

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.02.03

轮式机器人环境建图计量评价方法研究

张昱¹, 温聚英², 姜延欢¹, 崔佳慧¹, 吴娅辉¹, 田森¹

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095;

2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 针对移动机器人环境建图计量评价指标缺失和评价技术不完善的问题, 本文以轮式机器人和 Fast-Slam 建图算法为研究对象, 通过构造实物场景和标准数字地图, 提取准确、有效、可靠的环境地图评价指标, 全方位对激光雷达和其建图结果进行计量评价。本方法提出全局特征参数和局部特征参数等多种评价指标, 为移动机器人环境建图质量和环境建图算法优越性的合理评价提供支撑。

关键词: 评价指标; 激光雷达; 实物验证平台; 标准数字地图; 环境建图

中图分类号: TB9; TJ06

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)02-0019-09

Research on measurement and evaluation method of environment mapping of wheeled robot

ZHANG Yu¹, WEN Juying², JIANG Yanhuan¹, CUI Jiahui¹, WU Yahui¹, TIAN Sen¹

(1. Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Changcheng Institute of Metrology & Measurement,

Beijing 100095, China; 2. China Academy of Launch Vehical Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: In view of the lack of indicators and the imperfection of technology in measurement and evaluation of mobile robot environment mapping, this paper takes wheeled robot and FastSlam mapping algorithm as the research object, constructs physical scene and standard digital map, and extracts accurate, effective and reliable environmental map evaluation indicators to measure and evaluate the mapping sensor lidar and its mapping results from all directions. This method proposes multiple evaluation indicators such as global feature parameters and local feature parameters, providing support for the reasonable evaluation of the quality of mobile robot environmental mapping and the superiority of environmental mapping algorithms.

Key words: evaluation index; Lidar; physical verification platform; standard digital map; environmental mapping

0 引言

随着人类探索领域的不断拓展, 仅依赖人类自身的力量已经不能在复杂、多变的未知环境中完成任务, 采掘、医疗、海洋开发、宇宙探测等

行业均提出了自动化的要求, 各种应用于不同领域的移动机器人应运而生。机器人在未知环境中的移动作业离不开环境地图的感知和创建, 环境建图的准确性对于提升机器人自主化水平具有重要意义^[1-2]。20世纪90年代, 众多学者开始了以

收稿日期: 2023-02-02; 修回日期: 2023-03-31

基金项目: 国家技术基金项目(KBC52102580); 航空工业计量所创新基金(ZC02201580)

引用格式: 张昱, 温聚英, 姜延欢, 等. 轮式机器人环境建图计量评价方法研究[J]. 计测技术, 2023, 43(2): 19-27.

Citation: ZHANG Y, WEN J Y, JIANG Y H, et al. Research on measurement and evaluation method of environment mapping of wheeled robot[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(2): 19-27.



研究路径规划、自主导航及高水平的环境信息获取等为标志的更深层次探索, 移动机器人的环境建图技术成为研究热点^[3-4]。

激光雷达作为机器人环境建图的主要传感器^[5], 通过计算激光信号从被发射到被接收所经过的时间来确定目标距离, 根据激光的发射角度来确定目标的具体位置, 再结合目标物体表面的反射能量大小、发射波谱的幅度、频率和相位等信息, 呈现出目标的精确信息。目前, 常用的二维激光雷达建图主要有 Gmapping^[6], FastSLAM^[7], Frontier exploration 和 CartoSLAM^[8] 等。后续试验中选用 FastSLAM 作为试验验证算法。

多种建图算法与扩展卡尔曼滤波 (Extended-Kalman Filtering, EKF)^[9]、粒子滤波、网格映射等优化方法相互结合, 共同促进了环境建图领域的技术发展。然而该领域一直缺乏针对建图质量的公正评价手段^[10]。Birk 等人采用图像相似性和交叉熵作为评价栅格地图质量的指标^[11], 该指标给出了在噪声和姿态误差存在时, 地图相对于真实世界的失真情况, 并且已嵌入在雅各布斯地图分析工具包, 在机器人世界杯救援中用于地图比较测试。2013年, 武汉理工大学的张磊提出了一种基于环境特征值地图的优化算法和一种二维平面点云数据轮廓提取方法^[12], 将数据库特征值信息通过一定的坐标转换构建在固定分辨力的 bmp 图像上, 对 bmp 二维地图进行栅格化处理和矩形优化处理, 最终形成基于特征点的矩形优化地图, 通过构建带有障碍物的场景来评判地图的优劣, 其中局部地图的质量主要通过量化障碍物的几何特征进行评价。Creed 等人介绍了由现有地图算法生成的机器人地图的工具包 (Temple Map Evaluation Toolkit, TMET) 进行评价的方法^[13]。该工具包通过比较目标地图和被定义为真值的地面地图之间的相似性, 形成基于位姿和网格的评价方法。还有其他学者尝试检测地图中的要素或地点^[14], 例如在文献^[15]中使用 Harris 角点检测器、Hough 变换和尺度不变特征转换 (Scale-invariant feature transform, SIFT), 或者应用特征点检测与匹配 (Speeded-Up Robust Features, SURF) 和房间检测方法。这些方法有一个共同点, 即将检测到的特征与真实世界中对应元素进行匹配, 以此评价地

