

12-13-2019

Pedestrian Navigation Method Based on UWB and SINS

Yang Yang

Beijing Information Science and Technology University Institute of Intelligence Control, Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing 100192, China;

Li Qing

Beijing Information Science and Technology University Institute of Intelligence Control, Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing 100192, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Pedestrian Navigation Method Based on UWB and SINS

Abstract

Abstract: In view of the problem that the inertial navigation error is accumulating with time and UWB indoor is hard to continue tracking problems in complex environment, *an extended Kalman filter (EKF) fusing UWB and sins pedestrian navigation is proposed. The zero speed correction algorithm is used to trigger EKF at zero speed. The sins is corrected by the velocity error measurement provided by sins and the position error measurement provided by UWB restraining error accumulation. When UWB signal is interrupted, the position of UWB output without interruption is taken as the starting position.* The experiment results of SINS autonomous navigation show that UWB+SINS method complements the advantages and disadvantages of the two methods, restrains the accumulation of errors and ensures the continuity of navigation, improves the accuracy of pedestrian navigation, and the navigation error is 0.50%.

Keywords

pedestrian navigation, strapdown inertial navigation, UWB, extended kalman filtering, data fusion

Recommended Citation

Yang Yang, Li Qing. Pedestrian Navigation Method Based on UWB and SINS[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(12): 2636-2642.

UWB 与 SINS 融合的行人导航方法

杨洋, 李擎

(北京信息科技大学智能控制研究所, 高动态导航技术北京市重点实验室, 北京 100192)

摘要: 针对惯性导航的误差随时间不断累积、UWB 在室内复杂环境中很难持续跟踪的问题, 提出采用扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)融合 UWB 与 SINS 行人导航方法。利用 UWB 辅助 SINS。采用零速修正算法, 在零速时刻触发 EKF, 通过 SINS 提供的速度误差观测量和 UWB 提供的位置误差观测量对 SINS 进行修正, 抑制误差累积。在 UWB 信号中断时, 将未中断时 UWB 输出的位置作为起始位置, 利用 SINS 自主导航。实验结果证明: UWB+SINS 方法互补了两者的优缺点, 抑制误差累积且保证了导航的连续性, 提高了行人导航的精度, 导航误差为 0.50%。

关键词: 行人导航; 捷联惯性导航; 超宽带; 扩展卡尔曼滤波; 数据融合

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 12-2636-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0386

Pedestrian Navigation Method Based on UWB and SINS

Yang Yang, Li Qing

(Beijing Information Science and Technology University Institute of Intelligence Control, Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing 100192, China)

Abstract: In view of the problem that the inertial navigation error is accumulating with time and UWB indoor is hard to continue tracking problems in complex environment, an extended Kalman filter (EKF) fusing UWB and sins pedestrian navigation is proposed. The zero speed correction algorithm is used to trigger EKF at zero speed. The sins is corrected by the velocity error measurement provided by sins and the position error measurement provided by UWB restraining error accumulation. When UWB signal is interrupted, the position of UWB output without interruption is taken as the starting position. The experiment results of SINS autonomous navigation show that UWB+SINS method complements the advantages and disadvantages of the two methods, restrains the accumulation of errors and ensures the continuity of navigation, improves the accuracy of pedestrian navigation, and the navigation error is 0.50%.

Keywords: pedestrian navigation; strapdown inertial navigation; UWB; extended kalman filtering; data fusion

引言

惯性导航技术作为一种自主导航技术, 具有

完全自主的特点, 既不受外部环境的影响, 且更新数据的速度快。惯性导航可以在短时间和短距离内实现高性能的连续自主导航。然而, 惯性行人导航存在明显的缺点, 随着时间的积累和行人的移动, 误差将不断累积, 导致导航精度不断降低^[1]。为了消除惯性导航中的累积误差, 提高导航精度。许多学者将惯性导航系统与其他形式的定位系统进行融



收稿日期: 2019-05-30 修回日期: 2019-07-31;
基金项目: 国家自然科学基金(61971048);
作者简介: 杨洋(1996-), 女, 山西, 硕士生, 研究方向为控制工程, 高动态导航技术等; 李擎(1964-), 女, 河北, 博士, 教授, 研究方向为导航制导、飞行器控制等。

