DOI:10.14075/j.jgg.2025.02.047 **文章编号**:1671-5942(2025)12-1240-06

UWB 与低成本 MEMS IMU 组合的室内定位方法研究

周志凌[1] 管栋良[1] 张清华[2] 孙海文[1] 周 磊[1] 夏逸旻[1]

1 南京工业大学测绘科学与技术学院,南京市浦珠南路 30 号,211816
2 南京师范大学地理科学学院,南京市文苑路 1 号,210023

摘 要:提出一种融合超宽带(UWB)与低成本微机电(MEMS)惯性测量单元(IMU)的组合定位方法。首先利用测距偏差校正与卡尔曼滤波对 UWB 测距数据进行优化,再通过 UWB/IMU 融合模型实现多源传感器优势互补。实验结果表明,优化后 UWB 的平均定位精度由 15.70 cm 提升至 13.75 cm,RMSE 由 22.45 cm 降至 19.70 cm。在非视距(NLOS)场景中,当 UWB 信号突变或丢失时,融合系统仍能提供连续可靠的位置信息,平均精度为 13.23 cm,RMSE 为 17.90 cm。

关键词:UWB;低成本 IMU;NLOS;组合导航;室内定位
中图分类号:P228 **文献标识码**:A

随着无线通信技术和移动终端的快速发展,室内定位服务已成为现代社会生产与生活中不可或缺的重要组成部分[1]。研究者提出了多种室内定位技术,如红外、蓝牙、Wi-Fi、超宽带(UWB)等。其中,红外穿透力弱,蓝牙覆盖有限,Wi-Fi 易受干扰,而 UWB 凭借高精度、远测距、低功耗和较强的抗干扰能力[2-3],在室内定位领域表现突出,被广泛应用于智能工厂、物流、仓储、车辆导航、机器人定位等场景。在视距条件下,UWB 可实现 cm 级精度[4];但在复杂环境中,非视距(NLOS)传播会显著降低 UWB 的定位精度[5],而现有的误差抑制方法效果有限[6-7]。

惯性测量单元(IMU)具有短期高精度、抗干扰强和自主性高等特点,可弥补 UWB 在复杂环境下的不足。二者融合后,IMU 可在短时间内提供高精度位姿信息,用于识别并修正 UWB 的测距误差,而 UWB 可实时校正 IMU 的累积漂移,从而得到高精度、稳健的定位结果。近年来,学者们在 UWB/IMU 融合定位方面开展了大量研究并取得了显著成果。刘韬等[8]提出基于差值量测和扩展卡尔曼滤波的 UWB/INS 组合定位方法,能有效抑制 NLOS 误差;Kwon 等[9]基于 UWB 与 MEMS IMU 实现高精度装配监测;Sui 等[10]通过动态 NLOS 识别与地图约束优化权重分配,提升了动态环境下的定位精度。

现有研究多采用成本较高的 IMU 设备,限制了 UWB 与 IMU 融合技术的普及应用。为此,本文探索低成本 MEMS IMU 与 UWB 的组合定位方法,通过静态标定修正 UWB 测距偏差、卡尔曼滤波平滑测距数据,并融合 IMU 信息,实现动态环境下的高精度、低成本室内定位,为室内导航技术的普及化提供一种可行方案。

1 UWB/MEMS IMU 组合算法

1.1 UWB 测距及定位原理

由于飞行时间(time of flight,TOF)算法计算量小,且基于 TOF 原理的算法便于与 INS、GNSS 等系统进行量测级别的融合,所以选择 TOF 算法来求解 UWB 标签的坐标。

1.1.1 UWB 测距原理

UWB 常用的测距协议包括单边双向测距、对称双边双向测距[11]和非对称双边双向测距(ADS-TWR)[12]。在双向测距(TWR)算法中,不同设备之间依赖各自独立运行的晶体振荡器生成时钟,从而有效避免了设备间时钟不同步带来的误差[13]。本文采用 DecaWave 公司生产的 DW1000

收稿日期:2025-02-23
项目来源:国家重点研发计划(2021FBY3901301);江苏省自然科学基金(BK20220366);江苏省自然资源厅科技创新项目(JSZRKJ202406)。
第一作者简介:周志凌,硕士生,主要研究方向为室内外融合定位,E-mail:zhouzhiling@njtech.edu.cn。
通讯作者:管栋良,博士,讲师,主要从事 GNSS-R 和室内外融合定位研究,E-mail:guan.dongliang@njtech.edu.cn。

模块作为 UWB 芯片,并使用 ADS-TWR 方法进行测距。该方法通过消除时钟频率不一致导致的误差,显著提升了测距精度。ADS-TWR 测距方法的原理如图 1 所示。

