arXiv:2601.02184v1 [cs.RO] 5 Jan 2026

用于室内亚米级垂直定位与楼层识别的差分气压高度测量

张宇航[1] 和 S¨oren Schwertfeger[1], *

摘要—在复杂的多层环境中，准确的高度估计和可靠的楼层识别对于移动机器人定位与导航至关重要。本文提出一种稳健、低成本的垂直估计框架，将差分气压传感集成到完全兼容 ROS 的软件包中。我们的系统同时发布固定基站和移动传感器的实时高度数据，从而实现精准且无漂移的垂直定位。在封闭楼梯间和电梯等具有挑战性的场景中进行的实证评估表明，我们提出的气压处理流程可实现亚米级垂直精度（均方根误差：0.29 米）和完美的（100%）楼层识别。相比之下，我们的结果证实，仅依靠视觉或基于激光雷达的 SLAM 里程计获得的独立高度估计值，不足以实现可靠的垂直定位。因此，所提出的兼容 ROS 的气压模块为真实世界机器人部署中的稳健垂直感知提供了实用且经济高效的解决方案。我们的方法实现已作为开源项目发布于 https://github.com/witsir/differential-barometric。

I. 引言

A. 研究动机：室内机器人技术中的垂直感知

精准的高度估计和明确无歧义的楼层识别，是移动机器人在复杂室内环境中实现可靠定位与导航的基本前提。由于建筑本质上是三维空间（由层叠的楼层、电梯、楼梯和坡道构成），仅在平面上进行导航（x, y）并不足够 [1], [2]。如果无法准确掌握自身的垂直状态，即当前所在楼层，机器人就可能加载错误的地图图层，从而引发严重的定位错误，最终导致任务失败。

因此，当代机器人导航框架（如 ROS 技术栈）会为每层楼分别维护二维占据栅格或语义楼层地图，并要求机器人在线识别当前所在楼层，以便正确切换地图 [3]。即使是分层地图或体素化三维地图等复杂的多楼层表示方式，仍然依赖准确的高度线索来检测楼层转换并保持全局一致性 [1], [4]–[6]。同样，采用平面约束的 SLAM 系统必须纳入明确的垂直感知机制；否则，未被察觉的高度变化（例如通过楼梯或电梯）会导致地图错位和累积漂移 [5], [7]。通常，机器人定位，尤其是在处理机器人绑架问题时，若能获得线索或初始估计，便有助于提高计算速度和准确性 [8]。

实证研究证实，在楼层间移动时，高度估计和离散楼层检测中的误差会持续降低定位质量并损害地图完整性，进而导致服务和物流部署中影响任务成败的故障 [1], [2]。因此，垂直感知并非单纯的功能增强，而是确保室内机器人可靠运行的核心能力。

B. 室内垂直方向估计的气压计及气压计增强方法

稳健的垂直定位需要能够限制漂移、提供绝对参考，并利用许多最先进系统用来进一步提升最终精度的低成本气压线索。本节将现有垂直估计方法归纳为四种代表性方法。

1）气压测高与楼层判定：单个传感器气压计将气压转换为高度，但会受到暖通空调（供暖、通风与空调）引起的漂移以及手机偏移的影响 [9], [10]。稳健的方法利用参考气压计——包括双节点 [11] 或众包基站 [12]——以及概率楼层模型 [13], [14]。据报道，校准后的均方根误差（RMS）低于 0.3 米，这使气压测量成为实现垂直先验所需基础设施最少的方案。

2）惯性与视觉辅助预测：仅依靠惯性测量单元（IMU）双重积分会迅速发散；模式特定重置（例如楼梯或电梯检测）可将典型垂直行程中的漂移限制在几米以内 [15]。在扩展卡尔曼滤波（EKF）或因子图框架中融合气压计，可进一步将垂直漂移限制在厘米量级 [16]。在短距离室内飞行中，直接光流与 IMU 结合也能在无需外部先验的情况下实现低偏差高度估计，均方根误差约为 2.5 厘米 [17]。对于长距离或多楼层场景，单目视觉惯性里程计系统（例如 VINS-MONO [18]）可以优化视觉尺度，尤其是在融合气压测量值时。

3) 射频辅助高度定位：超宽带三维定位在视距条件下可达到厘米级精度；将其 Z 轴输出与气压计相结合，可抵消缓慢的大气漂移 [11]。Wi-Fi/蓝牙低功耗指纹定位在开阔大厅中符合 FCC E911[1] 垂直定位要求，但在楼梯间的性能会下降；加入气压计集群（BarFi）可提升楼层

*通讯作者。

[1]所有作者均来自智能感知与人机协同重点实验室——上海科技大学、教育部，中国。 {zhangyh12024, soerensch}@shanghaitech.edu.cn