<http://www.china-simulation.com>

• 2636 •

合。UWB 定位技术由于其具有功耗低、传输速率快、抗多径能力强与定位精度高等优点, 是其它定位技术无法比拟的。其定位原理是利用多个基站接收定位标签发出脉冲信号, 通过分析信号的到达角度 (AOA) 到达时间 (TOA) 以及到达时间差 (TDOA), 最终形成精确的定位坐标。定位精度优于其他近距离无线定位技术(如 RFID、WIFI、蓝牙等), 可以达到厘米级。因此, 可以使用 UWB 定位技术消除惯性行人导航系统中的累积误差。

一些学者将 UWB 与惯性导航技术进行融合, 但大部分只适用于无人机和车辆的定位^[2], 如郁嘉宇提出了采用 UWB 辅助车载 MEMS 定位的方法来抑制 MEMS 的发散^[3]。在行人导航方面, 曾庆化提出在建筑内拐角、楼梯口等处采用 UWB 进行惯导航向和位置的修正^[4], 但该方法不能彻底消除误差积累。孙壁文^[5]提出一种行人航迹推算(PDR)和 UWB 紧耦合行人导航系统, Pengzhan Chen 提出一种 UWB 和改进的 PDR 算法, UWB 来克服惯性定位的误差累积^[6]。但是 PDR 算法对行人的步长、步态要求较高, 而捷联惯性行人导航无需获取行人的精确步长, 因此本文提出 UWB 与 SINS 松组合进行行人导航。在传统捷联惯性行人导航的基础上, 采用基于 EKF 的数据融合的方法, 利用 UWB 提供的准确的位置信息对 SINS 系统进行修正, 即在零瞬态时刻触发卡尔曼滤波器, 不仅将 SINS 解算出的速度误差作为速度误差观测量, 还将 UWB 解算出的位置与 SINS 解算出的位置的差值, 作为位置误差观测量, 最终建立观测方程, 利用 EKF 对系统的所有状态误差进行最优估计。实现精确的行人导航。另外, 在 UWB 信号丢失的情况下, 单独采用 SINS 也可实现行人自主导航。

1 UWB+SINS 行人导航系统结构

UWB+SINS 行人导航方法采用松散组合方式, 以 SINS 为主, 在 UWB 信号未被遮挡时, 利用 UWB 提供的准确的位置信息, 消除累积误差, 抑制系统发散; 在 UWB 信号被遮挡时, 还可利用

SINS 实现行人自主导航。

基于 EKF 的 UWB+SINS 行人导航方法的具体流程是, 首先利用捷联惯导导航解算单元得到行人的位置、速度和姿态信息; 然后利用加速度计和陀螺仪的“与”逻辑进行“零瞬态”检测, 捕捉运动步态中的“零瞬态”; 在“零瞬态”区间触发扩展卡尔曼滤波器, 对系统的所有状态误差进行最优估计; 最后反馈给捷联解算部分, 修正捷联解算的误差, 实现行人导航。UWB+SINS 行人导航系统结构示意图如图 1 所示, 主要由 3 部分组成, 分别为捷联惯导导航解算部分、“零瞬态”检测部分以及基于数据融合的 EKF 部分。

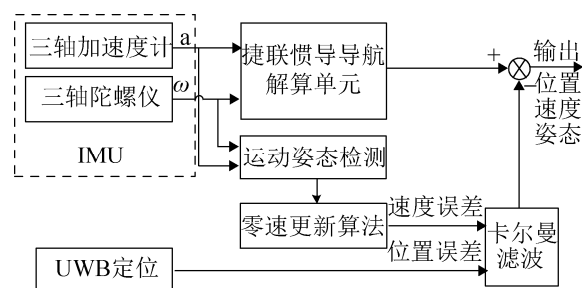


图 1 UWB+SINS 行人导航系统结构
Fig. 1 Structure of UWB+SINS pedestrian navigation system

2 SINS 行人导航解算和误差分析

捷联惯导导航解算部分主要是采用积分算法, 对 IMU 的输出信息进行 9 自由度的导航解算, 实时解算行人的导航定位信息。

本文选取东北天(E-N-U)为导航坐标系, 记为 n 系; $X-Y-Z$ 为载体坐标系, 记为 b 系。经过坐标系的转换将载体坐标 b 系, 转换为导航坐标 n 系, C_b^n 为变换矩阵,

$$C_b^n = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma - s\alpha s\beta c\gamma + c\alpha s\gamma c\alpha\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ c\beta s\gamma s\alpha s\beta c\gamma + c\alpha c\gamma - c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ -s\beta s\alpha c\beta c\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $s = \sin$, $c = \cos$ 。