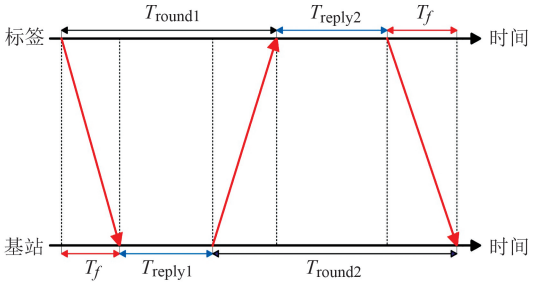


图 1　非对称双边双向测距方法原理图

Fig. 1　The schematic diagram of ADS-TWR

标签首先向基站发送一个轮询消息(PM)数据包,并记录发送该消息的时间。经过一段传播时间,基站接收到 PM 数据包并记录下接收的时间戳。随后,基站在经过设定的延迟处理后,将一个响应数据包返回给标签,同时标记发送时间。标签在收到响应消息时,记录下接收的时间戳,并将最初发送 PM 的时间和接收到响应消息的时间信息写入终止消息数据包。经过短暂的延迟,标签将此终止消息发送回基站,基站在接收到终止数据包后记录时间戳,从而完成整个距离测量流程。由此,可以计算出飞行时间:

$$T_f = \frac{T_{round1} \times T_{round2} - T_{reply1} \times T_{reply2}}{T_{round1} + T_{round2} + T_{reply1} + T_{reply2}} \tag{1}$$

式中,T_f 为飞行时间;T_{round1} 表示标签从发送 PM 数据包到接收到基站响应所经历的时间;T_{round2} 表示基站从发送终止数据包到接收到标签响应之间的时间间隔;T_{reply1} 表示基站的预设延迟处理时间;T_{reply2} 表示标签的预设延迟处理时间。则单标签与单基站之间的 TOF 距离测量公式为:

$$d = c \times T_f \tag{2}$$

式中,c 为电磁波传播速度(3×10^8 m/s)。ADS-TWR 方法的测距误差(error)理论上为:

$$\text{error} = T_f \times \left(1 - \frac{k_a + k_b}{2}\right) \tag{3}$$

式中,k_a 为基站的时钟偏移系数;k_b 为标签的时钟偏移系数。根据式(3)计算,当时钟偏移为 20×10^{-6}时,在 100 m 的距离处,理论上的测距误差仅为 2 mm。因此,该方法能够有效降低由设备间时钟偏差引起的误差。

1.1.2　UWB 测距偏差校正

由于 UWB 硬件设备的质量和应用环境的影响,UWB 测距信号中可能存在测距系统偏差。为提高 UWB 定位精度,必须对测距偏差进行校正。UWB 测距偏差校正包括 UWB 测距偏差标定和测距值校正。

在静态环境下,将每个标签基站在一定时间段内的测距平均值作为实际测距值。通过将该测距值与真实距离进行二次函数拟合,得到拟合函数 $f(x)$。依照该方法,对本文研究使用的 UWB 设备进行测距偏差标定,其实际测距值、参考测距值及拟合曲线如图 2 所示。公式(4)给出了相应的拟合函数。

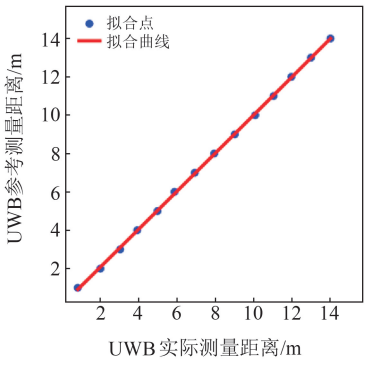


图 2　UWB 测距拟合曲线

Fig. 2　UWB ranging fitting curve

$$f(x) = 0.000\ 478\ 6x^2 + 0.985\ 2x + 0.105\ 6 \tag{4}$$

在 UWB 定位过程中,将实际测得的 UWB 测距值 d_{UWB}代入拟合函数 $f(x)$ 进行补偿,从而得到经过校正后的测距值 $\hat{d}_{UWB}$:

$$\hat{d}_{UWB} = f(d_{UWB}) \tag{5}$$

1.1.3　UWB 测距卡尔曼滤波优化

在实际应用中,UWB 测距会受到环境和硬件本身的影响,测量数据通常伴随着噪声。为了提高 UWB 测距精度,采用卡尔曼滤波算法对测距数据进行优化,以减少噪声影响[14]。卡尔曼滤波算法是一种递归算法,可在噪声存在的情况下对测量数据进行实时优化。卡尔曼滤波的优化过程主要分为时间更新和量测更新 2 个阶段,通过不断预测和修正测量值,逐步逼近真实值,从而提高 UWB 测距精度。