图质量。为了简化这一过程, 部分试验选择在环境中使用人造标记。

移动机器人生成的地图是对现实世界的抽象, 往往存在一定的误差, 特别是在非结构化环境中, 这种现象将更加严重^[16]。目前, 机器人环境建图的定量评价尚未形成公认的标准, 对于推断建图系统的性能需要遵循哪些客观的评价程序, 也没有达成共识^[17-18]。因此, 本文将进行确保智能移动机器人性能提升的基础研究, 构建准确、有效、可靠的环境地图的评价指标及方法。

1 环境建图计量评价方法

1.1 激光雷达评价指标和方法

点云是利用激光雷达在同一空间参考系下获取物体表面每个采样点的空间坐标, 是一系列表达目标空间分布和目标表面特性的海量点的集合, 通过分析激光雷达发射的激光束遇到目标的折返时间和强度获得。

激光雷达的评价指标主要包括点云的位置和强度, 其中, 点云位置包括: 点云数量、点云密度分布、点云平面拟合度和点云最大偏离距离; 点云强度包括: 点云强度分布、点云强度信噪比以及点云强度与位置关系。

针对点云位置方面指标, 激光雷达建图中点云 $P_i(x, y, z)$

$$\text{if } Dis_{p\alpha} < \delta, N++ \quad (1)$$

式中: α 为反光板所在平面位置; $Dis_{p\alpha}$ 为点云 $P_i(x, y, z)$ 到平面 α 的距离; N 为测试区域内激光雷达总点云数, 即数量指标参数, 个; δ 为误差因子, 可根据实际场景人为调整, 在后续试验中 δ 设置为 1 cm。激光点云密度 ρ 计算公式为

$$\rho = \frac{N}{A} \quad (2)$$

式中: A 为测试区域面积, cm^2 。

均方根误差 RMS 是观测值与真值偏差的平方和观测次数 n 比值的平方根, 使用均方根误差来表示点云平面拟合度, 其中真实值为点云原始位置, 观测值为点云拟合后的平面位置。计算公式为

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N D_i^2}{N}} \quad (3)$$

式中: D_i 为原始点云位置和拟合平面的距离, cm 。

最大平面位置误差用于评价样本数据中激光雷达点云数据的平面位置与真实的平面位置之间的最大距离, 即

$$d_{XY\max} = \max \left[\sqrt{(X_i - \widehat{X}_i)^2 + (Y_i - \widehat{Y}_i)^2} \right] \quad (4)$$

式中: $d_{XY\max}$ 为最大平面位置误差, cm; X_i 为激光点云在 X 方向上的平面位置; \widehat{X}_i 为 X 方向上的实际平面位置; Y_i 为激光点云在 Y 方向上的平面位置; \widehat{Y}_i 为 Y 方向上的实际平面位置。点云平面拟合采用 Ransac 方法, 从点云数据集中随机选出能组成平面最小数目的点云, 并使用这些点云计算出相应平面的参数。通过设置阈值在所有点云数据中记录符合该平面模型的样本数量, 重复上述过程直至输出满足最多样本点的平面结果。

点云强度信噪比用于评价激光雷达点云数据的强度值与噪声强弱的关系, 反映了激光雷达强度值受噪声干扰程度, 通过目标区域内激光雷达点云数据强度值的平均值和标准差进行评定。激光雷达点云数据的强度信噪比为

$$R_{\text{snr}} = 10 \log_{10} \frac{\overline{DN}}{\sigma} \quad (5)$$

式中: R_{snr} 为强度信噪比; \overline{DN} 为区域内点云的强度值的平均值; σ 为区域内点云强度值的标准差。

1.2 环境建图评价指标和方法

环境建图结果的评价指标主要分为两部分: 局部特征参数评价和全局特征参数评价。局部特征参数包括内部标准模型位置误差、内部标准模型尺寸误差、内部标准模型变形程度。

1) 内部标准模型位置误差

内部标准模型位置评价标准为环境建图结果图像中某一标准模型左上角位置坐标与标准数字地图中对应模型左上角位置坐标之间的欧氏距离, 计算公式为

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (6)$$

式中: D 为内部标准模型位置误差指标; (x_1, y_1) 为环境建图结果图像中标准模型左上角位置坐标, (x_2, y_2) 为标准数字地图中对应模型左上角位置坐标, 坐标系单位为 mm。