[1]指美国联邦通信委员会 E911 垂直位置精度规定，该规定要求在 80% 的情况下，Z 轴定位的均方根误差小于 3 米。

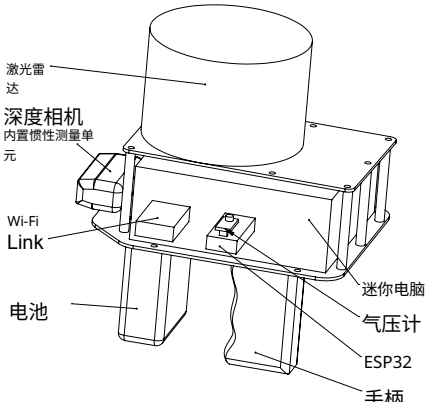

图1. 我们实验中使用的定制同步定位与建图设备。

识别率至 > 95%（适用于异构设备） [12],[19]。这些射频或射频—气压混合方案能够达到足以满足许多实际机器人应用需求的精度。

4) 带高度约束的几何*SLAM*：视觉/基于激光雷达的SLAM可提供度量结构，但沿重力方向会产生漂移，尤其是在纹理稀少的井道中。引入天花板/地板平面因子 [5] 或离散地板先验 [4] 可稳定 Z 轴，无需进行代价高昂的闭环检测。此外，Dubois等人（2024年）的最新研究展示了一种新颖方法，将气压高度约束紧密集成到基于ICP的SLAM后端中，在约束不足的环境中将垂直漂移降低约84% [20]。该研究首次提供了有力证据，表明在优化后端中进行紧密融合时，气压计–SLAM耦合能够显著抑制 Z轴漂移。

C. 现有垂直高度估计方法的局限性

尽管取得了显著进展，当前的室内高度估计技术仍面临若干障碍，这些障碍与第 I-B 节中的分类密切相关，但并不完全对应。

1) 对基础设施的依赖，以及在垂直通道中的鲁棒性有限： 射频方法（包括超宽带、蓝牙低功耗信标和 Wi-Fi RSS/CSI 指纹定位）依赖预先安装的锚点或足够密集的接入点（AP）网格。Wi-Fi 指纹定位需要进行大规模现场勘测，以便将 RSSI 值与真实位置关联起来。系统还需要通过离线阶段建立指纹数据库。稀疏的 AP 布局或临时部署会增加成本，而且楼梯间和电梯井往往覆盖不足。即使具备基础设施，这些封闭空间中的严重多径效应和信号遮挡也会使 Z 轴精度降至未经验证的水平 [11], [19],[21], [22]。

2) 楼梯间和电梯轿厢中的视觉/激光雷达 *SLAM* 验证不足：尽管基于视觉和激光雷达的 SLAM 在开放式走廊中展现出亚分米级性能，但很少有研究在狭窄、重复性高或光照不足的垂直通道中给出系统性结果。对比评估显示，在纹理稀少的井道中，单目方法会出现明显漂移；而在缺乏闭环检测的长玻璃走廊中，激光雷达也会出现显著漂移闭环检测 [5], [23], [24]。涵盖此类场景的严谨公开数据集仍然十分稀缺。

3) 缺乏联网基站气压计解决方案： 一些商用传感器（例如 MEMS 惯性测量单元）可能内置气压计，但现有软件栈只提供本地气压读数。将移动气压计连接到远程参考气压计，从而利用压差得出绝对高度这一关键步骤，鲜有产品能够开箱即用地支持。现有开源示例仅提供零散的驱动程序或特定平台脚本，却没有轻量级跨平台框架，能够通过统一的 ROS 接口同时发布基站气压和移动端气压。因此，在开展任何现场部署或公平比较之前，实践者都必须自行设计硬件和通信层[9], [13], [16]。

4) 评估协议零散且缺少跨模态基准测试：许多研究仅在有限条件下评估单一模态，阻碍了在相同垂直场景（如电梯、消防楼梯间）中对不同传感器进行客观比较。楼梯间和电梯是室内机器人必须感知并应对垂直运动的两类主要场景。因此，对任何垂直感知流程进行完整评估，都应衡量这两类场景中的联合误差。缺少标准化数据集、指标和即插即用评估脚本，妨碍了可复现的基准测试，也减缓了相关技术的采用。

总而言之，这些不足促使我们构建一个具备垂直感知能力、对基础设施依赖较少的框架——提供可直接集成到现有机器人系统中的代码，并在具有挑战性的垂直环境中进行严格评估。

D. 我们的贡献

为解决上述局限，本文作出以下贡献：

- 我们设计并实现了一个 ROS 即插即用气压计/Wi-Fi 高度估计模块。该模块由一套低成本硬件（气压传感器和兼容 Arduino 的开发板）以及一个 ROS 节点组成，后者将高度估计值作为标准 ROS 话题发布。这些组件集成在一个小型同步定位与建图单元中，如图1所示。此外，系统可通过互联网连接到基准气压观测站，利用已知的基准高度，为机器人导航和定位任务提供高度信息，例如机器人会话间歇或处于机器人绑架情形时。该模块无需重构代码即可集成到任何现有 ROS 系统中，直接弥补了可复现性和集成方面的不足。

