

文章编号: 2095-4980(2013)04-0583-05

基于步行者航位推算的井下人员辅助定位

肖永健, 肖力, 孙志刚

(华中科技大学 控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对目前井下人员定位系统存在的问题, 提出一种基于步行者航位推算的辅助定位方法。利用低成本的惯性测量单元(IMU)和磁力计, 设计稳定的姿态与航向参考系统(AHRS), 利用惯性导航的相关理论, 并通过分析人员步行姿态, 进行零速修正(ZUPT), 组成步行者航位推算系统, 对井下人员进行实时航位推算。以实验室大楼走廊模拟井下矿道环境进行航位推算实验, 实验结果表明, 本方法对人员行走距离和方向做出良好的推算, 能成为现有井下定位的有效补充, 提高人员定位精确度。

关键词: 姿态参考系统; 惯性导航; 零速修正; 步行者航位推算

中图分类号: TN967.2

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201304.0583

Underground personnel positioning system based on pedestrian dead reckoning

XIAO Yong-jian, XIAO Li, SUN Zhi-gang

(Control Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Aiming at the problems in existing underground personnel positioning systems, an assisted positioning method based on pedestrian dead reckoning is proposed. Low-cost Inertial Measurement Unit(IMU) and magnetometer are employed to constitute a stable Attitude Heading Reference System (AHRS). The theory of inertial navigation is utilized, an algorithm for step detection is described, and Zero velocity Update(ZUPT) is adopted for velocity and position estimation to compose a pedestrian dead reckoning system. An experiment is performed in the corridor of a laboratory building to emulate the underground mine road environment. The experimental results demonstrate that the dead reckoning performs well and this method is an effective complement to existing underground positioning by improving the positioning accuracy.

Key words: Attitude Heading Reference System; inertial navigation; Zero velocity Update; pedestrian dead reckoning

煤矿产业是我国重要产业, 煤矿安全生产问题也一直是国家和人民重点关注的对象。实现矿井下人员的精确定位, 既有利于生产管理, 又能在发生矿难事故时对人员进行快速救援。因此, 井下人员定位系统具有重要性和迫切性, 国内的专家学者和科研机构对此做出了很多重要研究。

目前, 研究主要集中在利用 Zigbee 技术^[1]和射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术^[2]来进行井下定位。Zigbee 技术在原理上采用接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)测距, 但在巷道这种密闭环境中, 会受到电磁干扰和多径效应的影响, 准确性大大降低, 从而影响定位的准确性。基于 RFID 技术能实现区域定位, 但定位精确度低, 只能满足人员管理的需求。国外一些关于室内人员定位的研究, 提出了通过步数的检测、步长的估计、方向的判断来推算人员的位置, 在短时间内取得较高的精确度^[3]。本文参考飞行器中的姿态检测原理, 利用基于微电子机械系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)技术的低成本惯性测量单元(IMU)和磁阻传感器, 对姿态进行预估。预估方法有基于陀螺仪和基于加速度计、磁力计 2 种方式, 在动态和静态特性上各有优缺点, 使用互补滤波的方式可以将 2 种数据很好融合, 得到良好的姿态估算效果, 并且计算量少, 适合控制系统需要。姿态检测对象为步行者脚部, 利用惯性导航计算对步速和步行距离进行推算, 并通过对比步行周期性动作特性的分析, 利用零速修正(ZUPT)技术对速度误差进行修正, 最终实现对步行者的航位推算。

1 姿态角初步估计

为描述姿态的变化,引入三维空间坐标系,并用空间矢量变换方式加以描述。考虑到人员行走属于低速运动以及 MEMS 传感器的灵敏度情况,可以忽略地球自转所带来的影响,仅在空间内定义 2 种坐标系:载体坐标系(b系)和导航坐标系(n系)。

载体坐标系(b系)三轴与 IMU 固联,并随载体的运动而运动。定义 x 轴指向前, y 轴指向左, z 轴相对 x,y 轴成右手定则,原点 O 在 IMU 重心。加速度计、陀螺仪和磁力计的原始测量值均基于载体坐标系。

导航坐标系(n系)为当地水平坐标系,定义 x 轴指向北, y 轴指向西, z 轴沿重力反方向指向天,即为北西天(North-West-Up, NWU)坐标系。对人员速度和航位的推算均基于导航坐标系。

从载体坐标系到导航坐标系的变换使用欧拉转动角 ϕ, θ 和 ψ 表示, ϕ, θ 和 ψ 分别为横滚角、俯仰角和航向角,定义转动顺序为: $\phi \rightarrow \theta \rightarrow \psi$ 。3 次转动可以用数学方法表述成 3 个独立的方向余弦矩阵 $C_x(\phi), C_y(\theta), C_z(\psi)$, 载体坐标系到导航坐标系的变换矩阵 $C_b^n = C_x C_y C_z$ 。