2) 内部标准模型尺寸误差

内部标准模型尺寸评价标准为内部标准模型模板匹配过程中最佳匹配模板的尺寸与标准模型

对应原尺寸之差, 计算公式为

$$L_{\text{in}} = L_1 - L_2 \quad (7)$$

式中: L_{in} 为内部标准模型尺寸误差指标, mm; L_1 为最佳匹配正方形模板的边长, mm; L_2 为对应标准模型原尺寸, mm。

3) 内部标准模型的变形程度

内部标准模型的变形程度评价标准为最佳模板匹配结果的误差, 计算公式为

$$E(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |S_{ij}(m, n) - T(m, n)| \quad (8)$$

式中: $E(i, j)$ 为内部标准模型的变形指标; $T(m, n)$ 为匹配模板; S_{ij} 为被搜索图; $S_{ij}(m, n)$ 为搜索图被覆盖子图; i, j 为子图左上角在被搜索图 S 上的坐标, 坐标系单位为 mm。

如图 1 所示, 蓝色圆点为区域内初始点云位置, 蓝色虚线框为点云拟合矩形, 红色为初始矩形位置。 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$ 为拟合矩形和初始矩形左上角端点位置, L_1 和 L_2 为拟合矩形和初始矩形尺寸。

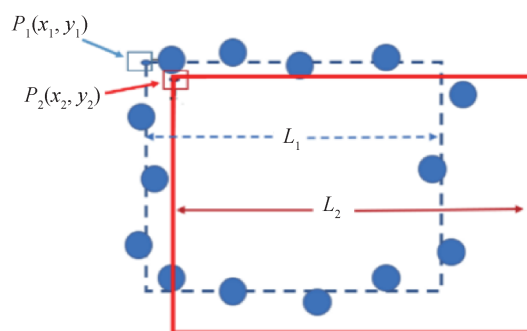


图 1 点云位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of point cloud location

全局特征参数评价指标包括全局场景尺寸和全局相似性评价。

1) 全局场景尺寸

全局场景尺寸评价标准为环境建图结果图像中外围轮廓所围成外框尺寸与标准数字地图边缘尺寸之差, 计算公式为

$$\begin{cases} L_{\text{out}_{\text{hor}}} = L_3 - L_5 \\ L_{\text{out}_{\text{ver}}} = L_4 - L_6 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $L_{\text{out}_{\text{hor}}}$ 为全局场景尺寸中水平方向指标, mm; $L_{\text{out}_{\text{ver}}}$ 为竖直方向指标, mm; L_3, L_5 为环境建图结果图像中外围轮廓和标准数字地图边缘水平方向尺

寸, mm; L_4, L_6 为环境建图结果图像中外围轮廓和标准数字地图边缘垂直方向尺寸, mm。

2) 全局相似性

全局相似性评价基于地图和地面真实值之间的最小均方欧几里德距离 (LMS-ED) 的度量 [14], 原理公式为

$$\psi(a, a', c) = \frac{\sum_{a[p_1]=c} \min(md(p_1, p_2) | a'(p_2)=c)}{\#_c(a)} \quad (10)$$

式中: $\psi(a, a', c)$ 为全局相似性指标; c 为固定大小的颜色集合; $a[p_1]$ 为像素阵列 a 在位置 $p(x, y)$ 处的颜色 c ; $md(p_1, p_2)$ 为像素之间的曼哈顿距离;

$\#_c(a)$ 为 a 中颜色 c 的像素数。

2 环境建图计量评价试验验证

试验整体分为两部分: 首先是对轮式机器人环境建图所依赖的主要传感器—激光雷达进行测试和评价, 其次是对整体建图结果进行评价。

激光雷达测试评价试验原理如图2所示。试验前使用步进电机驱动直线导轨, 控制激光雷达做直线移动, 其中运动速度和距离变化情况由伺服电机控制器设定。而后通过机器人上搭载的32线激光雷达对已标定的规则反光板进行扫描, 对返回的点云数据进行分析。

