

基于激光雷达与 RGB-D 相机融合 Gmapping 建图研究

李全峰^{1,2,3}, 吴海波^{1,2,3*}, 陈江^{1,2,3}, 张艺潇^{1,2,3}¹昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650500;²云南省先进装备智能制造技术重点实验室, 云南 昆明 650500;³云南省先进装备智能维护工程研究中心, 云南 昆明 650500

摘要 针对移动机器人单激光雷达或 RGB-D 相机 Gmapping 建图时存在的障碍物检测不完全或建图效果不理想等问题, 提出一种激光与相机融合 Gmapping 建图策略。首先, 对相机点云和激光点云进行预处理, 然后通过点云库 (PCL) 进行点云融合、滤波, 采用点对线的迭代最近点 (PL-ICP) 算法进行相邻帧点云配准, 以提高匹配精度和速率; 接着, 为了提高里程计精度, 对视觉里程计、激光里程计采用 Kalman 滤波算法进行融合, 对融合后的数据与轮式里程计进行动态加权二次融合; 最后, 在搭建好的移动机器人上验证所提方法。实验结果表明: 与激光建图和相机建图方法相比, 所提方法的障碍物检测率提高了 32.03 个百分点和 19.86 个百分点, 地图的尺寸误差分别减小 0.014 m 和 0.141 m, 角度误差分别减小 1° 和 3°; 与原始里程计相比, 里程计精度提高了 0.12 个百分点。

关键词 Gmapping; 数据融合; 里程计融合; 激光雷达; RGB-D 相机

中图分类号 TP242.6

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221447

Gmapping Mapping Based on Lidar and RGB-D Camera Fusion

Li Quanfeng^{1,2,3}, Wu Haibo^{1,2,3*}, Chen Jiang^{1,2,3}, Zhang Yixiao^{1,2,3}¹Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China;²Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology for Advanced Equipment in Yunnan Province, Kunming 650500, Yunnan, China;³Yunnan Advanced Equipment Intelligent Maintenance Engineering Research Center, Kunming 650500, Yunnan, China

Abstract This paper proposes a laser-camera fusion Gmapping mapping strategy to resolve problems of incomplete obstacle detection or unsatisfactory mapping effects when carrying lidar or an RGB-D camera on a mobile robot in Gmapping mapping. First, the camera point cloud and laser point cloud are preprocessed, and then point cloud fusion and filtering are performed by the point cloud library (PCL). The point-to-line iterative closest point (PL-ICP) algorithm is used to register the point cloud of adjacent frames to improve the matching accuracy and speed. Second, a visual odometer and a laser odometer are fused by the Kalman filtering algorithm, and the fused data and wheel odometer are dynamically weighted twice to improve the accuracy of odometers. Finally, the proposed method is verified on the built mobile robot. The experimental results show that the proposed method improves the obstacle detection rate by 32.03 percentage points and 19.86 percentage points, respectively, compared to the laser mapping and camera mapping methods, the size error of the map reduces by 0.014 m and 0.141 m, and the angle error decreases by 1° and 3°, respectively. The accuracy of the odometer is increased by 0.12 percentage points compared to the old odometer.

Key words Gmapping; data fusion; odometer integration; lidar; RGB-D camera

1 引言

同步定位与建图 (SLAM) 技术^[1]是移动机器人技

术研究中的重点, 同时也是移动机器人能自主移动的关键。SLAM 技术是利用移动机器人上传感器所获取的外界信息, 实时建立能定位机器人当前位姿的局部地

收稿日期: 2022-04-28; 修回日期: 2022-05-26; 录用日期: 2022-06-16; 网络首发日期: 2022-06-26

基金项目: 云南省人才培养基金 (KKSYS201701001)、国家自然科学基金 (51965029, 52065035)

