

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417001

# 一种抗差估计的 GNSS/UWB/IMU 集成式室内外无缝定位方法<sup>\*</sup>

陈帅印<sup>1,2</sup> 刘 宁<sup>1,2</sup> 胡可君<sup>1,2</sup>

(1. 北京信息科技大学自动化学院 北京 100192; 2. 北京信息科技大学高动态导航技术北京市重点实验室 北京 100192)

**摘 要:** 针对单导航源定位系统在室内外场景切换时存在定位精度低和连续性差的问题,提出了一种抗差估计的 GNSS/UWB/IMU 集成式室内外无缝导航定位方法。在面对室内外复杂场景切换的情况下,采用抗差估计算法对 GNSS 与 UWB 的观测信号进行置信度评估和融合,并将融合的数据与惯导系统数据相结合,利用扩展卡尔曼滤波算法实现定位。为了评估算法在干扰和噪声下的导航定位精度,将惯导定位模块、卫星定位模块以及超宽带标签集成到一起进行实验。实验结果表明,所提融合定位方法的东向、北向定位均方根误差分别为 6.95 cm 和 6.89 cm,最大定位误差为 28.55 cm;在室内外过渡阶段,系统能够保持连续准确的定位,提高了复杂多变的室内外环境下的导航定位精度和稳定性。

**关键词:** 多源融合;抗差估计;室内外无缝定位;扩展卡尔曼滤波

**中图分类号:** TN967.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.10

## GNSS/UWB/IMU integrated indoor and outdoor seamless positioning method with robustness estimation

Chen Shuaiyin<sup>1,2</sup> Liu Ning<sup>1,2</sup> Hu Kejun<sup>1,2</sup>

(1. School of Automation, Beijing Information Science &amp; Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing Information Science &amp; Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of low positioning accuracy and poor continuity in the single navigation source positioning system in indoor and outdoor seamless positioning, a GNSS/UWB/IMU integrated indoor and outdoor seamless navigation and positioning algorithm based on robust estimation was proposed. In the face of complex indoor and outdoor scene switching, the robustness estimation algorithm is used to evaluate the confidence level of the two observation signals collected by GNSS and UWB and fuse them, and the fused data is used as the new observation value, and the extended Kalman filter algorithm is used to fuse the new observation value with the data of the inertial system to achieve fusion positioning. In order to evaluate the navigation and positioning accuracy of the algorithm in the presence of interference and noise, the inertial navigation positioning module, the satellite positioning module and the ultra-wideband tag were integrated together and field tests were carried out. Experiments show that the root mean square error of the proposed fusion positioning method is 6.40 cm in the east direction and 6.73 cm in the north direction, and the maximum error is not more than 28.55 cm.

**Keywords:** multi-source fusion; robustness estimation; seamless positioning indoors and outdoors; extended Kalman filtering

## 0 引 言

导航与位置服务攸关国家安全、经济发展和社会民生,

高精度、高可靠的室内外无缝定位已成为国防、经济、社会发展的迫切需要。目前大多数系统都是在特定、单一的环境下运行,数字互联社会无处不在的技术为复杂的导航和

收稿日期:2024-09-27

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金面上项目(62471048)、装发教育部联合基金青年项目(8091B03032311)、北京市自然科学基金面上项目(4212003)资助

定位服务开辟了道路<sup>[1]</sup>。目前,定位用到的系统以及传感器主要包括卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)、惯性导航系统(inertial navigation system, INS)、超宽带无线电定位系统(ultra wide band, UWB)<sup>[2]</sup>、激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)<sup>[3]</sup>、无线局域网(wireless local area network, WLAN)定位系统、5 G 定位<sup>[4]</sup>、视觉<sup>[5]</sup>等,由于各种定位技术的局限性,仅仅采用单一的定位方法难以满足应用需求。在环境切换时,定位精度急剧下降,无法保证定位的准确性和连续性。

在室内外无缝导航领域,研究人员提出了多种不同的导航方案,使用多种不同的传感器融合导航,以应对各种复杂的环境挑战。文献[6]提出了面向城市和室内环境的多传感器集成导航系统,将惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)、GPS 以及 LiDAR 紧密集成并融合导航,但需要将各个传感器进行校准,算法复杂度高;文献[7]提出了结合 GNSS 和 WLAN 技术的无缝定位方法,根据环境中的信号条件在 GNSS 和 WLAN 定位之间切换,但定位精度不高;文献[8]提出了 GNSS 和 5 G 融合定位技术,但在室内环境中 5 G 信号不稳定,定位误差偏大;文献[9]提出了全球导航卫星定位/视觉/惯性/激光雷达紧耦合融合算法,解决了大模型场景中遇到的误差累积问题,但算法复杂度高,对处理器要求高,不易实现。

