



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: GNSS/气压计融合的室内外高程估计及室内楼层识别方法
作者: 陈永森, 柳景斌, 雷杰涛, 龚晓东, 黄格格
DOI: 10.13203/j.whugis20230299
收稿日期: 2024-05-27
网络首发日期: 2024-06-24
引用格式: 陈永森, 柳景斌, 雷杰涛, 龚晓东, 黄格格. GNSS/气压计融合的室内外高程估计及室内楼层识别方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20230299>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20230299

引用格式：

陈永森, 柳景斌, 雷杰涛, 等. GNSS/气压计融合的室内外高程估计及室内楼层识别方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,DOI: 10.13203/j.whugis20230299 (CHEN Yongsen, LIU Jingbin, LEI Jietao, et al. A Study of GNSS/Barometer Integrated Elevation Estimation and Floor Identification[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,DOI: 10.13203/j.whugis20230299)

GNSS/气压计融合的室内外高程估计及室内楼层识别方法

陈永森¹ 柳景斌¹ 雷杰涛¹ 龚晓东¹ 黄格格¹

¹ 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北武汉, 430079

摘要：精确可靠的高程信息对应应急救援人员安全和无人机等应用具有重要价值。全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)在森林、城市峡谷等信号遮挡环境下高程定位结果不可靠,在室内或地下等封闭空间甚至无法定位。本文针对GNSS高程方向定位结果受环境影响定位精度低以及在封闭空间高程信息不连续的问题,融合GNSS与气压计两种不依赖地面局部基础设施的传感器,采用抗差卡尔曼滤波实现室内外空间连续高程估计并识别楼层。本文实验表明,GNSS/气压计融合可实现室内外空间高程连续估计,高程估计精度可达亚米级,在楼层平均高度4.2米条件下基于室内外连续高程信息的楼层识别精度可达100%,楼层间高差估计平均误差为0.504米。本文提出的GNSS/气压计融合方法可实现室内外空间连续无缝高程定位,鲁棒性较强,可满足部分位置服务对高程信息的需求。

关键词：气压计; 抗差卡尔曼滤波; 高程估计; 楼层识别; 室内定位

A Study of GNSS/Barometer Integrated Elevation Estimation and Floor Identification

CHEN Yongsen¹ LIU Jingbin¹ LEI Jietao¹ GONG Xiaodong¹ HUANG Gege¹

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: Accurate and reliable elevation information is of great value to emergency personnel safety and UAV applications. The global navigation satellite system (GNSS) is not reliable in the environment where signals are blocked, such as forests and urban canyons, and even cannot be located in indoor or underground spaces. **Method:** To resolve the problems of low elevation positioning accuracy of GNSS and discontinuous elevation information in indoor space, this paper integrates two kinds of sensors, GNSS and barometer, which do not depend on local ground infrastructure, and adopts robust Kalman Filter to realize continuous elevation estimation and floor identification in indoor and outdoor space. **Result:** The experiment shows that the GNSS/ barometer fusion can realize the continuous estimation of indoor and outdoor space

收稿日期: 2024-05-27

项目资助:武汉市知识创新专项基础研究(2022010801010109),人工智能创新专项(2023010402040029),湖北省自然科学基金(2023AFB081),测绘遥感信息工程国家重点实验室专项科研经费资助。

第一作者: 陈永森, 硕士, 主要从事室内外定位研究。whu_cys@whu.edu.cn

通讯作者: 柳景斌, 博士, 教授, 博士生导师。ljb04@163.com

elevation, the accuracy of elevation estimation can reach sub-meter level, the accuracy of floor identification can reach 100%, and the estimation error of height difference between floors is 0.504 meter. **Conclusion:** The GNSS/barometer fusion method proposed in this paper can realize continuous elevation positioning in indoor and outdoor space with strong robustness, it may meet the requirements of some location services for elevation information.

Key words: barometer; robust Kalman Filter; elevation estimation; floor identification; indoor positioning

随着导航定位技术的飞速发展,位置服务(location based services, LBS)逐渐融入到大众生活并得到更为广泛的应用。在室外,卫星导航定位技术在开阔环境中依托地基增强的实时差分定位技术(real-time kinematic, RTK)和依托星基增强的精密单点定位技术(precise point positioning, PPP)可达到厘米级的定位精度^[1]。在室内由于GNSS信号受到屏蔽,无法使用卫星定位。各式各样的室内定位技术如WIFI^[2]、光源^[3]、超宽带(ultra wide band, UWB)^[4]、惯导^[5]、音频^[6]、视觉^[7]、5G^[8]等不断被学者开发使用。通过模型驱动、数据驱动、异构传感器融合定位等方法将室内定位精度由2-5 m提升至1 m^[9]。然而无论是室外还是室内,位置服务更倾向于提供目标所在位置的二维平面坐标,目标在三维空间中的高程信息通常被忽略。对于室内外多种位置服务应用,如应急救援、无人机应用和车辆导航等,高程信息十分重要。很多城市通过建造高架来缓解巨大的交通压力,高架舒缓了交通拥堵的同时也给GNSS定位带来了挑战。普通GNSS用户使用低成本GNSS接收机,其定位精度只能达到米乃至十几米,当GNSS接收机因卫星信号受到遮挡或者受到多路径效应的干扰而导致高程定位结果出现跳变,导航软件会对高架具体层级判断出现偏差,从而改变导航路线,影响人们出行。在室内应急救援中,基于室内空间规整的分层结构,通过高程信息确定室内楼层,对于确定救援人员位置保障人员安全和救援指挥效率具有重要意义。对于室内外无人机应用,高程信息是无人机飞控系统的重要参数,高程起伏波动将影响无人机飞行安全^[10]。

使用气压计辅助高程定位是近年的研究热点之一。文献^[11-12]研究气压计作为高程附加约束条件对GNSS/INS组合导航的影响,文献^[13]将气压计与GNSS观测作为特征向量输入到支持向量机(support vector machines, SVM)进行高架桥环境判别。有的利用气压计辅助UWB^[14],蓝牙