- 我们在完全封闭的四层楼梯间和电梯井中，对基于视觉的同步定位与建图、基于激光雷达的同步定位与建图、Wi-Fi 指纹定位以及基于气压计的方法进行了一系列实证评估，在受控条件下并列定量比较它们的高度估计和楼层检测性能。我们

我们搭建了图1所示的手持式装置式同步定位与建图设备，用于开展所有这些实验。

II. 相关工作

利用气压计对室内机器人进行垂直定位的研究可分为三个方向：*(i)* 单气压计高度变化检测、*(ii)* 差分气压测量与多传感器融合，以及*(iii)* 以机器人为中心的框架，这些框架会在电梯和楼梯间评估气压计。我们回顾了具有代表性的机器人学文献，并指出本研究提出的即插即用、基站参考气压计方案旨在填补的空白。

A. 单气压计楼层转换检测

早期的地面机器人搭载单个压力传感器，以此¨划分多层地图。Ozkil等人利用气压突变，在医院机器人更换楼层时初始化新的二维地图层 [25]。Li等人报告称，单个气压计的均方根误差达到米级，但也指出，相对气压仍足以触发离散的楼层标签 [9]。最近，Jung等人将气压计集成到 MUNES 规划器中，使其能够在多楼层激光雷达导航过程中识别楼梯和电梯，但高度仍以机器人起始位姿为相对基准 [1]。这些研究证实，机载气压计能够有效检测垂直方向上的楼层转换，但都无法在机器人初始化时提供绝对先验高度。

B. 差分气压测量与融合

差分方法以固定气压计为参考，以抵消大气漂移。Bao等人将双气压计与超宽带融合，在视距实验室中实现了 $\pm$5cm 的垂直均方根误差 [11]。Fetzer 等人在粒子滤波器中结合相对气压、Wi-Fi 和惯性测量单元，并在三栋建筑中展示了 < 0.3m 的楼层分配误差——但其代码面向 Android，而非 ROS [13]。Hager 等人将基站—移动端气压计对与惯性测量单元分类器集成到室内导航栈中，以区分电梯、自动扶梯和楼梯 [15]。FLOORPAIR [26]和 BarFi [12] 等智能手机系统通过差分气压地图实现了 > 95 % 的楼层识别准确率，但目前尚无面向机器人的评估。

C. 以机器人为中心的电梯与楼梯间评估

由于特征稀疏且信号易受遮挡，电梯和消防楼梯对激光雷达、视觉和射频定位而言一直极具挑战性。Jung 等人对电梯运行中的激光雷达 SLAM 进行了基准测试，但未量化垂直误差 [1]。Hager等人报告了气压计与惯性测量单元在电梯内的性能

但未发布 ROS 软件包 [15]。据我们所知，尚无先前研究提供可直接用于 ROS 的节点，该节点能够 (i) 从系统启动时起，持续输出以基准气压计为参考的无漂移高度；并且 (ii) 发布离散的楼层标签，同时在电梯和封闭楼梯间中进行验证。

D. 总结

现有机器人学文献证实，气压计在检测楼层转换方面表现出色，差分气压测量可达到分米以下的精度，但现有实现要么以手机为中心，要么需要手动校准。目前尚无开源的、

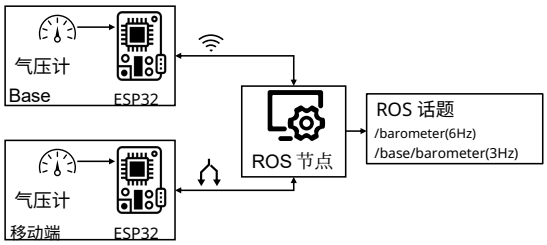

图 2. 差分气压计 ROS 软件包的数据管道。

即用型 ROS 解决方案能够提供以基准为参考的高度和楼层 ID。我们的工作填补了这一空白，发布了一个即插即用的 ROS 模块，可与联网基准气压计通信，在启动时提供绝对高度，并在对室内机器人最关键的两种垂直通道——电梯和楼梯间——中实现米以下的精度。

III. 方法

图 2 展示了 ROS 节点如何连接两个气压计并发布其数据。

A. 气压-高度映射（国际标准大气对流层）

对于基准气压计和移动气压计，我们使用国际标准大气（ISA）对流层模型将气压转换为几何高度：

$$h(P,T) = \frac{T}{L}\left[1 - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\kappa}\right], \qquad \kappa \triangleq \frac{RL}{g} \approx 0.1903, \quad (1)$$

其中，T 为绝对温度，$L = 0.0065\text{K m}^{-1}$、$R = 287.05\,\text{Jkg}^{-1}\,\text{K}^{-1}$、$g = 9.80665\text{m s}^{-2}$，$P_0$ 为通过公共气象 API 获取的当前海平面参考气压。

