

融合激光雷达和 RGB-D 相机建图

李少伟, 钟勇, 杨华山, 张树, 范周慧

(福建省汽车电子与电驱动技术重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 针对智能小车在未知环境的条件下, 利用单一传感器同时定位与地图创建不能准确构建复杂环境地图的问题, 提出采用一种 RTABMAP 算法, 用于融合激光雷达和 RGB-D 相机建图, 该算法采集了激光雷达、RGB-D 相机和里程计的数据, 将其存储在内存管理机制的节点中, 提取这些节点的特征。通过匹配节点间的视觉词汇次数更新节点的权重, 采用离散贝叶斯滤波估计进行回环检测, 优化局部地图, 最终构建全局地图。在安装有开源机器人操作系统 (ROS) 的智能小车上实验。结果表明, 本研究方法在障碍物检测率方面与激光建图和 RGB-D 相机建图方法相比, 提高了 30.75% 和 18.63%; 地图尺寸误差分别减少了 0.013 和 0.150 m; 角度误差分别减少了 3° 和 1°。

关键词: 智能小车; RTABMAP 算法; SLAM; 传感器融合

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)06-0551-07

Mapping by integrating LiDAR and RGB-D camera

LI Shaowei, ZHONG Yong, YANG Huashan, ZHANG Shu, FAN Zhouhui

(Fujian Provincial Key Laboratory of Automotive Electronics and Electric Drive Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: To address the issue of using a single sensor for simultaneous localization and mapping in an unknown environment for intelligent vehicles, a RTABMAP algorithm was proposed for mapping by integrating LiDAR and RGB-D camera. The algorithm collects data from LiDAR, RGB-D camera, and odometer, and stores them in nodes of the memory management mechanism for feature extraction. The weight of the node is updated by matching the number of visual words between the nodes, and the discrete Bayesian filter estimation is used for loop detection to optimize the local map, and finally construct a global map. Experiments were carried out on a smart car equipped with an open source robot operating system (ROS). Results show that compared with laser mapping and RGB D camera mapping methods, the proposed method improves obstacle detection rate by 30.75% and 18.63%; the map size error has been reduced by 0.013m and 0.150m respectively; the angle error has been reduced by 3 ° and 1 °, respectively.

Keywords: intelligent vehicles; RTABMAP algorithm; SLAM; sensor integration

同时定位和地图构建 (simultaneous localization and mapping, SLAM)^[1] 技术是指在没有环境先验信息的情况下, 移动平台在运动过程中建立环境模型并估计自身的运动。SLAM 技术是搭载传感器的移动平台在未知环境中进行侦查和导航的前提。

经过多年的研究, 激光 SLAM 和视觉 SLAM

接近成熟^[2-3]。国内外学者开源了多种 SLAM 方法, 包括基于激光雷达的 Gmapping^[4] 和 Cartographer^[5], 以及基于视觉相机的 RGB-D-SLAM^[6] 和 ORB-SLAM^[7] 等。然而, 在实际应用中, 单一传感器容易受到环境干扰, 导致环境信息缺失和精度下降等。为了克服这些缺点, 学者们开始探索激光雷达和深度相机的融合。通过多传感器融合

收稿日期: 2023-09-19

第一作者简介: 李少伟 (1998—), 男, 福建漳州人, 硕士研究生, 研究方向: 车辆工程、智能车避障。

通信作者: 钟勇 (1968—), 男, 湖南娄底人, 教授, 博士, 研究方向: 车辆工程、新能源汽车。

技术,提高移动机器人在复杂环境中的定位和建图精度。陈文佑等^[8]提出了一种激光与相机局部地图融合构建全局地图的策略,近似地获取机器人定位和建图的概率密度,但却导致粒子数量减少,从而浪费计算资源。晏小彬等^[9]用单目相机作为辅助进行激光 SLAM。Xu 等^[11]提出了一种基于扩展卡尔曼滤波器原理的 RGB-D 相机与激光雷达融合的 SLAM 方法。该方法在相机匹配失败时,通过将激光雷达数据补充到相机数据中并生成地图。白崇岳等^[12]使用扩展卡尔曼滤波算法将激光雷达、惯性测量单元(IMU)和光电编码器融合定位。卢俊鑫等^[13]提出一种新的 RGB-D 视觉里程计方法,结合了点线的优点。

