

# 头盔式激光扫描系统 WHU-Helmet

李健平, 杨必胜

(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:** 轻小型穿戴式激光扫描系统具有成本低、体积小、易操作的特点, 为室内外一体化三维地理信息获取提供了一种可行方案, 是传统移动测量系统的有效补充。相比现有手持及背包激光扫描系统, 基于头盔的观测平台与用户视线保持方向一致, 具有“所见即所得”的特点, 让作业人员双手得到了解放。以自主研发的头盔式激光扫描系统“WHU-Helmet”为对象, 设计了基于多尺度正态分布变换的 LiDAR-IMU SLAM 算法, 实现了在室内外环境无缝的实时三维点云数据获取。以两个典型室内外环境为实验区域(办公楼、地铁站), 将“WHU-Helmet”获取的三维点云与地面式激光扫描系统获取的三维点云对比, 平均误差小于 0.44 m, 均方根误差小于 0.23 m, 表明了头盔式激光扫描系统在室内外一体化三维测图中具有巨大的潜力。

**关键词:** 激光扫描; 广义点云; 三维测图; 实时定位与建图; 智慧城市

中图分类号: P232

文献标志码: A

## A Helmet-based Laser Scanning System for 3D Dynamic Mapping

LI Jianping, YANG Bisheng

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

**Abstract:** Compact wearable laser scanning system has the advantages of low cost, small volume and easy operation, which provides a feasible strategy for indoor and outdoor seamless 3D geographic information acquisition. It is an effective supplement to the traditional mobile measurement system. Compared with the existing handheld and backpack laser scanning system, the helmet-based platform keeps the same direction with the user's sight, with the characteristics of “What you see is what you get”, liberating user's hands. Using the self-designed

helmet-based laser scanning system, named “WHU-Helmet”, this paper proposes a multi-scale NDT based LiDAR-IMU SLAM. Taking two typical indoor and outdoor environments as the study area (office building and subway station), the 3D point clouds obtained by “WHU-Helmet” are compared with the 3D point clouds obtained by terrestrial laser scanning. The average error is less than 0.44 m and the root mean square error is less than 0.23 m, which demonstrated that the helmet-based laser scanning system has great potential in indoor and outdoor seamless 3D mapping.

**Key words:** laser scanning; ubiquitous point cloud; 3D mapping; SLAM (simultaneous localization and mapping); smart city

建设智慧城市需依靠室内外三维全空间地理信息数据为桥梁, 从而搭建现实物理世界与虚拟网络世界之间双向映射, 形成虚实结合的城市治理模式, 对提升我国城市可持续发展能力具有重要意义<sup>[1]</sup>。随着以摄影测量、激光扫描为代表的地理信息设备获取技术的发展, 点云已成为继二维影像和矢量地图之后的第三类时空数据, 是构建智慧城市重要基础<sup>[2, 3]</sup>。利用车载、机载、地面三维激光扫描为代表的移动测量技术, 可以快速获取大范围城市场景三维点云数据, 构建室外环境的数字三维模型<sup>[4]</sup>。而相对于室外环境, 室内环境由于 GNSS (Global Navigation Satellite System, 全球导航卫星系统) 信号拒止, 光照条件差导致环境特征分布复杂, 给现有 LiDAR (Light Detection and Ranging, 激光扫描) 系统准确、高效获取三维数据带来了巨大的挑战<sup>[5]</sup>。如何克服现有移动测量系统对导航信号的依赖, 提高设备在室内复杂环境中的数据获取精度与效率, 是

收稿日期: 2022-03-24

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金(41725005); 中国博士后科学基金(2022M712441)

第一作者: 李健平(1993—), 男, 工学博士, 主要研究方向为移动测量系统硬件集成, 多源数据融合。

E-mail: lijianping@whu.edu.cn

通信作者: 杨必胜(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为激光扫描与摄影测量, 点云处理, 空间智能。E-mail: bshyang@whu.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