在时间更新阶段,基于系统模型对状态和协方差进行预测,以提供后续量测更新所需的先验信息。假设 k 时刻的真实状态是从 $k-1$ 时刻的状态演化而来,其状态方程为:

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1} = \boldsymbol{F}_k \hat{\boldsymbol{x}}_{k-1} \tag{6}$$

式中,$\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}$ 为 k 时刻的先验状态估计;$\boldsymbol{F}_k$ 为状态转移矩阵;$\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1}$ 为 $k-1$ 时刻的状态估计值。

$$\boldsymbol{P}_{k|k-1} = \boldsymbol{F}_k \boldsymbol{P}_{k-1|k-1} \boldsymbol{F}_k^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}_k \tag{7}$$

式中,$\boldsymbol{P}_{k|k-1}$ 为 k 时刻的先验协方差;$\boldsymbol{P}_{k-1|k-1}$ 为上一次更新后的协方差;$\boldsymbol{Q}_k$ 为过程噪声协方差,反映

系统模型的不确定性，本文中 $\boldsymbol{Q}_k$ 取值为 0.018。

在量测更新步骤中，卡尔曼增益决定了预测值与测量值之间的权重分配，如式(8)所示：

$$\boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{P}_{k|k-1}\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{P}_{k|k-1}\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}_k)^{-1} \tag{8}$$

式中，$\boldsymbol{K}_k$ 为卡尔曼增益；$\boldsymbol{H}_k$ 为测量矩阵；$\boldsymbol{R}_k$ 为测量噪声协方差，表示测量值的不确定性，本文中 $\boldsymbol{R}_k$ 取值为 0.542。根据当前时刻的观测值、预测值和卡尔曼增益，计算出当前时刻的状态估计值：

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k} = \hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1} + \boldsymbol{K}_k(\boldsymbol{z}_k - \boldsymbol{H}_k\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}) \tag{9}$$

式中，$\boldsymbol{z}_k$ 为当前时刻的 UWB 测距值。状态估计值的误差协方差矩阵通过预测步骤中计算得到的误差协方差矩阵和卡尔曼增益计算得到：

$$\boldsymbol{P}_{k|k} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H}_k)\boldsymbol{P}_{k|k-1} \tag{10}$$

式中，$\boldsymbol{P}_{k|k}$ 为当前时刻更新后的协方差；$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

1.2 UWB/IMU 组合导航

1.2.1 IMU 航迹推算(dead reckoning，DR)原理

DR 是一种在航海、航空、车辆导航等领域中广泛使用的技术，通过已知的初始位置和运动参数(如速度、方向)来预测物体的当前位置。式(11)给出了基于 IMU 的 DR 模型：

$$\begin{cases} p_{\mathrm{DR},x}^{k} = p_{\mathrm{DR},x}^{k-1} + v^{k-1}\cos(\theta^k)\Delta t^k \\ p_{\mathrm{DR},y}^{k} = p_{\mathrm{DR},y}^{k-1} + v^{k-1}\sin(\theta^k)\Delta t^k \\ v^k = (p_{\mathrm{DR}}^{k} - p_{\mathrm{DR}}^{k-1})/\Delta t^k \end{cases} \tag{11}$$

式中，p_{DR} 为利用 MEMS IMU 信息推算出的载体位置；v 为载体速度；θ 为 MEMS IMU 输出的航向角；Δt^k 为时刻 k 与 $k-1$ 的时间间隔。

1.2.2 UWB/IMU 组合导航策略

在组合导航过程中，以 UWB 定位结果与 IMU DR 定位结果之间的欧氏距离为参考，进行定位结果的选择。如果 UWB 定位结果与 IMU 推算结果之间的距离小于设定的阈值，则输出 UWB 定位结果；反之，则输出 IMU DR 结果。在 NLOS 条件下，若 UWB 无法提供有效定位信息，则输出 IMU DR 结果：

$$\begin{cases} p = p_{\mathrm{UWB}}, \ \| p_{\mathrm{UWB}} - p_{\mathrm{DR}} \| < D \\ p = p_{\mathrm{DR}}, \ \| p_{\mathrm{UWB}} - p_{\mathrm{DR}} \| \geqslant D \\ p = p_{\mathrm{DR}}, \ p_{\mathrm{UWB}} = \mathrm{None} \end{cases} \tag{12}$$

式中，p 为最终定位结果；p_{UWB} 为 UWB 定位结果；p_{DR} 为 IMU DR 定位结果；$\| p_{\mathrm{UWB}} - p_{\mathrm{DR}} \|$ 为 UWB 定位结果和 IMU DR 定位结果之间的欧氏距离；D 为阈值。

