

双二维激光雷达相对位姿的标定方法

陈健武, 全思博, 全燕鸣, 郭清达

华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640

摘要 针对室内空间的三维重建,采用双二维激光雷达,提出精确标定两雷达相对位姿的方法,实现三维空间的可连续采集,并获得准确的三维轮廓点云。利用静态标定靶标的扫描数据,建立靶标参数求解数学模型,得到双雷达坐标系相对位姿的补偿矩阵,并转化为精确矩阵。建立仿真平台,模拟标定实验,实现靶标参数的扭曲校正,初步验证该标定方法可行,并进行模拟采集实验,获得的点云分离程度小于等于7 mm。搭建了硬件实物平台,标定后进行室内轮廓采集实验,最终得到了无畸变扭曲的三维轮廓点云。实验结果表明,双二维激光雷达相对位姿的标定精度可以满足室内场景三维重建的要求。

关键词 测量; 三维重建; 二维激光雷达; 位姿标定; 连续采集

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1004005

Calibration Method of Relative Position and Pose Between Dual Two-Dimensional Laser Radar

Chen Jianwu, Quan Sibbo, Quan Yanming, Guo Qingda

School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510640, China

Abstract Aiming at three-dimensional (3D) reconstruction of interior space, based on dual two-dimensional (2D) laser radar, the precise calibration method of relative position and pose between two radars were presented, the consecutive collection was achieved, and accuracy point cloud contour was obtained. By the establishment of mathematical model of target parameter from scanning data of static calibration, the position and pose compensation matrix between dual 2D laser radar was obtained, which was converted into precise matrix. We established simulation platform to simulate calibration experiment and realize distortion correction of target parameters. This method was proved to be applicable through analogue acquisition experiments, where the degree of separation of point cloud was less than or equal to 7 mm. Undistorted 3D point cloud contour was acquired through the establishment of hardware platform and indoor contour acquisition experiment after calibration. The experiment results show that the calibration accuracy of relative position and pose between dual 2D laser radar could meet the requirements of 3D reconstruction in interior scene.

Key words measurement; three-dimensional reconstruction; two-dimensional laser radar; position and pose calibration; consecutive collection

OCIS codes 120.6650; 120.6085; 280.3640

1 引言

激光测距雷达因其测量快速、精确和可抗干扰,在航天、林业、气象等领域得到广泛的应用^[1-3]。目前,智

收稿日期: 2017-04-19; 收到修改稿日期: 2017-06-17

基金项目: 广东省数控一代机械产品创新应用示范工程专项资助项目(2013B011301026)

作者简介: 陈健武(1994—),男,硕士研究生,主要从事三维重建、工业机器人等方面的研究。

E-mail: 201621002538@mail.scut.edu.cn

导师简介: 全燕鸣(1957—),女,教授,博士生导师,主要从事机械制造及检测技术、机器视觉应用方面的研究。

E-mail: meymquan@scut.edu.cn(通信联系人)

能移动机器人的研究开发成为热点,而激光测距雷达是其自主定位导航的关键传感器。激光测距设备一般分为单点测距雷达、二维(2D)激光雷达和三维(3D)激光雷达。类似于二维激光雷达的单线旋转扫描,三维激光雷达是多线旋转扫描,其单次扫描获取的数据更多、工作效率更高、结构更复杂,相比二维激光雷达价格非常昂贵。在追求低成本和高效益的民用市场竞争趋势下,三维激光雷达在普通领域难以被市场接受。因此,国内外专家学者提出改善或者组合多个二维激光雷达,实现三维数据的采集。

激光雷达最初应用于空间信息采集,主要用于建立城市空间建模。Zhao 等^[4]使用多个线阵相机和二维激光雷达等多传感器进行数据融合,借助全球定位系统(GPS)和惯性导航系统(INS)定位,实现城市模型构建。Roca 等^[5]利用小型飞行器携带二维激光雷达,借助全球卫星导航系统(GNSS)和惯性测量单元(IMU)定位,实现地形建模。随着激光设备的发展,二维激光雷达逐渐应用于室内三维空间信息采集的研究。项志宇^[6]和尚涛等^[7]利用旋转机构,提供二维激光雷达的第3维度支持,从而扫描室内三维空间轮廓,但由于没有移动机构,采集过程只能进行离散的定点采集。

采用双二维激光雷达的方案,可实现三维空间的连续采集。要获得精确的室内三维点云,关键在于以下3点。1)激光雷达的采集性能和测量精度。采集性能和测量精度很大程度与设备价格相关,价格高的设备往往适用范围较广且误差较小;2)第3维度的运动支持和定位算法的精度与稳健性。利用二维激光雷达实现水平运动的实时定位与地图构建(SLAM)^[8]已经成为一个热门研究主题,目前已有不少的成熟算法^[9-11];3)激光雷达精确相对位姿的标定。Antone 等^[12]利用自制的金字塔型靶标,获得相对于固定坐标系的二维激光雷达位姿;Almeida 等^[13]提出双圆锥模型标定方法,得到多雷达的相对位姿。