学术界与工业界共同关注的热点<sup>[6-7]</sup>。

随着众源地理信息获取装备<sup>[8]</sup>以及 LiDAR SLAM (Simultaneous Localization and Mapping, 同时定位测图) 技术的快速发展<sup>[9]</sup>, 以穿戴式为代表的轻小型激光扫描系统具有成本低、体积小、易操作的特点, 可以便捷在通行受限区域获取三维点云数据, 为室内外一体化无缝三维地理信息获取提供了可行方案, 是传统移动测量系统的有效补充。现有穿戴式激光扫描设备, 如手持式<sup>[10]</sup>、背包式<sup>[11]</sup>等, 需要用户在作业过程中依据经验或设备反馈判断扫描范围, 难以保证三维点云的完整性, 导致作业效率较低。尤其在应急救援过程中, 施救人员需携带并操作救援装备, 难以再利用手持或背包设备对未知复杂三维环境进行探测, 导致实时三维空间信息缺失, 严重制约了救灾的效率和安全性。基于头盔的观测平台与用户视线保持方向一致, 具有“所见即所得”的优势, 解放了用户的双手, 已在单兵作战、应急搜救、AR、VR 等领域有了成功运用<sup>[12]</sup>。但目前尚基于无头盔平台的激光扫描系统在室内外三维数据获取方面的案例。因此, 本文以自主研发的头盔式激光扫描系统“WHU-Helmet”为研究对象, 设计基于多尺度正态分布变换的 LiDAR-IMU SLAM 算法, 并在典型室内外场景进行三维点云获取实验, 以验证头盔式激光扫描在室内外一体化三维测图中的精度与可行性。

## 1 WHU-Helmet 硬件组成与坐标系定义

本文研发的头盔式激光扫描系统硬件组成如图 1 所示, 系统中主要由四种传感组成: GNSS 接收机与天线, IMU (惯性测量单元), 固态激光雷达, 以及全局曝光相机。GNSS 接收机用于获取绝对地理位置以及时间基准信息, 当设备从室外移动到室内环境时, 系统将根据 GNSS 接收机播报的卫星颗数自动忽略定位信息, 仅利用参考时间信息保持系统高精度时间基准。系统中搭载的 MEMS (micro-electro-mechanical system) IMU, 用于积分短时间系统相对姿态与位置变化, 降低作业过程中剧烈运动对系统的影响。固态激光雷达和光学相机用于采集环境的几何与纹理信息。所有传感器都根据接收电信号触发信号进行严格时间同步<sup>[13]</sup>。

系统中主要涉及激光雷达坐标系( $F_L$ ), 载体坐标系( $F_B$ 与 IMU 三轴对齐), 局部制图坐标系( $F_M$ )。在  $t$  时

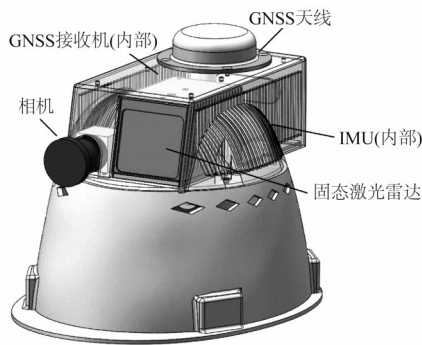


图1 头盔式激光扫描系统硬件描述

Fig.1 Hardware description of the helmet-based laser scanning system

刻, 需要估计的系统状态为  $x(t) = [r_B^M(t), v_B^M(t), q_B^M(t), b_a(t), b_g(t)]$ 。其中包括载体位置  $r_B^M(t)$ 、速度  $v_B^M(t)$ 、姿态四元数  $q_B^M(t)$  (对应旋转矩阵为  $R_B^M(t)$ )、加速度计零偏  $b_a(t)$ 、角速度计零偏  $b_g(t)$ 。在激光雷达中的一个观测点  $r_p^L$ , 可通过载体位置  $r_B^M(t)$  与姿态  $R_B^M(t)$ , 及激光雷达安置参数 (安置角  $R_L^B$ , 杆臂值  $r_L^B$ ), 根据式(1)将其投影至局部制图坐标系。激光雷达安置参数可根据标定场进行标定获取<sup>[14]</sup>。

$$r_p^M = R_B^M(t) R_L^B r_p^L + R_B^M(t) r_L^B + r_B^M(t) \quad (1)$$

## 2 基于多尺度正态分布变换的实时 LiDAR-IMU SLAM

本文提出的基于多尺度正态分布变换的实时 LiDAR-IMU SLAM 流程如图 2 所示。在获取到时间

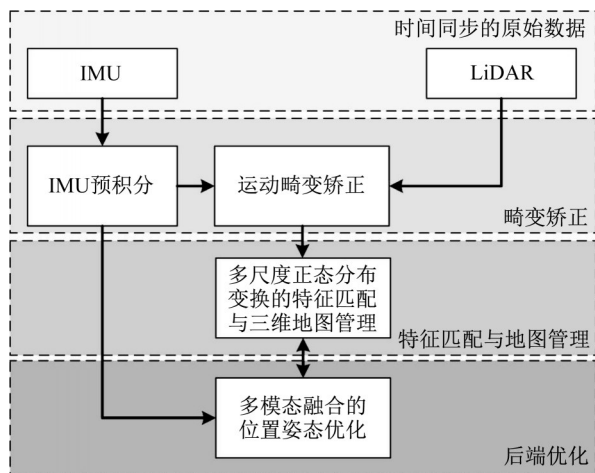


图2 多尺度正态分布 (NDT) 变换的实时 LiDAR-IMU SLAM 流程

Fig.2 Flowchart for the multi-scale real-time normal distributions transform (NDT) based LiDAR-IMU SLAM