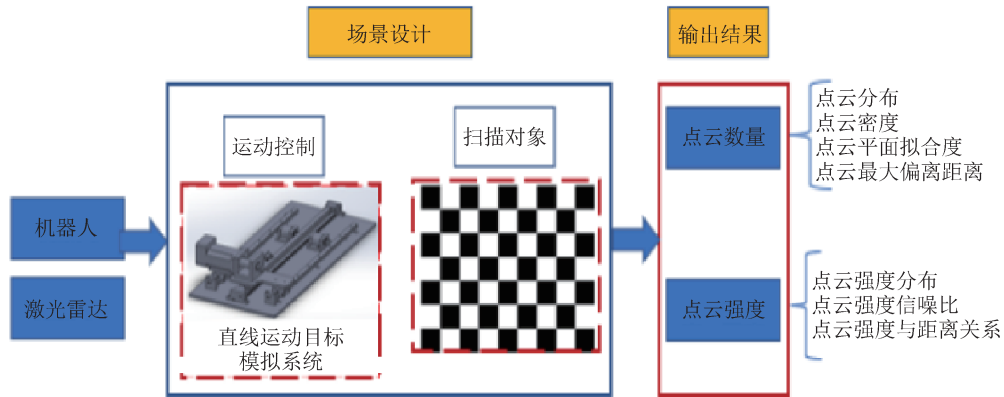


图2 激光雷达评价试验原理图

Fig.2 Schematic diagram of lidar evaluation test

如图3所示, 针对轮式机器人环境建图结果的评价试验流程为: ①通过合理摆放正方体、长方体、圆柱等标准模型, 在实验室中构建标准实物场景; ②使用激光测距仪对实物场景进行精准测量, 通过编程软件实现标准数字地图的绘制, 同时轮式机器人通过扫描激光雷达采集点云数据, 使用 FastSLAM 算法进行环境建图; ③通过比较标准数字地图和轮式机器人的建图结果, 确定地图参数指标集和评价方法 (包括局部特征参数评价和全局特征参数评价两类); ④分析指标评价过程是否完成: 如果完成, 则环境建图计量评价结束; 如果尚未完成, 则进行影响因素调整和重复性测试操作后, 返回步骤②。

目前处理 slam 问题时主要有特征地图、拓扑地图、栅格地图3种类型。特征地图可以对环境进行直观描述, 针对特征建立模型, 简洁明了, 可以大大降低构建地图的计算量, 但对环境中的干扰抵抗能力较差, 不适合非结构化的复杂环境;

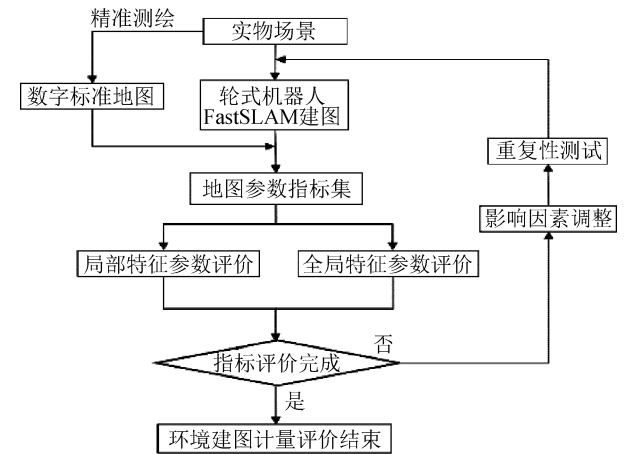


图3 环境建图结果评价试验流程图

Fig.3 Flow chart of environmental mapping result evaluation test

拓扑地图是一种容易被机器人理解的构图方式, 但是这种表达方式会导致辨识度不高, 不容易构建大环境下的地图; 栅格地图将二维空间分割成若干大小相等的栅格, 通过对地图中每个栅格进行探测并赋值, 完成对平面环境的地图构建, 抗

环境干扰能力较强，在建图之后方便后续的导航等研究。本试验中采用栅格地图作为评价对象，指标提取算法也都根据栅格地图特点设计。

试验中所用到的装置器材如图4所示，主要包括：搭载32线激光雷达的轮式机器人、标准实物场景模型、直线导轨和反光板。真实军事环境复杂多变，难以在现阶段试验中对其场景进行完全复现，考虑到军事场景中物体也多以点、线、面等特征体现，且这些基础元素也便于计量领域的定量表征，因此在实验室环境下以正方体、长方体、圆柱、球等标准模型作为代替，组合构造简单场景，初步实现轮式智能移动机器人环境建图计量评价。