通信作者: *whb_kust@kust.edu.cn

图,并由局部地图得到全局地图的技术。该技术的计算量大,运算过程极复杂,运算涉及往复迭代和相互耦合。

激光 SLAM 和视觉 SLAM 经过 30 多年的研究已接近成熟^[2-4]。国内外学者开源了许多 SLAM 方法,基于激光雷达的有 Gmapping^[5]、Cartographer^[6]等,基于视觉相机的有 RGB-D-SLAM^[7]、ORB-SLAM^[8]等。由于受到传感器本身的影响,这些基于单个激光雷达或视觉相机的 SLAM 存在多种不足。如二维激光雷达在距离和方位上的测量精度虽然很高,但只能扫描雷达所在单一平面上的 2D 信息,从而导致激光 SLAM 时不能完全检测到障碍物,且当激光获取信息不足时可能导致 SLAM 定位能力丧失。多组二维激光雷达或三维激光雷达都可以解决上述问题,但是成本较高。RGB-D 相机能够获取环境的三维彩色信息和深度信息,但是深度信息精度较差,易受光照影响,而且在环境纹理不清晰时不能采集,这些原因都会影响到视觉 SLAM 效果。由于这些缺点的存在,学者们开始探索激光雷达与深度相机融合,使它们之间形成优势互补。陈文佑等^[9]提出了一种融合激光局部地图与相机局部地图来构建全局地图的策略。Xu 等^[10]提出的 RGB-D 相机与激光雷达融合 SLAM 方法是基于扩展卡尔曼滤波器(EKF)原理的,当相机匹配失败时,该方法生效,将激光雷达数据补充到相机数据中并生成地图。张恒等^[11]提出一种先对相机数据与激光雷达数据进行卡尔曼滤波融合,然后再对激光数据与相机数据生成的二维局部地图进行贝叶斯估计融合的策略。晏小彬等^[12]用单目相机作为辅助进行激光 SLAM,该方法主要通过单目相机的运动估计校正激光雷达运动过程中的点云畸变。白崇岳等^[13]利用扩展卡尔曼滤波算法对激光雷达、惯性测量单元(IMU)和光电编码器三种传感器进行融合定位。申东等^[14]提出

基于稀疏位姿优化的 SLAM 算法。卢俊鑫等^[15]提出一种新的 RGB-D 视觉里程计,该视觉里程计很好地结合了点线特征各自的优点。胡少兴等^[16]提出了一种水平布设二维激光扫描仪和里程计结合的快速 SLAM 方法。尹皓等^[17]对激光里程计、惯性测量单元和轮式里程计通过高斯牛顿法进行融合,提高了移动机器人的定位精度。本文提出了一种激光雷达和 RGB-D 相机在数据层次上融合的 Gmapping 建图策略,并对两种传感器得到的里程计信息与轮式里程计信息进行融合来提高里程计精度,从而使建图精度得到一定程度的提高,最后通过实验室搭建的移动机器人实验平台验证所提策略的可行性。

2 基本原理

激光数据与相机数据融合的原理是:先使两种数据处于同一坐标系,然后对激光数据和相机数据进行预处理并融合,接着将融合得到的数据转换成激光数据,最后采用点对线的迭代最近点(PL-ICP)算法来实现对相邻帧点云快速、准确的配准。

2.1 联合标定

数据融合需要使激光数据和相机数据处在同一个坐标系下,采用文献[18]中的方法对相机和激光雷达进行联合标定,联合标定的外参结果为 $\mathbf{T} = \begin{Bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{Bmatrix}$ 。其中 \mathbf{R} 为相机坐标系到激光坐标系的变换旋转矩阵, $\mathbf{t} = (x \ y \ z)^T$ 为相机坐标系到激光坐标系的变换平移矩阵。设相机到雷达的 x 、 y 、 z 轴的变换角度为 γ 、 β 、 α ,则有

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$R_{xyz}(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{pmatrix}. \quad (2)$$

将式(1)代入式(2),解得

$$\begin{aligned} \beta &= \arctan 2(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}) \\ \alpha &= \arctan 2\left(\frac{r_{21}}{\cos \beta}, \frac{r_{11}}{\cos \beta}\right) \\ \gamma &= \arctan 2\left(\frac{r_{32}}{\cos \beta}, \frac{r_{33}}{\cos \beta}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

已知各轴旋转角度和平移距离,可直接采用机器人软件平台(ROS)中自带的 static_transform_publisher 对雷达和相机进行静态坐标变换,结果如图 1 所示。点云经过了剪切处理,C 最上层点云与边界点云为激光和相机融合点云,C 其余点云和 D 点云为相机点云。