本文采用激光雷达和 RGB-D 相机在数据层次上融合的方法,基于 RTABMAP 算法提供里程计信息,进行回环检测和全局优化,解决了单一传感器构建地图精度低、易受环境干扰等问题,保证环境地图信息的完整性。

1 系统整体结构与传感器模型

如图 1 所示,智能小车的主要控制器是树莓派。在电脑上,同样安装了与树莓派相同版本的机器人操作系统,并通过 WIFI 连接到树莓派的热点。通过 SSH 建立远程登录,实现远程发布指令。STM32 主板负责接收里程计、IMU 和电池电压等信息,并将其传输给树莓派 ROS 主控。树莓派 ROS 主控将运动底盘的目标速度等指令发送给 STM32 主板。此外,树莓派还通过 USB 与激光雷达和 RGB-D 相机连接。把接收到的数据信息经过处理、整合,通过相关算法完成智能小车的运动、建图等功能。

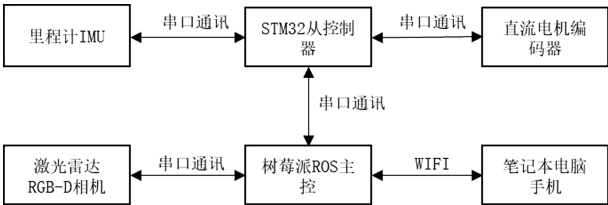


图 1 系统结构图

Fig.1 System structure diagram

采用奥比中光 RGB-D 相机获取深度图像,参数如表 1 所示。采用思岚二维激光雷达 RPLIDAR A1,参数如表 2 所示。

表 1 奥比中光 RGB-D 相机参数

Tab.1 Parameters of ORBBEC RGB-D camera

类别	规格
传感器	MT9001+AR0330
拍照分辨率	640 * 480/1 280 * 720
深度分辨率	640 * 480/320 * 240
深度最大帧率/(帧·s ⁻¹)	30
接口	USB2.0
工作温度/(°)	-10~50

表 2 RPLIDAR A1 激光雷达参数

Tab.2 RPLIDAR A1 LiDAR parameters

项目	典型值
测距范围/m	0.15~12
扫描角度/(°)	0~360
测距分辨率/mm	<0.5
角度分辨率/(°)	≤1
单次测距时间/ms	0.125
测量频率/Hz	≥8 000
扫描频率/Hz	5.5

2 传感器数据融合方法

2.1 RGB-D 相机标定

使用张正友标定法,通过相机标定实验,获取上述相机的内、外部参数。如图 2 所示,准备一张棋盘格,将其贴在表面光滑的板子上作为标定板。使用 RGB-D 相机和红外相机分别对棋盘格标定板拍照。两种相机的标定步骤相同。标定实验需要拍摄 20 组照片,以获得更准确的结果。

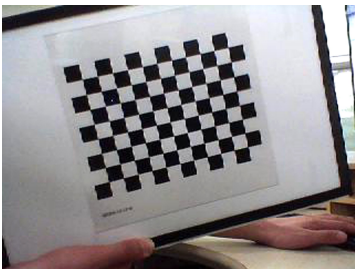


图 2 棋盘格标定板

Fig.2 Checker board calibration board

标定后的总体误差像素在正常范围内,因此

标定结果较为准确。通过 RGB-D 相机标定,获得 RGB-D 相机和红外相机的内参及畸变系数,如表 3 所示。

表 3 奥比中光相机标定结果		
Tab.3 ORBBEC camera calibration results		
内参及畸变系数	RGB 相机	红外相机
焦距	[591.885 99, 603.398 93]	[586.186 035, 590.631 409]
主点	[315.961 48, 205.728 73]	[324.702 427, 246.167 765]
畸变	[0.221 661, -0.575 455, -0.014 215, 0.003 895, 0.000 000]	[-0.068 62, 0.174 404, 0.001 015, 0.006 24, 0.000 000]

2.2 相机与激光雷达联合标定

2.2.1 相机建模

常用的是针孔相机模型。假设光线从物体通过针孔进入相机成像, $o-x-y-z$ 为相机坐标系。点 P 在世界坐标系中的坐标为 (X_w, Y_w, Z_w) , 点 P 在像素坐标系下投影的坐标为 (X_c, Y_c, Z_c) , 经过世界坐标系到相机坐标系下的变换得:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{M} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中, \boldsymbol{M} 为外参矩阵, \boldsymbol{R} 为旋转矩阵, \boldsymbol{t} 为平移向量。

