

基于IMU的FAST巡检定位系统研究*

胡玮^{1,2} 于东俊^{1†} 孙京海¹

(1 中国科学院国家天文台 北京 100101)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 日常巡检是500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)运行和维护中的重要工作. FAST部件众多, 巡检过程中存在工作量大、寻找部件费时费力的问题. 实现巡检定位, 可以引导维护人员快速到达故障点, 对提高巡检效率, 保障望远镜正常运行有重要意义. 考虑到反射面对卫星信号存在遮挡, 采用惯性导航的方式, 基于双足脚绑IMU (Inertial Measurement Unit), 设计了1套步行导航算法. 算法沿用零速修正框架, 融合双足信息, 并结合磁场信息修正航向误差. 在规则轨迹中测试了算法有效性, 水平定位误差在行走距离的3%以内. 在巡检现场的不规则轨迹中, 结合沿途标志点, 水平定位误差小于11 m, 能够满足日常巡检定位的需要和支撑后续巡检定位系统的实用化.

关键词 望远镜: 500 m口径球面射电望远镜, 技术: 步行导航, 仪器: 脚绑惯性测量单元, 方法: 卡尔曼滤波

中图分类号: P111; **文献标识码**: A

1 引言

500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)是我国的一项重大科学基础设施. FAST建成之后, 日常维护成为了一项重要工作, 对保障望远镜正常运行, 保证观测质量和科学产出有重要作用. FAST结构复杂、部件众多, 机房、箱变、促动器等需要每日进行人工巡检^[1]. 巡检维修工作中, 根据部件编号进行搜寻, 费时费力. 如何确定维护人员相对目标点的位置并规划路径, 是一个值得研究的问题. 除了节约搜寻时间, 维护人员的调度管理和巡检工作的记录也有赖于准确的定位, 得到的轨迹还可用于对巡检流程的分析和优化.

目前最通用的导航方式是卫星导航, 全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System,

BDS)等全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)可以提供米级的位置服务. 但是巡检维护工作大部分在反射面之下进行, 卫星信号会被遮挡. 这类似于卫星信号缺失的室内定位应用场景, 室内定位研究中使用的技术手段有移动通讯、WIFI、蓝牙、超宽带、磁场匹配、惯性导航等. 考虑到FAST现场条件和对电磁兼容的要求, 移动通讯、蓝牙等定位方式并不适用. 惯性导航是一种自主推算的导航方式, 不依赖外部信息, 也不会向外界发射信号, 适于在卫星信号缺失和要求电磁静默的场所中使用. 惯性导航的缺点是定位误差会随时间发散, 需要使用其他辅助信息来抑制误差发散.

惯性导航用于人员定位时, 常将惯性传感器安装在脚部构成捷联惯导系统. 使用的传感器称为惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU), 包

2024-01-15收到原稿, 2024-03-27收到修改稿

*国家自然科学基金项目(42274055), 贵州省省级科技计划项目(黔科合支撑[2023]一般352)资助

†djyu@nao.cas.cn

括3轴陀螺和3轴加速度计. 安装在脚部是为了配合零速修正算法使用, 利用行走过程中, 脚会周期性接触地面这一特征, 将速度为零作为伪测量值来修正误差. 零速修正算法可以大幅度减少纯惯导推算的误差累积, 使位置误差降低到时间的1/2次方^[2]. 但是方位角是不可观的, 航向漂移成为影响导航精度的重要因素. 目前文献中常用的航向修正方法有类似于零速修正的零角速度修正、地磁定向和判断行人沿道路和建筑物取向直线行走的启发式偏移消除等. 本文采用脚绑IMU的方式和零速修正算法框架, 测试了多种已有的误差修正算法, 选取地磁定向、磁角速率更新和双足距离修正组成组合导航系统, 在FAST巡检场景下达到米级定位精度.

2 零速修正算法框架

整体的算法框图如图1所示. 首先使用陀螺和加速度计的数据进行姿态更新、速度更新和位置更新, 得到纯惯导推算的结果. 每次递推后还要计算1步预测的状态向量及其协方差矩阵, 称为时间更新. 同时使用IMU数据进行零速检测, 在脚触地阶段进行零速修正. 为提高定位精度, 量测更新中还包括地磁场、标志点、双足距离等辅助信息. 不同量测更新的触发条件不同, 采用序贯滤波的方式, 便于程序调试, 也可以减小矩阵运算维数^[3]. 时间更新和量测更新组成完整的卡尔曼滤波算法框架.

真实系统是非线性的, 状态向量并不直接选取速度、位置等量, 而是对它们的误差建模, 误差小量减小了高阶项的影响, 可以解决系统非线性问题. 量测更新对误差状态进行估计, 之后将误差状态补偿到惯导推算结果中, 补偿后误差状态置零. 卡尔曼滤波的框架能够融合惯导推算和外界观测信息, 获得更准确的导航结果.

2.1 惯导递推

行人惯性导航中使用的惯性器件, 为满足可穿戴性的要求, 性能不会太高, 器件噪声远大于地球自转. 于是忽略地球自转得到简化的惯性导航方程, 包括姿态、速度和位置的推算方程.