捷联惯导数学模型为:

$$\dot{C}_b^n = C_b^n \Omega_{nb}^n \quad (2)$$

式中： Ω_{nb}^n 为反对称矩阵，

$$\Omega_{nb}^n = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{nbz}^b & \omega_{nby}^b \\ \omega_{nbz}^b & 0 & \omega_{nbx}^b \\ \omega_{nbz}^b & \omega_{nbx}^b & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

速度为：

$$\dot{v}^n = C_b^n f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v^n + g^n \quad (4)$$

式中： f^b 为加速度计输出的比力； ω_{ie} 为地球自转角速度； ω_{en} 为位置角速率； g^n 为地球重力加速度。

经度、纬度、高度的变化率分别为 $\dot{\lambda}$ 、 \dot{L} 、 \dot{h} ：

$$\dot{\lambda} = \frac{v_E}{(R_n + h) \cos L} \quad (5)$$

$$\dot{L} = \frac{v_N}{R_m + h} \quad (6)$$

$$\dot{h} = v_U \quad (7)$$

式中： λ 、 L 、 h 分别为经、纬、高度； v_E 、 v_N 、 v_U 分别为东北天(E、N、U)方向上速度； R_n 、 R_m 分别为地球的横、纵向曲率半径；

捷联惯导的误差模型为：

$$\delta \dot{v}^n = f^n \times \psi - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta v^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v^n - \delta g^n + C_b^n \delta f^b \quad (8)$$

$$\delta \dot{\lambda} = \delta v_E^n \sec L / (R_E + h) + \delta L \cdot \delta v_E^n \tan L \sec L / (R_E + h) \quad (9)$$

$$\delta \dot{L} = \delta v_N^n / (R_N + h) \quad (10)$$

$$\delta \dot{h} = \delta v_U^n \quad (11)$$

$$\dot{\psi} = -\psi \times \omega_{in}^n + \delta \omega_{in}^n - C_b^n \delta \omega_{ib}^b \quad (12)$$

式中： ω_{ie}^n 为地球自转角速度在导航系(n 系)上的投影； ω_{en}^n 为导航系(n 系)相对地球系(e 系)的转动角速度在导航系(n 系)上的投影^[7]； $\delta \omega_{ib}^b$ 为陀螺仪输出角速度误差。

上述误差模型简化后得，

$$\delta \dot{v}^n = [f^n \times] \psi + C_b^n \delta f^b \quad (13)$$

$$\delta \dot{p}^n = \delta v \quad (14)$$

$$\dot{\psi} = -C_b^n \delta \omega_{ib}^b \quad (15)$$

式中： δv^n 为速度误差； δp^n 为位置误差； φ^n 为姿态误差。

3 零速修正算法

人正常行走时，每走一步都会用脚触地，因此

每一步都存在脚部接触地面的阶段。当行人处于完全站立状态，或处于行走时的支撑状态时，脚部的角速度以及加速度几乎为零，且处于该状态的时间很短暂，这些状态就称为“零瞬态”。

当行人处于“零瞬态”时，理论上速度值为零，但实际上由于测量噪声和系统误差的累积，SINS 解算输出的速度值并不为零，因此，需要精确检测出行人运动时的“零瞬态”，并在此刻对误差进行修正。这种思想被称为零速修正(ZUPT)。

零速修正的步骤分成两步，通过建立 C_1 、 C_2 、 C_3 ^[8] 三个判别条件，捕捉行人行走过程中的“零瞬态”，实现“零瞬态”检测；然后当行人处于“零瞬态”时，启动扩展卡尔曼滤波。将惯导输出的速度作为系统的速度误差观测量，对速度误差进行积分得到位移量即位置误差值，实现各项误差的校正。