根据相似三角形关系可得:

$$\frac{Z_c}{f} = -\frac{X_c}{X'} = -\frac{Y_c}{Y'} \tag{2}$$

式中,负号表示倒立的像, f 为相机的焦距, X' 和 Y' 分别为成像点的坐标。

将成像平面置于三维空间点同一边,可将式 (2) 简化为:

$$\frac{Z_c}{f} = \frac{X_c}{X'} = \frac{Y_c}{Y'} \tag{3}$$

即:

$$\begin{cases} X' = f \frac{X_c}{Z_c} \\ Y' = f \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \tag{4}$$

将式 (4) 写成矩阵形式表达式为:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \tag{5}$$

根据针孔相机模型,假如图像物理坐标系的原点 O' 在像素坐标系中为坐标 (u_0, v_0) , 令 dx 、 dy 分别为像素在 X' 和 Y' 方向上的实际物理尺寸大小,则:

$$\begin{cases} u = \frac{X'}{dx} + u_0 \\ v = \frac{Y'}{dy} + v_0 \end{cases} \tag{6}$$

将式 (6) 用矩阵形式表示:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

联立式 (5) 和 (7), X_c 、 Y_c 用 X' 和 Y' 表示可得:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

联立式 (1) 和 (8), X_w 、 Y_w 表示 X_c 、 Y_c , 且令 $f_x = f/dx$, $f_y = f/dy$, 则可得:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中, f_x 、 f_y 、 u_0 和 v_0 为相机内参。

若激光雷达扫描空间中的点 P 距离激光雷达为 d , 激光雷达旋转角度 θ 时, 则点 P 在激光雷达坐标系中的坐标为:

$$P_l = \begin{bmatrix} d \cos \theta \\ d \sin \theta \end{bmatrix} \tag{10}$$

该点在世界坐标系下可以表示为:

$$P_w = T_1^w P_l \tag{11}$$

点 P 在相机和激光雷达坐标系中的坐标都表示该点的位置, 则由世界坐标系中的式 (1) 和式 (7) 的关系可得:

$$T_1^w P_l = T_w^c K^{-1} P_c \tag{12}$$

联立公式(9)可得,点 P 在激光雷达坐标系和相机坐标系下的对应关系为:

$$z_c P_c = K T_w^c T_l^w P_l = K [R | t]_l^c P_l \quad (13)$$

2.2.2 内参数数据

通过对相机的标定实验得到内参数据。使用得到的相机内参启动相机激光雷达联合标

$$T_l^c = \begin{bmatrix} -0.836\ 487 & 0.032\ 554 & 0.265\ 406 & 0.024\ 487 \\ -0.276\ 486 & 0.017\ 549 & -0.945\ 264 & -0.265\ 735 \\ -0.032\ 548 & -0.965\ 452 & -0.008\ 454 & -0.249\ 623\ 5 \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.3 激光雷达与 RGB-D 相机融合

只使用激光雷达传感器构建的地图并不能准确反映环境特征,因为激光雷达主要提供距离信息而缺乏颜色和纹理等视觉特征。相比之下,RGB-D 相机传感器可以直接感受到深度信息,并且能够提供更丰富的点云地图,从而更准确地反映环境的特征。然而,相机的视野较小,测量范围有限,并且容易受到光照条件的影响。因此,通过将多个传感器融合可以显著提高整个传感系统的精度和鲁棒性。本文使用 RTABMAP 算法实现融合视觉图像和激光 SLAM 建图。

定程序,接着启动激光雷达节点,使用打开的 rviz 可视化图形程序观察激光雷达扫描的数据,选定相机和激光雷达汇总的点进行标定,直到满足要求的点标定完毕。将标定结果存储在 yaml 文件里。联合标定结果如式(14)矩阵所示。

2.3.1 RTABMAP 系统框架

RTABMAP 系统框架的设计如图 3 所示。将视觉传感器、激光传感器和机器人底盘等通过 tf 关系输入系统。经过同步模块进行时间戳对齐,以确保数据的一致性。RTABMAP 系统采用图结构来组织地图,图结构由节点和节点之间的连接边组成。经过同步后的传感器数据将被存储到短期内存(short-term memory,STM)模块中。对于每一帧传感器数据,系统会创建一个节点,并将该节点中包含的信息存储其中。这些信息包括该帧对应的里程计位姿、视觉和激光的观测数据,以及从该帧中提取出的视觉单词和局部地图等有用信息。