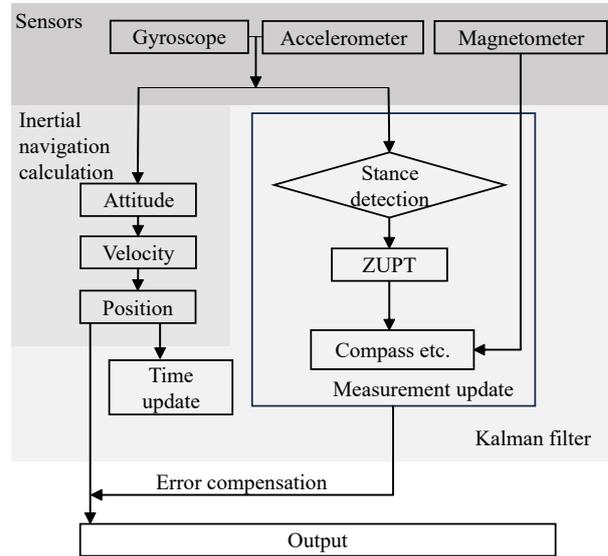


图1 本文定位算法的整体框图

Fig. 1 The overall framework of the positioning algorithm

由角速度和上一时刻的姿态推算得到当前时刻的姿态:

$$C_{b,k}^n = C_{b,k-1}^n \frac{2I_{3 \times 3} + \Omega_k \Delta t}{2I_{3 \times 3} - \Omega_k \Delta t},$$

其中 $C_{b,k}^n$ 为采样时刻 t_k 从载体坐标系(b系)到导航坐标系(n系)的坐标变化矩阵, $I_{3 \times 3}$ 为三维单位矩阵, Ω_k 为 t_k 时刻陀螺读数的反对称矩阵, Δt 为更新时间间隔.

由比力和上一时刻的速度推算得到当前时刻的速度:

$$\mathbf{v}_k^n = \mathbf{v}_{k-1}^n + C_{b,k}^n \mathbf{f}_k^b \Delta t + \mathbf{g}^n \Delta t,$$

其中 \mathbf{v}_k^n 为 t_k 时刻n系下的速度. \mathbf{f}_k^b 为 t_k 时刻加速度计测得的比力, 投影坐标系是b系. \mathbf{g}^n 是在n系中投影的重力加速度向量, 东北天坐标系下取值为 $[0, 0, -g]^T$, 其中 g 为当地的重力加速度数值.

由速度和上一时刻 t_{k-1} 的位置 \mathbf{p}_{k-1}^n 得到当前时刻 t_k 的位置 \mathbf{p}_k^n , 位置也投影在n系中:

$$\mathbf{p}_k^n = \mathbf{p}_{k-1}^n + \frac{1}{2}(\mathbf{v}_{k-1}^n + \mathbf{v}_k^n) \Delta t.$$

2.2 动态系统模型

对于低精度IMU, 纯惯导推算的导航结果会在短时间内快速发散, 必须使用其他辅助信息进行修正. 惯性导航与其他辅助信息的融合采用卡尔曼滤波框架, 卡尔曼滤波算法的设计就是要构建离散系统误差状态模型和观测方程, 之后就可以使用卡尔曼滤波公式进行计算.

一般先求得连续系统状态方程, 再进行离散化. 连续系统状态方程的形式为:

$$\delta \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(t)\delta \mathbf{x}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{w}(t),$$

其中 $\delta \mathbf{x}$ 为状态向量, \mathbf{F} 为状态转移矩阵, \mathbf{G} 为噪声分配矩阵, \mathbf{w} 为系统噪声, 各变量都是时间 t 的函数. 选取导航参数和传感器误差构成状态向量:

$$\delta \mathbf{x} = [\phi^T \mathbf{b}_g^T \delta \mathbf{p}^T \delta \mathbf{v}^T \mathbf{b}_a^T]^T,$$

其中5个状态分别为姿态误差 ϕ 、陀螺零偏误差 \mathbf{b}_g 、位置误差 $\delta \mathbf{p}$ 、速度误差 $\delta \mathbf{v}$ 、加速度计零偏误差 \mathbf{b}_a .

对姿态、速度和位置的递推方程进行扰动分析, 将传感器误差建模为1阶高斯马尔可夫过程, 得到状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\mathbf{b}}_g \\ \delta \dot{\mathbf{p}} \\ \delta \dot{\mathbf{v}} \\ \dot{\mathbf{b}}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{C}_b^n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_{gb}} \mathbf{I}_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{I}_{3 \times 3} & 0 \\ (\mathbf{C}_b^n \mathbf{f}^b) \times & 0 & 0 & 0 & \mathbf{C}_b^n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{ab}} \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \mathbf{b}_g \\ \delta \mathbf{p} \\ \delta \mathbf{v} \\ \mathbf{b}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b^n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_{3 \times 3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{C}_b^n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}_g \\ \mathbf{w}_{gb} \\ \mathbf{w}_a \\ \mathbf{w}_{ab} \end{bmatrix},$$

其中 T_{gb} 、 T_{ab} 分别为陀螺和加速度计误差建模的相关时间, \mathbf{w}_g 、 \mathbf{w}_a 分别为陀螺和加速度计的读数白噪声, \mathbf{w}_{gb} 、 \mathbf{w}_{ab} 分别为陀螺和加速度计的驱动白噪声. $(\cdot) \times$ 表示向量的反对称矩阵.

