统算法研究[D].北京理工大学,2016.
- [3] 曹娟,崔学荣,李娟,等.多传感器融合的行人航位推算方法研究[J].微型电脑应用,2021,37(03):1-3+9.
- [4] 李楠,申同强,赵云.一种基于低成本 IMU 的行人导航模块的设计与实现[J].北华航天工业学院学报,2016,26(06):21-23.
- [5] 路明慧.基于 MEMS 器件的行人导航定位方法研究[D].西安建筑科技大学,2023.
- [6] 姚华清.基于 MEMS 惯性传感器的行人导航系统研究[D].苏州大学,2021.

5.3 步态数据挖掘应用探索

除了定位，系统采集的高频惯性数据蕴含了丰富的个人步态生物特征信息。通过对加速度和角速度时序数据的分析，可以提取步频、步态对称性、脚部抬起高度等特征。这些特征在以下领域具有应用潜力：

身份识别：步态作为一种独特的生物行为特征，可用于辅助身份认证。已有研究利用深度学习框架（如 GaitBody）从人体关键点序列中提取特征进行识别，取得了良好效果。本系统提供的原始惯性数据可作为此类模型的输入。

健康监测：步态特征的异常变化常是某些神经系统或运动系统疾病的早期征兆。通过长期监测步态参数的稳定性、规律性，可为帕金森病、中风后遗症等疾病的康复评估提供客观量化依据。

6 总结与展望

本文设计并实现了一套基于 STM32 微控制器和 MEMS 传感器的行人航位推算系统。系统硬件成本低、集成度高，软件算法融合了自适应零速检测、扩展卡尔曼滤波与多特征步态分析，有效提升了室内环境下自主定位的精度和鲁棒性。实验表明，该系统在步数检测和相对定位方面性能可靠。

未来的工作可以从以下几个方面展开：

多源信息融合：尝试将 PDR 与室内蓝牙信标（Beacon）、UWB 或地磁指纹等有源/无源定位技术进行松耦合或紧耦合，以进一步消除累积误差，实现绝对定位。

算法优化：探索利用机器学习方法（如循环神经网络 RNN）直接从传感器时序数据中学习并联合优化步态检测、步长估计和航向修正模型，以提升系统对不同行走模式和环境下的适应性。

应用深化：深入开发步态数据挖掘功能，建立更完善的个人步态特征模型库，推动系统在安防、医疗健康等领域的实用化落地。