本文介绍一种基于全向移动平台的双二维雷达相对位姿标定方法,将一个三面垂直的空间直角靶标作为标定工具。根据双二维激光雷达在空间直角投射的二维数据点,通过几何解析的方程组求解,提取出各自测量得到的空间直角靶标,并匹配两者的靶标参数,计算得到两个二维激光雷达的相对位姿关系。最后,采用系统仿真与硬件实物分别进行了实验。

2 坐标关系模型

2.1 系统坐标系设定

室内三维轮廓采集方案核心设备是双二维激光雷达:倾斜安装的激光雷达(采集雷达),用于采集室内空间轮廓数据;水平安装的激光雷达(定位雷达),基于 SLAM 算法^[14]可实现水平定位。两个二维激光雷达固定安装在移动平台上,运动中扫描环境轮廓,通过定位雷达自身定位,可以进一步转化得到采集雷达在世界坐标系中的位置,最终采集雷达的二维数据被转化为世界坐标系下的三维轮廓点云。本文出现的符号,左上标表示数据的参考坐标系,右下标表示描述对象。

图1为系统工作的坐标关系,如图所示,定位雷达坐标系 C_p , X 和 Y 轴在水平面内, X 轴为定位雷达“零点”方向, Y 轴垂直于 X 轴, Z 轴为高度方向,三者满足右手关系。设备启动时,系统以定位雷达初始位置和姿态建立世界坐标系 C_w 。定位雷达随平台运动,采集的数据通过 SLAM 算法实时更新,得到定位雷达坐标系 C_p 相对于世界坐标系 C_w 的相对位姿旋转平移矩阵(即 RT 矩阵) ${}^{C_w}M_{C_p}$ 。同时,根据采集雷达相对于定位雷达的固定位姿 RT 矩阵 ${}^{C_p}M_{C_a}$,建立采集雷达坐标系 C_a 。

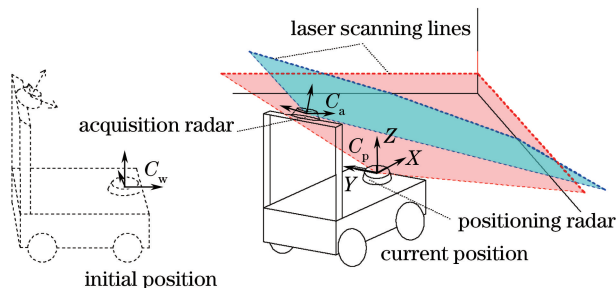


图1 系统工作的坐标关系

Fig. 1 Coordinate relation of system operation

2.2 二维激光雷达 SLAM 定位

SLAM 是实现全自主移动机器人的关键技术,机器人在未知环境中从一个未知位置开始移动,在移动过程中根据位置估计和传感器数据进行自身定位,同时建造增量式地图。目前该技术的实现手段有声呐、视觉、激光雷达等。由于激光得到的点云数据用起来直接、快捷和稳定,因此激光 SLAM 是目前比较成熟且应用广泛的方法。

基于二维空间的激光定位和构图算法,使用二维激光雷达扫描水平面,得到实时、变化的水平截面轮廓数据。设备连续移动,扫描得到的点云特征具有很大的相关性,匹配随移动平台位姿变化而变化的二维点云数据,可得到移动平台在世界坐标系中的实时水平位姿 (x_w, y_w, Ψ_w) 。从统计学的观点看,SLAM 是一个滤波问题,系统的运动模型和观测模型是带高斯噪声的线性模型,系统的状态服从高斯分布。可根据系统的初始状态和从 0 到 t 时刻的扫描信息,估计系统的当前位姿状态。点云匹配经典方法是扩展卡尔曼滤波的 SLAM 算法^[15]。

2.3 坐标转化

二维雷达采用单激光束旋转扫描的工作方式,因此原始数据为极坐标系下的系列点 $p(\rho, \varphi)$, ρ 为测量距离, φ 为测量角度。根据

$$\begin{cases} x = \rho \cdot \cos \varphi \\ y = \rho \cdot \sin \varphi, \\ z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

将点 $p(\rho, \varphi)$ 转化为空间直角坐标系下点 $P(x, y, z)$ 。

通过 RT 矩阵 ${}^wM_{C_p}$ 和 ${}^{C_p}M_{C_a}$,可将上述不同坐标系下的空间点进行三维齐次式坐标系转化。最终,将采集雷达的实时原始数据 $p(\rho, \varphi)$ 转化为世界坐标系 C_w 下的静态环境轮廓点 wP 。

数据处理过程中,需要两个坐标转换参数矩阵 ${}^wM_{C_p}$ 和 ${}^{C_p}M_{C_a}$ 。 ${}^wM_{C_p}$ 由 SLAM 算法匹配得到; ${}^{C_p}M_{C_a}$ 由两激光雷达在移动平台的安装位姿决定,需要精确标定。

3 相对位姿标定

在确定两个二维激光雷达的相对位姿时,设备必须以自身扫描中心作为坐标系原点,以扫描平面作为坐标系的 XOY 面。但是扫描中心点在设备内部,扫描平面肉眼不可见,难以直接测量两个雷达之间的精确位姿关系。常规方法测量所产生的误差,对于中距离室内测量影响比较大。因此,需通过标定得到两者之间的精确位姿关系。