将公式 (1) 应用于基准传感器（b）和移动传感器（m）可得

$$h_b = f(P_b, T_b), \qquad h_m = f(P_m, T_m), \qquad (2)$$

其中 $f(\cdot) \equiv h(\cdot)$ 如式（1）所定义。由于两个高度共用相同的 P_0，相减后绝对气压偏差会抵消，从而得到机器人相对于地面的相对高度：

$$\Delta h = h_m - h_b. \qquad (3)$$

B. 多个气压计的相对校准

当 N 个气压计共置于同一水平面时，理想情况下它们的读数除噪声外应完全一致。但实际上，制造公差会引入传感器特定的常量偏移。因此，我们利用两天的共址数据进行仅偏移量的相对校准。

*1)*预处理与时间对齐：令 $\{p_i(t)\ T_i(t)\}$表示传感器 $i \in \{1,\ldots,N\}$ 在时间 t的原始气压和温度。我们通过将每个数据流重采样至 $\Delta = 30$ 秒并取平均，构建均匀网格 $\mathcal{T} = \{t_1,\ldots,t_M\}$，然后对各传感器的数据执行内连接。

为抑制脉冲伪影，我们丢弃不符合实际跳变阈值的时间戳：

$$\mathcal{T}' = \Big\{ t_m \in \mathcal{T} : \ |p_i(t_m) - p_i(t_{m-1})| \le 1\,\mathrm{hPa}, \\ |T_i(t_m) - T_i(t_{m-1})| \le 1^\circ\mathrm{C},\ \forall i \Big\}, \quad (4)$$

从而得到 $M' = |\mathcal{T}'|$ 对齐样本。

*2)*偏移模型和估计：在所有传感器并置且共享相同环境条件的情况下，我们建立模型

$$\begin{aligned} p_i(t) &= p^\star(t) + \beta_i^{(p)} + \varepsilon_i^{(p)}(t), \\ T_i(t) &= T^\star(t) + \beta_i^{(T)} + \varepsilon_i^{(T)}(t), \end{aligned} \qquad t \in \mathcal{T}', \quad (5)$$

其中，$p^\star(t)$ 和 $T^\star(t)$ 是共同的（随时间变化的）信号，$\beta_i^{(p)}$ 和 $\beta_i^{(T)}$ 是时不变偏移，$\varepsilon_i^{(\cdot)}(t)$ 是零均值噪声。为保证可辨识性，我们通过施加以下约束来固定规范

$$\sum_{i=1}^{N} \beta_i^{(p)} = 0, \qquad \sum_{i=1}^{N} \beta_i^{(T)} = 0. \quad (6)$$

我们通过约束最小二乘估计 $\{p^\star(t)\}$和 $\{\beta_i^{(p)}\}$:

$$\min_{\{p^\star(t)\},\{\beta_i^{(p)}\}} \sum_{t\in\mathcal{T}'} \sum_{i=1}^{N} \big(p_i(t) - p^\star(t) - \beta_i^{(p)}\big)^2 \ \text{s.t. (6)}, \quad (7)$$

温度也采用类似方法。正规方程存在闭式解：

$$\hat{p}^\star(t) = \tfrac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} p_i(t), \qquad \hat{\beta}_i^{(p)} = \tfrac{1}{M'}\sum_{t\in\mathcal{T}'} \big(p_i(t) - \hat{p}^\star(t)\big) \quad (8)$$

$$\hat{T}^\star(t) = \tfrac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} T_i(t), \qquad \hat{\beta}_i^{(T)} = \tfrac{1}{M'}\sum_{t\in\mathcal{T}'} \big(T_i(t) - \hat{T}^\star(t)\big) \quad (9)$$

方程 (8)–(9) 准确地完成了以下操作：(i) 对每个时间戳的各个传感器读数取平均，形成参考值；(ii) 对每个传感器相对于该参考值的偏差进行时间平均，从而得到一个恒定偏移。

校准读数及其在 *ISA* 中的应用：在运行过程中，我们减去学习得到的偏移，以获得校准序列

$$\tilde{p}_i(t) = p_i(t) - \hat{\beta}_i^{(p)}, \qquad \tilde{T}_i(t) = T_i(t) - \hat{\beta}_i^{(T)}. \quad (10)$$

~ ~所有高度计算均将 (P, T) 代入 (1)。具体而言，对于 (3) 中使用的基站/移动端对，

$$\Delta h = h\big(\tilde{P}_m, \tilde{T}_m\big) - h\big(\tilde{P}_b, \tilde{T}_b\big), \quad (11)$$

这会消除公共的 P_0 偏差以及在式（8）–（9）中估计的传感器特定加性偏差。为便于报告，我们将其记为

$$\begin{aligned} \texttt{pressure_offset}_i &\triangleq \hat{\beta}_i^{(p)}\ [\mathrm{hPa}], \\ \texttt{temperature_offset}_i &\triangleq \hat{\beta}_i^{(T)}\ [^\circ\mathrm{C}]. \end{aligned} \quad (12)$$