同步的原始LiDAR及IMU数据后,本文提出基于多尺度正态分布变换的实时LiDAR-IMU SLAM,主要分为畸变矫正,特征匹配与地图维护,以及后端优化三个部分组成,详细步骤见图2。

### 2.1 IMU预积分与LiDAR运动畸变矫正

由于LiDAR连续扫描特性,第 $k$ 帧(一般为0.1s内的扫描数据) LiDAR数据存在由于剧烈运动导致的运动畸变效应,采用可利用单帧激光扫描时间内的IMU数据对系统运动进行补偿,将单帧内的点云数据转换至初始扫描位置,从而消除单帧激光扫描运动畸变。利用IMU获取运动补偿姿态采用预积分法<sup>[15]</sup>,对第 $k$ 帧激光采集时间 $\Delta t$ 的所有IMU数据进行建模。所有IMU数据按照式(2)~(4)进行建模:

$$r_B^M(t_{k+1}) = r_B^M(t_k) + v_B^M(t_k)\Delta t - \frac{1}{2}g^M\Delta t^2 + R_B^M(t_k)^\top \left( \underbrace{\int_{t \in [k, k+1]} [R_B^M(t_k)(\hat{a}(t) - b_a(t))] dt}_{\alpha_{k+1}^k} \right) \quad (2)$$

$$v_B^M(t_{k+1}) = v_B^M(t_k) - g^M\Delta t + R_B^M(t_k)^\top \left( \underbrace{\int_{t \in [k, k+1]} [R_B^M(t_k)(\hat{\omega}(t) - b_\omega(t))] dt}_{\beta_{k+1}^k} \right) \quad (3)$$

$$q_B^M(t_{k+1}) = q_B^M(t_k) \otimes \underbrace{\int_{t \in [k, k+1]} \left[ \frac{1}{2} \Omega(\hat{\omega}(t) - b_\omega(t)) \right] dt}_{\lambda_{k+1}^k} \quad (4)$$

式中: $\hat{a}(t)$ 、 $\hat{\omega}(t)$ 分别为加速度和角速度观测; $g^M$ 为重力加速度; $\Omega(\bullet)$ 为轴角到纯虚四元数的转换。 $\alpha_{k+1}^k$ 、 $\beta_{k+1}^k$ 和 $\lambda_{k+1}^k$ 分别为位置、速度和角度预积分项,即第 $k$ 帧激光扫描时间内载体的相对运动,可直接用于补偿激光扫描运动畸变。

### 2.2 多尺度正态分布变换的特征匹配与三维地图管理

NDT是常用于LiDAR SLAM的匹配与三维地图表达方式,相比于基于线、面特征的SLAM方法,无需提取几何特征,在复杂退化环境或没有规则几何结构的环境中具有较好的表现,且整体计算量可控<sup>[16]</sup>。其核心思想是将一定三维体素大小内的点云 $p$ 转换为正态分布,其均值为 $\mu$ ,协方差矩阵为 $\Sigma$ ,满足概率密度函数 $f(p)$ ,写作式(5)。利用NDT进行特征匹配时,以点到分布的概率为代价函数,优化相对位置与姿态参数。

$$f(p) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sqrt{|\Sigma|}} e^{-\frac{(p-\mu)^\top \Sigma^{-1} (p-\mu)}{2}} \quad (5)$$

对于搭载在头盔式激光扫描系统中的固态激光

雷达,其扫描获取的单帧点云内部点密度存在较大差异,距离扫描中心较远处点密度大,相反距扫描中心较远处点密度小,如图3所示。如果为了保证远处的体素有足够多的点用于准确计算协方差,则需要将格网设置大,导致近处格网分辨率太低,损失了近处的细节信息。如果为了保证近处细节信息,设置较小的格网尺寸,会导致远处格网内点数较少,导致远处的体素协方差计算错误。因此使用相同的体素对单帧点云进行体素化处理,难以选取合适的体素尺寸以平衡近处和远处体素的细节信息。