观测方程一般直接使用离散形式:

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k,$$

其中 \mathbf{Z}_k 为 t_k 时刻的观测量, \mathbf{H}_k 为 t_k 时刻的观测矩阵, \mathbf{X}_k 为离散化的状态向量, \mathbf{V}_k 为 t_k 时刻的观测噪声. 观测矩阵根据观测量的选择来设定. 实际观测向量与系统估计的观测向量之间的差值称为观测新息, 将用于系统状态的修正. 下文介绍使用不同辅助信息的量测更新时, 会给出对应的观测矩阵和观测新息.

2.3 零速修正

零速修正(Zero velocity UPdaTe, ZUPT)是利用行走过程中, 脚会周期性接触地面这一特征, 将速度为零作为观测信息修正误差. 零速修正的观测量为速度, 因此其观测矩阵 \mathbf{H}_k 为:

$$\mathbf{H}_k = [\mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 3}].$$

实际脚在触地过程中不绝对静止, 会有微小运动, 即可视为观测噪声, 文献[4]的研究表明这一噪声标准差大概为0.017 m/s. 零速修正的观测新息 \mathbf{m}_k 为:

$$\mathbf{m}_k = \mathbf{v}_k - [0 \ 0 \ 0]^T,$$

其中 \mathbf{v}_k 为惯导推算得到的地速.

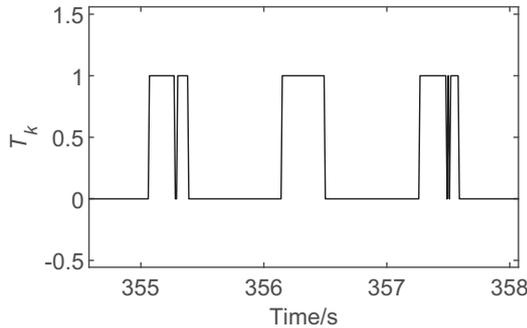
零速修正在脚触地时进行, 触地阶段利用陀螺和加速度计的数据来判定. 当角速度 $\boldsymbol{\omega}_k$ 幅值小于阈值 λ , 并且加速度 \mathbf{a}_k 幅值与重力加速度接近时, 判定为静止. λ 取为0.6 rad/s^[5]. 零速判定值 T_k 可表达为:

$$T_k = \begin{cases} 1, & \text{if } |\boldsymbol{\omega}_k| < \lambda \text{ and } 9 < |\mathbf{a}_k| < 11, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

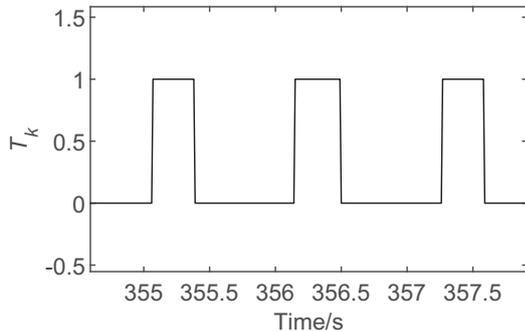
实践中由于数据波动会有个别时刻判定失误, 这会影响零速修正的效果和后续脚摆动周期的判断. 通过均值滤波对零速判定序列进行过滤, 计算某一时刻周围判定值的平均值, 若均值大于0.5则该时刻判定值设为1, 小于0.5则设为0, 如下式所示:

$$T_k = \begin{cases} 1, & \text{if } \frac{1}{2N+1} \sum_{n=k-N}^{k+N} T_k > 0.5, \\ 0, & \text{if } \frac{1}{2N+1} \sum_{n=k-N}^{k+N} T_k < 0.5, \end{cases}$$

式中 N 为过滤窗口的大小, 取为5. 过滤的效果如图2所示, 准确率与通用的广义似然比检验(Generalized Likelihood Rate Test, GLRT)法^[6]相当.



(a) Detection value before filtering



(b) Detection value after filtering

图 2 对行走过程中的零速判定值进行均值滤波前后的对比

Fig. 2 Comparison of stance detection values during walking before and after applying mean filtering

3 其他辅助信息

航向在零速修正中是不可观的, 所以航向会逐渐漂移. FAST现场主干道为螺旋形, 巡检路径也常常不规则, 无法使用假设行人直线行走的启发式漂移消除(Heuristic Drift Elimination, HDE)^[7]. 在步行导航领域, 不同的研究者提出了多种修正方法, 通过测试和比较, 选取了以下几种适应于FAST巡

检场景的修正方法.

3.1 地磁定向

大部分IMU都带有磁力计, 地磁场可提供有效的方位信息. 但地磁场会受到铁磁类物质的干扰, 使用磁场修正方位角前需要先排除异常值:

$$40 \mu\text{T} < B_{m,k} < 60 \mu\text{T},$$

$B_{m,k}$ 为当前时刻磁场幅值, 地磁场的幅值大概为 $50 \mu\text{T}$, 排除与地磁场偏差太远的测量值. 为避免振动的影响, 地磁定向也在零速阶段进行. 地磁航向角 ψ_{mb} 根据磁力计读数计算:

$$\psi_{\text{mb}} = \psi_{\text{nb}} + \alpha_{\text{nm}} = \text{atan2} \frac{\cos \phi_{\text{nb}} B_x + \sin \phi_{\text{nb}} B_z}{\sin \phi_{\text{nb}} \sin \theta_{\text{nb}} B_x + \cos \theta_{\text{nb}} B_y - \cos \phi_{\text{nb}} \sin \theta_{\text{nb}} B_z},$$