^[15],WIFI^[16]进行室内三维定位,或者直接利用其进行楼层识别^[17]。上述高程定位结果在气压计辅助下精度得到改善,但使用气压计时并未考虑环境变化对气压值的影响^[18]。因此,有学者采用差分气压的方法来减弱环境对气压的影响,扩大气压计使用场景。如文献^[19]用差分气压序列检测GNSS信号是否存在欺骗干扰,成功率达到92%。文献^[20]将相对气压变化融合GNSS观测,有效缓解了GNSS高程定位跳变问题,文献^[18]利用气压变化速率判断行人上下楼过程来识别所在楼层,楼层一次变换80m以内的识别精度为100%。这些研究证明了气压计在高程定位上的潜力,但研究重点分别聚焦于室外或者室内空间,没有将室内外空间连续高程信息衔接起来。如GNSS在室内将失去作用,室内楼层识别方法只能提供楼层位置而无法给出高度信息。

本文针对应急救援、人员安全管控和无人机等应用,提出了一种GNSS/气压计融合室内外高程连续估计及室内楼层识别方法。首先,不同于传统上普遍采用标准大气压高模型估计海拔高的方法,本文推导了大气模型微分方程,利用该微分方程和气压计的观测值变化计算高程变化;其次,利用高程变化信息与GNSS绝对高程融合,实现GNSS拒止环境等室内外高程信息连续估计,其估计的高程结果在GNSS统一的坐标系内;最后,通过抗差卡尔曼滤波方法,结合气压计高程变化信息,探测由于环境影响导致的GNSS高程估计粗差,提高高程融合精度和鲁棒性。该方法利用气压计估计相对高程变化,与GNSS融合实现室内外等泛在空间GNSS高程连续估计,解决在复杂遮挡环境或室内空间GNSS高程定位不准甚至不可用的难题,对于室内外无缝位置服务,应急救援等应用具有重要价值。

1 GNSS/气压计室内外高程估计及楼层识别方法

本文提出的GNSS/气压计室内外高程估计和

楼层识别方法需要准确的绝对高程作为初始值，故选用 RTK 获取高程定位结果。RTK 高程定位误差根据 RTK 定位状态以及定位精度进行自适应更新；气压计数据经过移动均值降噪后根据国际标准大气压高模型计算气压高，根据高程变化及上一历元绝对高程得到当前历元的绝对高程，使用抗差卡尔曼滤波融合 RTK 高程定位结果得到绝对

高程估值，在室内环境依据绝对高程估值进行楼层识别。本文重点关注 GNSS/气压计融合的室内外高程连续估计和室内楼层识别方法，仅使用 RTK 定位状态进行室内外环境的简单判断，没有依据文献^[21]利用卫星数量，卫星高度角及卫星信噪比进行精确判断。本文方法的流程图如图 1 所示。

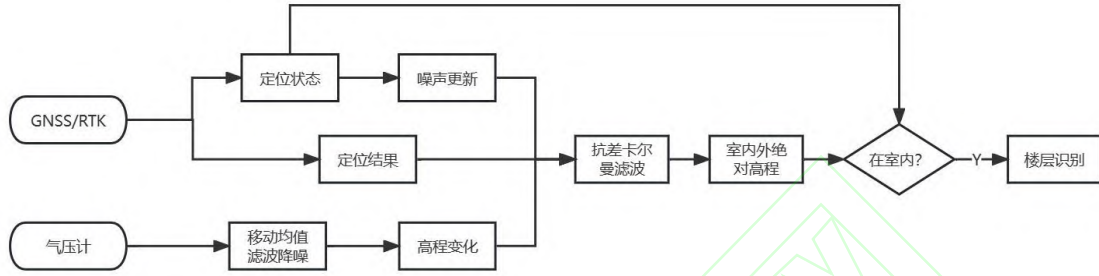


图 1 GNSS/气压计融合高程估计和楼层识别方法总体流程图

Fig. 1 Flowchart of GNSS/Barometer Integrated Elevation Estimation and Floor Identification

下文将从三部分对流程图内容进行详细说明，每部分内容如下：1.1 介绍气压计高程估计方法以及气压测高与 GNSS 测高的区别；1.2 介绍抗差卡尔曼滤波的数学模型及实现；1.3 介绍楼层识别算法。

1.1 气压计高程估计

气压数值大小受到高程以及环境温度影响。等温大气假设测高模型认为测高范围内温度是恒定的，忽略了高度变化对温度的影响^[22]。国际标准大气压高程模型考虑了这种影响，可计算出海拔高度小于 11 km 的任意点的相对海拔高度，模型公式为^[15]：

$$H - H_0 = \frac{T_0}{\beta} \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{\beta R_d}{g}} \right] \quad (1)$$

表 1 国际标准大气参数

Tab. 1 International Standard Atmospheric Parameters

参数	标称值
平均海面大气压强	$P_0 = 101325 \text{ Pa}$
平均海平面加速度	$g = 9.80665 \text{ m/s}^2$
平均海平面温度	$T_0 = 288.15 \text{ K}$
温度梯度	$\beta = -6.5 \text{ K/km}$
普适气压常数	$R_d = 287.0528 \text{ m}^2/\text{s}^2\text{K}$

式中 H 为海拔高， H_0 为平均海平面高度， T_0 为平均海平面温度， T 为环境温度， β 为温度梯度， g 为平均海平面加速度， R_d 为普适气压常数， P_0 为平均

海平面大气压强。将表 1 中参数代入式 (1)，令平均海平面高度 $H_0 = 0$ 可得：

$$H = 44330.769 \left[1 - \left(\frac{P}{101035} \right)^{0.19026} \right] \quad (2)$$

由式 (2) 根据气压可反算出高程，但结果无法作为绝对高程参考值。由气压值求出的高程为气压高，同一位置的气压受到气候环境影响（如温度，湿度等）每时每刻都不同，在一天的时间间隔内反算出的高程差异最高能达到十几米^[18]，不具备稳定性，无法作为绝对高程参考。相比之下，GNSS 高程定位结果不会随时间改变，可作为绝对高程。但由于高程基准不同，气压反算的高程无法直接对定位精度较低的 GNSS 高程定位结果进行校正。气压反算的高程是与海平面的垂直距离，式 (2) 计算的气压高，其高程基准面是平均海平面。GNSS 定位的参考坐标系是参考椭球。其高程是沿椭球面法线方向距参考椭球面的距离^[23]。受到地球形状的影响，平均海平面与参考椭球面并不重合且二者高程基准线也不相同，地球上相同两点处高程变化不相等。但当两点间水平距离较短时，本文假设两点处高程变化近似相等。