目前,常使用 GNSS/UWB/IMU 方案来解决室内外导航问题,同时提出了很多先进的定位方案,如多交互模型、粒子滤波、联邦卡尔曼滤波以及容积卡尔曼滤波等算法,在理论上具有一定的优势,但在实际应用中,往往因过于复杂而难以满足需求。文献[10-11]提出了基于交互多模型的因子图组合导航方法,但由于需要同时维护多个模型,计算资源消耗较高,影响实时性;文献[12-15]采用联邦卡尔曼滤波融合算法解决了多传感器组合定位问题,然而计算难度大且对异常值的处理不够鲁棒,导致融合结果受到影响;文献[16-17]提出了基于粒子滤波的多源弹性导航定位方法,实现多源传感器的弹性融合与定,但其性能高度依赖参数设置,参数选择不当导致效果不佳;文献[18-20]使用容积卡尔曼实现多个传感器融合定位,但需要处理高维状态空间和协方差矩阵,计算量大,导致实时性能下降。

在室内外无缝导航环境中,为了探究在嵌入式设备的基础上如何实现室内外无缝切换的高精度导航定位,由于单片机的处理能力有限,无法执行复杂算法和处理大量数据,因此需要避免过于复杂的算法以确保实时性。文献[21]设计了基于 GPS/UWB 的无缝导航定位,通过 GNSS 和 UWB 信号强度评估传感器信任度,但在 GNSS 或 UWB 暂时丢失或者弱化的情况下,缺乏 IMU 的辅助,导致短时间内定位精度下降;文献[22]提出了一种多源融合室内外无缝定位方法,对气压计、UWB、惯性导航系统以及 GNSS 等多个传感器融合定位,提出了多源置信度的滑动窗权重计算方

法,但状态向量和测量向量的噪声协方差矩阵维数过高,只能在 MATLAB 仿真进行。因此,本文提出了一种基于抗差估计的 GNSS/UWB/IMU 集成式室内外无缝导航系统,旨在嵌入式系统中实现室内外高精度导航。首先,将介绍定位平台的整体架构;然后,基于抗差估计策略对 GNSS 和 UWB 观测数据进行置信度评估,以最大限度地利用这两种传感器的定位信息。最后,将 GNSS 和 UWB 融合得到的导航解与 IMU 数据结合,利用扩展卡尔曼滤波实现室内外环境下连续可靠的无缝定位。

## 1 模型与方法

### 1.1 系统设计

室内外定位系统的性能高度依赖复杂多变的定位环境。从无遮挡的室外环境到相对封闭的室内空间,再到两者交界的过渡区域,单一的定位传感器很难提供持续稳定的高精度定位。为此,本文提出了一种基于抗差估计的 GNSS/UWB/IMU 集成式室内外无缝定位系统。如图 1 所示,该系统根据不同的工作场景采用相应的差异化导航策略,通过自动检测传感器数据实现智能切换定位模式,从而确保在各种环境下都能提供可靠的定位服务。同时系统利用无线通信技术实现车载平台(UWB 标签、惯性模块和 RTK 基站)和电脑端的实时信息共享,进一步增强了定位系统的协同性和覆盖能力,为复杂多变的室内外场景提供持续精准的导航定位支持。

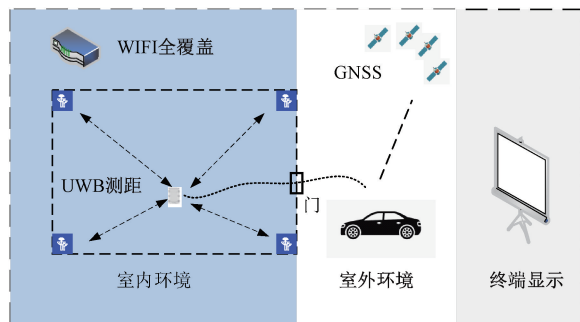


图 1 室内外定位系统框架

Fig. 1 Indoor and outdoor positioning system frames

### 1.2 算法框架

在复杂的室内外导航环境中,GNSS 或 UWB 会出现信号暂时丢失的情况。针对这一问题,如图 2 所示,本文首先计算各传感器的独立抗差定位解,通过 IGG III 权函数分析各传感器的权重,根据抗差估计的原理得到新的观测值融合导航解。随后,将新的观测值融合导航解与 IMU 数据结合,利用扩展卡尔曼滤波算法计算最终的组合导航融合解。本文采用抗差滤波策略,有效抑制粗差和动力学模型预测值的异常扰动对最终融合导航解的影响。通过充分利用各传感器的优势,室内外集成式系统能够在复杂多变的环境中提供持续稳定的高精度导航定位服务。