C. 楼层索引

给定测得的楼层高度 $\{H_k\}$，我们通过最近邻分配计算楼层索引：

$$\ell = \arg\min_k \big|\Delta h - H_k\big|. \quad (13)$$

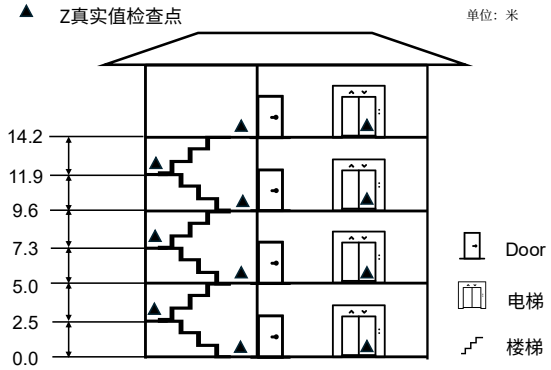

图 3. 实验环境示意图。数据采集轨迹涵盖了沿多层楼梯间完整上行，随后乘电梯下行。

D. 对 *ISA* 常数的敏感性

使用默认 ISA 常数（$L,\ R,\ g$）会使相对高度估计 Δh 在我们的工作范围内产生不到 2 厘米的偏差，远低于传感器的噪声底，因此当系统输出高度差时，无需对（$L,\ R,\ g$）进行精确校准。不过，式（8）–（9）中的校准偏移量可能会因传感器老化或磨损而随时间漂移，因此应定期重新估计，以保持精度。

IV. 实验设置

A. 硬件与设备

我们搭建了一套手持式SLAM设备，如图1所示。该设备集成了Intel RealSense D435i RGB-D相机，可提供同步的彩色与深度帧，并配有板载惯性测量单元，用于测量加速度计和陀螺仪数据。设备上安装了一台Velodyne VLP-16激光雷达（16通道），用于以10 Hz的频率采集三维点云。设备由TB47S电池组供电，运算则由ASUS P N53超紧凑型迷你电脑负责。该系统支持连续记录数据约三小时。ESP32开发板通过串行电缆连接，用于以约6 Hz的频率读取气压传感器数据。另配有EDUP EP-AC1681适配器，作为Wi-Fi采集终端。该设备还支持直接测量设备与其定位平面之间的垂直偏移量。我们使用卷尺在楼梯平台和到达平台进行实地测量，以获取真实高度，如图3所示，并将这些位置标记为Z真实值检查点。

B. 环境与数据集

为在真实条件下全面评估我们提出的方法，我们在一栋多层学术建筑内采集了一个定制数据集，测试区域由楼梯间及其相邻的电梯厅组成，如图 3 所示。该环境带来了诸多显著挑战，例如照明不足、Wi-Fi 覆盖有限、结构模式重复以及低纹理表面等。在电梯轿厢内，由于传感器与周围环境之间缺乏可观测的相对

运动，SLAM系统往往会失效，因为这违背了基于特征的定位的基本假设。因此，必须仅依靠气压和基于 Wi-Fi 的方法来估计垂直位移。

1）楼梯间数据采集：数据采集从一楼预先设定的起始点（即检查点 1）开始，经由楼梯间上行至四楼。在上行过程中，传感器记录了同步数据流，包括单目 RGB 图像、深度图像、激光雷达点云、气压（包括基准气压计）以及 Wi-Fi RSSI 值。为获取可靠的真实高度测量值，我们确保准确测得路线中每个检查点的高度；这些检查点包括三个楼层间平台和四个主楼层平台。通过直接实地测量并结合已知的建筑几何结构（层高和楼层间平台高度），我们精确计算出这些参考点的真实垂直位置。

2）电梯数据采集：电梯序列从四楼楼梯数据采集后的下一个检查点开始。进入电梯后，我们依次触发每层的楼层停靠请求，并在每次停靠时记录传感器数据和真实测量值。

3)Wi-Fi 数据采集：使用 Wi-Fi 指纹进行垂直定位包括两个不同阶段：离线指纹映射阶段和在线定位阶段。首先，沿实验轨迹，在具有已知垂直位置的预定义参考点处记录接收信号强度指示器（RSSI）值，以构建 Wi-Fi 指纹数据库。随后，在在线定位阶段，将未知位置处记录的 RSSI 模式与该数据库进行匹配，以估计离散垂直位置（例如特定楼层）。需要指出的是，本文中的基于 Wi-Fi 的定位本质上提供的是离散的楼层级估计，而非连续的高度测量值，因此其主要用于粗略的楼层识别，而不是精确的高度跟踪。

所有传感器数据流——包括单目 RGB 图像、深度测量值、点云、气压读数和 Wi-Fi RSSI 测量值——均通过 ROS 节点记录，并序列化为 ROS 包文件。该方法确保了数据的精确同步，并便于后续分析。