1.1 基于陀螺仪的姿态解算

角速率 $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ 与 IMU 陀螺仪输出 $(\omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b)$ 的关系如下^[4]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_x^b \\ \omega_y^b \\ \omega_z^b \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\theta = \pm 90^\circ$ 时,式(1)中 $\dot{\phi}$ 和 $\dot{\psi}$ 方程的解会变得不确定。实际应用在步行者身上的姿态解算,俯仰角 θ 的变化范围有限,可以认为不受上述条件的限制。将上述微分方程组离散化,根据陀螺仪的采样周期 Δt ,可求出欧拉转动角。欧拉角即为系统所需的姿态角,并且可进一步求出载体坐标系到导航坐标系的变换矩阵 C_b^n 。

1.2 基于加速度计和磁力计的姿态解算

当载体处于静止或准静止状态时,基于 IMU 测量器件的灵敏性,认为载体只受到当地重力加速度作用。根据变换矩阵 C_b^n ,可算出载体的横滚角 ϕ_{acc} 和俯仰角 θ_{acc} 与 IMU 各轴加速度输出值的关系:

$$\phi_{\text{acc}} = \arctan(a_y^b/a_z^b) \quad (2)$$

$$\theta_{\text{acc}} = \arctan\left(\frac{-a_x^b}{\sqrt{(a_y^b)^2 + (a_z^b)^2}}\right) \quad (3)$$

磁力计提供载体坐标系(b系)3个方向上受到的磁通量 (H_x^b, H_y^b, H_z^b) ,可设计电子罗盘,对航向进行解算。根据横滚角 ϕ 和俯仰角 θ ,可由式(4)推出磁航向角 β :

$$\beta = \arctan\left(\frac{H_y \cos \theta + H_z \sin \theta}{H_x \cos \phi + H_y \sin \theta - H_z \cos \theta \sin \phi}\right) \quad (4)$$

定义当地磁北角和真北角之间的夹角为 α ,则载体的偏航角为 $\psi_H = \beta + \alpha$ 。

2 基于互补滤波器的数据融合

2.1 互补滤波器解算原理

基于陀螺仪的姿态解算,在短时间内可提供高动态性的姿态数据,但受陀螺仪漂移的影响,精确度会随着时间的增加而下降,最终导致数据发散。基于加速度和磁力计推算的姿态角,短时间内精确度较差,但测量误差不会随时间累积。根据两者在频域上的互补特性^[5],考虑设计互补滤波器对两组数据进行数据融合,以提高姿态解算的准确性,并满足解算实时性的要求。

以横滚角为例, ϕ 表示载体横滚角真实值, $\hat{\phi}$ 表示经过互补滤波器输出值, ϕ_ω 表示由陀螺仪测量数据推算的

横滚角, u_L 表示陀螺仪推算的低频积累误差, 则 $\phi_\omega = \phi + u_L$; ϕ_{acc} 表示由加速度计推算的横滚角, u_H 表示加速度计推算的高频误差, 则 $\phi_{acc} = \phi + u_H$ 。设置低通滤波器 $C_L(s) = \frac{C(s)}{s + C(s)}$ 和高通滤波器 $C_H(s) = \frac{S}{s + C(s)}$, 其中 $C(s)$ 具有全通特性, 分别对 ϕ_{acc} 和 ϕ_ω 进行滤波处理:

$$\hat{\phi}(s) = C_L(s)\phi_{acc}(s) + C_H(s)\phi_\omega(s) \quad (5)$$

代入式(1), 可得到互补滤波器模型, 如图1所示。

2.2 数据融合算法设计

$C(s)$ 取常数 k , 此时 $C_L(s)$ 和 $C_H(s)$ 分别为一阶低通滤波器和一阶高通滤波器。滤波器的截止频率 f 由滤波增益 K 决定, $f = \frac{K}{2\pi}$ 。步行者航位推算中存在频繁的加减速过程, 加速度计同时对重力加速度和运动加速度敏感, 此时由式(2)~式(3)推算出的姿态角误差成分加大, 精确度下降。文献[6]在研究无人直升飞机控制时提出滤波切换的方法, 减少了运动加速度对姿态估计的影响。本文以此为参考, 根据运动加速度的检测, 对滤波增益 K 进行调整, 以适应人员步行中不同状态下的滤波要求。