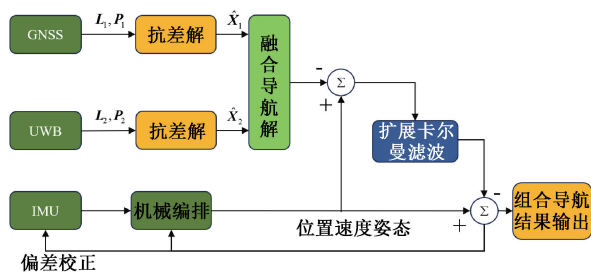


图 2 算法框架

Fig. 2 Algorithmic framework

### 1.3 系统状态方程与量测方程

本文选取东北天坐标系作为惯导系统的导航坐标系。根据惯性导航机械编排得到系统的姿态、速度、位置误差方程分别为：

$$\dot{\boldsymbol{\varphi}}^n = \boldsymbol{\varphi}^n \times \boldsymbol{\omega}_{in}^n + \delta\boldsymbol{\omega}_{in}^n - \mathbf{C}_b^n \boldsymbol{\varepsilon}^b \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \delta\dot{\mathbf{v}}^n &= \mathbf{f}_{sf}^n \times \boldsymbol{\varphi}^n + \mathbf{v}^n \times (2\delta\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \delta\boldsymbol{\omega}_{en}^n) - \\ & (2\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) \times \delta\mathbf{v}^n + \mathbf{C}_b^n \nabla^b \end{aligned} \quad (2)$$

$$\delta\dot{\mathbf{p}}^n = \delta\mathbf{v}^n \quad (3)$$

其中,  $\boldsymbol{\varphi}^n = [\phi_E \ \phi_N \ \phi_U]^T$  表示导航系下的惯导失准角误差;  $\delta\mathbf{v}^n = [\delta v_E \ \delta v_N \ \delta v_U]^T$  表示导航系下的惯导速度误差;  $\delta\mathbf{p}^n = [\delta L \ \delta \lambda \ \delta h]^T$  表示导航系下的惯导位置误差;  $\boldsymbol{\omega}_{in}^n$  表示导航系旋转角速率,  $\delta\boldsymbol{\omega}_{in}^n$  表示导航系计算误差;  $\boldsymbol{\omega}_{ie}^n$  表示地球自转角速度,  $\boldsymbol{\omega}_{en}^n$  表示导航坐标系相对于地球坐标系的旋转角速度,  $\delta\boldsymbol{\omega}_{ie}^n$  和  $\delta\boldsymbol{\omega}_{en}^n$  分别表示地球自转角速度计算误差和导航系旋转计算误差;  $\boldsymbol{\varepsilon}^b = [\varepsilon_X^b \ \varepsilon_Y^b \ \varepsilon_Z^b]^T$  表示陀螺零偏;  $\nabla^b = [\nabla_X^b \ \nabla_Y^b \ \nabla_Z^b]^T$  表示加速度计常值零偏;  $\mathbf{f}_{sf}^n$  表示比力矢量在导航系下的投影;  $\mathbf{C}_b^n$  表示载体坐标系到导航坐标系的方向余弦矩阵。

状态方程和量测方程统一标准为：

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \mathbf{f}(\mathbf{X}_{k-1}, \mathbf{W}_{k-1}) \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \end{cases} \quad (4)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_k &= [\phi_E, \phi_N, \phi_U, \delta v_E, \delta v_N, \delta v_U, \delta L, \delta \lambda, \delta h, \\ & \varepsilon_X^b, \varepsilon_Y^b, \varepsilon_Z^b, \nabla_X^b, \nabla_Y^b, \nabla_Z^b]^T \end{aligned} \quad (5)$$

其中, 式(4)和(5)中  $\mathbf{X}_k$  表示系统状态向量,  $\mathbf{f}(\cdot)$  表示非线性状态方程,  $\mathbf{W}_{k-1}$  表示系统过程噪声向量,  $\mathbf{Z}_k$  表示量测向量,  $\mathbf{H}_k$  表示量测矩阵,  $\mathbf{V}_k$  表示量测噪声向量。

系统过程噪声向量和量测噪声向量满足：

$$\begin{cases} E(\mathbf{W}_k) = 0, E(\mathbf{W}_k \mathbf{W}_j^T) = \mathbf{Q}_k \delta_{kj} \\ E(\mathbf{V}_k) = 0, E(\mathbf{V}_k \mathbf{V}_j^T) = \mathbf{R}_k \delta_{kj} \\ E(\mathbf{W}_k \mathbf{V}_j^T) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{Q}_k$  表示系统噪声协方差矩阵,  $\mathbf{R}_k$  表示量测噪声协方差,  $\delta_{kj}$  为 Kronecher  $\delta$  函数。

将 GNSS 和 UWB 系统提供的高精度位置信息作为参考基准, 可以计算出 INS 的位置解算误差。通过对比 INS

的位置输出与 GNSS/UWB 的参考位置, 建立 INS/GNSS 和 INS/UWB 组合导航系统的量测方程：

$$\mathbf{Z}_{1,k} = [\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_G] = [\mathbf{O}_{3 \times 3} \ \mathbf{I}_{3 \times 3} \ \mathbf{O}_{3 \times 9}] \mathbf{X}_k + \mathbf{e}_{1,k} \quad (7)$$

$$\mathbf{Z}_{2,k} = [\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_U] = [\mathbf{O}_{3 \times 3} \ \mathbf{I}_{3 \times 3} \ \mathbf{O}_{3 \times 9}] \mathbf{X}_k + \mathbf{e}_{2,k} \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{P}_1$  为 INS 解算的位置;  $\mathbf{P}_G$  和  $\mathbf{P}_U$  分别为 GNSS 和 UWB 输出的位置;  $\mathbf{O}$  表示零矩阵,  $\mathbf{I}$  表示单位矩阵;  $\mathbf{e}_{1,k}$  和  $\mathbf{e}_{2,k}$  分别为 GNSS 和 UWB 的量测噪声, 通常假设其为零均值高斯白噪声。