采用逆向思维,利用误差而产生的靶标特征不重合现象,反求两个雷达之间位姿的补偿值 M_{com} ,最终得到精确值 ${}^{C_p}M_{C_a}$ 。原理如图 2 所示。标定前,只需要粗测采集雷达相对于定位雷达的位姿 ${}^{C_p}M_{C_a,0}$ 。

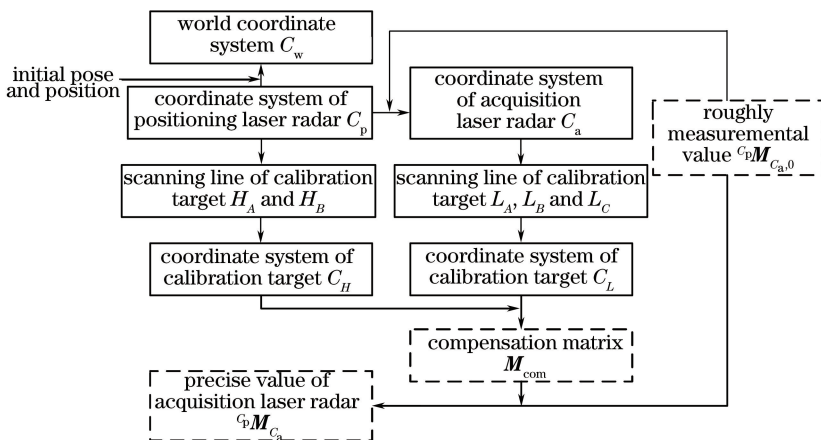


图 2 双二维激光雷达标定流程图

Fig. 2 Flow chart of dual two-dimensional laser radar calibration

两个激光雷达的位姿关系固定,只需进行静态标定即可。制作一个三平面两两满足一定垂直度要求的空间直角模型作为标定靶标。移动平台面向靶标放置,使两个激光雷达分别采集静态的线条点云数据,如图3所示。由于设备不需要移动,定位雷达坐标系与世界坐标系重合,两雷达采集点均转化到世界坐标系中进行标定匹配。

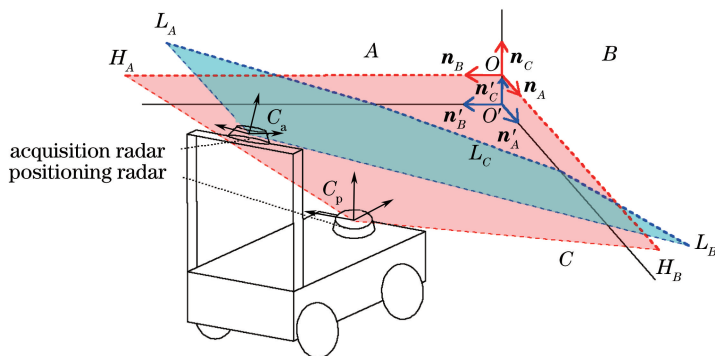


图3 标定场景

Fig. 3 Calibration scene

3.1 点云分割和直线拟合

标定过程需要匹配 H_A 、 H_B 和 L_A 、 L_B 、 L_C 的两组数据。为了减小噪声干扰,将原始数据 $p(\rho, \varphi)$ 从极坐标转化为二维空间直角坐标 $P(x, y, 0)$ 后,先对每帧的采集点进行分段拟合处理,提取各条直线的单位方向向量 l_j 和定点 Q_j ,再一并转化为定位雷达坐标系下的立体空间参数。

分段方法如图4所示,设定每帧第1顺序点 P_1 为第一个间断点,判断第 i 点 P_i 是否为下一个间断点,只需计算出该点 P_i 到由第 $i-1$ 点 P_{i-1} 和上一间断点 P_j 构成的直线的距离 h_i ,若距离大于设定阈值 h_0 ,则判断为间断点 P_{j+1} 。各帧数据可按照间断点分成标定所需的各段直线。

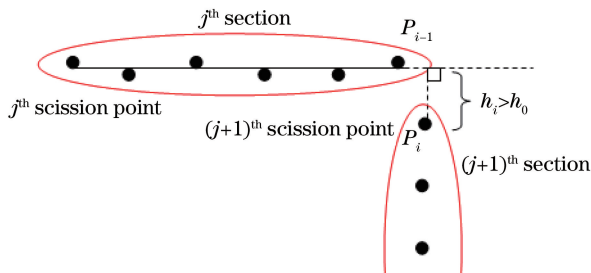


图4 数据点分类方法

Fig. 4 Classification method of point data

3.2 靶标特征提取

如图3所示,建立靶标坐标系 $C(n_A, n_B, n_C, O)$, n_A 、 n_B 、 n_C 分别表示靶标三面单位法向量, O 为靶标顶点。

首先提取定位雷达的靶标坐标系。在假定定位雷达足够水平的情况下,经过上述预处理且互相垂直的水平线 H_A 、 H_B ,可直接提取靶标坐标系 $C_H(n_A, n_B, n_C, O)$,即 H_B 的方向向量为 n_A , H_A 的方向向量为 n_B ,两者的外积作为 n_C , O 由 H_A 和 H_B 的直线解析方程联立解出。