其中 B_x 、 B_y 、 B_z 为磁力计3轴的读数, θ_{nb} 、 ϕ_{nb} 和 ψ_{nb} 分别为俯仰角、横滚角和方位角, α_{nm} 为磁偏角, $\text{atan2}()$ 为四象限反正切函数. 磁偏角查询国际地磁参考场获得, 减去磁偏角后得到真正的方位角:

$$\psi_{\text{nb}} = \psi_{\text{mb}} - \alpha_{\text{nm}}.$$

将方位角作为观测量, 因此观测矩阵为:

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} [0, 0, 1] & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} \end{bmatrix}.$$

观测新息 m_k 为惯导推算得到的方位角 ψ_k 与地磁定向得到的方位角 ψ_{nb} 之差:

$$m_k = \psi_k - \psi_{\text{nb}}.$$

3.2 磁角速率更新

类似于零速修正, 可以在零速阶段进行零角速度修正(Zero Angular Rate Update, ZARU)^[8]. 假设脚触地时角速度为零. 但是触地时脚部会有微小转动, 零角速度假设可能会带来系统误差. 地磁场在局部近似于准静态磁场, 磁力计读数的变化是由磁力计的转动引起的, 因此可以根据磁力计读数变化计算角速度, 以更准确地校准陀螺零偏, 此过程称为磁角速率更新(Magnetic Angular Rate Update, MARU).

磁场准静态的判定条件为:

$$\Delta B_m = |B_{m,k} - B_{m,k-1}| < 0.15 \mu\text{T},$$

其中 ΔB_m 为相邻时刻磁场幅值的变化量.

t_k 时刻的观测新息 \mathbf{m}_k 和观测矩阵 \mathbf{H}_k 分别为^[9]:

$$\mathbf{m}_k = \mathbf{B}_k - \mathbf{B}_{k-1} + [(\boldsymbol{\omega}_k \Delta t) \times] \mathbf{B}_{k-1},$$

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & -(\mathbf{B}_{k-1} \Delta t) \times & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix},$$

其中 \mathbf{B}_k 为 t_k 时刻磁力计的读数.

3.3 双足最小距离修正

在左右脚同时安装IMU理论上可以获得更准确的位置,但是需要将双脚的信息融合起来.左右脚两个惯性导航系统的状态向量 $\delta \mathbf{x}^{(1)}$ 和 $\delta \mathbf{x}^{(2)}$ 联立得到新的状态向量 $\delta \mathbf{x}$:

$$\delta \mathbf{x} = [\delta \mathbf{x}^{(1)} \quad \delta \mathbf{x}^{(2)}]^T.$$

将 $\delta \mathbf{x}$ 作为新系统的状态向量,状态方程和观测方程的建立和离散化过程与上文单个惯性导航系统类似,在此省略.观测矩阵和观测新息仍然是算法设计的关键,将在下文给出.

步行过程可以简化为一只脚触地作为支点,另一只脚摆动的过程.左右脚交替接触地面,双脚的零速判定值如图3所示.在行走过程中,双脚的间距不断变化.在触地脚更换时,双脚距离达到最大;大约在脚摆动的中间时刻,双脚距离达到最小.双脚距离的最大值和最小值都可用于修正导航误差,利用最小值修正效果好于使用最大值^[10].

利用双脚距离最小值进行误差修正,如果左右脚的两个惯导系统从同一时刻开始推算,并且位置初始值都设为零,则可假设双脚距离最小值为零.在1次摆动完成后,利用系统估计的双脚位置计算间距,寻找摆动过程中双脚间距的最小值及对应时刻.假设找到 t_k 时刻双脚距离最小,此时系统估计的左右脚的位置分别为 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) ,则最小距离为:

$$d_{\min} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2},$$

观测新息 m_k 为实际测得的间距与系统估计间距之差:

$$m_k = d_{\min} - 0.$$

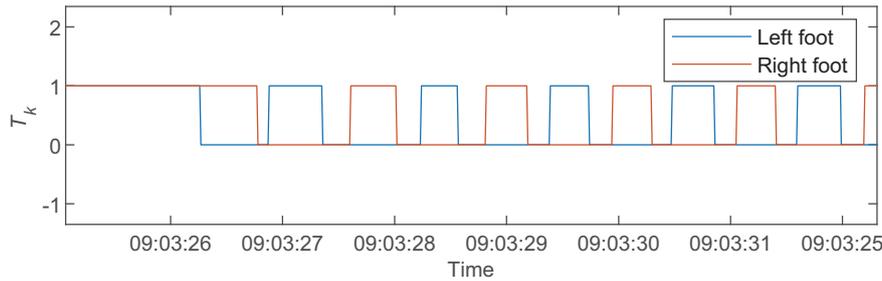


图3 行走过程中双脚零速判定值间的关系

Fig. 3 The relationship between stance detection values of two feet during walking

由于观测量是双脚距离,与系统状态之间是非线性关系,因此观测矩阵也是非线性的,需要对观测矩阵进行线性化.线性化后的观测矩阵为:

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{1 \times 6} & \mathbf{H}_1 & \mathbf{0}_{1 \times 6} & \mathbf{0}_{1 \times 6} & \mathbf{H}_2 & \mathbf{0}_{1 \times 6} \end{bmatrix},$$

其中

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \frac{x_1 - x_2}{d_{\min}} & \frac{y_1 - y_2}{d_{\min}} & \frac{z_1 - z_2}{d_{\min}} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \frac{x_2 - x_1}{d_{\min}} & \frac{y_2 - y_1}{d_{\min}} & \frac{z_2 - z_1}{d_{\min}} \end{bmatrix}.$$

双足距离最小值及其对应时刻 t_k 只有在脚的1次摆动完成后才能确定,求得 t_k 后需要返回该时刻进行量测更新,之后重新推算后续时刻.