为验证不同时刻气压对高程变化的影响，对式 (2) 两边求微分：

$$dH = -0.08349 \left(\frac{P}{101035} \right)^{-0.80974} dP \quad (3)$$

由式 (3) 可得，高程变化速率随着气压值的增大

而减缓。通常地面的大气压值在 97000Pa 和 104000Pa 之间，气压变化 1Pa 导致高程的变化大约是 8cm，即使每日同一位置处气压值不同，但气压变化导致的高程变化值是稳定的。因此，本文利用式 (3) 估计高程变化，融合 GNSS 高程定位结果估计 GNSS 坐标系下的绝对高程，提高高程定位结果的精度与可靠性。

1.2 基于抗差卡尔曼滤波的 GNSS/气压计融合高程估计

利用 GNSS 进行定位时，当卫星信号受到遮挡会导致定位结果跳变，在高程方向会出现几米到十几米的波动，高程定位结果不可靠；而低成本气压计高程精度在亚米级，优于 GNSS。为了解决 GNSS 高程定位不连续的问题、保持定位精度、提高定位可靠性，本文使用抗差卡尔曼滤波进行 GNSS/气压计高程融合估计。

抗差卡尔曼滤波在卡尔曼滤波基础上增加了粗差检验和抗差估计^[24]。主要包括状态预测和量测更新两部分^[25]。

状态预测：

$$\bar{x}_k = Ax_{k-1} + Bu_k \quad (4)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (5)$$

量测更新：

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (6)$$

$$x_k = \bar{x}_k + K_k(z_k - H\bar{x}_k) \quad (7)$$

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (8)$$

式中 x_{k-1} 为 $k-1$ 时刻状态最优估计、 A 为状态转移矩阵、 u_k 为系统输入、 B 为控制输入矩阵、 x_k^- 为 k 时刻状态估计、 P_{k-1} 为 x_{k-1} 协方差阵、 P_k^- 为 x_k^- 协方差阵、 Q 和 R 分别为状态噪声和量测噪声的协方差阵。

粗差检验和抗差估计发生在量测更新之前，对于新息向量 γ ，其计算公式如下：

$$\gamma = z_k - Hx_k^- \quad (9)$$

在量测值没有粗差的情况下根据误差传播律，新息向量满足如下分布^[26]：

$$\gamma \sim N(0, HP_k^- H^T + R) \quad (10)$$

选用 3σ 作为粗差评判标准，若新息向量超过 3σ 则认为观测值存在粗差，需要进行抗差估计。抗差估计通过选择抗差因子来削弱量测值对滤波估计的影响，常用的抗差估计因子为 IGG 方案，Huber 函数，这里选用 Huber 函数构造抗差因子 α ^[27]：

$$\alpha = \begin{cases} 1, & |\gamma| \leq c \\ |\gamma|/c, & |\gamma| > c \end{cases} \quad (11)$$

根据抗差因子对 R 进行更新：

$$R = R/\alpha \quad (12)$$

再将更新后的 R 代入到量测更新中进行滤波计算。

对滤波参数的设定，初值 x_1 为实验开始时 RTK 出现固定解时的大地高，此后根据气压值计算的高差进行状态更新，当有 RTK 的高程观测值时进行融合更新。初始协方差 P_1 为 I ， Q 为气压计高差估计精度 σ_d （下文给出估计方法）， R 根据 RTK 定位精度和解算状态进行自适应调整，当为“固定解”状态时，RTK 高程定位精度为 1-2cm^[28]；当为“浮点解”状态时，高程定位精度为 0.5m^[28]；当为“差分解”状态时，高程定位精度为 5-10m^[28]；当为“无法定位”状态时，高程定位精度为 ∞ 。

1.3 楼层识别算法

当行人由室外进入室内，人们对高程信息的需求是自身位于室内哪一具体层级。依据滤波后的绝对高程可实现所在楼层识别。通常情况下行人位于同一楼层时高程不变。基于该启发式经验，根据楼层层间距真值 \bar{D} 和气压计高差估计精度 σ_d 进行楼层识别，图 2 为楼层识别算法伪代码。

```

解法 1 楼层识别算法
输入：气压高序列 presH, 初始楼层高度 initH, 当前高程 nowH, 当前所在楼层 nowFloor
输出：nowH, nowFloor
1: 已知：序列长度 windowSize, 层间距真值  $\bar{D}$ , 气压计高差估计精度  $\sigma_d$ , 均值阈值  $m_0$ , 标准差阈
   值  $s_0$ , 楼层阈值 floor0
2: presH ← presH - initH
3: presH ← nowH - initH
4: 气压高子序列 1:hSeq1 ← presH(1 : windowSize/2)
5: 气压高子序列 2:hSeq2 ← presH(windowSize/2 + 1 : windowSize)
6: 子序列 1 均值  $m_1$  ← mean(hSeq1), 子序列 1 标准差  $s_1$  ← std(hSeq1)
7: 子序列 2 均值  $m_2$  ← mean(hSeq2), 子序列 2 标准差  $s_2$  ← std(hSeq2)
8: if  $|m_1 - m_2| < m_0$  &  $|s_1 - s_2| < s_0$  then
9:   填补高程: newH ← (m1 + m2)/2
10:  if  $|newH - nowH| < \sigma_d$  then
11:   nowH ← (newH + nowH)/2
12: else
13:   楼层变化数: dFloor ← round((newH - D)/D)
14:   if  $dFloor = 0 \cup |newH - dFloor * \bar{D}| < floor_0$  then
15:     if nowFloor ≠ dFloor then
16:       nowFloor ← dFloor
17:     end if
18:   end if
19:   nowH ← newH
20: end if
21: end if
22: nowH ← nowH + initH

```

图 2 楼层识别算法伪代码

Fig. 2 Pseudo Code for Floor Identification Algorithm

算法判断滤波后的高程序列稳定性进行楼层识别与更新，同一楼层只进行单次识别。伪代码输入的 $presH$ 为高程序列， $initH$ 为进入室内时（0 层）的初始高程， $nowH$ 为当前位置高程， $nowFloor$ 为当前所处楼层（相对于 0 层）。算法将长为 $windowSize$ 的高程序列 $presH$ 分为两段等长子序列，通过对比子序列统计特征的相似性来