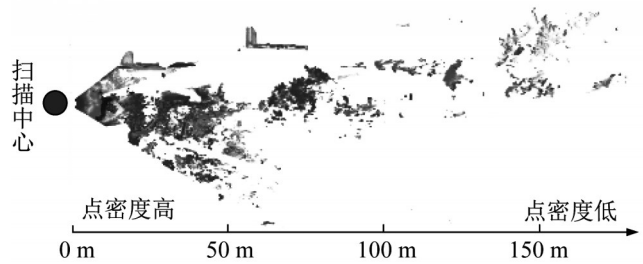


图3 固态激光雷达扫描点云示意图

Fig.3 Scanning pattern of the solid-state LiDAR

本文采取多尺度正态分布变换以克服上述体素尺寸设置难题,步骤如下:

(1)设置体素尺寸为 $S_{\text{voxel}}$ (实验中为0.5 m),对单帧点云进行均匀体素化,并计算每一个体素中的均值、方差、点数、特征向量、空间范围,依据特征向量判断体素几何属性(线性、面性、不规则)<sup>[17]</sup>,舍弃无点的体素;

(2)对体素进行迭代合并,合并条件见表1;

表1 体素合并条件

Tab.1 The merging conditions of voxels

条件类型	条件描述
空间范围满足条件	合并后体素尺寸小于 $S_{\text{max}}$ (实验中为2 m);
几何属性条件	合并前都为线性,若合并后依旧为线性的; 合并前都为面性,若合并后依旧为面性的; 合并前都为不规则的; 合并前一个为面性,一个为不规则,合并后为面性的; 合并前一个为线性,一个为不规则,合并后为线性的;

(3)将合并后的体素内所有参数更新。

以面性体素合并为例,如图4所示。图4a二者都为面性体素,合并后依旧为面性,则合并成功;图4b分别为面性体素和不规则体素,合并后为面性体素,合并成功;图4c二者都为面性,合并后为不规则,合并失败;图4c二者都为不规则,合并后为面性。通



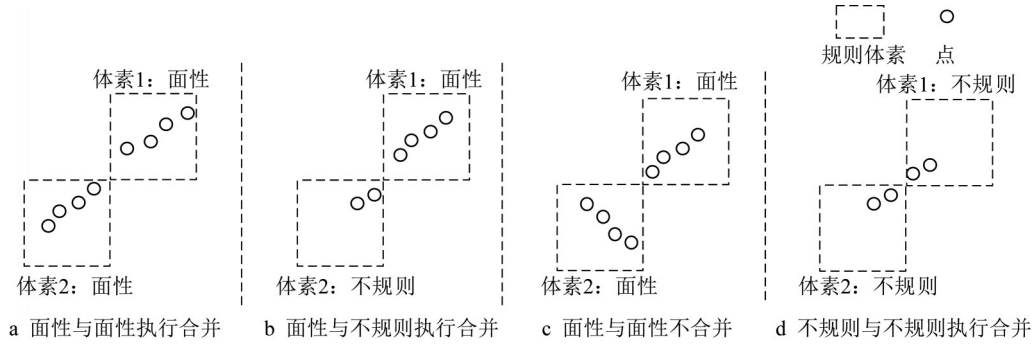


图 4 多尺度 NDT 合并条件示意图

Fig.4 Illustration of the multi-scale NDT merging conditions

过上述方式合并生成多尺度体素,可以有效克服 NDT 算法中体素大小难以设定难题。

### 2.3 多模态融合的位置姿态优化

在实时估计头盔式激光扫描系统的状态参数时,需考虑两种模态信息,即 IMU 对运动的高频观测约束  $e_{\text{Preinte}}^{k,k+1}$  以及激光与地图的匹配约束  $e_{\text{LiDAR}}^{k,k+1}$ 。考虑到系统运行的实时性需求,采用滑动窗口<sup>[18]</sup>,仅实时估计当前帧激光的位置与姿态,将历史激光帧和历史 IMU 信息边缘化,转化为先验约束  $e_{\text{Margin}}$ 。三类约束条件的范数累加共同组成能量函数  $E$ 。

$$E = \sum e_{\text{Preinte}}^{k,k+1 \top} e_{\text{Preinte}}^{k,k+1} + \sum e_{\text{LiDAR}}^k \top e_{\text{LiDAR}}^k + e_{\text{Margin}} \top e_{\text{Margin}} \quad (6)$$

详细实现如下:

#### (1) IMU 预积分约束

IMU 信息在 SLAM 系统中除了可以用于运动畸变矫正外,其预积分得到的相对姿态、位置信息也可用于计算头盔式激光扫描系统的状态量。第  $k$  帧激光和第  $k+1$  帧激光之间所有的预积分项  $\alpha_{k+1}^k, \beta_{k+1}^k$  和  $\lambda_{k+1}^k$  可构成如公式(7)约束。式中,  $\delta\alpha_{k+1}^k, \delta\beta_{k+1}^k$  和  $\delta\lambda_{k+1}^k$  是预积分项  $\alpha_{k+1}^k, \beta_{k+1}^k$  和  $\lambda_{k+1}^k$  对应的误差,  $\delta b_a^k$  和  $\delta b_g^k$  是加速度计零偏和角速度计零偏随机游走误差。优化后的 IMU 零偏可用于修正运动畸变,提供更好的运动畸变改正效果。

$$e_{\text{Preinte}}^{k,k+1} = \begin{bmatrix} \delta\alpha_{k+1}^k \\ \delta\beta_{k+1}^k \\ \delta\lambda_{k+1}^k \\ \delta b_a^k \\ \delta b_g^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_B^M(t_k)^\top (r_B^M(t_{k+1}) - r_B^M(t_k) - v_B^M(t_k)\Delta t + \frac{1}{2}g^M\Delta t^2) - \alpha_{k+1}^k \\ R_B^M(t_k)^\top (v_B^M(t_{k+1}) - v_B^M(t_k) + g^M\Delta t) - \beta_{k+1}^k \\ 2[q_B^M(t_{k+1})^{-1}q_B^M(t_k) \otimes \lambda_{k+1}^k]_{1:3} \\ b_a(t_{k+1}) - b_a(t_k) \\ b_g(t_{k+1}) - b_g(t_k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

#### (2) LiDAR 匹配约束

对于第  $k$  帧点云中的一个三维点  $r_p^L$ , 根据当前位姿及公式(1)计算得到该点在制图坐标系中的位置  $r_p^M$ , 并在多尺度正态分布地图中搜索到的最邻近体素(均值为  $\mu$ , 协方差为  $P$ ), 可根据正态分布定义, 构造误差函数  $e_{\text{LiDAR}}^k$ :

$$e_{\text{LiDAR}}^k = -e^{-\frac{(r_p^M - \mu)^\top P^{-1}(r_p^M - \mu)}{2}} \quad (8)$$

#### (3) 边缘化约束

利用滑动窗口限制 SLAM 系统实时优化的参数量从而保证系统的实时计算能力。当一帧新的激光帧到来时, SLAM 系统将为其创建一组新的系统状态量, 并删除最旧的系统状态量及相关约束条件, 从而保证 SLAM 系统中优化的参数量固定不变。为了在删除最旧状态量与相关约束条件的过程中保留对当前系统状态量的约束, 降低信息损失, 本文利用舒尔补进行先验信息提取<sup>[19]</sup>。根据非线性最小二乘原理<sup>[20]</sup>, 本文能量函数  $E$  的求解如下:

$$H\delta x = b \quad (9)$$

式中:  $H = A^\top P A$  为 Hessian 矩阵;  $\delta x$  为改正数,  $b = A^\top P l$  为误差项。将  $\delta x$  分成两部分  $\delta x = [\delta x_{\text{marg}}^\top, \delta x_{\text{remain}}^\top]^\top$ , 式中  $\delta x_{\text{marg}}$  为需要删除的最老状态量, 而  $\delta x_{\text{remain}}$  为需要保留的待优化状态量。式(9)可以改写为

$$\begin{bmatrix} H_{\text{marg}} & H_{\text{remain}} \\ H_{\text{remain}}^\top & H_{\text{corr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_{\text{marg}} \\ \delta x_{\text{remain}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{\text{marg}} \\ b_{\text{remain}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

依据舒尔补, 式(10)可以转化如下:

$$\begin{bmatrix} H_{\text{marg}} & H_{\text{remain}} \\ 0 & H_{\text{corr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_{\text{marg}} \\ \delta x_{\text{remain}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{\text{marg}} \\ b_{\text{remain}} - H_{\text{corr}}^{-1} H_{\text{marg}}^\top b_{\text{marg}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

从式(11)中可以发现, 在不求解  $\delta x_{\text{marg}}$  的情况下, 也可将  $\delta x_{\text{remain}}$  进行求解, 且顾及了最老观测信息的约束, 即将最旧约束转化为对现有状态的先验信息,

从而获得边缘化约束  $e_{\text{Margin}}$ :

$$e_{\text{Margin}} = H_{\text{corr}} \delta x_{\text{remain}} + b_{\text{remain}} - H_{\text{corr}}^T H_{\text{marg}}^{-1} b_{\text{marg}} \quad (12)$$