## 2 抗差估计的融合算法

在复杂的室内外环境中, UWB 观测和 GNSS 观测可能会受到多种干扰, 其中包括多径传播、环境干扰和系统噪声等。这些因素会导致观测结果产生异常或失真, 影响定位、导航和测量的准确性和可靠性。

基于此, 本文将抗差估计的思想引入室内外无缝定位系统中, 使用等价权原理检测 GNSS 和 UWB 中的观测信息, 根据观测值将权重划分为保全区(保持原观测值不变)、降权区(对观测值做抗差限制)和拒绝区(权为 0)<sup>[23]</sup>。

### 2.1 多传感器观测信息的抗差估计

系统的观测误差方程为<sup>[24]</sup>：

$$\mathbf{V}_{i,k} = \mathbf{H}_{i,k} \mathbf{X}_k - \mathbf{Z}_{i,k} \quad (9)$$

其中,  $i = 1, 2$ 。当  $i = 1$  时, 将 GNSS 作为观测信息; 当  $i = 2$  时, 将 UWB 作为观测信息。

为了抑制传感器量测向量  $\mathbf{Z}_{i,k}$  中各分量异常误差的影响, 引入极值条件：

$$\sum_{j=1}^2 (\mathbf{B}_{i,k})_j \rho(\mathbf{V}_{i,k})_j = \min \quad (10)$$

其中,  $\mathbf{B}_{i,k}$  为  $\mathbf{Z}_{i,k}$  的先验权函数;  $(\mathbf{B}_{i,k})_j$  为  $\mathbf{B}_{i,k}$  的第  $j$  个对角线元素;  $\rho$  为严凸非减函数;  $(\mathbf{V}_{i,k})_j$  为  $\mathbf{Z}_{i,k}$  的第  $j$  个残差分量。

求得各个传感器单独抗差解为：

$$\hat{\mathbf{Z}}_{i,k} = (\mathbf{H}_{i,k} \bar{\mathbf{B}}_{i,k} \mathbf{H}_{i,k}^T)^{-1} \mathbf{Z}_{i,k} \bar{\mathbf{B}}_{i,k} \mathbf{H}_{i,k}^T \quad (11)$$

其中,  $\bar{\mathbf{B}}_{i,k}$  为等价权矩阵,  $\hat{\mathbf{Z}}_{i,k}$  为各个传感器单独抗差解。

根据 IGG III 权函数的基本思想, 构建如式(12)所示的等价权函数。

$$b_{i,k} = \begin{cases} 1, & |\tilde{\mathbf{V}}_{i,k}| < c_0 \\ \frac{c_0}{|\tilde{\mathbf{V}}_{i,k}|} \left( \frac{c_1 - |\tilde{\mathbf{V}}_{i,k}|}{c_1 - c_0} \right)^2, & c_0 \leq |\tilde{\mathbf{V}}_{i,k}| < c_1 \\ 0, & |\tilde{\mathbf{V}}_{i,k}| \geq c_1 \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $|\tilde{\mathbf{v}}_{i,k}|$  为  $\mathbf{v}_{i,k}$  的标准化残差的绝对值;  $c_0$  的取值范围一般为  $1.5 \sim 2.0$ ;  $c_1$  的取值范围一般为  $3.0 \sim 8.0$ 。

通过加权平均得到观测值融合解  $\hat{\mathbf{Z}}_k$ :

$$\hat{\mathbf{Z}}_k = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^2 \bar{\mathbf{B}}_{i,k} \hat{\mathbf{Z}}_{i,k}}{\sum_{i=1}^2 b_{i,k}}, & \sum_{i=1}^2 b_{i,k} \neq 0 \\ 0, & \sum_{i=1}^2 b_{i,k} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

根据等价权函数  $b_{i,k}$  的值判断两个观测值的信任度。当  $1 \geq b_{1,k} > \eta$  或  $1 \geq b_{2,k} > \eta$  时, 其中  $\eta$  为信任度阈值, 则两个传感器的观测值至少有一个是可信的, 令  $r_k = \max(b_{i,k})$ ; 当  $0 \leq b_{1,k} \leq \eta$  且  $0 \leq b_{2,k} < \eta$  时, 则两个传感器的观测值都不可信, 令  $r_k = \min(b_{i,k})$ 。

系统观测噪声的协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_k = \begin{cases} \text{diag}\left(\frac{1}{r_k} \quad \frac{1}{r_k} \quad \frac{1}{r_k}\right), & r_k \neq 0 \\ \text{diag}(\infty \quad \infty \quad \infty), & r_k = 0 \end{cases} \quad (14)$$