判断高程序列 $presH$ 的稳定性。若 $presH$ 稳定，由子序列得到所处位置高程 $newH$ ，若 $nowH$ 与 $newH$ 差值小于阈值 σ_d ，认为高程未发生明显变化，更新 $nowH$ ；若差值大于 σ_d ，说明高程大幅度变化，有可能位于新楼层。为进一步判断位于新楼层还是在楼梯间停留，根据 $newH$ 以及层间距真值 \bar{D} 得到楼层变化值 $dFloor$ ，结合 \bar{D} 与阈值 $floor_{th}$ 判断是否处于新楼层。

伪代码中高程序列稳定性阈值 m_{th}, s_{th} ，楼层变化阈值 $floor_{th}$ ，确定方法如下。

根据误差传播率，子序列高程均值 H_{mean} 的中误差 σ_{mean} 为：

$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma}{n} \quad (13)$$

式中 n 为子序列长度， σ 为楼层高度反演误差。因此 $|H_{mean1} - H_{mean2}|$ 的中误差 σ_{dif} 为：

$$\sigma_{dif} = \sqrt{2}\sigma_{mean} \quad (14)$$

考虑气压计高差估计精度 σ_d 与楼层高度反演误差 σ 的关系：

$$\sigma_d = \sqrt{2}\sigma \quad (15)$$

将式(13)，(14)代入式(15)可得：

$$\sigma_{dif} = \frac{\sigma_d}{n} \quad (16)$$

因此取：

$$m_{th} = 2\sigma_{dif} \quad (17)$$

考虑行人动作对气压变化的影响，取

$$s_{th} = 0.6 \quad (18)$$

$floor_{th}$ 的选取基于气压计高差估计精度，其并不会随楼层间距的变化而变化的规律，综合行人动作对气压变化的影响取

$$floor_{th} = 2\sigma_d + s_{th} \quad (19)$$

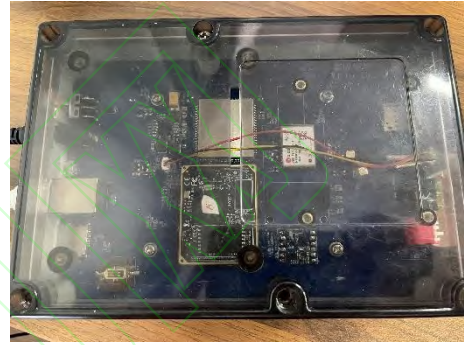
2 实验验证

2.1 实验设备与场景

实验使用电子测距仪进行层间距真值测量，使用课题组研发的集成 ZED-F9P 定位芯片、ATK-MS901M(可获取 IMU, 磁力计, 气压计的十轴高性能角度传感器)模块获取 GNSS/RTK 定位结果和气压值。实验设备如图 3 所示。



(a) 电子激光测距仪



(b) GNSS、气压计等多传感器集成模块

图 3 实验设备

Fig. 3 Experiment Equipment

2.2 GNSS/气压计融合高程估计实验设计

设计了两组 GNSS/气压计融合实验，实验过程中时刻保持连接 CORS 站进行 RTK 定位，再以气压计辅助进行高程估计。

实验一实验路线为：地面露天处→地面信号遮挡处→室内→室内上下楼梯攀爬→地面信号遮挡处→地面露天处。实验一过程中高程由低到高变化为模拟消防人员救援定位。

实验二实验路线为：顶楼露天处→顶楼信号遮挡处→室内→室内下上楼梯攀爬→顶楼信号遮挡处→顶楼露天处。实验二过程中高程由高到低变化模拟矿井人员作业定位。

图 4 为实验一和实验二室外部分实验路线现场照片。室内场景选择在武汉大学星湖楼。



(a) 实验一露天开阔处



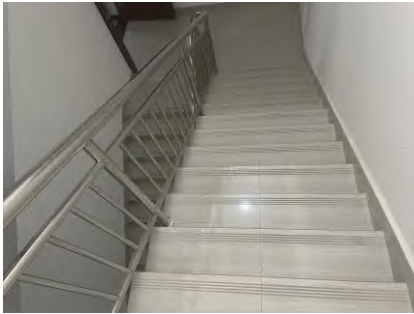
(b) 实验一信号遮挡处



(c) 实验二露天开阔处



(d) 实验二信号遮挡处



(e) 星湖楼楼梯间

图 4 实验路线现场照片

Fig. 4 Field Photos of Experiment Route

3 实验结果

3.1 气压计高差估计精度测定

在滤波融合和楼层识别过程时，需要利用气压计高差估计结果，本文首先测定气压计高差估计的精度。以某建筑相邻楼层层间距作为真值，考虑到楼层挡板厚度的影响，在楼梯间进行层间距测量。层间距测量使用精度为厘米级的电子激光测距仪进行多次测量，取平均值 \bar{D} 作为真值。受到气压计握持高度的影响，根据气压计反算的气压高 H 由两部分组成：

$$H = H_{floor} + H_{motion} \quad (20)$$

其中 H_{floor} 为实验对象所在楼层平面海拔高度， H_{motion} 为人手持气压计离楼层平面的垂直距离。气压计的不同位置会引起 H_{motion} 变化，为降低 H_{motion} 对气压计标准差测量的影响，将气压计置于固定位置进行高度测量。相邻楼层 H 作差得层间距 ΔH ：

$$\Delta H = |H_1 - H_2| \quad (21)$$

将式(20)代入式(21)并考虑实验时不同楼层处 H_{motion} 近似相等，可得：

$$\Delta H = |H_{floor1} - H_{floor2}| \quad (22)$$

使得基于气压高计算的层间距 ΔH 仅和各楼层高度相关，通过采集 54 组层间距 ΔH 算得气压计高差估计精度 σ_d ， σ_d 计算公式为：

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta H_i - \bar{D})^2}{n-1}} \quad (23)$$

式中 \bar{D} 为层间距真值， n 为采样次数， ΔH_i 为层间距采样值。

对层间距采样时使用离散点采样法，但实际行人运动是连续的。为模拟行人在固定楼层徘徊情况，在每一楼层进行 5-10s 的逗留以便与上下楼梯过程区分开来，通过气压计的数值稳定性来进行楼层判断。实验过程中，气压计采样频率为 50Hz，采样过程中采样数据受到噪声干扰出现波动，用移动均值滤波对原始数据进行降噪，滤波公式为：

$$x_t = \frac{\sum_{i=-n/2}^{n/2} x_{t+i}}{n} \quad (24)$$

式中 n 为滤波窗口大小,滤波窗口过大则算法识别灵敏度下降;窗口过小则采样数据受噪声干扰严重,实验中取 $n = 100$,即2秒的观测值个数。图5为移动均值滤波前后气压计采样数据对比。横轴为采样点序号,纵轴为对应的气压值(kPa)。