### 3 实验与分析

#### 3.1 实验环境与数据采集

本文实验区域选取了两个典型城市场景,包括办公楼和地铁站,用于室内外一体化无缝测图实验(如图 5)所示。实验人员携带头盔式激光扫描系统(如图 6 a 所示),以  $1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的步速对室内外环境进行扫描。实时扫描获取的数据经过本文提出方法处理,进行三维可视化,可视化的效果如图 6 和图 7 所示。为了说明头盔激光扫描在视角与效率的优势,同时利用手持激光扫描在办公楼行走相同的路线进行数据采集,如图 6 b 所示,并采用 LOAM 算法对手持扫描数据进行处理,获取的点云数据如图 9 所示。

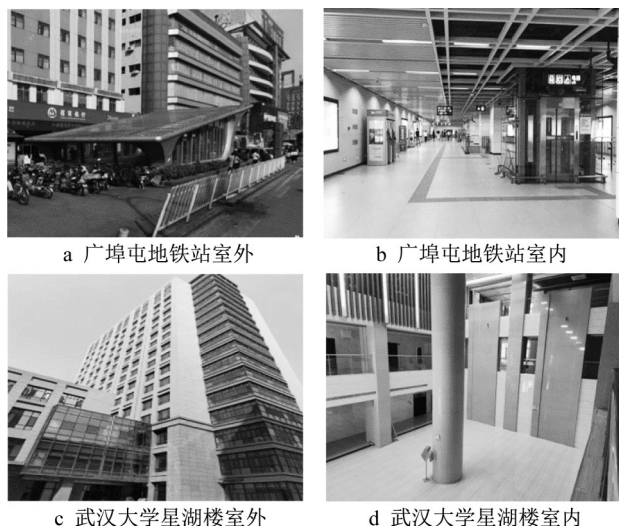


图 5 试验区域

Fig.5 Study area



图 6 头盔及手持激光作业示意图

Fig.6 Illustration of data acquisition using the helmet and a handheld scanner

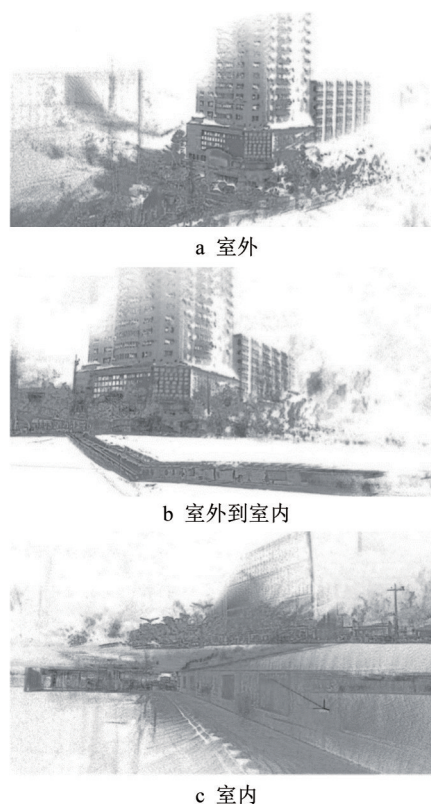


图 7 广埠屯地铁站室内外一体化三维点云地图

Fig.7 Outdoor and indoor 3D point cloud map of computer-town subway station

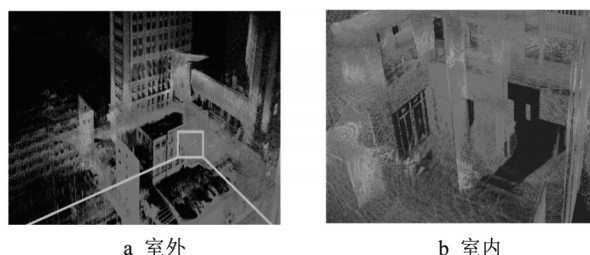


图 8 星湖楼室内外一体化三维点云地图

Fig.8 Outdoor and indoor 3D point cloud map of Xinghu building

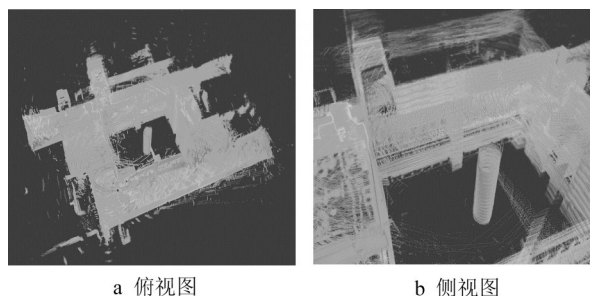


图 9 手持激光点云星湖楼室内点云地图

Fig.9 Point cloud collected by the handheld laser scanner in Xinghu building