2.2 数据融合

对激光数据和相机数据采用点云融合的方式进行

融合、联合标定、坐标变换等处理,使激光数据和相机数据处于同一坐标系下,对激光数据和相机数据进行预处理,最后将数据融合在一起,具体步骤如下。

1) 相机数据降采样处理。深度相机采集到的原始点云数据量非常大,故对其进行降采样处理。大多数学者的处理方法是先将原始点云转换成能被点云库(PCL)处理的点云,然后利用 PCL 中的滤波器进行滤波处理,所以效率不高。所提方法为节省数据处理时间直接从保存点云数据的无符号整型八位地址中每隔 64 行和 4 列读取一个数据,然后再将读取的数据转换成能被 PCL 处理的点云格式,节省大量时间。

2) 去除地面与过高点云。采用的移动机器人总高度为 0.55 m,遍历所有点云 \mathbf{P} ,当某点云的 z 轴方向

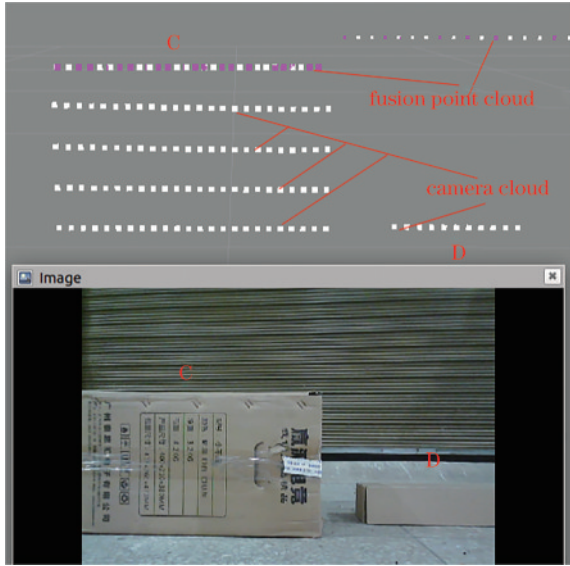


图 1 同一坐标系下的激光数据和相机数据

Fig. 1 Laser data and camera data in the same coordinate system

距离大于 0.01 m 且小于 0.55 m 时,保留该点云。

3) 激光雷达数据截取。激光雷达扫描范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 根据雷达在小车上的安装位置对其范围进行截取。以小车前进方向为中轴线, 左右两边各截取 45° 角, 所以有效扫描范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

4) 数据融合。通过 PCL 中的指针变量对两片点

云进行拼接融合。

5) 半径滤波。由于原始数据存在一些离散的错误点云, 融合后的点云中同样存在错误点云。所提方法采用 PCL 中的半径滤波器进行滤波, 减少离散点云。

6) 通过 pointcloud2_to_laserscan 将融合点云转换为激光数据, 结果如图 2 所示。

所提方法的总体框图如图 3 所示。



图 2 融合点云转换的激光数据

Fig. 2 Laser data converted from fusion point cloud

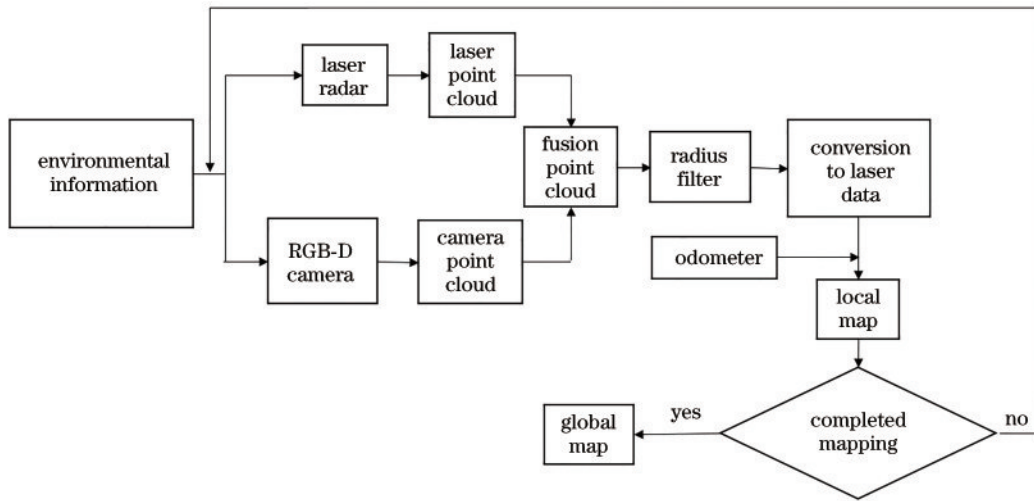


图 3 所提方法的总体框图

Fig. 3 General block diagram of the proposed method

2.3 点云匹配方法

选用 PL-ICP 算法^[19]进行 SLAM 前 endpoint 云匹配, 相较于原始迭代最近点 (ICP) 算法^[20], PL-ICP 算法的收敛性和整体匹配精度都有所提高。PL-ICP 算法的目标函数表达式为

$$\min_q \sum (n_i^T [p_i \oplus q_{k+1} - \prod \{S^{ref}, p_i \oplus q_k\}])^2 \quad (4)$$