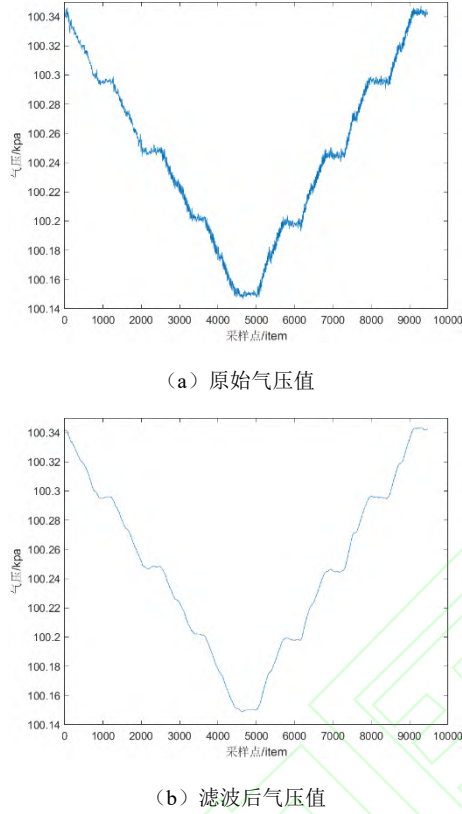


图5 气压计观测值滤波前后对比

Fig. 5 Comparison of Barometer Observation before and after Filter

利用图3(a)电子激光测距仪测得5次楼层间距结果如表2所示,测量结果取平均值得楼层间距 $\bar{D} = 4.2m$ 。

表2 层间距测量结果/m

Tab. 2 Result of Floor Span Measurements/m

测量次数	层间距
1	4.19
2	4.20
3	4.20
4	4.21
5	4.19

图6为楼层高度采样结果及层间距分布情况。图6-(a)为在楼梯间攀爬采样各楼层气压值的结果,每个圆圈处代表一个采样点,纵轴代表各楼

层由气压计反算的高度(m),横轴代表采样时间(s)。图6(b)为相邻楼层间层间距的分布情况,横轴代表采样点序号,纵轴为层间距(m)。图6(b)中测量的层间距用于计算气压计高差估计精度 σ_d ,故对原始气压数据未进行滤波处理,图5(a)可观察到原始气压数据混有高频噪声,故导致图6(b)部分层间距大小与真值 \bar{D} 偏差较大。将气压计层间距采样结果和层间距 \bar{D} 代入式(23),得气压计高差估计精度 $\sigma_d = 0.32m$ 。

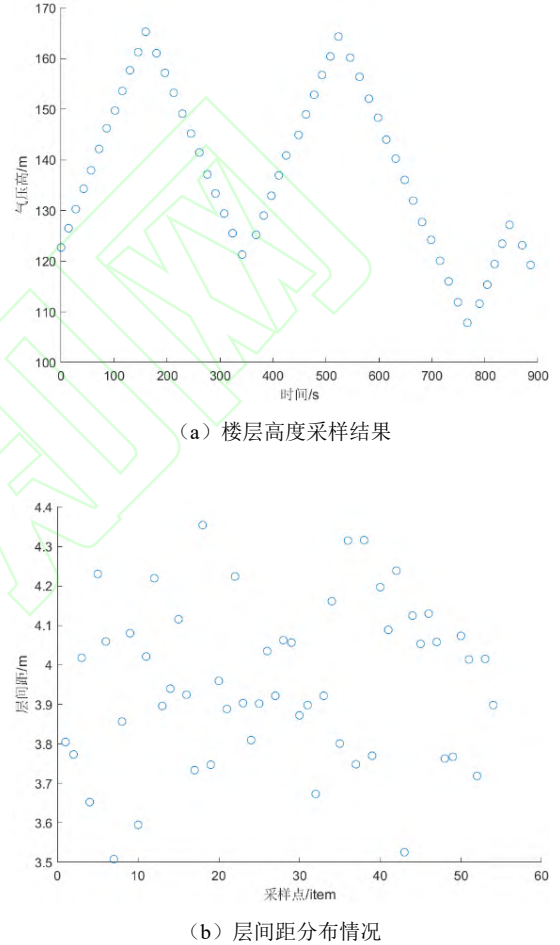


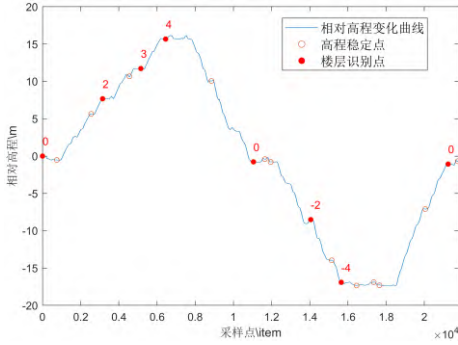
图6 基于气压计的楼层高度测量数据

Fig. 6 Floor Height Measurement Data by Barometer

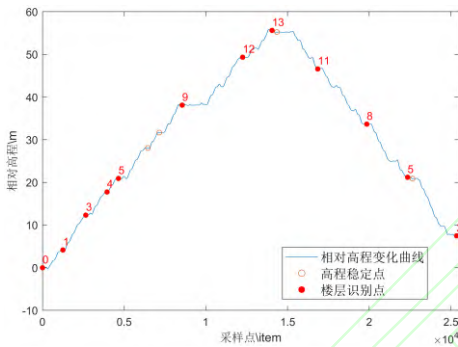
3.2 楼层识别算法验证

图2楼层识别算法实现过程中认为开始所在楼层为起始楼层,楼层识别结果相对于起始楼层。正数表示为在起始楼层之上几层,负数表示起始楼层之下几层。图7为楼层推算结果,实验一以6楼作为起始楼层,实验二以4楼作为起始楼层。实验过程包含人日常在楼层变换中会发生的大部分情况:正常上下楼、上下楼过程中在某级台阶处逗留、上下楼过程中因身体动作改变 H_{motion} 。图中横轴为采样点序号,纵轴为各采样点相对于

初始采样点的相对高程(m),空心红圈代表该采样点处高程稳定,实心红圈代表该采样点为楼层识别点,其上数字代表其与初始楼层的楼层差。需要注意的是,楼层识别点一定是高程稳定点,反之不成立。表3和表4为楼层识别误差。