从采集雷达扫描线 L_A 、 L_B 、 L_C 提取靶标坐标系 $C_L(n'_A, n'_B, n'_C, O')$,需要利用几何约束关系。

原始数据分段并拟合后,得到扫描线 L_A 的定点 $Q_A(x_{QA}, y_{QA}, z_{QA})$ 和方向向量 $l_A(x_{lA}, y_{lA}, z_{lA})$ 。

扫描线 L_A 可表示为

$$(x - x_{QA})/x_{lA} = (y - y_{QA})/y_{lA} = (z - z_{QA})/z_{lA}, \quad (2)$$

分别令 $y = y_{QA}$ 和 $z = z_{QA}$,改写成两平面相交的直线一般式方程:

$$\begin{cases} y_{lA}x - x_{lA}y + x_{lA}y_{QA} - y_{lA}x_{QA} = 0 \\ z_{lA}x - x_{lA}z + x_{lA}z_{QA} - z_{lA}x_{QA} = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

引入待定参数 m_A , 表示出过该直线的平面束方程:

$$y_{IA}x - x_{IA}y + x_{IA}y_{QA} - y_{IA}x_{QA} + m_A(z_{IA}x - x_{IA}z + x_{IA}z_{QA} - z_{IA}x_{QA}) = 0, \quad (4)$$

合并(4)式中的含 x, y, z 项并提取系数, 得到含待定参数 m_A 的平面法向量 \mathbf{n}'_A 。同理, 从 L_B 和 L_C 可提取出含 m_B 和 m_C 的平面法向量:

$$\begin{cases} \mathbf{n}'_A = (y_{IA} + m_A z_{IA}, -x_{IA}, -m_A x_{IA}) \\ \mathbf{n}'_B = (y_{IB} + m_B z_{IB}, -x_{IB}, -m_B x_{IB}) \\ \mathbf{n}'_C = (y_{IC} + m_C z_{IC}, -x_{IC}, -m_C x_{IC}) \end{cases} \quad (5)$$

由于空间直角模型三面互相垂直, 因此存在关系式:

$$\begin{cases} \mathbf{n}'_A \cdot \mathbf{n}'_B = 0 \\ \mathbf{n}'_A \cdot \mathbf{n}'_C = 0, \\ \mathbf{n}'_B \cdot \mathbf{n}'_C = 0 \end{cases} \quad (6)$$

(6)式可解得 3 个待定参数 m_A, m_B 和 m_C 。由于每个法向量均含一个未知参数 $m_i (i=A, B, C)$, 因此(6)式为三元二次方程组, 通常有两组解。两个雷达的实际相对位姿参数, 与粗测值之间只存在较小的偏差, 即对应各方向向量之间呈较小的锐角关系, 应满足不定方程组:

$$\begin{cases} \mathbf{n}'_A \cdot \mathbf{n}_A > 0 \\ \mathbf{n}'_B \cdot \mathbf{n}_B > 0, \\ \mathbf{n}'_C \cdot \mathbf{n}_C > 0 \end{cases} \quad (7)$$

通过(7)式对两组解进行检验, 可筛选出所需要的一组解, 从而得到 3 个方向向量 $\mathbf{n}'_A, \mathbf{n}'_B, \mathbf{n}'_C$ 的具体数值。在已知参数 m_A, m_B 和 m_C 后联立 3 平面方程解得顶点 O' 。

3.3 补偿矩阵求解

通过图 3 可看出, 两个靶标坐标系 C_H 和 C_L 存在明显的高度差 Δz , 由于移动平台只在水平面内移动, 在 Z 方向上不变, 因此扫描数据在 Z 方向的位置误差 Δz 不会导致点云的歪曲畸变, Δz 可忽略或取适当值。其他 5 个自由度($\Delta x, \Delta y$ 和用旋转矩阵表示的 3 轴旋转自由度 \mathbf{R})则需要标定修正。

理想情况下, 两个二维激光雷达采集获得的特征参数 C_H 和 C_L 描述同一靶标, 不考虑 Δz , 其顶点应该重合, 各方向向量对应平行。但由于位姿误差存在, 误差传递到采集雷达扫描线 L_A, L_B 和 L_C 中, 必然造成参数 C_L 歪曲。通过刚体的旋转法则, 对 C_L 整体参数依次进行 $\mathbf{n}'_C, \mathbf{n}'_B, \mathbf{n}'_A$ 的匹配旋转, 使其分别与 $\mathbf{n}_C, \mathbf{n}_B, \mathbf{n}_A$ 法向量平行, 得到旋转矩阵 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3$, 将其合成旋转矩阵

$$\mathbf{R}_{\text{com}} = \mathbf{R}_3 \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1, \quad (8)$$