### 3.2 精度分析

为了验证头盔式激光扫描系统在室内外三维一体化测图的精度,本文利用地面激光扫描仪(Riegl VZ-400)在实验环境中进行扫描并进行多站扫描数据拼接。拼接后的多站激光扫描数据作为基准。人工在两个实验场景中分别选取 30 个均匀分布的特征点,并建立其在地面激光扫描数据与头盔式激光扫描数据中的匹配关系,从而衡量头盔式激光扫描系统的精度。两个场景中的同名点误差分布如图 10 所示,其统计值如表 2 所示。其中,有部分同名点误差的最大值为 0.86 m,主要是由于场景中存在高反的墙面(如地铁站内部的玻璃、楼道中的瓷砖等),激光原始观测存在镜面反射,产生了镜像观测错误,导致局部点云误差变大。可以发现同名点的平均误差小于 0.44 m,均方根误差小于 0.23 m。手持激光扫描获取的点云同名点误差的平均误差为 0.57 m,大于头盔激光扫描获取的点云误差。

对比手持激光扫描和头盔激光扫描在室内获取的点云数据的完整度可以发现,头盔激光扫描获取的点云密度在建筑物顶面和地面更加均匀、稠密,这是由于不同激光器扫描的模式造成的。这是由于上述结果说明了头盔式激光扫描系统在室内外三维一体化无缝测图中具有巨大的潜力。

表 2 室内外三维点云误差分布

Fig.2 The error distribution of indoor and outdoor point clouds

实验区域	误差分布 /m			
	最小值	最大值	平均值	均方根误差
广埠屯地铁站	0.19	0.81	0.44	0.23
星湖楼	0.03	0.86	0.34	0.18

## 4 结论与展望

轻小型穿戴式激光扫描系统具有成本低、体积小、易操作的特点,是传统激光扫描系统的有效补充,可在通行受限区域获取三维空间数据。本文自主设计了头盔式激光扫描系统“WHU-Helmet”,提出基于多尺度正态分布变换的实时 LiDAR-IMU SLAM 方法,并以典型室内外环境为实验区域,以验证头盔式激光扫描系统在室内外一体化三维测图的精度与可行性。通过将“WHU-Helmet”获取的三维数据与地面式激光扫描系统获取的三维点云对比,“WHU-Helmet”获取的点云平均误差小于 0.44 m,均方根误差小于 0.23 m。头盔式激光扫描系统对

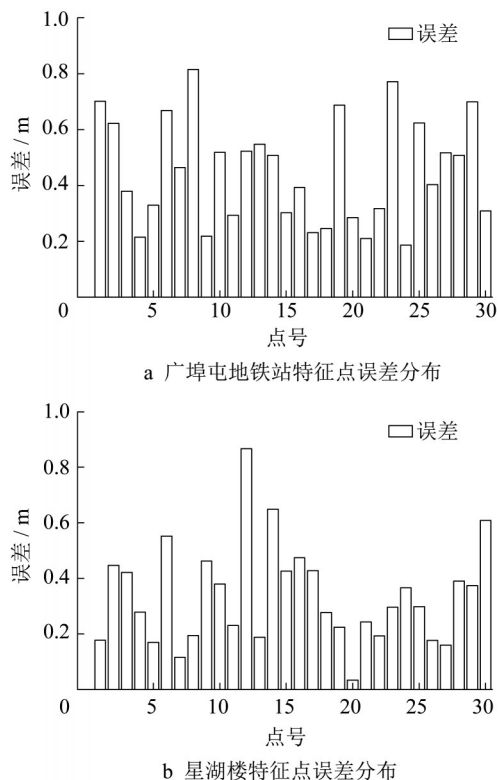


图 10 特征点误差分布

Fig.10 Error distribution of the selected corresponding points

导航信息无依赖,三维测图自动化程度高,在室内外三维一体化测图中有着巨大潜力。在未来的工作中,将以室内外结构化信息自动提取为研究点,利用结构约束信息提升穿戴式系统的三维测图精度。