(a) 实验一结果



(b) 实验二结果

图7 楼层识别结果

Fig. 7 Result of Floor Identification

表3 实验一楼层识别误差/m

Tab. 3 Error of Floor Identification on Experiment 1/m

序号	楼层差	高差	固定高差	误差
1	2	7.676	8.400	0.724
2	3	11.725	12.600	0.875
3	4	15.772	16.800	1.028
4	0	-0.771	0.000	0.771
5	-2	-8.507	-8.400	0.107
6	-4	-16.907	-16.800	0.107
7	0	-1.071	0.000	1.071

表4 实验二楼层识别误差/m

Tab. 4 Error of Floor Identification on Experiment 2/m

序号	楼层差	高差	固定高差	误差
1	1	4.163	4.200	0.037
2	3	12.326	12.600	0.274
3	4	17.756	16.800	-0.956
4	5	20.932	21.000	0.068

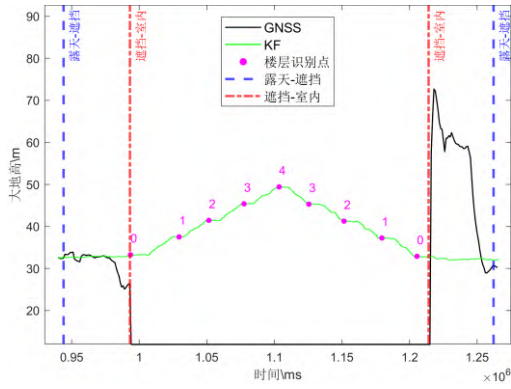
5	9	38.108	37.800	-0.308
6	12	49.739	50.400	0.661
7	13	55.324	54.600	-0.724
8	11	46.591	46.400	-0.191
9	8	33.652	33.600	-0.052
10	5	21.204	21.000	-0.204
11	2	7.487	8.400	0.913

在两次楼层识别实验中,均能对所在楼层作出有效识别,识别准确率100%。识别楼层高度与楼层真实高度的平均误差为0.504m。两次实验中部分楼层识别误差接近1m,是因为在楼层识别实验中,为了检验算法鲁棒性,在楼层行走时将气压计置于与耳朵或与膝盖平齐处作为行人动作误差项来影响气压计读数,此时的楼层识别误差包含气压计测量误差和行人动作误差,故误差值较大。

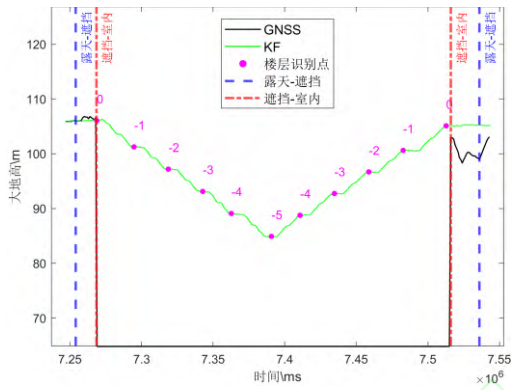
在两次实验中,本文算法表现良好,但同时存在一些缺陷。一是算法涉及气压计的高差估计误差测量,而不同手机搭载的气压计不尽相同,逐一进行误差估计不现实;二是算法以当前位置与初始楼层的高程差值作为识别依据。文中提到气压大小受环境影响不同时间,相同地点的气压高不相等。当气压发生较大变化引起高程差值变化将会导致楼层误识别。因此对本文算法而言,如何提高算法的泛用性,如何识别、消除、削弱环境对气压的影响是今后的研究难点之一。

3.3 室内外高程估计及楼层识别

图8为实验一和实验二GNSS/气压计融合后的高程估计和楼层识别结果。图中横轴为采样时间(ms),纵轴为大地高(m);黑色曲线为RTK高程定位结果,绿色曲线为滤波后的高程定位结果。竖直红线之间为室内场景,紫色实心圆代表在该时刻识别出新楼层,其上数字代表与初始楼层的楼层差,竖直蓝线与竖直红线之间为信号遮挡处场景,其余区域为露天处场景。



(a) 实验一



(b) 实验二

图 8 室内外连续高程估计和楼层识别结果

Fig. 8 Indoor and Outdoor Continuous Elevation Estimation and Floor Identification

对比实验现场照片以及图 8，可以发现：

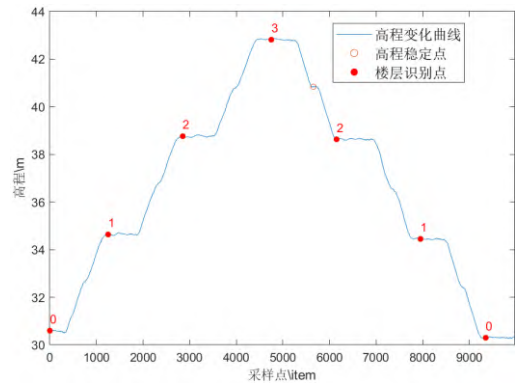
- 1) 当实验场景由露天处转由信号遮挡处，RTK 无法保持固定解出现浮点解和差分解状态，GNSS 高程定位结果在米级内波动，定位结果与实际高程变化情况不符；滤波后的高程保持稳定且与实际高程变化情况相符。
- 2) 当实验场景由室外信号遮挡处转换到室内，RTK 无法接收到卫星信号进行定位，此时仅依靠气压计进行高程估计。通过在室内进行上下楼梯攀爬和楼层停留，本文楼层识别算法在避免对楼梯间停留进行误判的同时对停留楼层实现准确识别。
- 3) 当实验场景由室内转由室外信号遮挡处，RTK 对失锁卫星进行重新跟踪并且卫星信号受遮挡使高程定位结果出现较大幅度跳变（代表 GNSS 定位结果的黑线与代表滤波结果的绿线之间有几十米至几百米的高程差异）。在成功跟踪卫星后，GNSS 高程定位结果在小范围内波动变化而滤波后的高程保持稳定。
- 4) 当实验场景由信号遮挡处回到起点露天处，

为检验滤波效果，回到起点后未等待 RTK 收敛至固定解，两次实验高程闭合差（实验开始和结束时同一位置绿线代表的绝对高程估值的差值）分别为 -0.594m 和 -0.800m 。