2 实验与结果分析

本文开展了一系列测试实验来验证卡尔曼滤波算法对 UWB 测距精度的提升及 UWB/IMU 组合导航算法的有效性。

2.1 实验准备

实验采用浩如科技公司研发的型号为 RTLS1-IGA01-EP 的 UWB 基站和型号为 RTLS1-ULM1-GP 的 UWB 标签，其芯片均为 DW1000。MEMS IMU 选用武汉元生创新科技有限公司研发的 YIS320，价格约 600 元，其性能稳定，适用于精密定位场景。

实验场地为南京工业大学风雨测量场。在风雨测量场最外侧的 4 根支柱上分别安装一个 UWB 基站，如图 3 所示，并用全站仪精确测量了 4 个 UWB 基站的坐标。

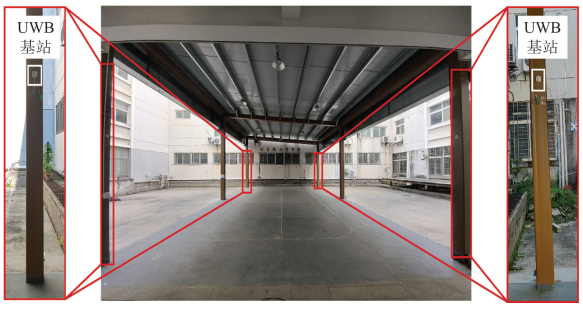


图 3 实验场地布设示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the layout of the experimental site

由于目前市场上没有成熟的集成 UWB 与 IMU 模块的室内定位设备，因此，分别将 UWB 标签与 MEMS IMU 传感器安装在实验小车上，以保证数据采集过程中的稳定性，如图 4 所示。测试期间，实验小车沿着预设的轨迹行进，对系统的定位性能进行全面测试。在实验过程中，UWB 和 MEMS IMU 传感器分别通过不同的串口读取数据，并按照时间顺序将其保存到同一数据文件中，从而实现数据的同步采集。

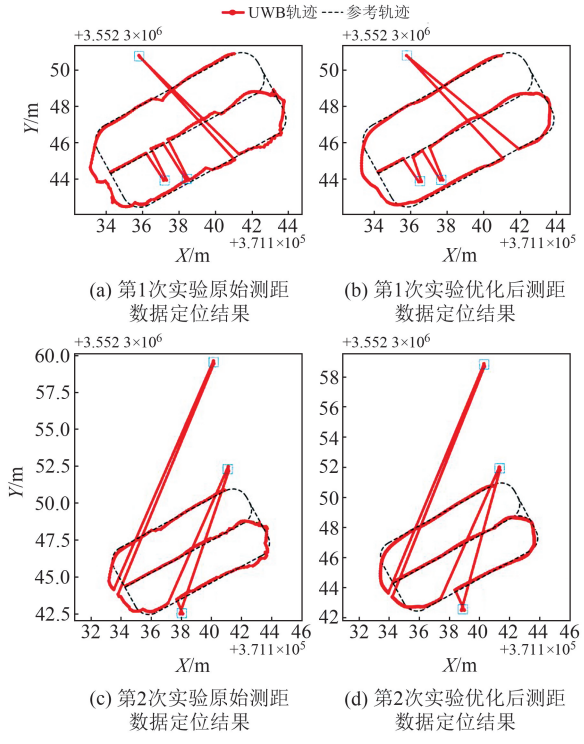


图 4 实验设备安装示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the assembly of the experimental equipment

2.2 UWB 定位精度及分析

按照预设路线在测试场地内进行 2 次数据采

集,验证测距偏差校正和基于卡尔曼滤波的优化方法对 UWB 定位精度的影响。通过对采集数据的处理分析,得到实验小车的实际运动轨迹,如图 5 所示。可以看出,经过测距偏差校正与卡尔曼滤波优化处理后的定位结果相较于原始数据更加平滑和准确,有效降低了定位数据的噪声,提高了定位精度。但同时也发现,卡尔曼滤波优化处理无法剔除 UWB 观测数据中的异常值,如图 5 蓝色方框所示。



(a) 第1次实验原始测距数据定位结果　(b) 第1次实验优化后测距数据定位结果

(c) 第2次实验原始测距数据定位结果　(d) 第2次实验优化后测距数据定位结果

图 5　UWB 原始测距数据定位结果与优化后测距数据定位结果

Fig. 5　UWB raw ranging data positioning results and optimized ranging data positioning results