4 基于数据融合 EKF 的设计

传统的零速修正算法能在一定程度上抑制系统误差发散^[9]，但是不能保证位置误差的准确性，因为位置不是直接测量得到的，而是在速度误差的基础上，经过建立模型计算得出的，因此不能完全解决误差累积问题，随着时间的延长，系统将失去导航能力。本文在传统零速修正算法的基础上，设计了基于数据融合的卡尔曼滤波器，其目的是将 UWB 输出的信息和 SINS 解算的信息融合，采用 UWB 解算的准确的位置信息来修正位置误差。换句话说，是将“零瞬态”时刻惯导解算位置与 UWB 位置的差值作为位置误差观测量。取代了原先由速度误差积分得到的位置误差值。

由于行人导航系统是非线性的，本文采用 EKF 算法。EKF 处理非线性系统的思想：首先对非线性系统线性化，用误差形式下的状态方程和观测方程描述系统模型；然后采用标准卡尔曼滤波方程估计状态误差。

卡尔曼的状态方程和观测方程为^[10]，

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k-1} W_{k-1} \quad (16)$$

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (17)$$

式中: \mathbf{X}_k 为 k 时刻系统的状态量; \mathbf{X}_{k-1} 为 $k-1$ 时刻系统的最优状态; $\Phi_{k,k-1}$ 为系统从 $k-1$ 时刻到 k 时刻的状态转移矩阵; Γ_{k-1} 是 $k-1$ 时刻的系统噪声驱动矩阵; \mathbf{Z}_k 表示 k 时刻的观测量; \mathbf{H}_k 为 k 时刻的观测矩阵; \mathbf{V}_k 表示 k 时刻的观测噪声。对应 $k-1$ 时刻的协方差矩阵为 \mathbf{R}_{k-1} 。 \mathbf{W}_{k-1} 为 $k-1$ 时刻系统的噪声矩阵, 其对应 $k-1$ 时刻的协方差矩阵为 \mathbf{Q}_{k-1} 。

$$\mathbf{Q}_k = \mathbf{T}\mathbf{M}_1 + \frac{\mathbf{T}^2}{2!}\mathbf{M}_2 + \frac{\mathbf{T}^3}{3!}\mathbf{M}_3 + \dots \quad (18)$$

$$\mathbf{M}_{i+1} = \mathbf{F}\mathbf{M}_i + (\mathbf{F}\mathbf{M}_i)^\top \quad (19)$$

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{q} \quad (20)$$

式中: \mathbf{T} 为姿态矩阵; \mathbf{M} 为状态方程在连续系统下的状态转移矩阵^[11]。

本文选取了 9 个状态量, 如公式(21)所示, 其中, $\delta\mathbf{P}$ 、 $\delta\mathbf{v}$ 、 $\delta\boldsymbol{\varphi}$ 为惯导位置误差、速度误差、姿态误差在导航坐标系 E-N-U 坐标系上的三维分量。(其中, 姿态 $\boldsymbol{\varphi}$ 包括 α 航向角、 β 姿态角、 γ 横滚角);

$$\mathbf{X}_k = [\delta P_E, \delta P_N, \delta P_U, \delta v_E, \delta v_N, \delta v_U, \delta\alpha, \delta\beta, \delta\gamma] \quad (21)$$

状态转移矩阵 $\Phi_{k,k-1}$ 为 9×9 维,

$$\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{I}\Delta t & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & \Delta t[f^n \times] \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中: \mathbf{I} 为 3×3 的单位矩阵; $\mathbf{0}$ 是零矩阵。

噪声驱动矩阵的离散形式为:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_b^n & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{C}_b^n \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中: \mathbf{C}_b^n 为载体坐标系(X-Y-Z, b 系)到导航坐标系(E-N-U, n 系)的方向余弦矩。

传统修正算法中, 仅以速度误差为观测量,

$$\mathbf{Z}_k = [\Delta \mathbf{v}_k] \quad (24)$$

所得到的观测矩阵为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (25)$$

在本文中选取速度误差、位置误差, 作为系统的观测量,

$$\mathbf{Z}_k = [\Delta \mathbf{v}_k, \Delta \mathbf{P}_k] \quad (26)$$

观测矩阵 \mathbf{H} 由以下两部分构成。

(1) 对于速度误差补偿, 当检测到行人处于“零瞬态”时, 则从理论上讲, 此刻脚的速度为零, 但由于存在测量等误差, 此刻惯性传感器的测量值并不为零。将惯性传感器测量的实际速度与理论速度做差, 得到的差值 $\Delta \mathbf{v}_k$, 作为此刻的速度观测量,

$$\Delta \mathbf{v}_k = \begin{bmatrix} v_{Ek} \\ v_{Nk} \\ v_{Uk} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