ICP 算法的目标函数表达式为

$$\min_q \sum_i \| p_i \oplus q_{k+1} - \prod \{S^{ref}, p_i \oplus q_k\} \|^2 \quad (5)$$

式中: S^{ref} 为一参考平面; p 为点集; q 为 S^{ref} 和 p 之间的旋转平移关系; n_i^T 表示在映射点处的参考表面法向量; \oplus 表示旋转平移算符; k 为迭代次数; i 表示输入帧中激光点的序号。 $\prod \{S^{ref}, p_i \oplus q_k\}$ 可看作 k 时的参考帧, $p_i \oplus q_{k+1}$ 看作 p 在 $k+1$ 时经过 R 和 t 变化到 k 时刻的当前帧。 $p_i \oplus q_{k+1}$ 与 $\prod \{S^{ref}, p_i \oplus q_k\}$ 的差值为一向

量,所以式(4)求的是一向量在 n_i^T 上的投影,即直线的距离的平方,式(5)求一向量模的平方。当目标函数取得最小值时,求得旋转矩阵和平移矩阵为最优解。

3 里程计

里程计是 Gmapping 建图的重要参数之一。轮式里程计在车轮打滑时会产生误差,且小车长时间行驶时也会产生累积误差。为了减小里程计误差,所提方法参照文献[21-23]提出的一种多传感器里程计融合方法。

3.1 多传感器里程计融合框图

如图 4 所示,对激光里程计、视觉里程计和轮式里

程计进行了融合。激光里程计的原理是:先利用 PL-ICP 算法对最新输入的激光点云数据与上一帧点云数据进行帧间匹配,求得变换矩阵,输出的最新里程计信息为上一帧里程计信息与当前求得的变换矩阵的累加。视觉里程计的原理是:先从相机采集到的 RGB-D 图像信息中提取特征点,然后进行特征点匹配,从而得到相机的变换矩阵,对变换矩阵进行累加得到视觉里程计信息。轮式里程计直接从电机的光电编码器获得。里程计融合过程:首先对激光里程计和视觉里程计采用 Kalman 滤波思想进行融合,获得两者的融合里程计;然后再对获得的融合里程计与轮式里程计进行动态加权二次融合,获得最终更加精确的里程计信息。

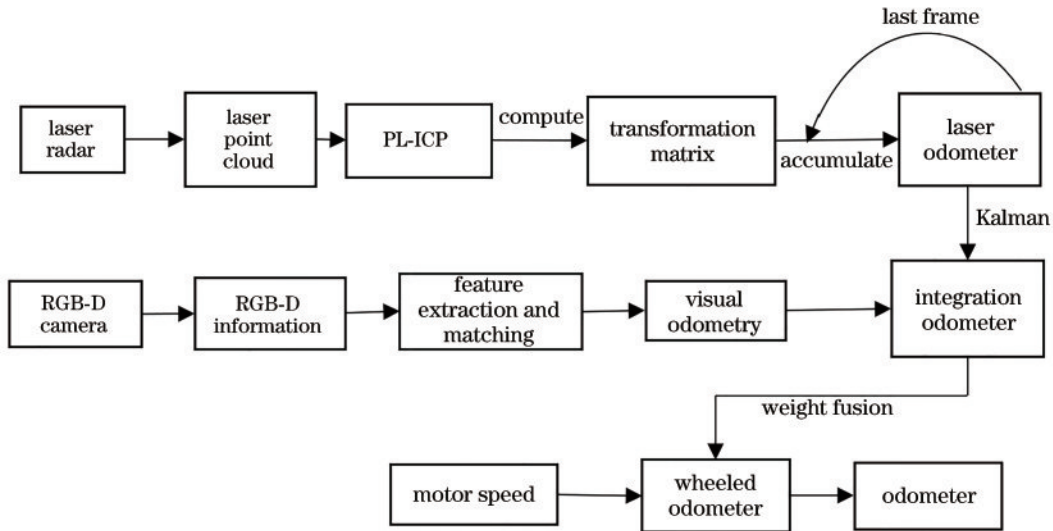


图 4 里程计融合框图

Fig. 4 Fusion diagram of odometer

3.2 Kalman 滤波融合方法

视觉里程计的权重:

$$K = \frac{\sigma_v^2}{\sigma_v^2 + \sigma_s^2} \quad (6)$$

融合:

$$X_k = X_v + K(X_s - X_v) \quad (7)$$

里程计误差更新:

$$\sigma_v = X_v - X_k, \sigma_s = X_s - X_k \quad (8)$$

式中: K 表示视觉里程计权重占比; X_k 和 X_s 表示 k 时刻视觉里程计和激光里程计信息; X_k 表示 k 时刻融合后的里程计信息; σ_v 和 σ_s 是视觉里程计和激光里程计与融合后的里程计在 k 时刻的误差, $k=0$ 时, σ_v 和 σ_s 为传感器在静止状态下的误差。

3.3 动态加权融合方法

采用动态调节所占权重的方法对融合里程计与轮式里程计进行融合。各里程计所占权重的大小是根据各里程计方差的大小确定的,方差越大权重越小,可以表示为

$$L = \left(\frac{\delta_d}{\delta_d + \delta_k} \right) X_k + \left(1 - \frac{\delta_d}{\delta_d + \delta_k} \right) p_d \quad (9)$$

式中: L 为融合后的里程计信息; p_d 为轮式里程计信息; δ_d 为轮式里程计信息的方差; δ_k 为融合里程计信息方差。

4 实验过程与结果分析

4.1 实验方案设计

以 Turtlebot2 型移动机器人为移动平台,其上搭载的传感器分别为 RPLIDAR A1 雷达和 Astra Pro 深度相机,如图 5 所示。RPLIDAR A1 雷达和 Astra Pro 深度相机的具体参数如表 1 和表 2 所示。

机器人上位机为惠普笔记本电脑,机器人总体高度为 0.55 m,如图 6 所示。为了更好地控制移动机器人移动建图,采用阿修罗游戏手柄进行远程控制。软件平台为 Ubuntu18.04 上安装的 ROS Modelic 操作系统。实验场地长 5.6 m,宽 3.18 m,场地上放置有不同形状大小的物体用来模拟办公室等复杂环境,如图 7 所示。

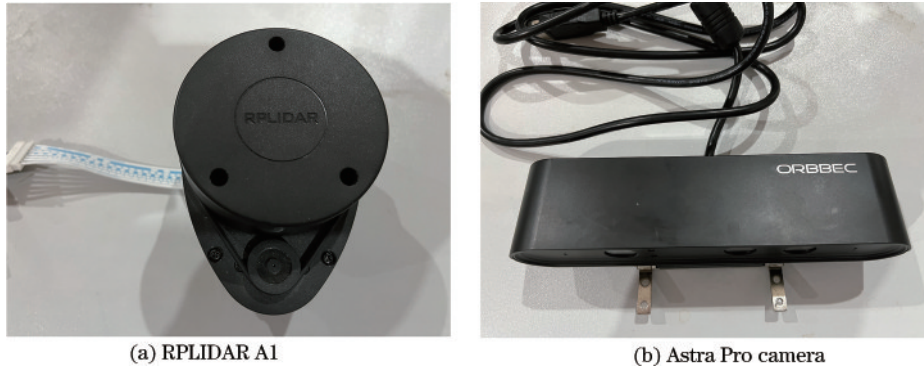


图 5 RPLIDAR A1 与 Astra Pro 相机
Fig. 5 RPLIDAR A1 and Astra Pro camera

表 1 RPLIDAR A1 参数
Table 1 RPLIDAR A1 parameters

Parameter	Value
Measuring radius /m	0.15-12
Sampling frequency /10 ³	8
Scanning frequency /Hz	5.5
Angular resolution / (°)	≤1
Scanned area / (°)	360
Accuracy of ranging	actual distance 1% (≤3 m)
	actual distance 2% (3-5 m)
	actual distance 2.5% (5-12 m)