表 1 给出了剔除异常值前后以及卡尔曼滤波优化处理前后的 UWB 定位误差。定位误差为小车实际运动轨迹与预设理想轨迹之间的距离偏差。由表 1 可以看出,2 次实验中,未将异常值剔除的 UWB 原始测距数据平均定位误差分别为 24.1 cm 和 30.0 cm,RMSE 分别为 70.0 cm 和 112.0 cm,STD 分别为 65.7 cm 和107.9 cm;经过测距偏差校正与卡尔曼滤波优化处理后,其平均定位误差分别降低至 21.4 cm 和 28.0 cm,RMSE 分别为 64.2 cm 和 122.7 cm,STD 分别为 60.5 cm 和 119.5 cm。剔除异常值后,UWB 原始测距数据的平均定位误差分别为 16.6 cm 和 14.8 cm,RMSE 分别为 23.8 cm 和 21.1 cm,STD 分别为 17.1 cm 和 15.0 cm;经过优化处理后,其平均定位误差分别降低至 14.5 cm 和 13.0 cm,RMSE 分别降低至 20.8 cm 和18.6 cm,STD 分别降低至 15.2 cm 和 13.3 cm。

综上所述,经过测距偏差校正和卡尔曼滤波优化后,UWB 平均定位精度相较于原始数据从 15.70 cm 提升至 13.75 cm,提升了 12.4%;RMSE 从 22.45 cm 降低至 19.70 cm,降低了 12.2%;STD 从 16.05 cm 降低至 14.25 cm,降低了 11.2%。实验结果表明,本文提出的卡尔曼滤波优化方法能有效提高 UWB 定位精度。

2.3　UWB/IMU 组合导航实验及分析

2.3.1　NLOS 条件下 UWB 定位异常时组合导航实验及分析

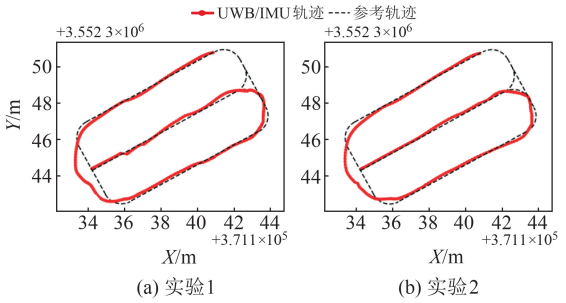
测距偏差校正与卡尔曼滤波优化处理可有效降低定位数据的噪声。然而,在受到环境或设备噪声影响时,优化后的定位结果中仍存在较为明显的偏差,如图 5 中蓝色方框标记的位置。为此,本文进一步提出 UWB 和 MEMS IMU 组合导航方法。根据上节中介绍的方法,得到 UWB/IMU 组合导航定位结果,如图 6 所示。

表 1　UWB 定位误差

Tab. 1　UWB positioning errors

异常值处理	实验组	原始数据/m				优化后数据/m			
		最大误差	平均误差	RMSE	STD	最大误差	平均误差	RMSE	STD
剔除异常值前	第 1 次实验	7.451	0.241	0.700	0.657	6.916	0.214	0.642	0.605
	第 2 次实验	12.546	0.300	1.120	1.079	1.301	0.280	1.227	1.195
剔除异常值后	第 1 次实验	0.859	0.166	0.238	0.171	0.785	0.145	0.208	0.152
	第 2 次实验	0.777	0.148	0.211	0.150	0.694	0.130	0.186	0.133

由图 6 可见,UWB 和 IMU 的组合导航定位方法显著改善了 UWB 定位中的异常值问题,定位结果更为稳定可靠。表 2 给出了 UWB/IMU 组合导航定位结果。从表 2 可以看出,2 次实验中,经过 UWB/MEMS IMU 组合定位后的最大误差分别为 78.5 cm 和 69.4 cm,平均误差分别为 13.8 cm 和 13.3 cm,RMSE 分别为 20.4 cm 和 19.0 cm,STD 分别为 15.0 cm 和 13.5 cm,该定位精度与 UWB 剔除异常值后的精度相当。这表明本文提出的组合定位方法能有效解决因环境干扰或设备噪声导致的定位异常问题,显著提升定位系统的鲁棒性。



(a) 实验1 (b) 实验2

图 6 NLOS 条件下 UWB 定位异常时 UWB/IMU 组合定位结果

Fig. 6 UWB/IMU combined positioning results under NLOS conditions with UWB positioning anomalies

表 2 NLOS 条件下 UWB 定位异常时 UWB/IMU 组合定位精度

Tab. 2 UWB/IMU combined positioning accuracy under NLOS conditions with UWB positioning anomalies

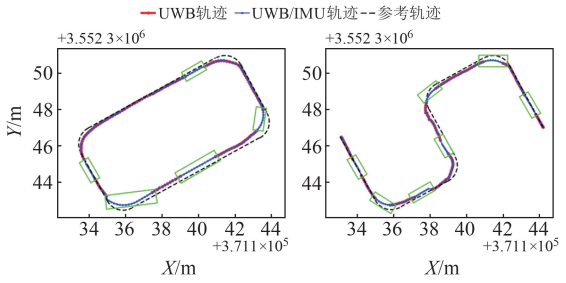
实验	最大误差/m	平均误差/m	RMSE/m	STD/m
实验 1	0.785	0.138	0.204	0.150
实验 2	0.694	0.133	0.190	0.135