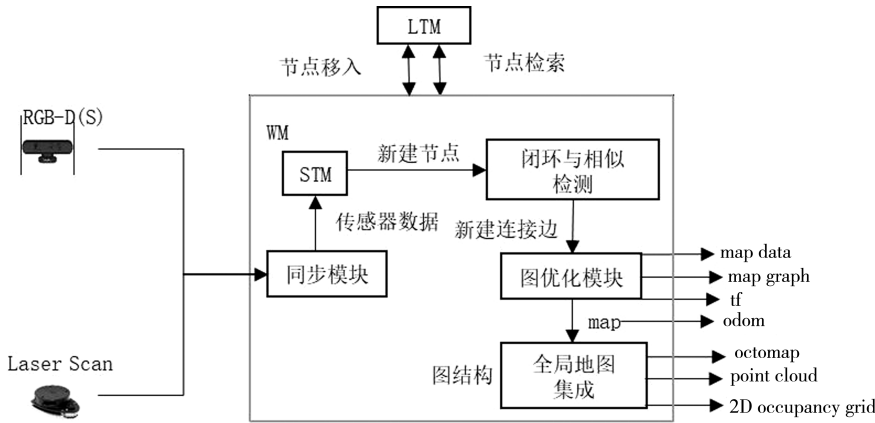


图 3 RTABMAP 系统框架
Fig.3 RTABMAP system framework

2.3.2 内存管理机制

RTABMAP 采用图结构组织全图,每采集一帧传感器数据创建一个节点存储相关数据,当所建的图规模很大时,创建的节点数量也很大,如果只在全部节点上闭环检测和全局优化就会影响到实时性,RTABMAP 引入内存管理机制,以分级管理这些节点。内存管理机制将地图中的节点分成 3 个级别: STM 用于存储局部地图的节点;工作

内存(working memory,WM)用于存储全局地图的节点;长期内存(long-term memory,LTM)用于存储暂时与全局地图无关或不重要的节点。

内存管理机制的具体过程如图 4 所示。传感器数据经过传感器内存(sensor memory,SM)模块进行预处理,包括数据维度的精简和特征提取,计算出当前的位姿信息,处理后的数据被用来创建新的节点加入 STM 中。如果新节点与前一个刚

加入 STM 的节点非常相似,那么可以利用权重更新方法将这两个节点融合在一起。

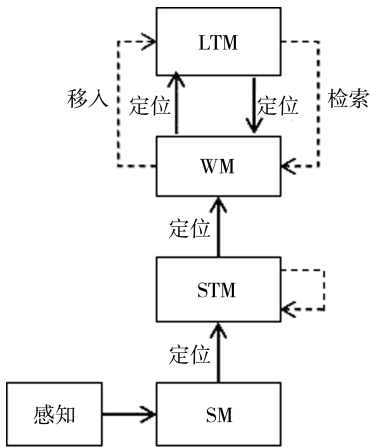


图 4 内存管理机制

Fig.4 Memory management mechanism

2.3.3 闭环检测与图优化

当 STM 创建一个新的节点时,可利用深度图像、激光扫描数据、点云数据等来生成对应的局部地图。如果选择生成三维地图,可以直接用三维点云创建三维局部地图,也可将三维点云经过三维光束模型处理创建三维局部地图。

通过一个独立的 ROS 节点提供 RTABMAP 所需的里程计信息。由于局部建图所依赖的里程计存在累积误差,因此需要进行回环检测和全局优化。在 RTABMAP 中,回环检测包括视觉闭环检测和激光相似检测,而全局优化则采用位姿图优化方法,视觉闭环检测基于视觉词袋模型和贝叶斯滤波器。视觉词袋模型能够快速计算当前位姿节点与候选回环节点之间的相似度。它通过提取图像特征并构建词袋表示,实现高效的图像匹配和相似度计算。贝叶斯滤波器用于维护候选回环节点相似度的概率分布,通过更新概率分布来选择最可能的回环节点。视觉闭环检测能有效地检测到不同时刻和位置下的相似场景,从而解决里程计累积误差的问题。

2.3.4 全局地图集成

局部地图在机器人自身坐标系下构建,而全局地图在世界坐标系下构建。这两者之间通过机器人坐标系到世界坐标系的变换关系进行转换。算法主节点 RTAB-Map 利用闭环检测和全局优化来维护机器人的全局位姿估计,并通过发布机器人坐标系和世界坐标系之间的变换关系来实现转换使用。