C. 实现细节

我们实现了一套全面的感知、通信和处理流程，以确保在所有实验场景中实现一致的数据采集和准确的高度估计。下面，我们将详细介绍气压和 Wi-Fi 子系统、基于视觉和激光雷达 SLAM 的高度估计方法，并讨论平台特定因素。

1) 气压子系统：我们为固定基准节点和移动平台均选用了低成本的 HP206C 气压计。我们开发了两个嵌入式软件模块：

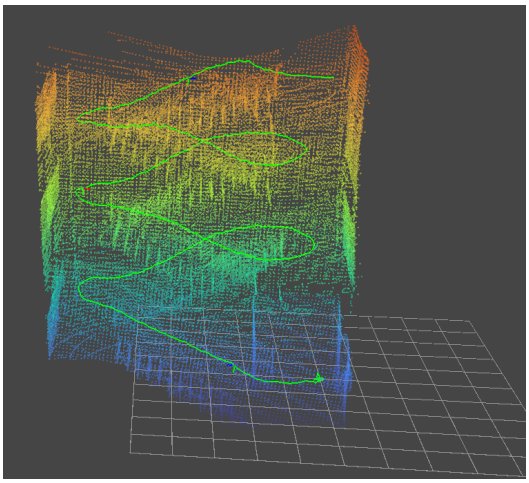

图 4. GLIM 生成的带有轨迹的三维点云。

(i) 基准节点通过无线网络持续广播气压读数，其中包含时间戳、温度和压力值；(ii) 移动节点通过串行通信传输气压测量值。移动平台上的专用 ROS 节点会将这些数据流转换为标准化的 ROS 主题（/base/barometer，频率为 3 Hz；/barometer，频率为 6 Hz），并发布温度、压力和高度。

2）*Wi-Fi*子系统：使用 EDUP EP-AC1681适配器采集 Wi-Fi RSSI数据。我们开发了两个专用的 ROS 节点：第一个节点采集带有已知位置标签的初始 RSSI 测量值，以构建用于室内定位的指纹地图；第二个节点使用该指纹地图进行实时垂直（z 轴）定位。尽管生成了完整的三维定位数据，但我们仅使用垂直高度数据评估定位精度。

3）视觉与激光雷达高度估计：鉴于传感器成本、尺寸和实用性方面的差异，我们分别评估了基于视觉和基于激光雷达的方法。对于基于视觉的高度估计，我们使用 RealSense D435i 运行 ORB-SLAM3 [7]。基于激光雷达的高度估计则使用 GLIM [27] 单独进行。我们将每种估计方法输出的高度分别与真值数据进行比较。

D. 结果与分析

表I和图5总结了四种处理流程在封闭楼梯间和电梯场景中的垂直估计性能。需要强调的是，在本研究中，同步定位与建图仅用作高度估计的工具；地图构建精度和闭环性能评估不在本研究的范围内。

1）借助基站气压计进行高度估计：联网基准气压计提供参考气压时，移动气压计的均方根误差为 0.29 米

表I 垂直估计误差（均方根误差）与楼层检测准确率对比

方法	均方根误差（米）	楼层检测准确率（%）
气压计	**0.291**	**100**
基于激光雷达的SLAM	3.480	–
基于视觉的同步定位与建图	3.718	–
Wi-Fi	–[a]	81.8

[a]由于 Wi-Fi 估计值为离散值，因此未报告均方根误差。

在四层楼的范围内。测试建筑的层高为 2.3 米；该误差比楼层间距离小一个数量级，因此在楼梯间和完全封闭的电梯内，楼层检测的正确率均达到 100%。这一结果印证了先前关于差压补偿后漂移低于分米级的报告 [13], [14]，并表明单个低成本传感器即可轻松满足 FCC E911 3 米垂直定位要求。

2) 视觉与激光雷达 *SLAM* 里程计：ORB-SLAM3（RGB-D + 惯性测量单元）和 GLIM（激光雷达 +惯性测量单元）在楼梯间生成了几乎重叠的高度轨迹（图5），这与两种系统均依赖 RealSense 惯性单元进行 Z 速度积分的情况一致。在狭窄的楼梯间内，设备沿近似螺旋路径移动，产生的横向视差有限。我们使用 GLIM 生成楼梯场景中的三维点云及轨迹，如图4所示。因此，单目深度尺度（ORB-SLAM3）和 ICP 配准（GLIM）在重力轴方向上约束不足，微小的惯性测量单元偏差或时间同步误差会累积成米级偏差。每隔半层便会重复出现楼梯立板、扶手和白墙，从而导致视觉特征匹配存在歧义，并使激光雷达生成近似平面的点云。已知这两种情况都会导致位姿图退化，并使垂直分量产生偏差 [23], [24]。电梯是典型的 SLAM 难以适用的环境。在封闭的轿厢内，传感器无法观测外部几何结构，因而无法跟踪相对运动。