表 2 Astra Pro 相机参数
Table 2 Astra Pro camera parameters

Parameter	Value
Measuring range /m	0.6-8
Resolution of color image	1280×720@30 frame/s
Resolution of depth map	1280×1024@7 frame/s
Precision	±(1-3) mm@1 m
Colour FOV	H66.1° and V40.2°
Depth FOV	H58.4° and V45.5°
Delay time /ms	30-45

其中 A 物体中间横杠高 0.42 m, 小车不能从下面通过; B 与 A 刚好相反, 小车能从下面通过; 纸箱 C 能同时被激光雷达和相机扫描到, 而纸箱 D 只能被相机扫描到。

对实验场地分别进行了多次激光建图、相机建图和激光相机融合建图, 建图效果如图 8 所示。

4.2 结果分析

图 8(a) 为实际测量得到的参考图, 图 8(b) 为激光建立的栅格地图, 图 8(c) 为相机建立的栅格地图, 图 8(d) 为激光与相机融合建立的栅格地图。从图 8 可以直观地看出, 图 8(d) 比图 8(b) 检测到的障碍物更多, 比图 8(c) 建图效果更好, 更接近图 8(a)。为了更

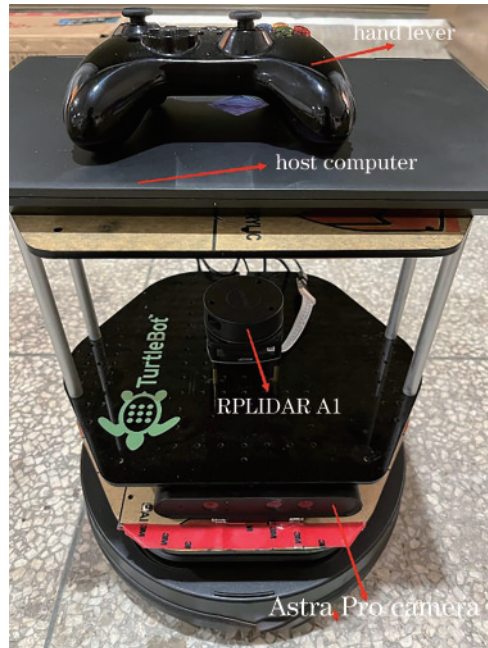


图 6 移动机器人
Fig. 6 Mobile robot



图 7 实验场地
Fig. 7 Experimental site

好地体现激光与相机融合建图的优点, 计算了建图时间、障碍物检测率、地图的尺寸及角度精度, 并测量出融合里程计相对于原来里程计的改善情况。

1) 建图时间和障碍物检测率

建图时间取 10 次建图所用的平均时间。设障碍物检测率为 f , 从传感器建立的地图中所检测到的障碍

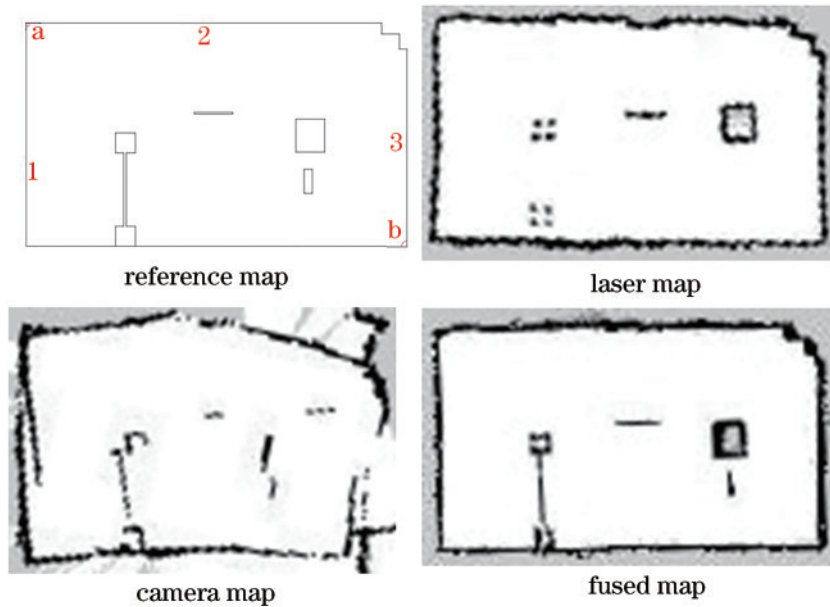


图 8 参考图和三种方法的栅格地图

Fig. 8 Standard map and grid maps obtained by three methods

物的总边长为 S_1 , 参考图中实际障碍物的总边长为 S_2 , 则有

$$f = S_1 / S_2 \quad (10)$$

障碍物检测率和建图时间如表 3 所示。

2) 地图尺寸精度及角度精度

选取 3 条线段和两个角度进行测量和误差分析, 所选线段和角度如图 8(a) 所示, 测量和误差分析结果如表 4 所示。

3) 融合里程计精度

测量小车 3 次行走的实际距离, 并与轮式里程计和融合里程计的数值进行比较, 计算出融合里程计的精度, 如表 5 所示。

表 3 障碍物检测率和建图时间

Table 3 Obstacle detection rate and mapping time

Parameter	Laser	Camera	Laser and camera
Obstacle detection rate / %	61.28	73.45	93.31
Mapping time / s	23.3	54.6	35.7