2.3.2 NLOS 条件下 UWB 无法定位时组合导航实验及分析

在 NLOS 环境中，存在信号衰减甚至缺失的问题。在这种条件下，单一的 UWB 定位系统将无法提供持续可靠的位置信息。本文在实验中模拟 UWB 信号间歇缺失的场景，用以检验 UWB/IMU 组合导航在 NLOS 环境下的定位性能。

分别设置 2 条不同路线来验证 NLOS 条件下 UWB/IMU 组合导航的性能，如图 7 所示。可以看出，在小车行驶过程中，2 条路线的部分路段均存在由于 NLOS 影响而导致的 UWB 信号丢失，从而无法依靠 UWB 进行定位。图 8 给出了在 2 条实验路线下，小车行进过程中 UWB 标签有效测距数的变化情况。图中的红线是指 UWB 定位所需的最少有效测距数，当测距数≥3 时可以定位，而＜3 时无法定位。在大部分时间内，UWB 标签可同时观测到 4 个有效测距数，但部分时间段只能观测到 2 个及以下的有效测距数。

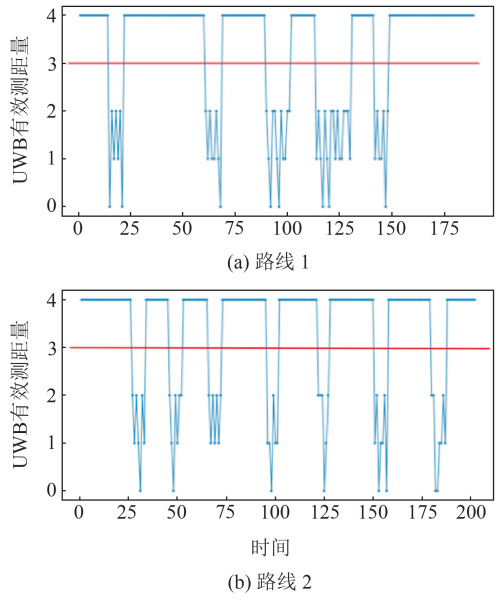
当 UWB 标签的有效测距数小于 3 时，UWB 无法完成定位，其对应的轨迹缺失位置如图 7 中绿色框所示。当 UWB 在 NLOS 场景中无法完成定位时，MEMS IMU 基于 DR 方法能够在短时间内保持较高精度的连续定位能力。而当 UWB 信号恢复正常，可利用 UWB 的高精度定位结果对 MEMS IMU 的累积误差进行实时修正，从而实现全局范围内的稳定高精度定位。基于 UWB/IMU 组合定位方法，获得小车连续可靠的位置信息，如图 7 中蓝色轨迹所示。为进一步评估 UWB/IMU 组合导航定位的精度，计算小车实



(a) 路线 1 (b) 路线 2

图 7 NLOS 条件下 UWB 无法定位时 UWB 及 UWB/IMU 组合定位轨迹

Fig. 7 UWB and UWB/IMU combined positioning trajectories when UWB cannot be located under NLOS conditions



(a) 路线 1

(b) 路线 2

图 8 UWB 有效测距数统计

Fig. 8 Statistics of the number of effective ranges using UWB

际行进轨迹与预设理想轨迹之间的偏差，结果如表 3 所示。

表 3 NLOS 条件下 UWB 无法定位时 UWB/IMU 组合定位精度

Tab. 3 Positioning accuracy of UWB/IMU combination when UWB cannot be located under NLOS conditions

实验组	最大误差/m	平均误差/m	RMSE/m	STD/m
实验 1	0.442	0.144	0.175	0.099
实验 2	0.308	0.114	0.147	0.092

根据表 3 中数据可知，即使在 NLOS 条件下，UWB/IMU 组合导航依然能够实现较高精度的定位，其最大误差分别为 44.2 cm 和 30.8 cm，平均误差分别为 14.4 cm 和 11.4 cm，RMSE 分别为 17.5 cm 和 14.7 cm，STD 分别为 9.9 cm 和 9.2 cm。

综上所述，在 NLOS 场景下，当 UWB 因信号异常出现较大的突变误差，或因信号丢失无法提供定位信息时，UWB/IMU 组合导航能提供持续可靠的位置信息，其平均定位精度为 13.23 cm，