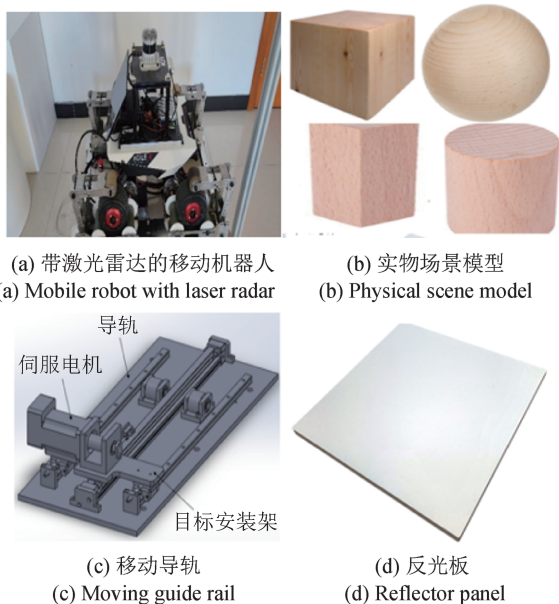


图4 试验装置及器材
Fig.4 Test device and equipment

3 结果和讨论

3.1 激光雷达评价试验结果

试验中反光板分为大尺寸反光板和小尺寸两种，其中大反光板尺寸为3 m × 2 m，小反光板尺寸为1 m × 1 m。导轨分别放在距离反光板2, 4, 6 m的位置，伺服电机控制机器人以1 m/s的速度

做匀速直线运动，搭载在机器人上的32线激光雷达在不同场景下对周围点云数据进行采集。

点云数量是激光雷达的一项核心指标，与激光线数、测量角度、回波密度等重要参数性能有关。点云数量随距离变化如图5所示，随着激光雷达与反光板之间距离变大，落在发光板上的点也越少，两者关系呈线性。两次所采用反光板面积不一致，且两者面积比与点云数量比值差距较大，这是因为激光雷达在不同位置的点云密度有一定差异，反光板上部分的点云密度明显下降。

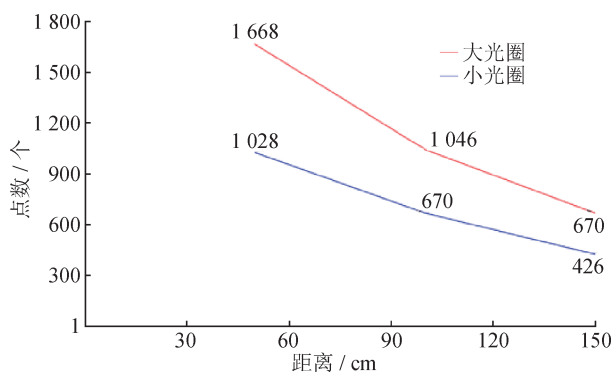


图5 点云数量随距离变化图

图5 Variation of the number of point clouds with distance

点云偏离距离为点云空间坐标与反光板之间的距离。以激光雷达距离小反光板2 m和6 m两种场景为例，如图6所示，横轴为点云所在距离范围均分20等份，纵轴为分布在其范围内的点云个数。可以看出，在2 m时，除了少部分边缘处，点云数量整体呈均匀分布；当距离变为6 m时，点云数量均匀程度明显变差，点云在一定范围内杂乱分布。

在点云数据拟合平面度方面，试验使用最小二乘和Ransanc两种方法，以拟合方程、均方根误差(RMS)和最大平面误差(MFE)3个指标作为标准。表1为拟合过程中RMS和MFE参数值，在不同距离下，激光雷达点云数据的平面拟合程度差距很小，Ransanc算法拟合效果相对较好，对离群点的鲁棒性更强。小反光板的点云平面拟合方程为

$$2m: 0.004\ 126\ 86x + 0.999\ 991y - 0.000\ 147\ 118\ 6z + 1.426\ 03 = 0 \quad (11)$$

$$4m: 0.040\ 991\ 8x + 0.998\ 912y - 0.022\ 255\ 4z + 1.977\ 84 = 0 \quad (12)$$

$$6m: 0.015\ 431\ 7x + 0.999\ 309y - 0.033\ 824\ 8z + 2.587\ 75 = 0 \quad (13)$$

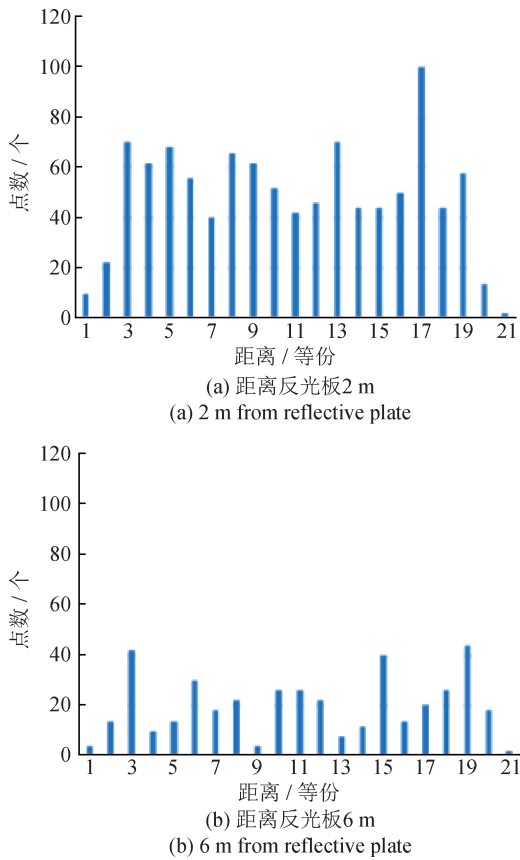


图6 不同距离下点云位置与反光板距离图

Fig.6 Diagram of point cloud position and reflector distance at different distances