表 4 测量结果及误差分析

Table 4 Measurement results and error analysis

Parameter	Actual	Laser	Camera	Laser and camera
Line 1 / m	3.25	3.171	3.963	3.181
Line 2 / m	5.18	5.100	5.977	5.167
Line 3 / m	2.77	2.616	2.539	2.69
Angle a / (°)	90	91	96	91
Angle b / (°)	90	88	91	90
Line average absolute error / m		0.0279	0.1554	0.0145
Angle average absolute error / (°)		1.5	3.5	0.5

表 5 里程计测量结果

Table 5 Odometer measurement results

Parameter	Actual	Old odometer	Fusion odometer
The first distance / m	3.130	3.127	3.132
The second distance / m	2.045	2.051	2.044
The third distance / m	3.000	2.990	3.006
Absolute error / %		0.23	0.11

由表 3~5 可知: 所提激光与相机融合建图方法的障碍物检测率为 93.31%, 比激光建图高 32.03 个百分点, 比相机建图高 19.86 个百分点; 在地图尺寸精度方

面, 比激光建图的尺寸平均绝对误差小 0.014 m, 比相机建图小 0.141 m; 在角度精度方面, 角度平均绝对误差比激光建图小 1°, 比相机建图小 3°; 里程计精度提高了 0.12 个百分点。由于数据融合使计算量增加, 建图时间增多, 比激光建图多 53.22%; 又因为数据经过裁剪、滤波等预处理, 数据处理量比原相机数据小, 所以建图时间比相机建图少 34.62%。综合来看所提方法具备可行性。

5 结 论

为使移动机器人在 Gmapping 建图时有更好的建

图效果,提出了一种激光与相机融合建图方法。该方法的融合数据结合了激光数据精度方面的优势和相机数据信息丰富的优点,在保持一定地图精度的同时有效提高了对障碍物的检测能力。多种传感器里程计信息的融合充分利用了车载传感器功能,提高了建图中所需里程计信息的精确度,使地图精度得到有效提高。实验结果表明:所提方法的障碍物检测率比激光建图高 32.03 个百分点,比相机建图高 19.86 个百分点;地图的尺寸平均绝对误差比激光建图小 0.014 m,比相机建图小 0.141 m;地图的角度平均绝对误差比激光建图小 1° ,比相机建图小 3° ;建图时间比激光建图多 53.22%,比相机建图少 34.62%;相比原始里程计,里程计精度提高了 0.12 个百分点。所提方法还有很多不足之处,如数据融合使建图时间增加和里程计精度有待进一步提高等,下一步工作将会利用多线程处理的方法减少数据处理时间,并将 IMU 融入里程计中以进一步提高里程计精度。