整个数据融合算法如图2所示, 由2组互补滤波器构成。第1组互补滤波器处理横滚角 ϕ 与俯仰角 θ 。根据加速度计的输出值, 取 $\alpha = \|\|f^b\| - g\|$ 作为运动加速度的检测值, ε_1 为加速度计各轴输出的白噪声方差之和, ε_2 为实验获得的阈值, 本文取 $0.1g$ 。当 $\alpha \leq \varepsilon_1$ 时, K_1 值保持不变; 当 $\varepsilon_1 < \alpha \leq \varepsilon_2$, K_1 值减半; 当 $\alpha > \varepsilon_2$ 时, 这时由加速度推算的姿态角误差成分过大, K_1 值取零, 只依赖于陀螺仪的输出对横滚角 ϕ 与俯仰角 θ 进行估算。第2组滤波器处理偏航角 ψ , 利用磁力计的输出值以及横滚角 ϕ 与俯仰角 θ , 根据式(4)计算磁航向角以及航向角 ψ_H 。由于磁力计对磁性物质敏感, 有时受环境干扰较大, 需要将磁力计测得的总磁场与当地磁场理论值进行比较。当差值超过阈值 ε_3 时, 认为附近环境中存在影响磁力计正常工作的因素, 将 K_2 值取零, 只依赖于陀螺仪的输出对偏航角 ψ 进行估算。

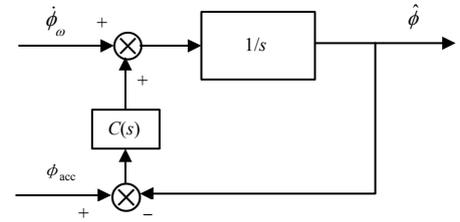


Fig.1 Complementary filter model
图1 互补滤波器模型

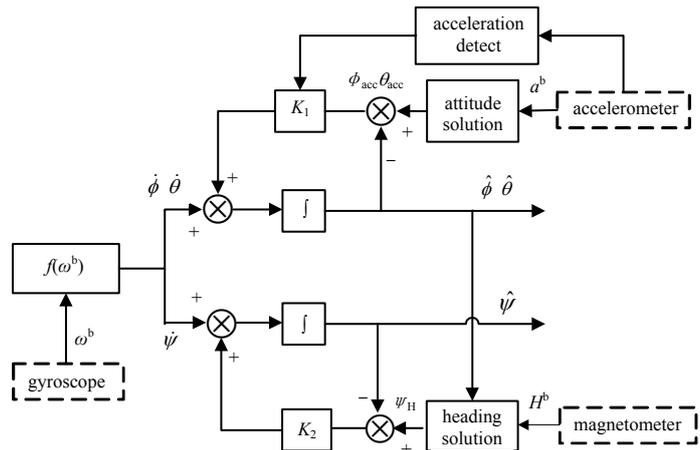


Fig.2 Data fusion algorithm structure based on complementary filter
图2 基于互补滤波的数据融合算法结构图

3 基于零速修正的步行者航位推算

3.1 系统放置与步姿分析

根据陀螺仪、加速度计、磁力计数据的姿态推算, 进行数据融合, 组成实时性强且满足精确度要求的姿态与航向参考系统(AHRS)。根据坐标旋转顺序, 由姿态角可得到变换矩阵 $C_b^n = C_x C_y C_z$ 。根据惯性导航的原理, 将从加速度计获得的原始数据(载体所受的比力 f^b)与变换矩阵 C_b^n 相乘, 并减去当地的重力加速度, 可获得系统在导航坐标系下的三轴加速度, 经过2次积分后依次获得在导航坐标系下的速度和位置信息。

一般的飞行器惯性导航技术, 由于存在误差随时间迅速累积的特点, 对初始对准信息有很高的精确度要求^[7]。本文设计的步行者航位推算与一般的飞行器导航不同, 在步行过程中人员动作会对加速度计和陀螺仪带来频繁的干扰, 单独使用上述方式进行航位推算, 在没有参考位置信息修正的情况下, 速度漂移无法有效遏制, 最终导致速度和位置误差积累过快, 航位推算结果无法使用。

将测量系统放置在步行者躯干上部,在步行过程中相对稳定,可以减轻外界干扰,AHRS 提供的姿态估计最为可靠,但无法解决速度漂移带来误差积累这一问题^[3]。将测量系统固定在步行者脚上,虽然外界干扰最为严重,但数据可以明显反应步行过程的周期性动作。一方面可以引入 ZUPT 对速度漂移进行有效遏制,另一方面步伐检测鲁棒性强,可以尽量延长步行者航位推算的有效时间。本文采用后一种方式,将测量系统固定在鞋面。