表1 点云平面拟合中RMS和MFE

Tab.1 RMS and MFE in point cloud plane fitting

反光板	距离/m	RMS	MFE
小反光板	2	0.014 221	0.067 158
	4	0.014 111	0.059 066
	6	0.014 422	0.065 274
大反光板	2	0.009 938	0.042 841
	4	0.008 611	0.065 178
	6	0.007 617	0.043 510

如图7所示,以距离为2 m情况下小反光板不同位置点云强度分布云图为例,反光板上方位点云密度相较下方更为稀疏,同时点云强度也有明显下降。另外试验中发现,反光板上方位点云有向上倾斜的趋势。在比较距离2 m和6 m的点云强度分布云图后可以看出,点云密度随着激光雷达到反光板距离的增大而下降,点云强度有略微的

下降但不明显,在后续试验中加大距离,探究点云强度和距离的关系。点云强度信噪比如表2所示,在试验近距离条件下,并没有出现太大波动。

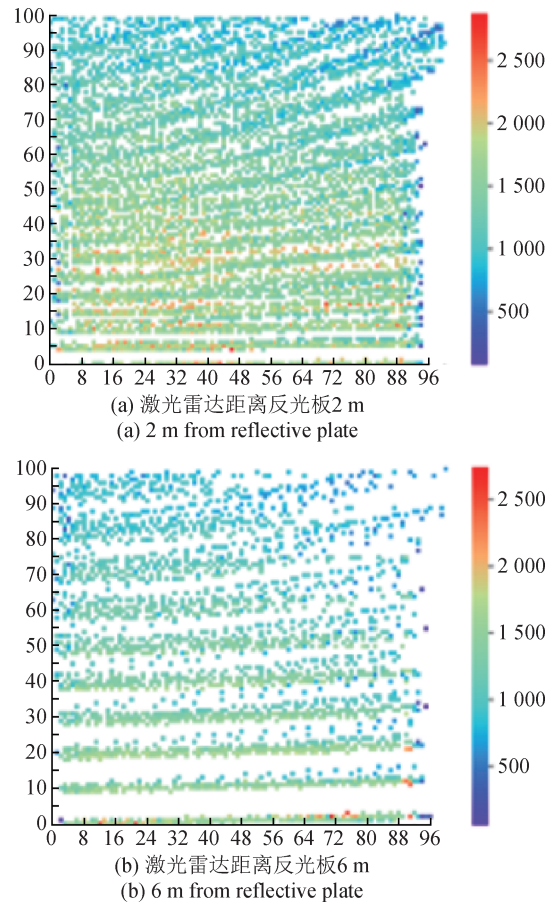


图7 反光板不同位置点云强度分布云图

Fig.7 Cloud chart of point cloud intensity distribution at different positions of reflector

表2 点云强度信噪比

Tab.2 Signal to noise ratio of point cloud intensity

反光板	点云强度信噪比		
	距离2 m	距离4 m	距离6 m
小反光板	5.535 0	5.897 6	5.784 3
大反光板	5.831 9	4.996 2	5.606 1

3.2 轮式机器人环境建图结果计量评价技术研究

针对拐角、杂物堆积和工作桌椅造成的场景不规则问题,试验中使用木板、窗帘等物品将其隔开,使用激光测距仪实现精确测量。整个实物场景尺寸为7 971 mm × 6 453 mm。由于机器人建

图过程中，每个单元像素格的尺寸为 5 cm × 5 cm，因此在 python 软件中生成 6 553 × 8 071（实物场景尺寸加上机器人环境建图边缘所占大小）规格的 png 格式图像，单位像素尺寸为 1 mm × 1 mm。标准数字地图如图 8 所示。