## 2.2 多传感器抗差估计的融合算法

### 1) 滤波初始化

$$\hat{\mathbf{X}}_0 = E[\mathbf{X}_0] \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_0 = E[(\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_0)(\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_0)^T] \quad (16)$$

其中,  $\mathbf{X}_0$  为系统状态初值;  $\hat{\mathbf{X}}_0$  为系统状态初值的估计值;  $\mathbf{P}_0$  为误差协方差矩阵的初值。

2) 利用上一时刻的后验估计值得到当前时刻先验估计值。

$$\bar{\mathbf{X}}_k = \mathbf{A}_{k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \mathbf{W}_{k-1} \quad (17)$$

其中,  $\bar{\mathbf{X}}_k$  为  $k$  时刻的先验估计值,  $\mathbf{A}_{k-1}$  为  $k-1$  时刻的状态预测函数的雅克比矩阵,  $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$  为  $k-1$  时刻的后验估计值。

3) 采用抗差估计融合算法从 UWB 信号和卫星信号中提取有效信息, 并将其融合。

$$\hat{\mathbf{Z}}_k = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^2 \bar{\mathbf{B}}_{i,k} (\mathbf{H}_{i,k} \bar{\mathbf{B}}_{i,k} \mathbf{H}_{i,k}^T)^{-1} \mathbf{Z}_{i,k} \bar{\mathbf{B}}_{i,k} \mathbf{H}_{i,k}^T}{\sum_{i=1}^2 b_{i,k}}, & \sum_{i=1}^2 b_{i,k} \neq 0 \\ 0, & \sum_{i=1}^2 b_{i,k} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

4) 使用上一时刻的后验估计协方差计算当前时刻的先验估计协方差。

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_k \quad (19)$$

其中,  $\mathbf{P}_k^-$  当前时刻  $k$  的先验估计协方差矩阵,  $\mathbf{P}_{k-1}$  为上一时刻  $k-1$  的后验估计协方差矩阵,  $\mathbf{A}_k$  是当前时刻  $k$  的状态预测函数的雅克比矩阵。

5) 利用先验估计协方差矩阵  $\mathbf{P}_k^-$  和测量矩阵  $\mathbf{H}_k$  以及观测噪声的协方差矩阵  $\mathbf{R}_k$  计算出卡尔曼增益矩阵  $\mathbf{K}_k$ 。

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (20)$$

6) 将卡尔曼滤波器的预测值和观测值按照卡尔曼增益的比例进行融合, 得到后验估计值, 同时求得后验估计协方差矩阵。

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \bar{\mathbf{X}}_k + \mathbf{K}_k (\hat{\mathbf{Z}}_k - \mathbf{H}_k \bar{\mathbf{X}}_k) \quad (21)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^- \quad (22)$$

其中,  $\hat{\mathbf{X}}_k$  为后验状态估计值,  $\mathbf{P}_k$  为后验估计协方差矩阵。

## 3 实验验证与分析

### 3.1 实验条件

为了评估本文所提出的室内外无缝定位系统的可行性, 如图 3 所示, 在大学校园内进行实验, 实验场景分为室内和室外。



图 3 实验环境

Fig. 3 Experimental environment

实验设备主要包括 RTK 基站模块、UWB 基站和车载定位平台, 其中车载定位平台如图 4 所示 (包括 MEMS-IMU 模块、GNSS-RTK 模块和 WIFI 模块)。

车载定位平台采集并记录卫星信号、UWB 信号以及惯性导航信号等数据, 通过 WIFI 通信模块, 将这些原始数据传输至计算机端的上位机系统进行显示和处理。

MEMS-IMU 的性能参数如表 1 所示。

### 3.2 无缝导航定位实验

在图 3 所示的室内部署 4 个 UWB 基站, 将 RTK 基站放置在空旷的室外。车载定位平台随实验小车一起移动, 从室外出发环绕一圈后进入室内, 在室内测试卫星信号完



全失锁情况下的定位情况,然后控制实验小车从室内行驶到室外。整体测试路线为从室外到室内再到室外。定位轨迹如图 5 所示。

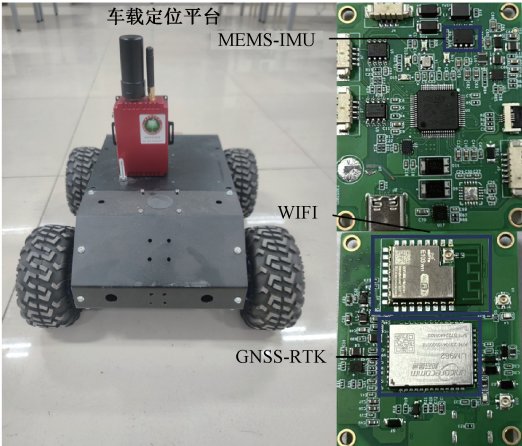


图 4 车载定位平台

Fig. 4 Vehicle positioning platform

表 1 MEMS-IMU 性能参数

Table 1 MEMS-IMU performance parameters

指标	加速度计	陀螺仪
	(x-, y-, z-轴)	(x-, y-, z-轴)
量程	± 18g	± 500(°)/s
零偏稳定性	0.5mg	5(°)/h
随机游走	0.2m/s/√h	2(°)/√h
输出噪声强度	0.5mg/√Hz	0.05(°)/s/√Hz