其相应的观测矩阵如下,

$$\mathbf{H}_1 = [\mathbf{0} \quad \mathbf{I} \quad \mathbf{0}] \quad (28)$$

(2) 对于位置误差补偿, 使用 UWB 解算的精确的位置信息对惯导解算的位置进行修正, 考虑到算法计算量和数据融合的有效性, 同样也是在行人处于“零瞬态”时进行误差补偿的, 将“零瞬态”时刻惯导解算位置与 UWB 位置之差, 作为位置误差观测量,

$$\Delta \mathbf{P}_k = \begin{bmatrix} P_{E_SINS_k} \\ P_{N_SINS_k} \\ P_{U_SINS_k} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{E_UWB_k} \\ P_{N_UWB_k} \\ P_{U_UWB_k} \end{bmatrix} \quad (29)$$

相应的观测矩阵如下,

$$\mathbf{H}_2 = [\mathbf{I} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}] \quad (30)$$

由公式(28)和(30), 得出

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (31)$$

当行人处于“零瞬态”时, 开始卡尔曼滤波, 即可估计出速度误差, 位置误差。卡尔曼滤波过程为:

时间更新:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad (32)$$

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^\top + \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^\top \quad (33)$$

量测更新:

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (34)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1}) \quad (35)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k/k-1} \quad (36)$$

通过状态量的估计和量测更新，得到的导航误差估计量被返回至 SINS 解算环节，SINS 系统输出修正后的导航结果。

5 实验与分析

为了验证本文提出的 UWB+SINS 行人导航方法的定位效果及精确性，在实验室内进行了的行人导航实验。

首先，配置实验环境。本文使用实验场所是布置有 UWB 设备的实验室。实验设备是惯性导航设备和 UWB 设备，如图 2 所示。



图2 UWB 定位标签、同步控制器、定位基站、自研惯性导航器件

Fig. 2 UWB positioning tag, synchronous controller, positioning base station, self-developed inertial navigation device

其中，惯性导航设备采用实验室自主研发的惯性导航器件，由三轴陀螺仪、三轴加速度计和三轴磁力计组成。UWB 定位设备主要由定位基站、定位引擎、同步控制器以及一个定位标签组成。如图 3 所示，PC 端通过网线和同步控制器相连，同步控制器与基站之间用光纤连接，定位基站之间也用光纤串联，分别固定在天花板上。

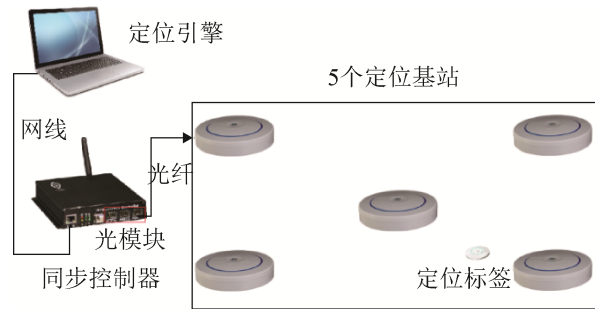


图3 UWB 设备

Fig. 3 UWB equipment

其次，设计实验方案。将自主研发的惯性导航器件固定于行人脚面上。同时为了免受不必要的干扰，将 UWB 标签固定在行人的肩部。行人绕图 4 所示的封闭路线行走，总路程为 28 m，从起点沿着预定路线顺时针走一圈后回到原地。分别进行两组实验。

第 1 组：利用 UWB+SINS 方法和纯 SINS 方法进行实验，实验结果如图 4 所示，图中的红色圆圈代表起点位置，绿色方块代表终点位置。蓝色实线代表预定路径，粉色虚线代表采用纯 SINS 方法解算得到的路径，黑色虚线代表 UWB+SINS 导航方法解算的路径。