对经 \mathbf{R}_{com} 旋转后的顶点 $O'^{\mathbf{R}_{\text{com}}}$, 通过平移使其与顶点 O 重合, 得到平移向量

$$\mathbf{t}_{\text{com}} = \mathbf{O}'^{\mathbf{R}_{\text{com}}} - \mathbf{O}, \quad (9)$$

从而得到位姿补偿矩阵

$$\mathbf{M}_{\text{com}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{\text{com}} & \mathbf{t}_{\text{com}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

3.4 精确相对位姿求解

位姿补偿矩阵 \mathbf{M}_{com} , 由定位雷达和采集雷达的原始数据经提取和匹配获得, 标定过程为静态过程, 采集雷达坐标系作为定位雷达坐标系的子坐标系。采集雷达相对定位雷达的精确位姿矩阵为

$${}^C_P \mathbf{M}_{C_a} = \mathbf{M}_{\text{com}} {}^C_P \mathbf{M}_{C_a, 0}. \quad (11)$$

该标定方法快速简单, 不需要额外的辅助设备, 没有复杂的标定操作过程, 只需要在实验前, 对靶标进行静态扫描即可, 标定的数据直接由计算机处理, 快速得到精确标定结果 ${}^C_P \mathbf{M}_{C_a}$ 。

3.5 标定误差分析模型

提出的标定方法误差来源主要有: 1) 测量噪声误差; 2) 靶标垂直度、平面度误差; 3) 定位雷达水平度误差。

从影响效果上考虑, 误差可分为两类: 波动误差和方向误差。波动误差可使理想的平面直线产生波动起伏, 具有随机性, 对数据点进行最小二乘拟合, 对标定结果的影响急剧减小。方向误差直接影响扫描线条的

几何特征(重合、平行和垂直关系),对标定结果有较大的影响。测量噪声会产生波动误差;靶标三面垂直度和定位雷达水平度误差会产生方向误差;而靶标各面平面度误差,既会产生波动误差,又会产生方向误差。

虽然相对位姿难以精确测量,但是其误差会在测量点云中表现出来。理想情况下,图 3 的两靶标参数应该重合, H_A 与 L_A 、 H_B 与 L_B 共平面,因此可以用标定修正后采集雷达的系列点与对应面的共面度 f_{cop} 作为误差的评定指标。

利用平面法向量 n_A 、 n_B 、 n_C 和靶标顶点 O ,理想靶标平面 A 、 B 、 C 的一般解析方程可表示为

$$a_1x + a_2y + a_3z + a_4 = 0, \quad (12)$$

式中参数 a_1, a_2, a_3, a_4 由法向量和已知点 O 求得。

对于位姿修正后的采集雷达,计算相应平面的所有点到此理想平面距离的平均值,将其作为共面度指标,用于评定标定效果。

$$f_{cop} = \frac{\sum_{i=1}^n |a_1x_i + a_2y_i + a_3z_i + a_4|}{n\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}}. \quad (13)$$

4 实验与分析

4.1 仿真实验

按照本方案搭建仿真平台,建立双二维激光雷达系统模型,并制作空间直角模型靶标。不同于实物系统,仿真模型的正确位姿在虚拟平台中可以精确设定。在仿真标定实验中,需要人为设置一个带有误差的“位姿粗值”来模拟粗测值与实际值的偏差,通过仿真实验验证该算法的可行性。

图 5 是标定实验数据在世界坐标系下的可视化图形。由于人为设置偏差,图 5(a)采集得到的是歪曲的线条。经过标定处理,图 5(b)中应该共面的靶标线条得到修正。

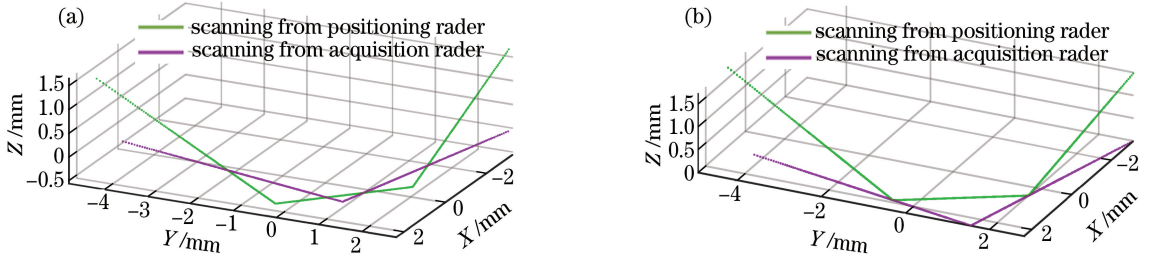


图 5 (a) 标定前的原始数据;(b) 标定后的修正点云

Fig. 5 (a) Acquisition raw data before calibration; (b) corrected point cloud after calibration

为了验证标定方法的稳定性,对于同一仿真模型,第 1~3 组实验改变靶标在激光雷达视场中的位置,第 4~5 组实验改变“位姿粗值”。表 1 为多次标定的精确位姿数据,为方便理解,将 RT 矩阵表示下的相对位置参数转化为 XYZ 坐标和 $\alpha\beta\gamma$ (Roll, Pitch, Yaw) 欧拉角。