RMSE 为 17.90 cm,STD 为 11.90 cm。

3 结　语

在复杂室内环境中,NLOS 传播效应常常导致 UWB 定位精度下降,甚至出现定位信号中断的情况。为此,本文提出了一种融合 UWB 与低成本 MEMS IMU 的室内组合定位方法。该方法通过测距偏差校正与卡尔曼滤波优化 UWB 测距数据,并借助 IMU 推算短期位置增量,以弥补 UWB 信号异常或中断时的定位缺失。实验结果表明,经优化后 UWB 的平均定位精度由 15.70 cm 提升至 13.75 cm,RMSE 降低了 12.2%;在 NLOS 场景下,组合系统仍能保持 13.23 cm 的平均精度,表现出较高的稳定性与可靠性。

本文通过实验验证了 UWB 与低成本 MEMS IMU 组合导航的技术可行性。两者的深度融合充分发挥了各自的优势,有效克服了单一系统在非理想环境中的局限性,为复杂室内环境下的高精度定位提供了一种新的有效解决方案。

参考文献

[1] 李清泉,周宝定. 基于智能手机的个体室内时空行为分析[J]. 地理科学进展,2015,34(4):457-465 (Li Qingquan, Zhou Baoding. Smartphone-Based Individual Indoor Spatio-temporal Behavior Analysis[J]. Progress in Geography, 2015, 34(4): 457-465)

[2] Wei Z, Jiang R, Wei X, et al. Novel Indoor Positioning System Based on Ultra-Wide Bandwidth[J]. Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art, 2020, 3(1)

[3] Alarifi A, Al-Salman A, Alsaleh M, et al. Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances[J]. Sensors, 2016, 16(5)

[4] 仰胜,胡志刚,赵齐乐,等. 基于 TOF 模式的 UWB 定位原理与精度验证[J]. 大地测量与地球动力学,2020,40(3):247-251 (Yang Sheng, Hu Zhigang, Zhao Qile, et al. Principle and Precision Verification of UWB Positioning Based on TOF[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(3): 247-251)

[5] 肖竹,王勇超,田斌,等. 超宽带定位研究与应用:回顾和展望[J]. 电子学报,2011,39(1):133-141 (Xiao Zhu, Wang Yongchao, Tian Bin, et al. Development and Prospect of Ultra-Wideband Localization Research and Application[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 133-141)

[6] 张国政,刘明轩,王桂莲,等. 基于 UWB 测距信息聚类的 LOS/NLOS 识别方法[J/OL]. 天津理工大学学报,https://link.cnki.net/urlid/12.1374.N.20250120.1850.002,2025-01-21(Zhang Guozheng, Liu Mingxuan, Wang Guilian, et al. LOS/NLOS Identification Method Based on UWB Ranging Information Clustering[J/OL]. Journal of Tianjin University of Technology, https://link.cnki.net/urlid/12.1374.N.20250120.1850.002, 2025-01-21)

[7] 隋心,史政旭,王长强,等. 室内超宽带测距定位及 NLOS 抑制方法[J]. 测绘通报,2024 (10):103-109 (Sui Xin, Shi Zhengxu, Wang Changqiang, et al. Indoor Ultra-Wideband Ranging and Localization Method with NLOS Mitigation[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024 (10): 103-109)

[8] 刘韬,徐爱功,隋心. 超宽带与惯性导航组合的室内导航定位[J]. 测绘科学,2016,41(12):162-166 (Liu Tao, Xu Aigong, Sui Xin. Application of UWB/INS Combination in Indoor Navigation and Positioning[J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(12): 162-166)

[9] Kwon S G, Kwon O J, Kwon K R, et al. UWB and MEMS IMU Integrated Positioning Algorithm for a Work-Tool Tracking System[J]. Applied Sciences, 2021, 11(19)

[10] Sui X, Song J P, Wang C Q, et al. UWB/MEMS IMU Integrated Positioning Method Based on NLOS Angle Discrimination and MAP Constraints[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1)

[11] Shah S, Demeechai T. Multiple Simultaneous Ranging in IR-UWB Networks[J]. Sensors, 2019, 19(24)

[12] 王春琦,冯大权,何春龙,等. 基于 UWB 的增强非对称双边双向测距算法研究[J]. 南昌航空大学学报:自然科学版,2019,33(1):66-73 (Wang Chunqi, Feng Daquan, He Chunlong, et al. Enhanced Asymmetric Double Side Two-Way Ranging Algorithm for UWB Ranging System[J]. Journal of Nanchang Hangkong University: Natural Sciences, 2019, 33(1): 66-73)

[13] 曹琢健. 基于 GNSS/INS/UWB 组合的室内外无缝定位方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2021(Cao Zhuojiang. Indoor and Outdoor Seamless Positioning Based on the Integration of GNSS/INS/UWB[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021)

[14] Yan J, Lin D H, Tang K, et al. High Precision Indoor Positioning Method Based on UWB[M]. Cham: Springer International Publishing, 2019

Indoor Positioning Method Based on UWB and Low-Cost MEMS IMU Fusion

ZHOU Zhiling[1]　*GUAN Dongliang*[1]　*ZHANG Qinghua*[2]