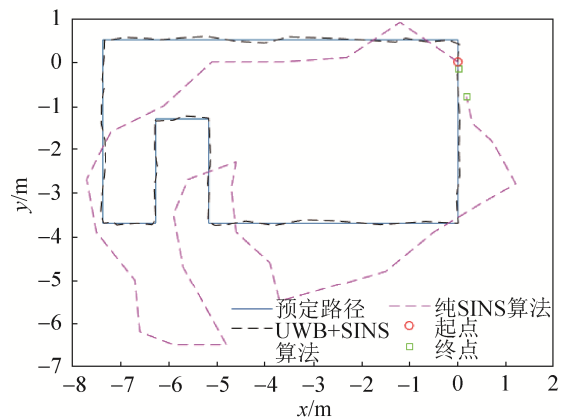


图4 纯 SINS 和 UWB+SINS 轨迹

Fig. 4 Traces of pure SINS and UWB+SINS

图 4 中可明显得出纯 SINS 解算得到的路径存在明显的累积误差，起点和终点解算误差为 0.820 m。而 UWB+SINS 方法解算得到的路径与预定路线接近，贴合度高，解算误差为 0.150 m。后

者的定位精度明显比前者高, 具有较高的可靠性。

第 2 组: 由于 UWB 信号被遮挡时, 定位精度急速下降, 为了验证遮挡时 UWB+SINS 方法的可靠性, 设计了遮挡实验, 即从 A 点到 B 点对 UWB 信号进行遮挡, 存在遮挡时的 UWB+SINS 方法实验结果如图 5 所示。实验结果表明, 遮挡时当为精度虽降低, 但仍可利用 SINS 方法进行导航。在恢复信号后, 定位瞬间跳变到 UWB 解算出的相对准确的位置。

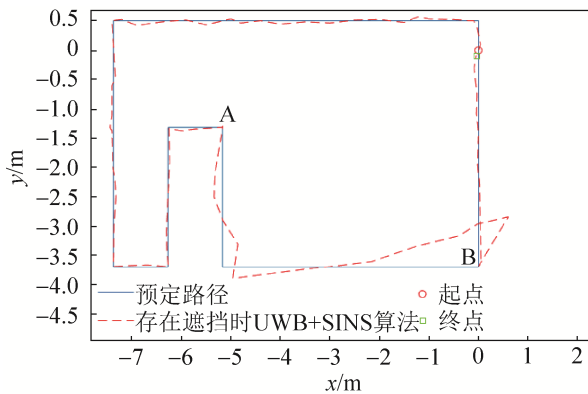


图 5 存在遮挡时 UWB+SINS 的轨迹
Fig. 5 Traces of UWB+SINS with occlusion

通过纯 SINS 方法和 UWB+SINS 方法对传感器数据进行处理得到其在行走状态下的位置、速度、姿态角协方差图分别如图 6~7 所示。UWB+SINS 方法协方差小于纯 SINS, UWB+SINS 方法稳定性较好。