### 作者贡献声明:

李健平:实现方法,完成实验,撰写论文。

杨必胜:提供方法思路,指导模型构建,实验数据处理及论文撰写。

### 参考文献:

- [1] 李德仁. 从测绘学到地球空间信息智能服务科学[J]. 测绘学报. 2017, 46(10):1207.  
LI Deren. From geomatics to geospatial intelligent service science [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10):1207
- [2] 杨必胜, 董震. 点云智能处理[M]. 北京:科学出版社, 2020  
YANG Bisheng, DONG Zhen. Point cloud intelligent processing [M]. Beijing: Chinese Science Publishing, 2020
- [3] 杨必胜, 董震. 点云智能研究进展与趋势[J]. 测绘学报, 2019, 48(12):1575.  
YANG Bisheng, DONG Zhen. Progress and perspective of



- point cloud intelligence [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48 (12): 1575.
- [4] 杨必胜, 梁福逊, 黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展, 挑战与趋势 [J]. *测绘学报*, 2017, 46 (10): 1509.  
YANG Bisheng, LIANG Fuxun, HUANG Ronggang. Progress, challenges and perspectives of 3D LiDAR point cloud processing [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46 (10): 1509.
- [5] 李清泉, 张德津, 汪驰升, 等. 动态精密工程测量技术及应用 [J]. *测绘学报*, 2021, 50 (9): 1147.  
LI Qingquan, ZHANG Dejing, WANG Chishen, *et al.* Technology and applications of dynamic and precise engineering [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50 (9): 1147.
- [6] 叶勤, 刘行, 姚亚会, 等. 便携式 RGB-D 传感器深度测量与建模精度研究 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2019, 47 (6): 870.  
YE Qin, LIU Xing, YAO Yahui, *et al.* Study on depth measurement and 3D reconstruction accuracy based portable RGB-D sensor [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47 (6): 870.
- [7] 龚健雅. 人工智能时代测绘遥感技术的发展机遇与挑战 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2018, 43 (12): 1788.  
GONG Jianya. Changes and challenges for development of surveying and remote sensing in the age of artificial intelligence [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43 (12): 1788.
- [8] 杨必胜, 李健平. 轻小型低成本无人机激光扫描系统研制与实践 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2018, 43 (12): 1972.  
YANB Bisheng, LI Jianping. Implementation of a low-cost mini-UAV laser scanning system [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43 (12): 1972.
- [9] ZHU Y, ZHENG C, YUAN C, *et al.* Camvox: A low-cost and accurate lidar-assisted visual slam system [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). [S.l]: IEEE, 2021: 5049-5055.
- [10] DEWEZ T J, YART S, THUON Y, *et al.* Towards cavity-collapse hazard maps with Zeb-Revo handheld laser scanner point clouds [J]. *The Photogrammetric Record*, 2017, 32 (160): 354.
- [11] SHAO J, ZHANG W, LUO L, *et al.* SLAM-based backpack laser scanning for forest plot mapping [J]. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2020, 5 (2): 267.
- [12] 袁浚天, 张景刚, 李蔚清, 等. 面向 AR 虚实士兵对抗训练的分布式感知技术 [J]. *计算机仿真*, 2020, 37 (6): 13.  
YUAN Hantian, ZHANG Jinggang, LI Weiqing, *et al.* The perception technology in ar confrontation system for virtual and real force [J]. *Computer Simulation*, 2020, 37 (6): 13.
- [13] LI J, YANG B, CHEN C, *et al.* NRLI-UAV: Non-rigid registration of sequential raw laser scans and images for low-cost UAV LiDAR point cloud quality improvement [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 158: 123.
- [14] LI J, YANG B, CHEN C, *et al.* Aerial-triangulation aided boresight calibration for a low-cost UAV-LiDAR system [J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, 5 (1): 245.
- [15] QIN T, LI P, SHEN S. Vins-mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34 (4): 1004.
- [16] MAGNUSSON M, LILIENTHAL A, DUCKETT T. Scan registration for autonomous mining vehicles using 3D-NDT [J]. *Journal of Field Robotics*, 2007, 24 (10): 803.
- [17] MAGNUSSON M. The three-dimensional normal-distributions transform: an efficient representation for registration, surface analysis, and loop detection [D]. Örebro: Örebro Universitet, 2009.
- [18] HUANG G P, MOURIKIS A I, ROUMELIOTIS S I. An observability-constrained sliding window filter for SLAM [C]// 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. [S.l]: IEEE, 2011: 65-72.
- [19] YANG Y, MALEY J, HUANG G. Null-space-based marginalization: analysis and algorithm [C]// 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). [S.l]: IEEE, 2017: 6749-6755.
- [20] 李德仁, 袁修孝. 误差处理与可靠性理论 [D]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.  
LI Deren, YUAN Xiuxiao. Error processing and reliability theory [D]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002.