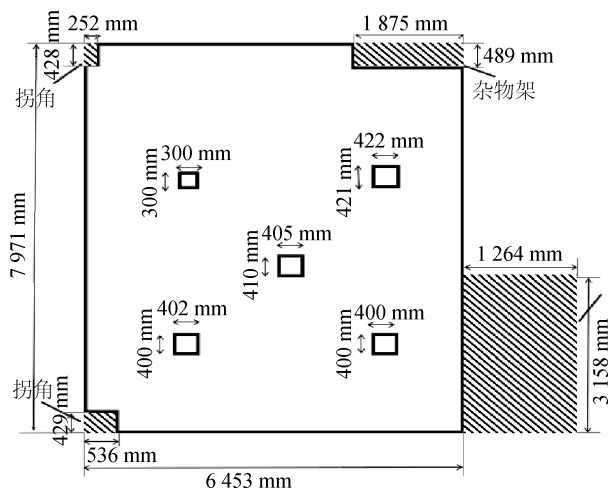


图8 标准数字地图
Fig.8 Standard digital map

按照既定规划路线，在场景中重复 15 次移动机器人环境建图，如图 9 所示，试验取第 1, 4, 7, 11, 15 次环境建图结果进行比较分析。为了尽量降低人为操作引入的误差，试验操作员提前在试

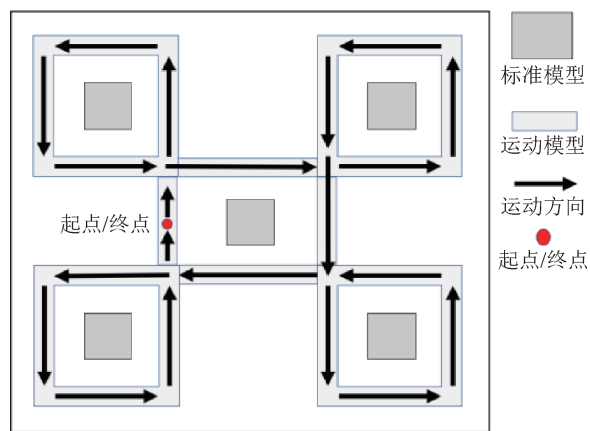


图9 实物场景中的路径规划
Fig.9 Path planning in physical scene

验场景中布置移动机器人的运动路径，严格控制机器人在规划的路径中运动。

根据位置信息，试验将内部 5 个标准模型的轮廓区别提取，针对每一个内部模型进行模板匹配。位置为最佳模板到达匹配位置时的左上角顶点坐标；尺寸为在 200 ~ 500 mm 范围内以 10 mm 为间隔选取的误差最小模板的边长值；误差为模型上所有点到最佳模板匹配位置上最短距离的平方和。部分评价结果如表 3 所示，模型标准值为矩阵 1 位置（1 600 mm，2 650 mm）、尺寸 350 mm；矩阵 3 位置（3 300 mm，4 350 mm）、尺寸 450 mm。

表3 局部特征评价结果

Tab.3 Evaluation results of local characteristics

次数	位置/mm		尺寸/mm		误差/mm	
	矩阵 1	矩阵 3	矩阵 1	矩阵 3	矩阵 1	矩阵 3
1	(1 632, 2 684)	(3 274, 4 369)	310	420	172	210
4	(1 646, 2 641)	(3 261, 4 371)	330	420	142	182
7	(1 587, 2 633)	(3 330, 4 291)	370	440	156	141
11	(1 612, 2 678)	(3 317, 4 333)	330	440	97	62
15	(1 622, 2 666)	(3 329, 4 361)	360	440	103	88

试验中轮式机器人的建图结果图像为黑白图像，不存在不同的颜色集合，所以 C = 白色。标准地图像素格尺寸为 1 mm × 1 mm，建图结果图像的像素格尺寸为 50 mm × 50 mm。根据试验实际情况，当以 1 mm 为单位计算图像相似性评价指标时，运算量过大，最后选择以 1 cm 为计算单位，

标准数字地图缩小 10 × 10 倍，建图结果图像放大 5 × 5 倍，使两者达到相同尺寸，方便进行图像相似度的评价。全局特征参数评价结果如表 4 所示，全局标准值为地图长 129 cm，宽 159 cm。

由上述试验结果研究发现，在不同重复次数下，机器人环境建图局部特征评价结果随着建图重

表4 全局特征评价结果

Tab.4 Evaluation results of global characteristics

次数	地图长/cm	地图宽/cm	图像相似度
1	129.03	159.35	0.97
4	128.85	159.27	0.98
7	128.78	159.43	0.98
11	128.92	159.53	0.98
15	128.79	159.64	0.98