使用 RGB-D 深度传感器和激光雷达对信息采集和建图是 RTABMAP 建图的关键步骤。在 RTABMAP 中,当每个新的特征节点被添加到地图中时,新生成的局部地图将与已构建的全局地图进行融合。这个过程基于各个节点的里程计位姿,将各个局部地图拼接起来形成一张全局地图。

3 实验验证

3.1 环境建图

搭建一台室内智能小车,该智能小车具有长达 8 h 的单次续航时间,系统整体架构组成:阿克曼转向系统、驱动电机、树莓派 4B、STM32 主板、激光雷达和惯性测量单元(IMU)。选择的场景长约 10 m,宽约 8 m,具有明显的空旷区域、障碍区域和线条清晰的边界,同时具备闭环的特性,能直观地对比建图效果。

激光雷达建图结果如图 5 所示,启动小车环绕周围环境一圈后形成了栅格地图,白色部分代表智能避障车已经扫描到的无障碍区域,即可以到达的区域;黑色部分表示存在障碍物的区域,可以观察到激光雷达所扫描的范围较广,建立的环境地图接近真实环境,且地图的完整性和精确度较高。

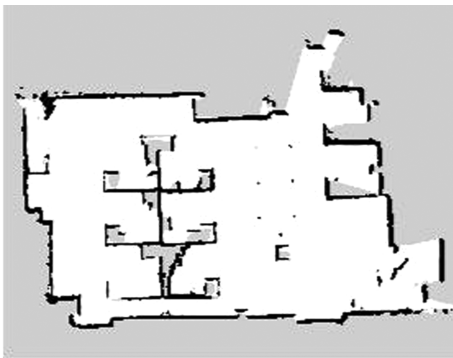


图 5 激光雷达环境建图

Fig.5 Lidar environment mapping

RGB-D 相机检测环境三维建图如图 6 所示,启动小车和建图程序,初始建图效果如图 6(a)所示,控制小车绕周围场景一圈,最终的建图效果如图 6(b)所示。整体的建图效果较为准确,虽然视觉传感器易受光照影响且视野范围有限,但障碍物的重要特征信息并未丢失,这也是将视觉传感器与激光雷达融合的依据。

通过融合激光雷达和相机两个传感器进行环境建图,实验结果如图 7(a)和(b)所示。结果表明,通过准确投影三维空间点到二维平面并处理

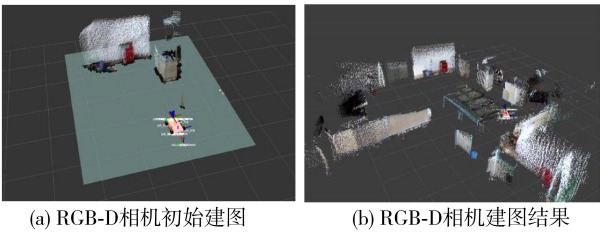


图 6 视觉传感器三维建图

Fig.6 3D construction of visual sensors

深度相机数据后,地图更新能够与激光雷达构建的地图保持一致,同时能够较为完整和清晰地反映实验场景。这说明融合视觉和激光雷达的建图方法具有良好的效果。相比于单一传感器建立的地图,融合建图方法能够获取更为完整的环境信息,更接近真实环境。

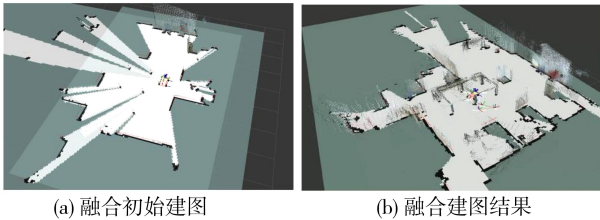


图 7 融合激光雷达和视觉建图

Fig.7 Fusion of LiDAR and visual mapping

表 5 测量结果及误差分析

Tab.5 Measurement results and error analysis

类别	线段 1/m	线段 2/m	线段 3/m	角 $\alpha/(^{\circ})$	角 $b/(^{\circ})$	平均尺寸绝对误差/m	平均角度绝对误差/ $(^{\circ})$
真实环境	3.350	5.280	2.670	90	90	—	—
激光雷达	3.273	5.210	2.649	92	89	0.028 3	1.5
RGB-D	3.988	6.001	2.439	95	92	0.165 4	3.5
融合建图	3.284	5.251	2.660	91	90	0.015 1	0.5