3) 在实验小车从室内移动至室外环境的过程中, UWB 标签由于无法接收到基站信号,精度会陡然下降,但是此时卫星模块收集到的卫星数不多,卫星数据也不一定很准确,单一地使用 UWB 或卫星信号不能很好地跟踪实际轨迹,出现了严重的轨迹发散现象。

针对上述问题,利用本文方法进行仿真分析,在仿真实现之前,需要确定一些关键的初始参数,其中信任度阈值  $\eta = 0.5$ 。对 IMU 和 RTK 的性能参数进行分析,设置初始参数值为:

$$P_0 = \begin{bmatrix} 10^{-4} \times I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & 10^{-6} \times I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & 10^{-18} \times I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & 10^{-3} \times I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & 10^{-2} \times I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$Q_0 = \begin{bmatrix} 10^{-1} \times I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 9} \\ O_{3 \times 3} & 10^{-4} \times I_{3 \times 3} & O_{3 \times 9} \\ O_{9 \times 3} & O_{9 \times 3} & O_{9 \times 9} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$R_0 = \begin{bmatrix} 2.8 \times 10^{-16} & 0 & 0 \\ 0 & 2.8 \times 10^{-16} & 0 \\ 0 & 0 & 2.8 \times 10^{-16} \end{bmatrix} \quad (25)$$

其中,  $P_0$  为初始状态误差协方差,  $Q_0$  为初始系统过程噪声协方差,  $R_0$  为初始量测噪声协方差。

通过对实验采集到的 UWB 信号、卫星信号等观测数据,以及融合算法解算出的估计结果进行综合分析,可以更准确地评估各类观测信号的可信度。根据 IGG Ⅲ 权函数 ( $c_0=2.0, c_1=8.0$ ) 评估出观测值的等价权重值,如图 6 所示。

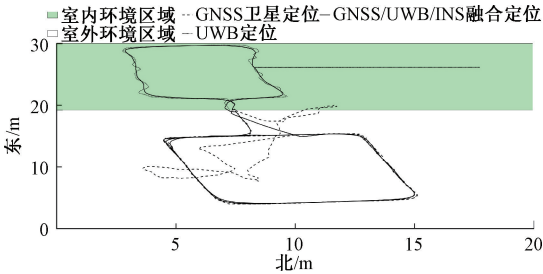


图 5 定位轨迹

Fig. 5 Locate the track

由图 5 可以发现,单一的传感器在室内外无缝导航中会出现如下问题:

1) 当 UWB 定位系统的标签与基站之间存在障碍物遮挡时,会产生多径效应,这种多径干扰造成部分测量数据出现严重偏差。由于这些异常数据的存在,最终生成的导航轨迹会出现一些畸形,从而影响整个导航系统性能。

2) 实验小车由室外移动到室内的过程中,卫星信号会慢慢衰减,导致卫星定位精度下降,但此时实验小车没有完全进入室内,还未接收到 UWB 信号,使得室内外交界处的导航轨迹出现比较大的误差。

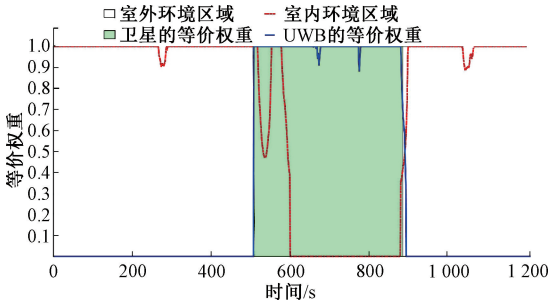


图 6 GNSS 与 UWB 的等价权重

Fig. 6 Equivalent weighting of GNSS to UWB

由图 5 和图 6 可以看出,当实验小车进入室内环境时, RTK 定位系统依然能够保持较高的定位精度,一直维持到小车进入 UWB 信号良好的区域。在这个过渡阶段,卫星定位精度才开始逐步下降;当实验小车离开室内环境时, UWB 信号逐渐消失,GNSS 定位从单点定位模式逐步过渡到高精度的 RTK 定位。融合导航算法能实现连续平稳顺滑并且准确的定位,轨迹曲线平滑无跳点。无论是从室外到室内还是从室内到室外,当其中一个传感器完全不能信任时,系统依然能提供高精度定位。