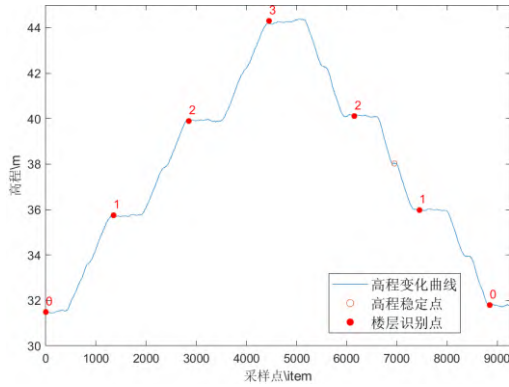
由实验可知，在 GNSS 高程估计有粗差（如信号遮挡或卫星重捕获时）或完全不可用时（如室内），通过 GNSS/气压计融合可以实现室内外空间连续高程估计，定位精度可达亚米级，在室内可实现楼层的准确识别。

4 讨论

在本文方法中起始点定位误差在后续高程估计中将作为常值误差影响估计结果，实验中为了保证高程估计精度，以 RTK 解固定时的高程定位结果为初值，而日常生活使用最广的单点定位误差在米级甚至更大，虽然起始点定位误差不会对本文中依据相对高程变化的楼层识别算法产生影响，但会影响到绝对高程的估计精度，不同量级的起始点定位误差，会使绝对高程出现波动。图 9 是不同时间段对相同楼层进行识别的结果，用气候影响下同一楼层不同气压高来模拟起始点定位精度对绝对高程的影响。从图中可以看出，本文方法依旧能够对楼层作出准确识别。



(a) 夜晚楼层气压高



(b) 中午楼层气压高

图9 起始点定位精度对楼层识别和高程估计的影响

Fig. 9 Effect of Initial Positioning Accuracy on Floor Identification and Elevation Estimation

本文方法也只在一定程度上缓解了GNSS高程定位不可靠问题；在室内结合高程和气压稳定性实现楼层识别的方法虽然克服了传统室内高程定位方法过分依赖地面局部设施和只提供楼层信息的问题。目前多传感器融合定位是大势所趋，仅就高程方向定位而言，文献^[29]利用GNSS/气压计/加速度计融合控制无人机悬停，误差随时间收敛只厘米级，这说明加速度计与GNSS/气压计之间存在优势互补的关系。本文后续研究将利用加速度计垂向加速度短时积分精度高的特性分离环境和行人动作对气压计的干扰，提高高程估计精度。

5 结语

随着人们对导航服务需求增多，二维平面位置信息已经不能满足人们日程生活的需要。在很多应用中，精确高程和楼层信息不可或缺。针对GNSS定位在室外等复杂环境下高程估计不准确或不可用的难题，本文提出了一种GNSS/气压计融合的室内外高程估计方法，实现室内外空间连续无缝高程估计，针对室内外不同场景提供不同类型的高程位置信息，对于救援疏散和位置服务等应用具有重要意义。使用课题组开发的GNSS/气压计等多传感器集成模块进行实验验证，实验结果表明，通过GNSS/气压计融合可以实现室内外空间绝对高程连续估计，高程估计精度达到亚米级。在室外，低成本气压计针对GNSS定位中跳变的高程定位结果能够起到校正和平滑作用，提高定位精度和可靠性；在室内仅依靠气压计维持高程更新时，对于间距固定的层级结构可实现楼层

的准确识别，具备辅助其他室内定位方法进行三维室内定位的潜力。

在本文研究的基础上，后续研究将利用集成模块实现室内外无缝三维定位方法，并迁移到人们日常移动设备上，如手机、手表等。

参考文献

- [1] Yang Qianfeng, Chen Junping, Wang Jiexian. The Research of Real-Time Fast Positioning based on RTK/PPP Loose Combination Filtering[Z]. 20205.(杨乾峰, 陈俊平, 王解先, 等. 基于RTK/PPP松组合滤波的实时快速定位研究[Z]. 中国四川成都: 20205.)
- [2] Li Z, Liu J, Yang F, et al. A Bayesian Density Model Based Radio Signal Fingerprinting Positioning Method for Enhanced Usability[J]. Sensors (Basel, Switzerland). 2018, 18(11): 4063.
- [3] Xie B, Tan G, Liu Y, et al. LIPS: A Light Intensity Based Positioning System For Indoor Environments[J]. 2014.
- [4] Q. T, K. I K W, Z. S. Human Body Shadowing Effect on UWB-Based Ranging System for Pedestrian Tracking[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019, 68(10): 4028-4037.
- [5] Kuang J, Niu X, Chen X. Robust Pedestrian Dead Reckoning Based on MEMS-IMU for Smartphones[J]. Sensors (Basel, Switzerland). 2018, 18(5): 1391.
- [6] Chen X, Chen Y, Cao S, et al. Acoustic Indoor Localization System Integrating TDMA+FDMA Transmission Scheme and Positioning Correction Technique[J]. Sensors (Basel, Switzerland). 2019, 19(10): 2353.
- [7] Ruotsalainen L, Kirkko-Jaakkola M, Chen L, et al. Multi-sensor slam for tactical situational awareness[Z]. North Coast Media, LLC, 2016: 27, 69.
- [8] Boccardi F, Heath R W, Lozano A, et al. Five disruptive technology directions for 5G[Z]. New York: IEEE, 2014: 52, 74-80.
- [9] Liu Jingbin, Zhao Zhibo, H. U. Ningsong, et al. Summary and Prospect of Indoor High-Precision Positioning Technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. 2022,