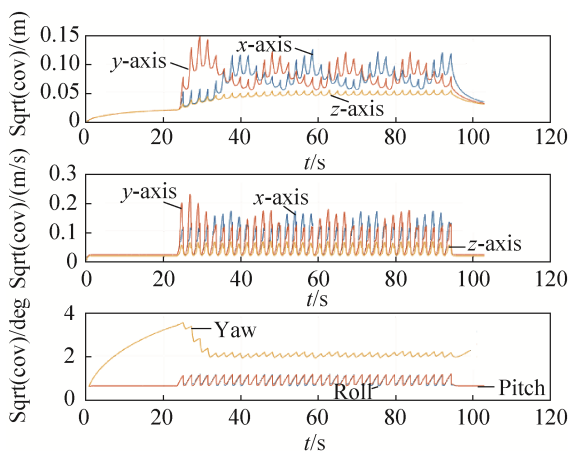


图 6 纯 SINS 协方差图
Fig. 6 Covariance of pure SINS

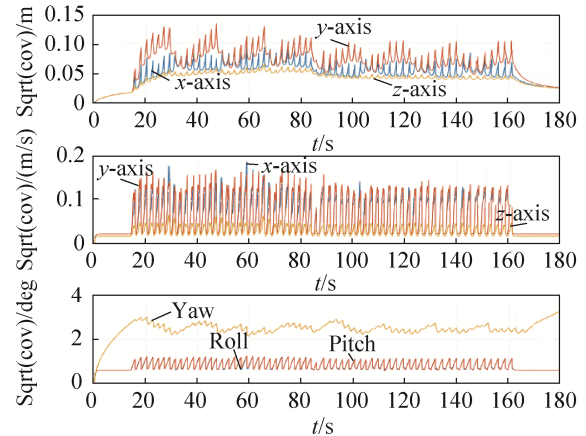


图 7 UWB+SINS 协方差图
Fig. 7 Covariance of UWB+SINS

6 结论

该行人导航方法采用 UWB 与 SINS 松组合的方式, 通过 EKF 进行数据融合。利用 UWB 准确的位置信息辅助修正 SINS 方法的累积误差, 其定位精度要优于采用纯 SINS 的行人导航, 且在 UWB 信号被遮挡的情况, 也可进行自主导航。通过实验得出, 该方法的定位精度达到 0.150 m, 误差为总路程的 0.50%, 相比纯 SINS 方法误差为 2.93%, 误差减小了 2.43%。该方法不仅修正了 SINS 的累积误差, 同时避免了 UWB 信号遮挡时精度急速下降的缺点, 且具有良好的导航精度。

参考文献:

- [1] Foxlin E. Pedestrian Tracking with Shoe-Mounted Inertial Sensors[J]. IEEE Computer Graphics and Applications (S0272-1716), 2005, 25(6): 38-46.
- [2] Benini A, Mancini A, Longhi S. An IMU/UWB/Vision-based Extended Kalman Filter for Mini-UAV Localization in Indoor Environment using 802.15.4a Wireless Sensor Network[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems (S0921-0296), 2013, 70(1/4): 461-476.
- [3] 郁嘉宇, 赵忠, 李凡, 等. 基于 MEMS/UWB 组合的室内定位方法[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(6): 77-85. Yu Jiayu, Zhao Zhong, Li Fan, et al. Indoor positioning method based on MEMS/UWB combination[J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(6): 77-85.
- [4] 曾庆化, 王敬贤, 孟骞, 等. 基于 UWB 优化配置的室内行人导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(2):

- 186-191.
Zeng Qinghua, Wang Jingxian, Meng Qian, et al. Indoor pedestrian navigation method based on optimal allocation of UWB[J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2017, 25(2): 186-191.
- [5] 孙璧文, 樊启高, 武亚恒, 等. 基于 PDR/UWB 紧耦合的足绑式行人导航技术[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(3): 43-47, 50.
Sun Biwen, Fan Qigao, Wu Yaheng, et al. Foot-mounted pedestrian navigation technology based on tightly coupled PDR/UWB[J]. Sensors and Microsystems, 2017, 36(3): 43-47, 50.
- [6] Chen Pengzhan, Kuang Ye, Chen Xiaoyue. UWB/Improved PDR Integration Algorithm Applied to Dynamic Indoor Positioning for Pedestrians[J]. Sensors (S1424-8220), 2017, 17(9): 2065-2065.
- [7] 苏中, 李擎, 李旷振, 等. 惯性技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
Su Zhong, Li Qing, Li Kuangzhen, et al. Inertial Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011.
- [8] 李超, 苏中, 朱嘉林. 可穿戴式自主定位技术的零速触发算法研究[J]. 传感技术学报, 2014, 27(5): 627-632.
Li Chao, Su zhong, Zhu Jialin. A Research about Zero Velocity Trigger Algorithm Used in the Wearable Autonomous Positioning Technology[J]. Journal of Sensing Technology, 2014, 27(5): 627-632.
- [9] 汪天生, 李擎. 改进的零速修正算法在行人自主导航中的应用[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(11): 336-343.
Wang Tiansheng, Li Qing. Application of Improved ZUPT in Pedestrian Self-Navigation[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(11): 336-343.
- [10] 谷志丹, 李擎, 赵辉. 行人自主导航定位的多级滤波方法[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(12): 235-239, 245.
Gu zhidan, Li Qing, Zhao Hui. Multi-stage Filtering Method for Pedestrian Navigation and Location[J]. Journal of system simulation, 2018, 30(12): 235-239, 245.
- [11] 秦永元, 张洪钺, 王叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012.
Qin Yongyuan, Zhang Hongyue, Wang Shuhua. Kalman filtering and combined navigation principle[M]. Xi'an: Northwest Polytechnical University Press, 2012.