图 7(a)、(b)展示了系统东向和北向的定位误差,表 2 给出位置误差的统计结果。

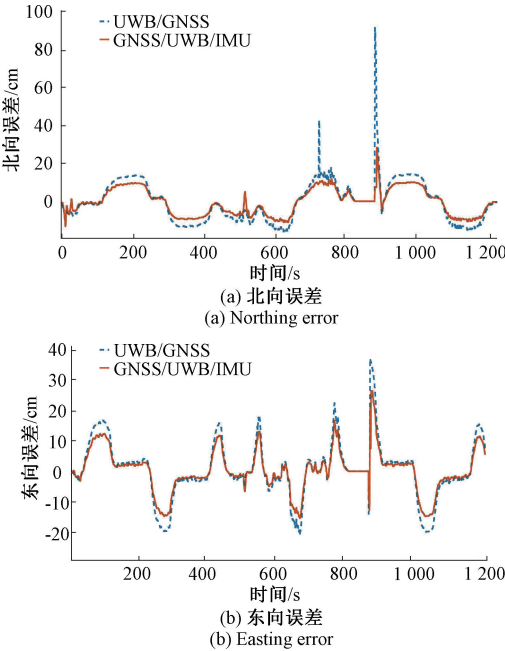


图 7 东向和北向定位误差  
Fig. 7 East and north positioning errors

表 2 位置误差统计

Table 2 Position error statistics

指标	方向	最大值/cm	均方根误差/cm
UWB/GNSS	E	35.42	9.36
	N	91.06	10.97
GNSS/UWB/IMU	E	28.55	6.95
	N	27.65	6.89

由图 7(a)、(b)以及表 2 可以看出,单一的导航信息源容易受到外界环境干扰,从而产生比较大的噪声,尤其是单一的传感器不能适用于复杂环境,无论是在室内、室外还是室内外交接区域,本文系统的东向和北向位置误差均处于可接受的范围之内,表明该导航系统实现了室内外无缝定位。UWB/GNSS 导航方式主要依赖于单纯判断传感器信号强度来决定导航模式的切换,这种方式缺乏对外界干扰的良好适应能力。在受到干扰影响时,该系统的东向定位误差高达 91.06 cm,显示出了较大的定位误差,这是由于系统无法有效地判断信号是否受到了干扰,导致整体定位性能受到严重影响;本文提出的 GNSS/UWB/IMU 融合定位算法具有很强的自适应能力,能灵活应对各种环境噪声的变化,通过动态调整算法参数、融合权重等方式,提高了整个系统的鲁棒性,定位结果在室内外交接区域实现平稳过渡,确保定位性能的持续稳定。本文算法的东向和北向定位均方根误差分别为 6.95 cm 和 6.89 cm,东向和北向最大定位误差分别为 28.55 cm 和 27.65 cm,本算法的东

向和北向的精度相对于 UWB/GNSS 导航方式分别提升 25.7%和 37.1%,其性能明显优于 UWB-GNSS 组合导航。

4 结 论

本文研究并实现了一种 GNSS/UWB/IMU 集成式室内外无缝定位系统,将卫星、UWB 和惯性系统整合到车载导航模块中,实现了定位系统的小型化和模块化。通过集中处理各传感器采集的数据,采用抗差估计和扩展卡尔曼滤波方法进行位置估计和跟踪。这种集成方案能够在不同环境下提供连续、准确的定位服务。抗差估计方法对 UWB 和 IMU 测量进行处理,有效抵抗噪声和异常值的干扰,从而提高定位的鲁棒性和准确性。

参考文献

[1] MALLIK M, PANJA A K, CHOWDHURY C. Paving the way with machine learning for seamless indoor outdoor positioning: A survey[J]. Information Fusion, 2023, 94: 126-151.

[2] 卜伟雄,朱蕴璞,何子路. 基于交互式多模型的 UWB 定位算法及实验研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(4): 22-26.

BU W X, ZHU Y P, HE Z L. UWB positioning algorithm and experimental research based on interactive multi-model [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(4): 22-26.

[3] HU Y, LI X, KONG D, et al. An enhanced-LiDAR/UWB/INS integrated positioning methodology for unmanned ground vehicle in sparse environments[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20 (7): 1-12.

[4] LIU Q, GAO CH F, XHAF A, et al. Performance analysis of GNSS + 5G hybrid positioning algorithms for smartphones in urban environments [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-9.

[5] 多靖赞,赵龙,赵毅琳,等. 动态特征剔除的无人系统视觉/惯性导航方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37 (12): 126-135.

DUO J Y, ZHAO L, ZHAO Y L, et al. Visual/inertial navigation method for unmanned system with dynamic feature removal [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (12): 126-135.

[6] GAO Y B, LIU SH F, ATIA M M, et al. INS/GPS/LiDAR integrated navigation system for urban and indoor environments using hybrid scan matching algorithm[J]. Sensors, 2015, 15(9): 23286-23302.

[7] SUN Y L, SHANG J, YANG Y. Indoor and outdoor seamless localization method based on GNSS and WLAN[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2020, 516: 1412-1419.