3.4 标志点位置修正

巡检过程中,巡检人员会在促动器、机房等地

点停留, 检查和记录设备的工作状态或进行维修. 而每个巡检点都有事先测绘的精确位置坐标, 可以作为标志点对导航位置信息进行修正. 将位置作为观测量, 观测矩阵为:

$$\mathbf{H}_k = [\mathbf{0}_{3 \times 3} \ \mathbf{0}_{3 \times 3} \ \mathbf{I}_{3 \times 3} \ \mathbf{0}_{3 \times 3} \ \mathbf{0}_{3 \times 3}].$$

观测新息为该时刻惯导推算位置 \mathbf{p}_k 与标志点位置 (x, y, z) 之差:

$$\mathbf{m}_k = \mathbf{p}_k - [x \ y \ z]^T.$$

4 实验与结果

我们通过实验验证了不同误差修正算法的效果, 分别在规则矩形轨迹场景和FAST巡检不规则

轨迹场景中进行了测试. 相比于不规则轨迹, 不同算法在规则轨迹中的效果对比更加明显. 实验结果分别展示了地磁定向和磁角速率更新单独作用和组合使用时的效果, 然后展示了左右脚轨迹融合的效果. 最后在FAST现场进行测试, 在使用以上3种修正方法的基础上, 结合标志点对轨迹作修正.

采集数据的传感器使用的是亚博智能公司生产的IMU CMP10A, 这是1个10轴IMU, 包括3轴加速度计、3轴陀螺仪、3轴磁力计和气压计. 陀螺仪和加速度计的基本参数见表1. 表中 g 代表重力加速度, LSB代表最低有效位(Least Significant Bit). 带宽和输出频率分别设置为256 Hz和100 Hz. IMU尺寸为24 mm × 30 mm × 1.6 mm, 重6.4 g, 用鞋带绑在脚背处, 左右脚各1个.

表 1 陀螺仪和加速度计的主要参数
Table 1 Main characteristics of gyroscope and accelerometer

	Accelerometer	Gyroscope
Range	$\pm 16 \text{ g}$	$\pm 2000 \text{ (}^\circ \cdot \text{s}^{-1})$
Resolution	0.0005 g/LSB	$0.061 \text{ (}^\circ \cdot \text{(s} \cdot \text{LSB)}^{-1})$
RMS noise	0.75–1 mg	$0.028\text{--}0.07 \text{ (}^\circ \cdot \text{s}^{-1})$
Bias	$\pm 20\text{--}40 \text{ mg}$	$\pm 0.5\text{--}1 \text{ (}^\circ \cdot \text{s}^{-1})$
Error over temperature	$\pm 0.15 \text{ mg/}^\circ\text{C}$	$\pm 0.005\text{--}0.015 \text{ (}^\circ \cdot \text{(s} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}^{-1})$
Bandwidth		5–256 Hz

实验1以正常步速沿200 m × 500 m的规则矩形行走, 总路程1.4 km, 用时约20 min. 初始姿态由磁力计确定, 初始速度和位置设置为零. 行走前静立10 s, 以便计算零偏并扣除. 图4和图5分别为左右脚的轨迹.

相比于惯导推算, 卫星导航定位误差较小, 卫星定位轨迹可作为参考轨迹. 红色轨迹是只使用零速修正算法的导航结果, 由于零偏残差和测量噪声的存在, 航向会逐渐漂移. 使用地磁定向得到的轨迹较为平直, 但相比卫星导航轨迹仍有偏移, 说明地磁定向可有效减少航向漂移, 但是局部地磁异常和磁力计零偏会导致航向偏差. 使用磁角速率更新也可以减少航向漂移, 但有时会修正过度, 单独使用效果不佳. 地磁定向与磁角速率更新结合使用得

到蓝色轨迹, 与只使用地磁定向的黄色轨迹比较接近, 说明地磁定向起决定性作用, 但磁角速率更新也可略微减小航向误差, 两种方法结合使用可以获得更好的结果.

使用以上修正算法后, 左右脚的解算位置仍有较大差别. 使用双足最小距离修正后的结果, 如图6所示, 可以使左右脚的数据很好地融合, 融合后的轨迹与卫星导航结果更为接近.

闭合轨迹场景下误差估计比较方便, 起点坐标为零时终点坐标即为误差值. 表2为使用不同修正方法时导航轨迹的终点坐标. 只使用零速修正, 位置误差在行走距离的10%以上, 右脚方位角偏差达到100°以上; 使用地磁定向位置误差降到4%, 方位角误差在10°左右; 使用MARU位置误差仍然很大,

但方位角偏差大幅减小; 以上两种方法结合使用, 略好于单独使用地磁定向; 数据融合后, 两脚位置差很小, 方位角误差几乎为零.