由表 4、表 5 可见,激光雷达与 RGB-D 相机融合建图方法的障碍物检测率为 94.31%,比仅使用激光建图高出 30.75%,比仅使用 RGB-D 相机建图高出 18.63%。此外,在地图尺寸精度方面,平均绝对误差比仅使用激光建图小了 0.013 m,比仅使用 RGB-D 相机建图小了 0.150 m。在角度精度方面,平均绝对误差比仅使用激光建图小了 1° ,比仅使用 RGB-D 相机建图小了 3° 。综上,激光与 RGB-D 相机融合建图方法在多个方面都表现出更高的性能和更好的精度,为机器人在复杂环境中的导航和感知任务提供了更可靠的支持。

用激光雷达与 RGB-D 相机融合计算建图时间、障碍物检测率和地图的尺寸精度及角度精度,计算结果如下。

(1) 建图时间和障碍物检测率

建图时间为 10 次建图所用的平均时间。假设障碍物检测率为 p ,则

$$p=C_1/C_2 \tag{15}$$

式(15)中, C_1 为融合传感器建图所检测到的障碍物总边长,m; C_2 为实际图中障碍物总边长,m。

建图时间和障碍物检测率如表 4 所示。

表 4 障碍物检测率和建图时间

Tab.4 Obstacle detection rate and mapping time

类别	建图时间/s	障碍物检测率/%
激光雷达	24.3	63.56
RGB-D 相机	56.6	75.68
激光雷达融合 RGB-D 相机	37.5	94.31

(2) 地图尺寸精度及角度精度

选取图中 3 条线段和两个角度进行测量和误差分析,结果如表 5 所示。

4 结论

1)提出一种 RTABMAP 算法,将视觉传感器与激光雷达采集到的信息按照一定的规则融合,以弥补单一传感器不能准确构图的问题。

2)通过利用多传感器感知的冗余信息进行融合,构建了一张鲁棒性更高、精度更高的 3D 栅格地图。

3)将激光雷达与 RGB-D 相机融合建图,障碍物的检测率比单独使用激光雷达建图和 RGB-D 相机建图分别提高了 30.75%和 18.63%。地图尺

寸平均绝对误差相比单独使用激光雷达建图和 RGB-D 相机建图,分别减少了 0.013 m 和 0.150 m。地图的角度平均绝对误差比激光雷达建图的小 1° ,比 RGB-D 相机建图小 3° 。

参考文献:

- [1] 吴文涛,何赞泽,杜旭,等. 融合相机与激光雷达的目标检测与尺寸测量[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(6):169-177.
- [2] 王世强,孟召宗,高楠,等. 激光雷达与相机融合标定技术研究进展[J]. 红外与激光工程,2023,52(8):119-132.
- [3] 孙健,刘隆辉,李智,等. 基于 RGB-D 相机和激光雷达的传感器数据融合算法[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版),2022,32(1):18-24.
- [4] 李陆君,张智,韩蕊,等. 基于激光雷达和深度相机融合的视觉 SLAM 研究[J]. 智能计算机与应用,2020,10(8):87-92.
- [5] 张青春,何孝慈,姚胜,等. 基于 ROS 机器人的相机与激光雷达融合技术研究[J]. 中国测试,2021,47(12):120-123.
- [6] 肖军浩,施成浩,黄开宏,等. 单目相机-3 维激光雷达的外参标定及融合里程计研究[J]. 机器人,2021,43(1):17-28.
- [7] MUR-ARTAL R, MONTIEL J M M, TARDOS J D. ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(5):1147-1163.
- [8] 刘鸿勋,王伟. 双目相机和激光雷达的融合 SLAM 研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2021,21(1):64-71.
- [9] LIU Y, ZHENG Z, QIN F Y, et al. A residual convolutional neural network based approach for real-time path planning[J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 242:108400.
- [10] WU Y Z, XIE F, HUANG L, et al. Convolutionally evaluated gradient first search path planning algorithm without prior global maps[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022, 150:103985.
- [11] XU Y L, OU Y S, XU T T. SLAM of robot based on the fusion of vision and LIDAR[C]//2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS). Shenzhen: IEEE, 2018:121-126.
- [12] 白崇岳,王建军,程霄霄,等. 融合激光 SLAM 实现无人驾驶轮椅空间定位优化[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(2):485-493.
- [13] 卢俊鑫,方志军,陈婕妤,等. 点线特征结合的 RGB-D 视觉里程计[J]. 光学学报,2021,41(4):147-157.

(责任编辑:陈雯)