参 考 文 献

- [1] 刘浩敏,章国锋,鲍虎军.基于单目视觉的同时定位与地图构建方法综述[J].计算机辅助设计与图形学报,2016,28(6):855-868.
Liu H M, Zhang G F, Bao H J. A survey of monocular simultaneous localization and mapping[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(6): 855-868.
- [2] 王锦凯,贾旭.视觉与激光融合 SLAM 研究综述[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2020,40(6):356-361.
Wang J K, Jia X. Survey of SLAM with camera-laser fusion sensor[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 40(6): 356-361.
- [3] Bailey T, Durrant-Whyte H. Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(3): 108-117.
- [4] Durrant-Whyte H, Bailey T. Simultaneous localization and mapping: part I[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(2): 99-110.
- [5] Grisetti G, Stachniss C, Burgard W. Improved techniques for grid mapping with Rao-blackwellized particle filters[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(1): 34-46.
- [6] Hess W, Kohler D, Rapp H, et al. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 16-21, 2016, Stockholm, Sweden. New York: IEEE Press, 2016: 1271-1278.
- [7] Endres F, Hess J, Engelhard N, et al. An evaluation of the RGB-D SLAM system[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 14-18, 2012, Saint Paul, MN, USA. New York: IEEE Press, 2012: 1691-1696.
- [8] Mur-Artal R, Montiel J M M, Tardós J D. ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(5): 1147-1163.
- [9] 陈文佑,章伟,胡陟,等.一种融合深度相机与激光雷达的室内移动机器人建图与导航方法[J].智能计算机与应用,2021,11(4):159-163.
Chen W Y, Zhang W, Hu Z, et al. An indoor mobile robot mapping and navigation method integrating depth camera and lidar[J]. Intelligent Computer and Applications, 2021, 11(4): 159-163.
- [10] 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, October 25-27, 2018, Shenzhen, China. New York: IEEE Press, 2018: 121-126.
- [11] 张恒,徐万红,张禹.激光雷达与深度相机融合的 SLAM 技术研究[J].机械工程师,2020(7):22-24,29.
Zhang H, Xu W H, Zhang Y. Research on SLAM technology of lidar and depth camera fusion[J]. Mechanical Engineer, 2020(7): 22-24, 29.
- [12] 晏小彬,彭道刚,威尔江.基于地平面的单目视觉辅助激光雷达 SLAM 研究[J].光学学报,2020,40(24):2428002.
Yan X B, Peng D G, Qi E J. Research on ground-plane-based monocular aided LiDAR SLAM[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2428002.
- [13] 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):0228007.
Bai C Y, Wang J J, Cheng X X, et al. Spatial positioning optimization of driverless wheelchair by fusion of laser SLAM[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(2): 0228007.
- [14] 申东,徐雨航,李强,等.基于稀疏位姿优化的激光 SLAM 算法研究[J].激光与光电子学进展,2021,58(24):2428003.
Shen D, Xu Y H, Li Q, et al. Research on laser SLAM algorithm based on sparse pose optimization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(24): 2428003.
- [15] 卢俊鑫,方志军,陈婕好,等.点线特征结合的 RGB-D 视觉里程计[J].光学学报,2021,41(4):0415001.
Lu J X, Fang Z J, Chen J Y, et al. RGB-D visual odometry combined with points and lines[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 0415001.
- [16] 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.
Hu S X, Chen C P, Zhang A W. Application of SLAM in vehicle-borne mobile mapping system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(11): 1108012.
- [17] 尹皓,李海滨,王利利.基于多传感器融合的移动机器人定位研究[J].机床与液压,2021,49(9):6-10.
Yin H, Li H B, Wang L L. Research on mobile robot localization based on multi-sensor fusion[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(9): 6-10.
- [18] Kassir A, Peynot T. Reliable automatic camera-laser calibration[C]//Proceedings of the 2010 Australasian Conference on Robotics and Automation, ACRA 2010, June 18, 2020, Australia. Brisbane: ARAA, 2010.

- [19] Censi A. An ICP variant using a point-to-line metric[C]// 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 19-23, 2008, Pasadena, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008: 19-25.
- [20] Arun K S, Huang T S, Blostein S D. Least-squares fitting of two 3-D point sets[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(5): 698-700.
- [21] 姜祚鹏, 梅天灿. 一种基于 PL-ICP 及 NDT 点云匹配的单线激光里程计[J]. 激光杂志, 2020, 41(3): 21-24.
Jiang Z P, Mei T C. A single-line laser odometer based on PL-ICP and NDT point-cloud matching[J]. Laser Journal, 2020, 41(3): 21-24.
- [22] 赵文龙, 高建焯, 何涛. 融合多传感器的自主 AGV 定位研究[J]. 现代制造工程, 2021(10): 85-90, 113.
Zhao W L, Gao J Y, He T. Research on autonomous AGV location based on multi sensor fusion[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(10): 85-90, 113.
- [23] 周唐恺, 江济良, 王运志. 一种融合视觉里程计与物理里程计的室内机器人定位方法: CN107356252A[P]. 2017-11-17.
Zhou T K, Jiang J L, Wang Y Z. Indoor robot positioning method by combining visual odometer and physical odometer: CN107356252A[P]. 2017-11-17.