表 1 仿真模型标定后的精确位姿

Table 1 Precise calibration results of simulation model

Serial number	X / m	Y / m	Z / m	Roll / (10^{-5} rad)	Pitch / rad	Yaw / (10^{-4} rad)	f_{cop} / mm
1	-0.3315	-0.0027	0.9576	+0.214	0.5270	9.50	6.2567
2	-0.3291	-0.0030	0.9585	-1.13	0.5275	9.23	6.7479
3	-0.3320	-0.0029	0.9585	-1.13	0.5275	9.23	6.8964
4	-0.3319	-0.0028	0.9574	-1.15	0.5269	9.51	6.5764
5	-0.3320	-0.0029	0.9574	+3.31	0.5269	9.70	6.7178
Actual parameter	-0.33	0.00	0.95	0	0.5236	0	—

数据结果表明,对于同一模型中不同的原始标定数据,均可以得到较一致的标定结果,这说明该标定方法的稳定性较好。姿态方面,Roll 和 Yaw 非常小,可忽略,Pitch 结果与俯视 30° 相比,仅有 $11.7'$ 的误差;X 方向误差小于等于 2 mm,Y 方向误差小于等于 3 mm。至于 Z 方向,标定过程把定位雷达所在平面视为水

平地面,因此虽然实际相对高度为 0.55 m,标定结果接近 0.95 m,但不影响采集系统。

根据前文提出的误差评定指标,仿真实验中 f_{cop} 均小于 7 mm。实际使用的室内型中距离二维激光雷达设备,采集误差为测量距离的 3%。一般工作过程会保持 1 m 以上的采集距离,即设备自身的采集误差在 30 mm 以上。因此,在仿真实验中,提出的标定方法在误差允许范围内,能有效得到采集雷达的精确相对位姿,标定精度基本满足使用要求。

图 6 为仿真实验采集一个边长 1 m 立方体的轮廓点云。对比使用粗测值和标定后的精确位姿参数,若坐标关系存在明显的位姿误差,则运动扫描过程中,多个同角度采集得到的同一物体的点云特征会出现扭曲和异位重影现象,如图 6(a)所示。而经过标定后的采集效果明显比较清晰重合,如图 6(b)所示。虽然点云仍然存在细微的异位,但分离程度小于等于 7 mm,采集融合误差远小于设备测量误差,满足使用要求。

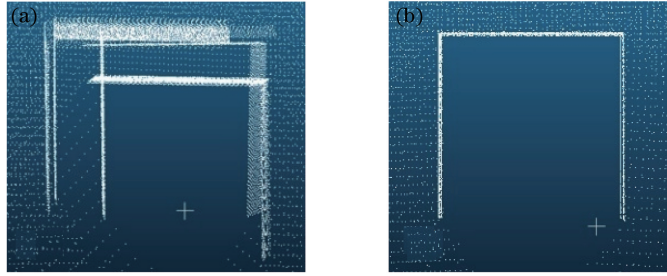


图 6 立方体模型的采集点云俯视图。(a)标定前;(b)标定后

Fig. 6 Top-view image of point cloud about a cube model. (a) Before calibration; (b) after calibration

4.2 硬件实验

整个硬件系统主要由采集雷达、定位雷达、运动机构、嵌入式计算机和远程计算机组成,配以大容量电池和无线网络装置,以精简采集设备结构,使测量过程更为灵活方便。

系统以双二维激光雷达作为核心设备:采集雷达(URG-04LX-UG01 二维激光雷达,Hokuyo 公司)拥有 5.6 m、240°测量范围,扫描周期为 100 ms,测距精度为测量距离的 3%;定位雷达(LMS111 二维激光雷达,SICK 公司)拥有 20 m、270°的测量范围,25 Hz 或 50 Hz 可调的扫描频率,测距精度为 ± 30 mm。稳定准确的定位是系统正常工作的前提,能够减小定位误差对轮廓点云造成的影响。因此定位雷达选用测量距离更大、精度更高的设备,保证每次扫描有足够多正确的特征以实现水平匹配定位。

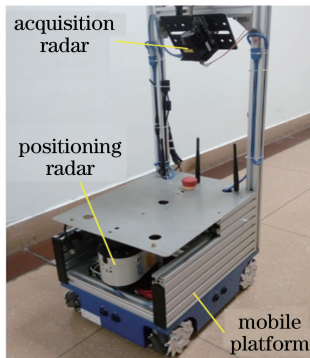


图 7 激光雷达采集系统实物平台

Fig. 7 Hardware platform of laser radar acquisition system

采集雷达安装在移动平台支架上部,扫描平面呈俯视倾斜 30°。移动平台由 4 个电机独立驱动的麦克纳姆轮支撑,可在地面全方向移动和转动,以提供第 3 维度的扫描支持。定位雷达水平安装在移动平台前方下部,为了减小其水平度误差对定位工作和标定工作的影响,配以惯性测量单元进行姿态测量、修正^[16]。双激光雷达的扫描范围为正前方对称展开区域,扫描死区均设置在后方的移动平台方向,避免了非环境因素的干扰。嵌入式计算机安装在移动平台内,直接驱动、控制和协调各部分工作,接收采集数据并进行计算处理和记录保存。通过无线网络,嵌入式计算机接受远程计算机的控制,并将采集数据传送到远程计算机上实时显示。