SUN Haiwen[1]　*ZHOU Lei*[1]　*XIA Yimin*[1]

1　School of Geomatics Science and Technology, Nanjing Tech University, 30 South-Puzhu Road, Nanjing 211816, China

2　School of Geography, Nanjing Normal University, 1 Wenyuan Road, Nanjing 210023, China

Abstract: A combined positioning method that integrates ultra wide band (UWB) with low-cost micro-

(下转第 1259)

物理学报, 2014, 57(8): 2530-2540(Lin Xiaoguang, Sun Wenke. Effects of Topography and Local Geological Structure on Computing Co-Seismic Deformation—A Case Study of the 2011 Japan Tohoku Earthquake(M_W9.0)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(8): 2530-2540)

[11] Langer L, Gharti H N, Tromp J. Impact of Topography and Three-Dimensional Heterogeneity on Coseismic Deformation [J]. Geophysical Journal International, 2019, 217(2): 866-878

[12] Trasatti E, Kyriakopoulos C, Chini M. Finite Element Inversion of DInSAR Data from the M_W6.3 L'Aquila Earthquake, 2009(Italy)[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38

[13] Williams C A, Wallace L M. The Impact of Realistic Elastic Properties on Inversions of Shallow Subduction Interface Slow Slip Events Using Seafloor Geodetic Data[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(15): 7462-7470

[14] Gharti H N, Langer L, Tromp J. Spectral-Infinite-Element Simulations of Coseismic and Post-Earthquake Deformation [J]. Geophysical Journal International, 2019, 216(2): 1364-1393

[15] Zhang C Q, Cui G J, Zhou H, et al. Influence of Mountain-Valley Morphology on In-Situ Stress Distribution[J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18: 2447-2459

Influence of Topographic Factors on Co-Seismic Deformation of the 2024 M_W7.0 Earthquake in Wushi, Xinjiang

DUAN Hurong[1]　*ZHANG Qi*[1]　*XIE Baopeng*[1]　*ZHANG Yerui*[1]　*WANG Wei*[1]

1　College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, 58 Mid-Yanta Road, Xi'an 710054, China

Abstract: To simulate the impact of terrain on co-seismic deformation, this paper established three different terrain models. The results show that compared with flat terrain, convex terrain reduces the amount of horizontal displacement, while concave terrain significantly increases the amount of horizontal displacement. The terrain difference in the epicentral area of the 2024 Wushi, Xinjiang M_W7.0 earthquake is significant, and the impact of the real terrain on the co-seismic deformation of this earthquake is not yet clear. This paper uses the spectral element method to simulate the co-seismic deformation of the Wushi earthquake and compares it with the co-seismic displacement field of D-InSAR. The results indicate that the impact of terrain factors on co-seismic deformation can reach 8.5%, 26.9%, and 6.8% in the E, N, and U directions, respectively.

Key words: dislocation theory; topographic factor; co-seismic deformation; spectral element method; Wushi M_W7.0 earthquake

Foundation support: Open Research Fund of State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, No. SKLGED2022-5-2.

About the first author: DUAN Hurong, associate professor, majors in geodetic inversion, E-mail: duanhurong@126.com.

Corresponding author: ZHANG Qi, postgraduate, majors in seismic dislocation research, E-mail: zq1374@stu.xust.edu.cn.

(上接第 1245 页)

electro-mechanical systems (MEMS) inertial measurement unit (IMU) is proposed. Initially, UWB ranging data is optimized using ranging bias correction and Kalman filtering. Subsequently, the complementary strengths of multiple sensors are leveraged through a UWB/IMU fusion model. Experimental results demonstrate that the optimized UWB achieves an improvement in average positioning accuracy from 15.70 cm to 13.75 cm, with the RMSE decreasing from 22.45 cm to 19.70 cm. In non-line-of-sight (NLOS) scenarios, even when UWB signals experience abrupt changes or are lost, the fusion system can still provide continuous and reliable positional information, with an average accuracy of 13.23 cm and an RMSE of 17.90 cm.

Key words: UWB; low-cost IMU; NLOS; integrated navigation; indoor positioning

Foundation support: National Key Research and Development Program of China, No. 2021FBY3901301; Natural Science Foundation of Jiangsu Province, No. BK20220366; Science and Technology Innovation Project of Jiangsu Provincial Department of Natural Resources, No. JSZRKJ202406.

About the first author: ZHOU Zhiling, postgraduate, majors in indoor and outdoor fusion positioning, E-mail: zhouzhiling@njtech.edu.cn.

Corresponding author: GUAN Dongliang, PhD, lecturer, majors in GNSS-R and indoor and outdoor fusion positioning, E-mail: guan.dongliang@njtech.edu.cn.