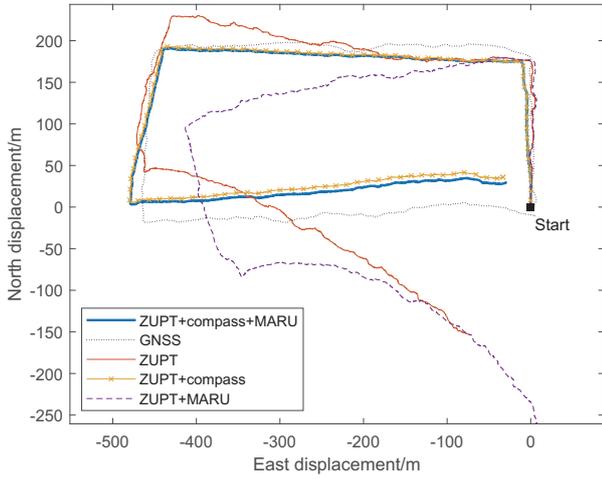


图 4 左脚使用不同算法的推算轨迹

Fig. 4 Estimated trajectories of left foot using different algorithms

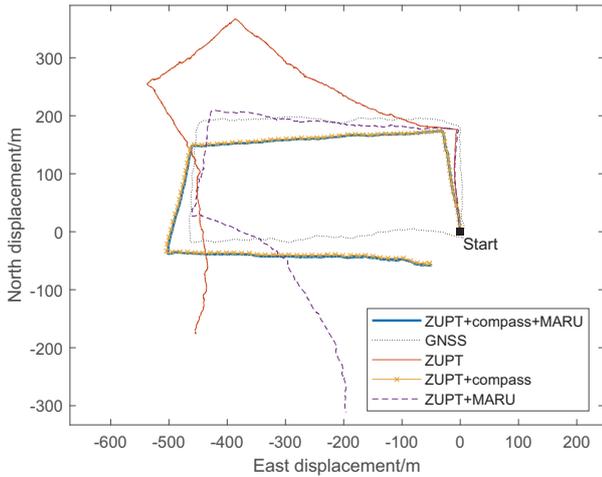


图 5 右脚使用不同算法的推算轨迹

Fig. 5 Estimated trajectories of right foot using different algorithms

实验2在FAST反射面下进行, 沿FAST螺旋巡检道行走, 模拟巡检过程, 途中在部分促动器处停留并记录编号. 共采集了3组数据, 每组用时 40 min, 路程约3.3 km. 促动器编号用于后处理, 将促动器地锚的位置坐标作为标志点, 对惯导解算位

置进行修正, 3组数据的步行轨迹如图7左栏所示.

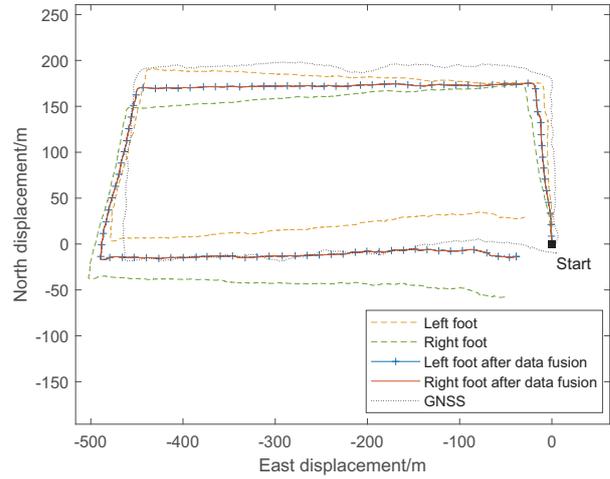


图 6 数据融合前后双足的轨迹

Fig. 6 The trajectories of two feet before and after data fusion

图中红点代表多次行走过程中记录的所有促动器位置, 实心点代表本次行走过程中记录并用于位置修正的促动器, 3组数据共47个修正点. 记录促动器的时间间隔大约为2 min, 间距大约150 m. 黄色虚线是使用零速修正结合两种磁场修正和双足修正得到的轨迹. 轨迹的形状大致与螺旋道吻合, 但是与沿途促动器对比, 位置仍然存在偏差. 蓝色实线是使用以上修正算法的基础上, 再结合标志点修正得到的轨迹. 经过修正后, 轨迹与促动器的位置基本吻合, 在部分修正点处, 可以看到轨迹修正时产生的位置突变. 蓝色轨迹与黄色轨迹对比, 展示了标志点位置修正可以进一步减小定位误差.

通过将推算的位置坐标与标志点坐标进行对比, 可以对定位误差作定量的分析. 标志点修正会将轨迹校正到标志点附近, 修正点处的位置修正量可被视为步行全程中定位的最大误差量. 计算修正前一时刻的位置与标志点间的水平距离, 进行统计分析, 得到频数分布直方图. 3组数据对应的频数分布直方图见图7右栏所示, 汇总结果如图8所示. 同时计算了3组数据水平位置误差的均值、均方值、最大值和标准差, 见表3. 考虑到记录编号时, IMU的位置与促动器地锚位置并不完全重合. 调整参数使修正后IMU的位置与标志点位置接近,

两者差值的标准差约为2 m. 从统计特征来看, 水平定位误差的均值为5.4 m, 47个修正点中只有1个点

误差大于10 m, 为10.3 m, 误差大部分在10 m内, 能够满足巡检需求.