获得精确的相对位姿参数后,设备可以进行三维空间轮廓的采集。图 8 是某车间主通道的真实环境和设备位姿精确标定前后的三维轮廓点云图。

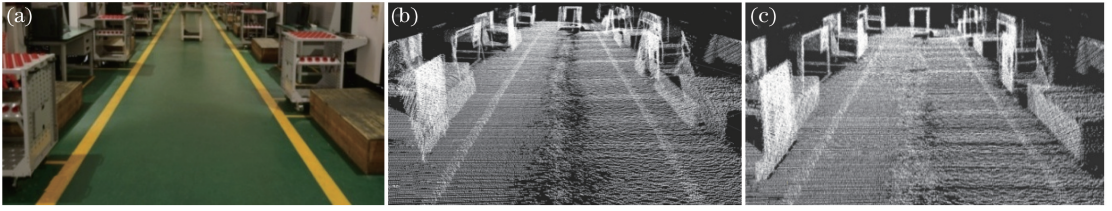


图 8 (a)车间真实环境;(b)标定前的车间采集点云;(c)标定后的车间采集点云

Fig. 8 (a) Real scene of workshop; (b) point cloud of workshop before calibration; (c) point cloud of workshop after calibration

从图 8(b)可明显看出,设备未标定的采集点云图,出现了类似图 6 的特征面不重合现象,特别是由姿态误差引起的歪曲现象随着测量距离的增加而放大。而经过精确标定后,设备采集效果如图 8(c)所示,特征明显重合。

受测量距离、测量角度、设备噪声以及运动过程的振动影响,实验得到的轮廓点云图难免会存在疏密不均匀和纹理效果。另一方面,物体表面的光学反射特性和粗糙程度也会影响激光雷达的采集能力,如图 8(a)中的黄线,由于其表面比绿色的地面涂漆粗糙,由漫反射效应可知,激光雷达对其表面的探测能力更强,因此,黄线处的点云比绿色地面的点云更密集。

由于物体遮挡会产生扫描盲区,环境轮廓点云存在一些细节缺失。但与真实场景对比,空间中主要物体的特征能够得到采集,且点云模型不存在畸变、扭曲等失真现象,主要物体位置和形状轮廓都可以得到识别。

图 9 为某楼层走廊的现实场景和实验数据图。实际物理测量宽度为 220 cm 的走廊,三维重构点云模型经过多次纵截面提取、拟合并测量,平均宽度为 220.551 cm,误差为 0.25%。实验结果说明,经过标定的双激光雷达采集系统,拟合消除噪声后的综合误差非常小,稳定在设备测量误差范围内,满足室内三维环境轮廓采集的使用要求。

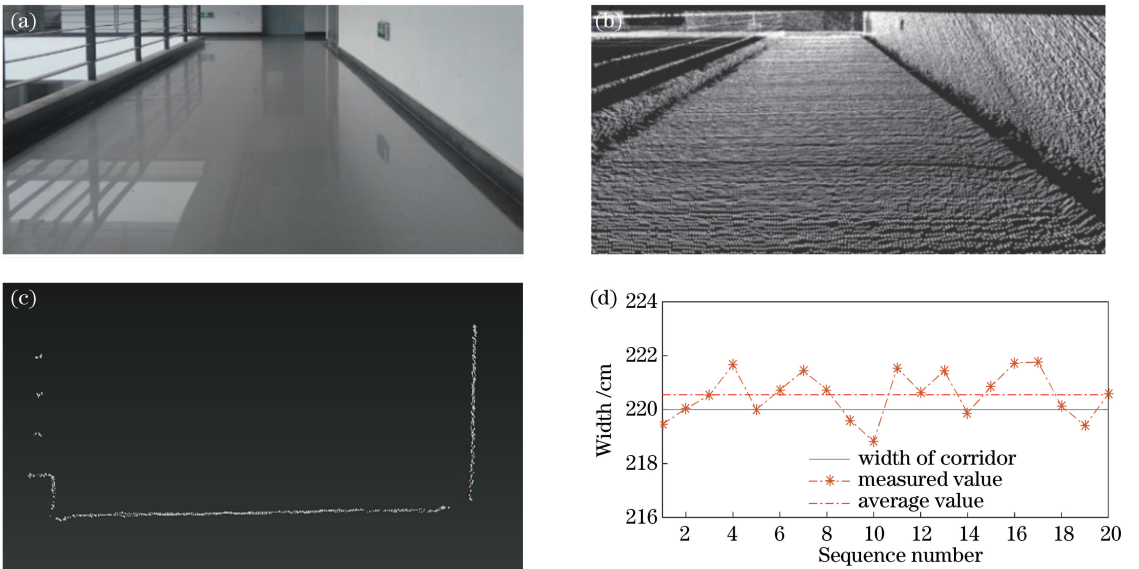


图 9 (a)楼层走廊真实环境;(b)楼层走廊采集点云;(c)走廊点云截面图;(d)走廊宽度测量数据图

Fig. 9 (a) Real scene of corridor; (b) point cloud of corridor; (c) cross-section of point cloud; (d) width data of corridor