3) Wi-Fi 指纹定位： 在防火门完全关闭的条件下构建的指纹地图仅包含八个不同的参考点。在测试过程中，当接入点信号受到严重衰减时，尤其是在楼梯间内，楼层级精度达到 81.8%。RSSI 匹配的离散值特性无法实现楼层内分辨率，这证实了仅依靠 Wi-Fi 不足以在射频屏蔽竖井中进行细粒度的高度跟踪。

4) 比较分析：气压计方案的均方根误差比其他所有模态低一个数量级以上，同时保持了 100% 的楼层识别率。基于 SLAM 的方法虽有助于水平里程计，但在视觉或几何特征退化的空间中，无法可靠地推断高度，因此不能作为楼层检测的独立方案。Wi-Fi 指纹定位可提供粗略的楼层线索，但对接入点密度和封闭程度高度敏感。这些结果凸显了我们的

[2]在实验中，我们还在所有楼梯的中间平台区域标记了检查点。相邻检查点之间的最小垂直距离为 2.3 米。

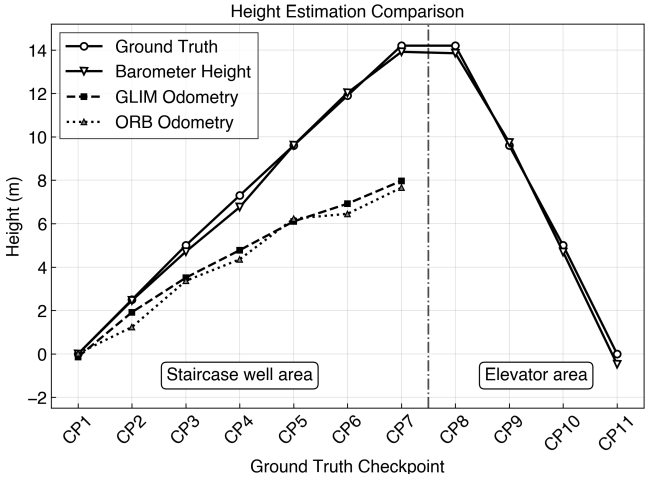

图 5. 楼梯（CP1–CP7）和电梯（CP7–CP11）场景中的高度估计轨迹。

ROS 气压计服务的实用性：它可作为即插即用的垂直传感器，供在多层建筑中运行的移动机器人使用，尤其适用于射频基础设施稀疏且视觉特征不可靠的环境。

V. 结论

本研究针对室内机器人稳健的垂直（高度和楼层）估计，重点关注一种低成本的差分气压传感方案。我们提出了一个兼容 ROS 的框架，可发布实时高度和基准参考话题，从而实现与现有机器人系统的无缝集成。在具有挑战性的垂直环境——封闭楼梯间和电梯——中的实验结果表明，与视觉 SLAM、激光雷达里程计和 Wi-Fi 指纹定位在可比条件下的表现相比，我们的气压计方法能够提供无漂移的亚米级垂直精度和可靠的楼层识别，清晰地展现出其优势。

未来的工作将着重于利用滤波框架（例如扩展卡尔曼滤波）融合气压数据和惯性测量单元数据，以进一步提高垂直精度；同时，将气压约束直接紧密集成到 ROS 中基于图的SLAM后端，从而增强系统在复杂室内部署环境中抵抗垂直漂移的能力。

VI. 致谢

本研究中的实验得到了上海科技大学信息科学与技术学院（SIST）计算机科学与通信核心设施平台的支持。

参考文献

[1] D. Jung, C. Kim, J. Cho, and S. Kim, 《Munes：包含电梯和楼梯的多楼层导航》，*arXiv*预印本 *arXiv:2402.04535*，2024年。[2] C. Wang, L. Meng, S. She, I. M. Mitchell, T. Li, F. Tung, W. Wan, M. Q.-H. Meng, and C. W. de Silva, 《不平整、非结构化室内环境中的自主移动机器人导航》，*arXiv*预印本 *arXiv:1710.10523*，2017年。[3] J. Palac´ın, R. Bitri´a, E. Rubies, and E. Clotet, 《基于二维激光雷达的自主移动机器人远程操控电梯乘坐流程》，*Sensors*，第23卷，第13期，第6089页，2023年。