复次数的增加,精度越来越高;全局特征评价结果十分相近,初步分析结果可能是由于建图算法本身精度的问题,导致部分全局特征指标在小场景下无法得到很好的效果。

4 结束语

针对机器人环境建图计量评价指标和技术缺失的问题,开展轮式机智能移动机器人环境建图计量评价技术研究。针对环境建图中常用传感器激光雷达,提出基于点云数量、点云密度分布、点云平面拟合度和点云最大偏离距离、点云强度信噪比5项指标,对激光雷达传感器性能从点云数量和强度两方面完成计量评价。针对建图结果栅栏地图,提出基于内部标准模型位置误差、内部标准模型尺寸误差、内部标准模型的变形程度3种局部特征参数评价指标,和全局场景尺寸、全局相似性两种全局特征参数评价指标,全方位对机器人建图结果进行计量评价。但在面对特定场景和不断更新的建图算法时,现有的评价指标方法仍不够完善。在后续试验中,机器人建图算法参数和大场景下的环境建图计量评价等方面仍需深入研究。

参考文献

- [1] SCHULTZAND A C, ADAMS W. Continuous localization using evidence grids[C]// Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998, 2833-2839.
- [2] 徐则中. 移动机器人的同时定位和地图构建[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- XU Z Z. Simultaneous localization and map-building for mobile robot[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [3] 危双丰, 庞帆, 刘振彬, 等. 基于激光雷达的同时定位与地图构建方法综述[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(2): 327-332.
- WEI S F, PANG F, LIU Z B, et al. Survey of LiDAR-based SLAM algorithm[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(2): 327-332. (in Chinese)
- [4] 高翔, 张涛. 视觉SLAM十四讲从理论到实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- GAO X, ZHANG T. Fourteen lectures on visual SLAM from theory to practice[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2019. (in Chinese)
- [5] ZHANG J, SINGH S. Low drift and real time lidar odometry and mapping[J]. Autonomous Robots, 2017, 41(2): 401-416.
- [6] GRISSETTI G, STACHNISS C, BURGARD W. Improved techniques for grid mapping with Rao-Blackwellized particle filters[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23: 34-46.
- [7] MONTEMERLO M, THRUN S, ROLLER D, et al. Fast-SLAM: a factored solution to the simultaneous localization and mapping problem[C]// Proceedings of AAAI national Conference on Artificial Intelligence. Palo Alto, CA: AAAI Press, 2002: 593-598.
- [8] KONOLIGE K, GRISSETTI G, BURGARD W, et al. Efficient sparse pose adjustment for 2D mapping[C]// Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei: IEEE Press, 2010: 22-29.
- [9] ZONG C F, HU D, ZHENG H Y. Dual extended kalman filter for combined estimation of vehicle state and road friction[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(2): 313-324.
- [10] 姜延欢, 杨永军, 李新良, 等. 轮式移动机器人自主导航计量评价现状[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 81-86.
- JIANG Y H, YANG Y J, LI X L, et al. Current status of measurement evaluation for autonomous navigation of wheeled mobile robots[J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(2): 81-86. (in Chinese)
- [11] VARSADAN I, BIRK A, PFINGSTHORN M. Determining map quality through an image similarity metric[C]// Robot Soccer World Cup. Springer, Berlin, Heidelberg,

- 2009.
- [12] 张磊. 基于视觉与惯性传感器的移动机器人环境地图创建方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
ZHANG L. Research on the method of creating mobile robot environment map based on vision and inertial sensor [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [13] CREED R, GEORGIEV K, LAKAEMPER R. A hybrid approach to 2D robotic map evaluation[C]// Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems. ACM, 2012.
- [14] 梁炜, 黄艳, 吴晓昱, 等. 结合电子地图的卫星导航动态定位轨迹测试方法研究[J]. 计测技术, 2022, 42(2): 32-39.
LIANG W, HUANG Y, WU X Y, et al. Research on test method of satellite navigation dynamic positioning track combined with electronic map[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(2): 32-39. (in Chinese)
- [15] RAINE K, STEDER B, DOMHEGE C, et al. On measuring the accuracy of SLAM algorithms[J]. Autonomous Robots, 2009, 27(4): 387.
- [16] 宫思远, 赵子越, 刘倩岷. 工业机器人校准技术与补偿方法发展现状及趋势[J]. 计测技术, 2021, 41(3): 1-8.
GONG S Y, ZHAO Z Y, LIU Q D. Development status and trends of industrial robot calibration technology and compensation methods [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(3): 1-8. (in Chinese)
- [17] CHANDRAN-RAMESH M, NEWMAN P. Assessing map quality using conditional random fields[C]// Field and Service Robotics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [18] GRISETTI G. Improving gridbased SLAM with rao-blackwellized particle filters by adaptive proposals and selective resampling[J]. Proceedings of 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2005.

(本文编辑: 田艳玲)



第一作者: 张昱 (1996—), 男, 助理工程师, 主要从事人工智能与计量校准技术相关研究。