5 结 论

利用双二维激光雷达构建出一套室内三维空间轮廓的移动采集系统,一个用于水平空间定位,另一个用

于环境轮廓采集。提出一种双二维激光雷达相对位姿的精确标定方法,采用廉价的二维激光雷达实现三维空间轮廓的连续移动采集功能,经过标定的系统,在采集过程可以实时显示采集效果,且综合误差控制在设备采集误差范围内,满足使用要求。这对于移动机器人三维空间识别和路径规划等智能化发展起到一定的促进作用。后续研究将会给设备提供旋转和高度方向上的自由度,使设备采集过程更加灵活自由,能够在更复杂的环境下,采集到更完整的三维环境轮廓点云。

参 考 文 献

- [1] Liu Yu, Chen Feng, Wang Ying, *et al.* Measurement of relative position and pose between two spacecrafts based on laser lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 189-194.
刘玉, 陈凤, 王盈, 等. 基于激光雷达的航天器相对位姿测量技术[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(8): 189-194.
- [2] Guo Qinghua, Liu Jin, Tao Shengli, *et al.* Perspectives and prospects of LiDAR in forest ecosystem monitoring and modeling[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014(6): 459-478.
郭庆华, 刘瑾, 陶胜利, 等. 激光雷达在森林生态系统监测模拟中的应用现状与展望[J]. *科学通报*, 2014(6): 459-478.
- [3] Bo Guangyu, Liu Dong, Wu Decheng, *et al.* Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0113001.
伯广宇, 刘东, 吴德成, 等. 双波长激光雷达探测典型雾霾气溶胶的光学和吸湿性质[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0113001.
- [4] Zhao H, Shibasaki R. Reconstructing a textured CAD model of an urban environment using vehicle-borne laser range scanners and line cameras[J]. *Machine Vision and Applications*, 2003, 14(1): 35-41.
- [5] Roca D, Martínez-Sánchez J, Lagüela S, *et al.* Novel aerial 3D mapping system based on UAV platforms and 2D laser scanners[J]. *Journal of Sensors*, 2016, 2016(1): 4158370.
- [6] Xiang Zhiyu. Fast 3D scanning laser radar system design and calibration [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2006, 40(12): 2130-2133.
项志宇. 快速三维扫描激光雷达的设计及其系统标定[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2006, 40(12): 2130-2133.
- [7] Shang Tao, He Huichao, Wang Xin, *et al.* Algorithm research on realizing three-dimensional imaging using two-dimensional laser radar[J]. *Journal of Jinlin University (Engineering and Technology Edition)*, 2012, 42(s1): 91-95.
尚涛, 贺会超, 王昕, 等. 二维激光雷达实现三维成像的算法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2012, 42(s1): 91-95.
- [8] Hu Shaoxing, Chen Chunpeng, Zhang Aiwu. Application of SLAM in vehicle-borne mobile mapping system [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1108012.
胡少兴, 陈春朋, 张爱武. 同步定位及地图创建算法在车载移动测绘系统中的应用[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1108012.
- [9] Santos J M, Portugal D, Rocha R P. An evaluation of 2D SLAM techniques available in robot operating system[C]. *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*, 2013: 1-6.
- [10] Zhang Xiao, Zhang Aiwu, Wang Zhihua. Pointcloud registration based on improved normal distribution transform algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 041002.
张晓, 张爱武, 王致华. 基于改进正态分布变换算法的点云配准[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(4): 041002.
- [11] Hess W, Kohler D, Rapp H, *et al.* Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2016: 1271-1278.
- [12] Antone M E, Friedman Y. Fullyautomated laser range calibration [C]. *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, 2007: 1-10.
- [13] Almeida M, Dias P, Oliveira M, *et al.* 3D-2D laser range finder calibration using a conic based geometry shape[M]// *Image Analysis and Recognition*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, 7324: 312-319.
- [14] Kohlbrecher S, Meyer J, Graber T, *et al.* Hector open source modules for autonomous mapping and navigation with rescue robots[M]// *RoboCup 2013: Robot World Cup XVII, Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, 8371: 624-631.
- [15] Du Hangyuan, Hao Yanling, Zhao Yuxin. SLAM algorithm based on fuzzy adaptive Kalman filter [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 40(1): 58-62.
杜航原, 郝燕玲, 赵玉新. 基于模糊自适应卡尔曼滤波的SLAM算法[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(1): 58-62.
- [16] Zhang Jinyi, Xu Dezheng, Li Ruohan, *et al.* 9-axis MEMS-IMU real-time data fusion algorithm for attitude estimation [J]. *Journal of Shanghai University(Natural Science Edition)*, 2015, 21(5): 547-559.
张金艺, 徐德政, 李若涵, 等. 9轴MEMS-IMU实时姿态估算算法[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2015, 21(5): 547-559.