步行可以以“步”为周期,周期内分解成若干状态。取鞋上 A 点作分析(如图 3 所示),速度呈现“减速—零速—加速”这一周期性过程。当 A 点完全紧贴地面的 ΔT 时间里,A 点速度理论值为零,记为脚落地阶段,其他时间记为空中摇摆阶段。结合本文所使用的系统放置,此结论同样适用,测量系统速度周期性为速度漂移的修正提供了条件。

3.2 基于俯仰角的步姿判断及零速修正

对步姿的周期判断有多种方式,有根据加速度和陀螺仪的原始数据进行分析^[9],有对姿态变换后导航坐标系下的加速度值进行分析^[10]。根据测量系统放置方式,本文选取姿态变换后的俯仰角 θ 作为步姿判断和零速修正的依据。俯仰角 θ 的变化情况如图 4 所示。

初始时刻步行者处于站立状态,根据此时测量系统的俯仰角 θ_0 作为标准值,取 $\varepsilon = 5^\circ$, $\theta_0 \pm \varepsilon$ 作为判断步姿状况改变的阈值。 $T = \Delta T_1 + \Delta T_2$ 为每一步周期, ΔT_1 判断为脚落地阶段,测量系统速度应为零值,对上一周期的步速进行修正; ΔT_2 判断为空中摇摆阶段,根据导航坐标系下加速度值进行双积分处理,得出每一步迈出的距离。

4 测试结果与分析

研究中使用的实验装置如图 5 所示,测量单元由 InvenSense 的 MPU6050 芯片(内含陀螺仪和加速度计)和 Honeywell 的 HMU5883L 磁力计芯片构成,通过 CC2430 模块对其进行采样控制,组成姿态参考系统,并通过 Zigbee 无线传感网络将数据发送到上位机,推算步行者航位。

实地测试地点为实验室大楼走廊,模拟井下矿道环境,实验结果如图 6 和图 7 所示。图 6 主要测试内容为方向判断。在行走过程中方向转变 360° ,从步行者航位推算得到的轨迹可以看出,基本能跟踪真实方向的变化。产生误差的原因主要包括:步行动作带来的扰动、磁力计参数标定的偏差。图 7 主要测试内容为沿直线来回走动,点线表示真实轨迹,虚线表示基于 ZUPT 推算的步行轨迹,实线表示只用 INS 推算的轨迹。从图中可以看出,在不加零速修正的情况下,单凭惯性导航推算出来的轨迹误差明显,这是由于速度发散所造成的;使用 ZUPT 后,速度的发散得到有效抑制,推算的步行轨迹与真实轨迹贴近,达到了在局部范围内提高现有定位系统精确度的效果。

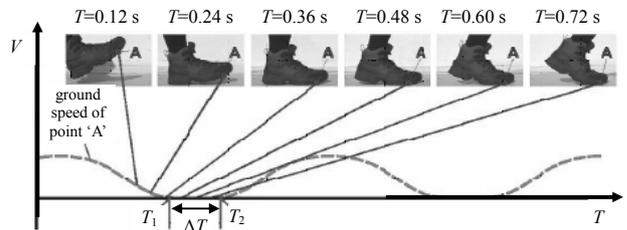


Fig.3 Gait phase analysis
图 3 步姿阶段分解图^[8]