- 47(7): 997-1008.(柳景斌, 赵智博, 胡宁松, 等. 室内高精度定位技术总结与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版). 2022, 47(7): 997-1008.)
- [10] Hei Mengna. Application of Multi-sensor Information Fusion Technology in UAV Height[D]. Xi'an University of Posts & Telecommunications, 2021.(黑梦娜. 无人机高度多传感器信息融合技术[D]. 西安邮电大学, 2021.)
- [11] Li Yanjie, Yang Yuanxi, He Hiabo. Effects Analysis of Constraints on GNSS/INS Integrated Navigation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. 2017, 42(09): 1249-1255.(李彦杰, 杨元喜, 何海波. 附加约束条件对GNSS/INS组合导航结果的影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版). 2017, 42(09): 1249-1255.)
- [12] Liu Wanke, Tao Xianlu, Zhang Chuanming, et al. Pedestrian Indoor and Outdoor Seamless Positioning Technology and Prototype System Based on Cloud-End Collaboration of Smartphone[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. 2021, 46(12): 1808-1818.(刘万科, 陶贤露, 张传明, 等. 云-端协同的智能手机行人室内外无缝定位技术及其原型系统验证[J]. 武汉大学学报(信息科学版). 2021, 46(12): 1808-1818.)
- [13] Li Bo. Research on Viaduct Environment Positioning and Identification Based on Low-Cost GNSS and Barometer[D]. East China Normal University, 2021.(李博. 基于低成本GNSS及气压计的高架桥环境定位与判别方法研究[D]. 华东师范大学, 2021.)
- [14] Sun Jianqiang, Shang Junna, Liu Xinhua. Barometer-assisted UWB indoor positioning method[J]. Transducer and Microsystem Technologies. 2021, 40(06): 30-33.(孙建强, 尚俊娜, 刘新华, 等. 气压计辅助的UWB室内定位方法[J]. 传感器与微系统. 2021, 40(06): 30-33.)
- [15] Cheng Zhangcai. Research on Indoor 3D Positioning Technology Based on the Fusion of Bluetooth and Barometer[D]. Central China Normal University, 2021.(成章才. 基于蓝牙与气压计融合的室内三维定位技术研究[D]. 华中师范大学, 2021.)
- [16] Fetzer T, Ebner F, Deinzer F, et al. Using Barometer for Floor Assignment within Statistical Indoor Localization[J]. Sensors. 2023, 23(1): 80.
- [17] Xiong Hanjiang, Guo Sheng, Zheng Xianwei, et al. Indoor Pedestrian Mobile Activity Recognition and Trajectory Tracking[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. 2018, 43(11): 1696-1703.(熊汉江, 郭胜, 郑先伟, 等. 室内行人移动行为识别及轨迹追踪[J]. 武汉大学学报(信息科学版). 2018, 43(11): 1696-1703.)
- [18] Teng Fan. Research on Floor Discrimination Method Based on Barometric Altimetry[D]. China University of Mining and Technology, 2019.(滕帆. 基于气压测高的楼层判别方法研究[D]. 中国矿业大学, 2019.)
- [19] Xu Yiyu, Chen Changfeng, Yuan Xuelin. GNSS spoofing jamming detection based on altimeter[J]. 2022: 1-13.(徐奕禹, 陈长风, 袁雪林, 等. 基于高度计辅助的GNSS欺骗干扰检测[J]. 系统工程与电子技术. 2022: 1-13.)
- [20] Xia Xiaolin. The Height Measurement System of Air Pollution Monitoring Based on Fusion Algorithm[J]. Environmental Science & Technology. 2014, 37(S1): 221-223.(夏晓玲. 基于融合算法的空气污染监测高度测量系统[J]. 环境科学与技术. 2014, 37(S1): 221-223.)
- [21] Bi Jingxue, Wang Yunjia, Zhen Jie. A Method of Indoor and Outdoor Scene Recognition Based on Mobile Phone and Its Preliminary Experiment[J]. Geography and Geo-Information Science. 2017, 33(03): 48-51.(毕京学, 汪云甲, 甄杰. 一种基于手机端的室内外场景识别方法及其初步实验[J]. 地理与地理信息科学. 2017, 33(03): 48-51.)
- [22] Fang Xingbo. Research on Indoor three-dimensional Positioning Algorithm Based on Pedestrian Dead Reckoning and Multi-sensor Fusion[D]. Hefei University of Technology, 2019.(房兴博. 基于行人航位推算和多传感器融合的室内三维定位算法研究[D]. 合肥工业大学, 2019.)
- [23] Lv Zhiping, Qiao Shubo. Basis of Geodesy[M]. Geodesy and Geoinformation Press, 2010.(吕志平, 乔书波. 大地测量学基础[M]. 测绘出版社, 2010.)
- [24] Yang Yuanxi. Main Progress of Adaptively Robust Filter with Applications in Navigation[Z]. 200911.(杨元喜. 自适应抗差滤波理论及应用的主要进展[Z]. 中国北京: 200911.)
- [25] P. S M, L. B P. State Estimation using Extended

- Kalman Filter and Unscented Kalman Filter[C]. 2020.
- [26] Da R. Failure detection of dynamical systems with the state chi-square test[J]. Journal of guidance, control, and dynamics. 1994, 17(2): 271-277.
- [27] Wang H, Li H, Zhang W, et al. Derivative-free Huber - Kalman smoothing based on alternating minimization[J]. Signal processing. 2019, 163: 115-122.
- [28] Xu Dandan , Bian Xiaochen. Analysis of RTK positioning accuracy in different scenarios[J]. ShanXi Architecture. 2023, 49(6): 185-188.(徐丹丹, 卞晓晨. RTK在不同场景下的定位精度分析[J]. 山西建筑. 2023, 49(6): 185-188.)
- [29] Huang He, Liu Yiheng, Zhao Xi. Multi-layer multi-source information fusion algorithm for hovering UAV height measurement[J]. Journal of Chinese Inertial Technology. 2018, 26(3): 316-322.(黄鹤, 刘一恒, 赵熙, 等. 多层多源信息融合旋翼无人机测高算法[J]. 中国惯性技术学报. 2018, 26(3): 316-322.)

网络首发:

标题: GNSS/气压计融合的室内外高程估计及室内楼层识别方法

作者: 陈永森, 柳景斌, 雷杰涛, 龚晓东, 黄格格

收稿日期: 2024-05-27

DOI:10.13203/j.whugis20230299

引用格式:

陈永森, 柳景斌, 雷杰涛, 等. GNSS/气压计融合的室内外高程估计及室内楼层识别方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,DOI: 10.13203/j.whugis20230299 (CHEN Yongsen, LIU Jingbin, LEI Jietao, et al. A Study of GNSS/Barometer Integrated Elevation Estimation and Floor Identification[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,DOI: 10.13203/j.whugis20230299)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

BDS/GPS 组合定位可靠性分析与粗差探测研究

柳景斌, 毛井锋, 吕海霞, 古富强, 李航

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(2): 214-223.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210522>

低成本毫米波雷达的室内自定位方法

柳景斌, 王泽民, 吕轩凡, 李维, 尹斐, 仇宏煜

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(9): 1399-1408.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210593>

同天线不同接收机的 GNSS-IR 雪深反演分析

陈亮宇, 安家春, 王泽民, 柳景斌, 屈小川

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1312-1321.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210710>