- [8] CAMPOLO F, BLAGA A, REA M, et al. 5GNSS: Fusion of 5G-NR and GNSS localization for enhanced positioning accuracy and reliability [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(9): 1-12.
- [9] 廖健驰, 李星星, 冯绍权. GVIL: 基于图优化的 GNSS PPP/视觉/惯性/激光雷达紧组合算法[J]. 武汉大学学报, 2023, 48(7): 1204-1215.  
LIAO J CH, LI X X, FENG SH Q. GVIL: GNSS PPP/vision/inertial/LiDAR tight combination algorithm based on graph optimization [J]. Geomatics of Wuhan University, 2023, 48(7): 1204-1215.
- [10] 李旭, 孔鑫, 刘锡祥. 基于交互多模型距离平滑的 UWB/IMU 因子图组合导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2022, 30(3): 322-327.  
LI X, KONG X, LIU X X. UWB/IMU factor map combined navigation method based on interactive multi-model distance smoothing [J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2022, 30(3): 322-327.
- [11] 曾庆化, 王守一, 李方东, 等. 基于交互式多模型因子图的自适应组合导航算法[J]. 中国惯性技术学报, 2024, 32(4): 346-353.  
ZENG Q H, WANG SH Y, LI F D, et al. Adaptive integrated navigation algorithm based on interactive multi-model factor map[J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2024, 32(4): 346-353.
- [12] YAO L H, LI M, XU T H, et al. GNSS/UWB/INS indoor and outdoor seamless positioning algorithm based on federal filtering[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(1): 015135.
- [13] 朱璐瑛, 孙炜玮, 刘成铭, 等. 多传感器组合导航系统的联邦 UKF 算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7): 91-98.  
ZHU L Y, SUN W W, LIU CH M, et al. Research on federal UKF algorithm for multi-sensor integrated navigation system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(7): 91-98.
- [14] 马伟, 李沅, 康健, 等. 基于联邦滤波的偏振光/SINS/BDS/地磁组合导航算法[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(2): 136-139.  
MA W, LI Y, KANG J, et al. Polarized light/SINS/BDS/geomagnetic integrated navigation algorithm based on federated filter [J]. Sensors and Microsystems, 2022, 41(2): 136-139.
- [15] ZHAO L L, GUO X CH, ZHU B. Two-stage weighted filtering algorithm for seamless positioning in indoor-outdoor crossover areas [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(18): 21718-21727.
- [16] FANG G W, SHENG CH ZH, YU B G, et al. An indoor and outdoor multi-source elastic fusion navigation and positioning algorithm based on particle filters[J]. Future Internet, 2022, 14(6): 169.
- [17] PIETRA V D, DABOVE P, PIRAS M. Loosely coupled GNSS and UWB with INS integration for indoor/outdoor pedestrian navigation [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(21): 6292.
- [18] 刘慧敏, 李国丽, 董翔, 等. 移动机器人室内外无缝切换定位方法研究[J]. 制造业自动化, 2022, 44(4): 83-88.  
LIU H M, LI G L, DONG X, et al. Research on indoor and outdoor seamless switching and positioning method for mobile robots [J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(4): 83-88.
- [19] GAO F, YAN K G, DUNA J H, et al. Research on outdoor AGV localization method based on adaptive square root cubature Kalman filter[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2023, 14274: 142-152.
- [20] ZHU K B; DENG CH B, ZHANG F, et al. A multi-source fusion navigation system to overcome GPS interruption of unmanned ground vehicles[J]. IEEE Access, 2023, 11: 1.
- [21] 连小勇, 王茂森, 戴劲松. 基于 GPS/UWB 技术的无缝定位平台设计[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(4): 203-207.  
LIAN X Y, WANG M S, DAI J S. Design of seamless positioning platform based on GPS/UWB technology [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(4): 203-207.
- [22] 姚子扬, 尚俊娜, 孙建强, 等. 一种多源融合室内外无缝定位方法[J]. 传感技术学报, 2022, 35(1): 72-83.  
YAO Z Y, SHANG J N, SUN J Q, et al. A multi-source fusion indoor and outdoor seamless positioning method[J]. Journal of Sensor Technology, 2022, 35(1): 72-83.
- [23] 张耀春. 基于 GNSS/INS 组合导航的抗欺骗干扰关键技术研究[D]. 战略支援部队信息工程大学, 2022.  
ZHANG Y CH. Research on key technologies of anti-spoofing interference based on GNSS/INS integrated navigation[D]. Information Engineering University of Strategic Support Force, 2022.
- [24] 罗诗琦, 陈瑞琼, 刘娅. 基于抗差估计的多 GNSS 共视基准站数据融合[J]. 电子测量技术, 2024, 47(11): 169-175.  
LUO SH Q, CHEN R Q, LIU Y. Multi-GNSS common view reference station data fusion based on robust estimation [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(11): 169-175.

## 作者简介

陈帅印, 硕士研究生, 主要研究方向为组合导航算法。

E-mail: 1738132980@qq.com

刘宁(通信作者), 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为动态导航、惯性导航、组合导航等。

E-mail: ning.liu@bistu.edu.cn