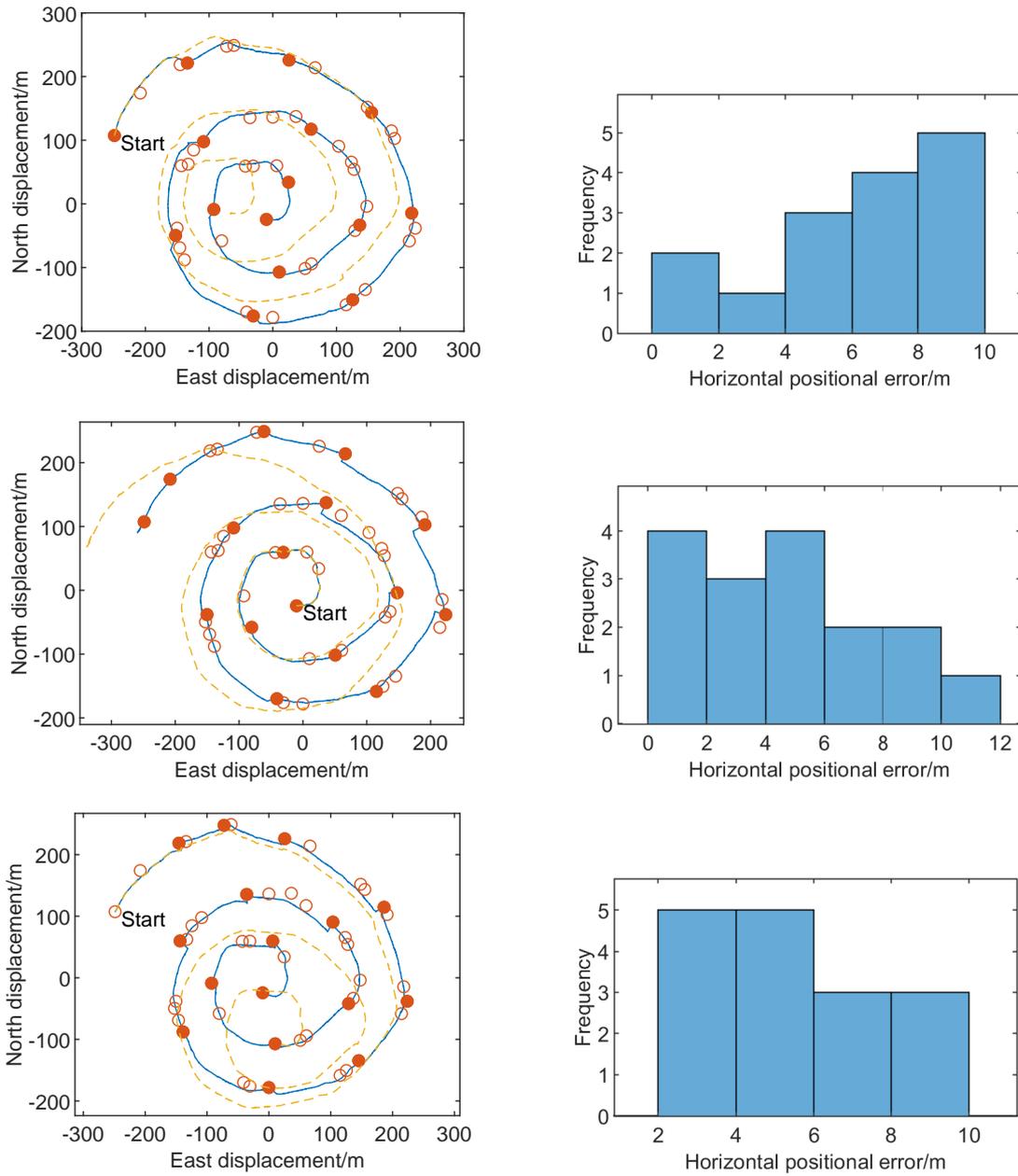


图 7 3次实验中使用和不使用标志点修正的轨迹以及标志点修正轨迹的位置误差频数分布. 红色实心点代表用于修正的促动器. 空心点代表未用于修正的促动器. 蓝色实线代表标志点修正后的轨迹. 黄色虚线代表标志点修正前的轨迹.

Fig. 7 The trajectories with and without marker correction in the three experiments, and the frequency distribution of positional errors for the marker-corrected trajectories. The red solid dots represent the actuators used for correction. The hollow dots represent the actuators not used for correction. The blue solid line represents the trajectory after marker correction. The yellow dashed line represents the trajectory before marker correction.