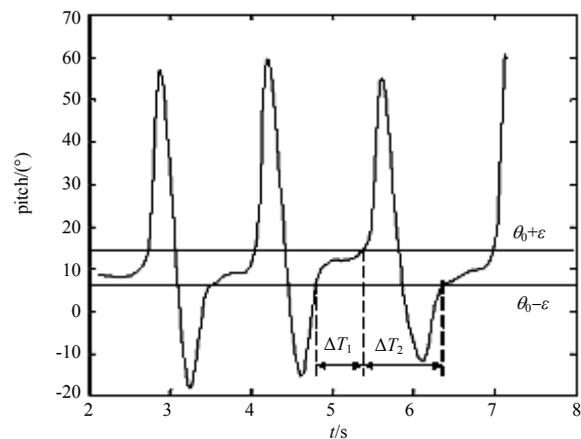


Fig.4 Change of pitch angle while walking
图 4 步行阶段测量系统俯仰角变化

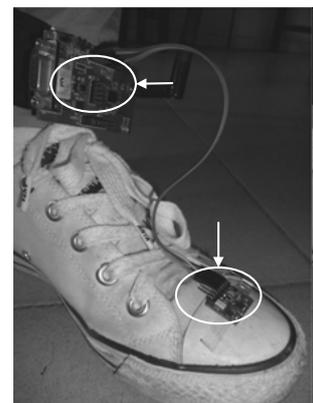


Fig.5 Measurement module and transmission device
图 5 测量模块与传输装置

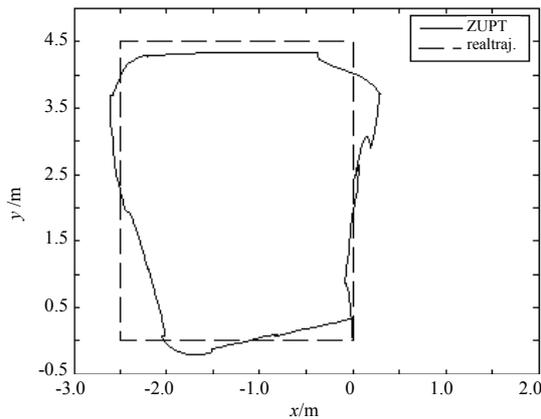


Fig.6 Direction test
图6 方向测试图

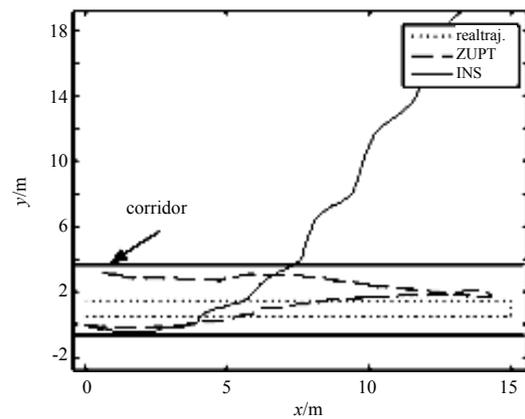


Fig.7 Field testing in corridor ZUPT
图7 走廊实地测试图

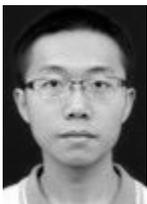
5 结论

本文利用低成本 MEMS 器件构建了姿态方向参考系统, 并通过分析人员行走的周期性特征, 设计出步行者航位推算系统。互补滤波与零速修正的使用对系统资源的消耗小, 易于实现。实验表明, 在局部区域内对人员行走的距离和方向有较好的推算。针对现有井下人员定位系统, 可以提供有效的辅助定位信息, 提高定位精确度, 同时可以减少原系统对人员定位的检测频率, 减轻原系统负担。

参考文献:

- [1] YAO Junyi,FU Xuan. Location estimation based on CC2431 RF transceiver in WSN[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(2):257-260.
- [2] YE Chencheng,XIAO Jingzhong,XIAO li. Personnel Positioning System of Underground Mines Based on RFID[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010(15):146-149.
- [3] Jimenez A R,Seco F,Prieto C,et al. A comparison of Pedestrian Dead-Reckoning algorithms using a low-cost MEMS IMU[C]// 2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing. Budapest:[s.n.], 2009:37-42.
- [4] Titterton D H,Weston J L. Strapdown Inertial Navigation Technology[M]. 2nd ed. London,UK:MPG Books Ltd., 2004.
- [5] LIANG Yande,CHENG Min,HE Fuben,et al. Attitude estimation of a quad-rotor aircraft based on complementary filter[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011,30(11):56-58.
- [6] XU Yu. Study of Flight Control Platform and Attitude Fusion Algorithms for Mini Autonomous Helicopter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [7] XU lin,LI Shiling,QU Xinfen. Transfer alignment technology of inertial navigation system:an overview[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(6):633-638.
- [8] Ojeda L,Borenstein J. Personal Dead-reckoning System for GPS-denied Environments[C]// 2007 IEEE International Workshop on Safety,Security and Rescue Robotics. Rome:[s.n.], 2007:1-6.
- [9] Lamy-Perbal S,Boukallel M,Castaneda N. An improved pedestrian inertial navigation system for indoor environments[C]// 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS). San Francisco:[s.n.], 2011:2505-2510.
- [10] Zhang Rui,Hoefflinger F,Gorgis O,et al. Indoor localization using inertial sensors and ultrasonic rangefinder[C]// 2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing(WCSP). Nanjing,China:[s.n.], 2011:1-5.

作者简介:



肖永健(1987-), 男, 广州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为捷联惯性导航及应用。
email:simon_6_6@163.com.

肖力(1973-), 男, 武汉市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为传感器网络与捷联惯性导航。

孙志刚(1969-), 男, 武汉市人, 副教授, 主要研究方向为网络控制系统与实时信号处理。