[4] M. Karg, K. M. Wurm, C. Stachniss, K. Dietmayer, and W. Burgard, 《通过在基于图的同时定位与地图构建中引入全局约束，实现多层建筑的一致性地图构建》，载于《2010 IEEE机器人与自动化国际会议》，2010年，第5383–5388页。[5] X. Wei, J. Lv, J. Sun, and S. Pu, 《Ground-SLAM：面向结构化多层环境的地面约束激光雷达同步定位与建图》，arXiv预印本 arXiv:2103.03713，2021年。[6] Z. Shan, R. Li, and S. Schwertfeger, 《用于地面机器人的RGB-D惯性轨迹估计与地图构建》，Sensors，第19卷，2251，2019年10月，第？期，第？页。[7] C. Campos, R. Elvira, J. G´omez Rodr´ıguez, J. Montiel, and J. Tard´os, 《ORB-SLAM3：用于视觉、视觉惯性和多地图同步定位与地图构建的高精度开源库》，arXiv预印本 arXiv:2007.11898，2020年。[8] F. Xie and S. Schwertfeger, 《利用区域图实现稳健的室内激光雷达终身定位》，IEEE机器人与自动化快报，第9卷，第1期，第531–538页，2023年。[9] B. Li, B. Harvey, and T. Gallagher, 《利用气压计确定室内定位的高度》，载于《室内定位与室内导航国际会议论文集（IPIN）》，法国蒙彼利埃，2013年。[10] K. Tsubouchi, Y. Hirayama, T. Ikuta, and N. Nishio, 《提升智能手机室内海拔估计精度：消除通风风扇效应》，载于《2023年第13届室内定位与室内导航国际会议（IPIN）》。IEEE，2023年，第1–7页。[11] L. Bao, K. Li, J. Lee, and W. Zhang, 《一种基于超宽带测距与双气压计测高、结合传感器融合的增强型室内三维定位系统》，Sensors，第24卷，第11期，第3341页，2024年。[12] X. Shen, Y. Chen, J. Zhang, L. Wang, G. Dai, and T. He, 《BarFi：利用众包实现气压计辅助的Wi-Fi楼层定位》，载于《第12届IEEE移动自组织网络与传感器系统国际会议论文集（MASS）》，美国德克萨斯州达拉斯，2015年，第416–424页。[13] T. Fetzer, F. Ebner, F. Deinzer, and M. Grzegorzek, 《利用气压计进行统计式室内定位中的楼层判定》，Sensors，第23卷，第1期，第80页，2023年。[14] H. Xia, X. Wang, Y. Qiao, J. Jian, and Y. Chang, 《利用多个气压计检测配备内置气压传感器的智能手机所在楼层，实现室内定位》，Sensors，第15卷，第4期，第7857–7877页，2015年。[15] P. Hager, S. Kaiser, and C. Gentner, 《气压计驱动的室内定位高度估计，包括电梯和自动扶梯检测机制》，载于《IEEE/ION定位、位置与导航研讨会论文集（PLANS）》，美国犹他州盐湖城，2025年。[16] A. M. Sabatini and V. Genovese, 《基于惯性测量与气压高度计测量的垂直速度和高度跟踪传感器融合方法》，Sensors，第14卷，第8期，第13 324–13 347页，2014年。[17] P. Chirarattananon, 《基于单目视觉和惯性测量单元测量的直接光流逆向飞行高度估计策略》，Bioinspiration & Biomimetics，第13卷，第3期，第036004页，2018年。[18] T. Qin, P. Li, and S. Shen, 《VINS-MONO：一种稳健且通用的单目视觉惯性状态估计器》，IEEE机器人学汇刊，第34卷，第4期，第1004–1020页，2018年。[19] R. Mundlamuri, D. Inupakutika, and D. Akopian, 《SDR-Fi-Z：一种基于无线局域网指纹识别的室内定位方法，满足E911垂直精度要求》，Sensors，第25卷，第3期，第823页，2025年。[20] W. Dubois, N. Samson, E. Daum, J. Laconte, and F. Pomerleau, 《压力之下：高度计辅助ICP实现三维地图一致性》，arXiv预印本，卷号arXiv:2410.00758，2024年10月。[21] L. Bao, K. Li, J. Lee, W. Dong, W. Li, K. Shin, and W. Kim, 《一种基于超宽带测距与双气压计测高、结合传感器融合的增强型室内三维定位系统》，Sensors，第24卷，第11期，第3341页，2024年。[22] R. Marjasz, K. Grochla, and K. Połys, 《一种面向多建筑环境垂直定位的综合算法：室内楼层检测的改进方案》，Scientific Reports，第14卷，第1期，第14034页，2024年。[23] Y.-L. Zhao, Y.-T. Hong, and H.-P. Huang, 《移动机器人视觉同步定位与建图和激光雷达同步定位与建图的综合性能评估：理论与实验》，Applied Sciences，第14卷，第9期，第3945页，2024年。[24] Y. Cong, T. Xu, C. Chen, W. Nie, and B. Yang, 《利用多功能旋转式激光雷达系统进行高效多楼层室内地图构建》，国际摄影测量、遥感与空间信息科学档案，第48卷，第613–618页，2024年。[25] A. G. ¨Ozkil 等，《多层建筑地图构建：一种气压方法，”载于*IEEE*机器人与自动化国际会议论文集（*ICRA*），2011年。[26] C. Yi、W. Choi、Y. Jeon 和 L. Liu，“基于智能手机气压传感器的压力对楼层定位系统”，*Sensors*，第19卷，第16期，第3622页，2019年。[27] K. Koide、M. Yokozuka、S. Oishi 和 A. Banno，“GLIM：采用GPU加速扫描匹配因子的三维测距惯性定位与地图构建”，机器人与自主系统，第179卷，第104750页，2024年。