表 2 不同修正方法的终点坐标
Table 2 The coordinates of end points using different algorithms

		Coordinates of end points/m			Error of heading/ $^{\circ}$
		x	y	z	
ZUPT	left	74	153	23	26
	right	464	176	19	-112
ZUPT+compass	left	-33	36	23	12
	right	-52	-54	20	7
ZUPT+MARU	left	20	-274	23	50
	right	-196	-312	-20	-95
ZUPT+MARU+compass	left	-29	29	22	11
	right	-50	-57	30	4
ZUPT+MARU+compass+dual-foot	left	-38.7	-13.4	21.3	0.7
	right	-38.2	-13.1	21.3	0.7

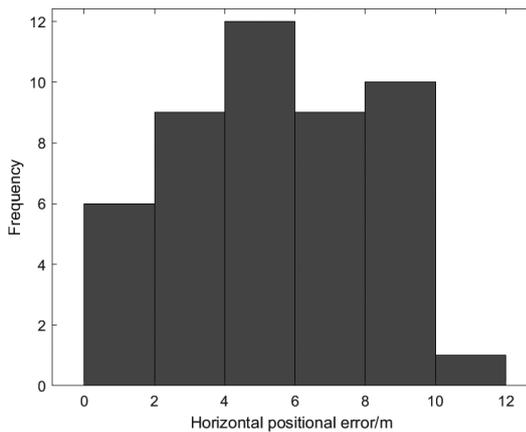


图 8 水平位置误差的频数分布

Fig. 8 The frequency distribution of horizontal positional errors

表 3 3次实验水平位置误差的统计特征(单位: m)
Table 3 Statistical characteristics of horizontal positional errors in the three experiments (unit: m)

Set#	Mean	RMS	Max	Std
1	6.0	6.6	9.9	2.7
2	4.8	5.7	10.3	3.0
3	5.3	5.7	8.4	2.3
All	5.4	6.0	10.3	2.7

5 结论

步行导航中, 零速修正算法可以使低成本的微机械IMU获得可用的导航结果, 但是位置和航向误差会随步行时长增加而增长. 使用多种辅助信息修正误差, 其中地磁定向起决定作用, MARU可减小航向漂移, 两者结合可以得到更好的结果. 双足修正可有效融合双足两个惯导系统的信息. 使用以上方法, 在FAST巡检场景下, 标志点间隔约150 m时, 可以实现较为准确的定位, 水平位置误差约5.4 m, 最大误差小于11 m. 定位精度能够满足日常巡检中定位和轨迹记录的需求.

本文主要对巡检定位中的步行导航算法进行了验证, 未来建立实用的巡检定位系统还需要进一步研究. 硬件方面, 设备在望远镜观测期间使用需要考虑电磁兼容, 同时还需设计更适合穿戴的传感器设备, 使其不影响巡检人员的正常作业. 软件方面, 需要实现导航定位的实时处理、自动检测标志点位置、实时输出导航结果. 后端优化可以加入平滑算法, 消除标志点修正时的位置突变, 获得更高精度的轨迹. 实验中使用闭合轨迹、卫星导航和对比促动器位置等方法对算法精度进行验证, 验证方法本身存在一定的误差, 进一步提高定位精度还需要设立更准确的参考值.

参 考 文 献

- [1] 吴若飞, 雷政, 杨磊, 等. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62: 1741
- [2] Wang Y, Chernyshoff A, Shkel A M. ITAES, 2020, 56: 2280
- [3] 严恭敏, 翁浚. 捷联惯导算法与组合导航原理. 西安: 西北工业大学出版社, 2019: 143
- [4] Shkel A M, Wang Y. Pedestrian Inertial Navigation with Self-Contained Aiding. Hoboken: Wiley, 2021: 73
- [5] Fischer C, Sukumar P T, Hazas M. IEEE Pervasive Comput, 2013, 12: 17
- [6] Skog I, Handel P, Nilson J O, et al. ITBE, 2010, 57: 2657
- [7] Jimenez A R, Seco F, Zampella F, et al. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. New York: IEEE, 2011: 122
- [8] Jimenez A R, Seco F, Prieto J C, et al. Workshop on Positioning, Navigation and Communication. New York: IEEE, 2010: 135
- [9] Zampella F, Khider M, Robertson P, et al. Proceedings of IEEE/ION PLANS. New York: IEEE, 2012: 129
- [10] Niu X, Li Y, Kuang J, et al. ISenJ, 2019, 19: 4577

Research on Positioning System for FAST Inspection Based on IMU

HU Wei^{1,2} YU Dong-jun¹ SUN Jing-hai¹

(1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT Routine inspection is an important task in the operation and maintenance of FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope). The telescope consists of a large number of components. Searching for components by their numbers during the inspection is time-consuming and laborious. Solving the position and navigation problem in inspection can help maintenance personnel find fault points quickly. It is important for improving the inspection efficiency and ensuring the telescope runs normally. Given that the satellite signals are blocked by FAST reflector, the inertial navigation is adopted and a set of pedestrian inertial navigation algorithm is designed based on pedestrian foot-mounted IMUs (Inertial Measurement Units). The algorithm follows the Zero Velocity Update (ZUPT) algorithm framework, fuses the data of two IMUs of two feet, and uses the magnetic field information to correct the heading error. The effectiveness of the algorithm was tested in regular trajectories, and the horizontal positioning error was within 3% of the walking distance. Every actuator has accurate coordinates and can be used as marker points to correct the position of inspectors when they pass. In the irregular trajectory of the inspection situation, combined with the control points along the way, the positioning error is less than 11 meters. The precision of algorithm can meet the positioning needs in inspection and support the application of the positioning system for inspection in the future.

Key words telescopes: FAST, techniques: pedestrian navigation, instrumentation: foot-mounted IMU, methods: Kalman filtering