

doi: 10.3969/j. issn. 1001 - 358X. 2017. 04. 022

测量技术

SLAM 在室内测绘仪器研发中的应用综述^{*}

蔡来良 杨望山 王姗姗 朱学练

(河南理工大学 测绘与国土信息工程学院 河南 焦作 454000)

摘要: SLAM(Simultaneous localization and mapping ,同时定位与地图创建)指机器人在自身位置不确定和未知的环境中创建环境地图,并且利用地图进行自主导航与定位。移动机器人研究的核心课题是同步定位与地图创建,而移动机器人又是室内测绘仪器的数据采集平台。文中对 SLAM 在室内测绘仪器的研发现状进行总结,然后结合 SLAM 测绘仪器室内移动测量系统重点探讨了被动视觉 SLAM、主动视觉 SLAM、无线局域网(WiFi) SLAM 和 RGB - D SLAM 方法的原理、优缺点和研究现状,对两种比较流行的 SLAM 算法改进思想和研究现状进行了阐述,最后根据 SLAM 室内测绘仪器的研发探讨了 SLAM 测绘仪器室内移动测量系统的评价标准与发展趋势。

关键词: 同时定位与地图创建; SLAM 方法; SLAM 算法; 测绘仪器

中图分类号: P24 文献标识码: A 文章编号: 1001 - 358X(2017)04 - 0085 - 07

Application summary of SLAM in research and development of surveying and mapping equipment in indoor

Cai Lailiang , Yang Wangshan , Wang Shanshan , Zhu Xuelian

(School of Surveying and Land Information Engineering , Henan Polytechnic University , Jiaozuo 454000 , China)

Abstract: SLAM (Simultaneous localization and mapping) referred to the robot in their own location uncertainty and unknown environment to create an environmental map using the maps for autonomous navigation and positioning. The research core of mobile robot was synchronous positioning and map creation , and mobile robot was the data acquisition platform of surveying and mapping instrument in indoor. In the paper ,the SLAM research status of SLAM in indoor were summarized and the principles , advantages , disadvantages and research situation of passive vision SLAM method , active vision SLAM method , wireless fidelity (WiFi) SLAM method and RGB - D SLAM method were discussed combining with the movement measurement system of SLAM surveying and mapping instrument in indoor. Improving think and research status of two more popular SLAM algorithms were described. At last , Evaluation criteria and the development trend of mobile measurement system of SLAM surveying instrument in indoor were discussed based on the research of SLAM surveying instrument in indoor.

Key words: simultaneous localization and mapping; SLAM method; SLAM algorithm; surveying and mapping instrument

地面固定式三维激光扫描仪因获取高密度、高精度的数据等受到人们青睐,但它每移动一个地方都需要架设一站,工作强度大。地面移动式三维激光扫描仪因用卫星进行定位,不能够获取高精度的室内点云数据。而 SLAM 室内移动测量系统获得的

室内点云数据满足了高效率、高精度,高密度的特点。SLAM 是移动机器人研究领域中的一个关键技术,是在未知环境中运用自身定位来获得周围环境信息,完成自身位姿的精确估计^[1]。由于移动机器人是室内测绘仪器的数据采集平台,自身位置的精

* 基金项目:河南省基础与前沿技术研究(162300410184);河南省科技攻关项目(162102210226);河南省高等学校重点科研项目计划(15A420005)

引用格式:蔡来良 杨望山 王姗姗 等. SLAM 在室内测绘仪器研发中的应用综述[J]. 矿山测量 2017 A5(4):85 - 91.

确估计对安装在移动机器人平台上的传感器获取数据的精度有很大的影响。文献^[2-5]等人研究了基于 SLAM 的室内移动测量系统;张君华等人^[6]开发了测量机器人自动监测系统;谢欣鹏等人^[7]研究了车载移动测量系统在矿山测量中的应用;余建伟^[8]等人研究了便携式移动测量系统。而 SLAM 测绘仪器室内移动测量系统是指在移动过程中利用移动机器人(数据采集平台)和激光扫描仪(测量环境距离信息)组成的室内三维数据获取系统。

本文结合 SLAM 测绘仪器室内移动测量系统对目前比较流行的移动机器人 SLAM 方法和算法进行了归纳和比较,并根据现有的研究成果指出 SLAM 测绘仪器室内移动测量系统的评价标准与发展趋势,为进一步的研究奠定了基础。

表 1 主动视觉 SLAM 方法和被动视觉 SLAM 方法的分类、组成、原理、优缺点及其研究现状

传感器	被 动 视 觉 SLAM 方 法			主 动 视 觉 SLAM 方 法							
分类	单目视觉	双目立体视觉	全景视觉	单线激光 雷达	多线激光 雷达	2D 激光 雷达	3D 激光 雷达				
组成	单目镜头	双目镜头	全景相机	发射器、分光器、接收器和反射镜等。							
原理	是一种被动传感器,不发出光波或声波,依赖环境中的光线来获得环境信息。										
优点	计算负荷低、价格 低、灵活等优点。	可以提取完整的特征信 息,方便特征的初始化 等优点。	能够应用于远距离,大 场景的情况下。	可视范围广,机器人与被发现目标之间的相对距离和 相对角度能够测量,测量数据的噪声可以通过一定 的方法进行滤除,并且激光传感器拥有感知漂移等功能, 弥补了被动视觉缺乏的距离信息,算法简单,实时性 强,计算量小的优点。							
缺点	深度难以恢复, 无法提取距离 信息。	对远距离的物体 重建困难。	显著的环境变化也 会影响到 SLAM 的鲁棒 性能。	首先,能耗高、价格贵、体积大,这些缺点对小型机器人 不适用,并且低成本的雷达没有足够高的分辨率,影响 建模精度,这些都是制约激光传感器发展的瓶颈;其次, 在长时间、大场景的映射变化时(如树的落叶、生长, 楼房的拆迁、重建等)依据物体几何形状方法判断, 旧的结构消失也会导致失败。							
研究 现状	根据视觉指向室内天花板的原理,提取了天花板上的视觉特征,由于 室内地面平坦,从视觉到天花板之间的距离是已知的,简化了特征初 始化的过程 ^[10] ;双目立体视觉 SLAM 方法是一类主动 SLAM 方法,但它 与普通的主动 SLAM 方法不同,该方法需要有抉择地变化机器人路 径,来提高地图估计的精度 ^[12] ;文献[13]研究了全景视觉的移动机器 人自主定位与导航并创建环境地图的方法。										
栅格地图模型是依据测距传感器获得物体占据栅格情 况,来创建环境地图 ^[14] ;SOM(学习神经网络)方法进行 激光雷达数据处理,精确的提取了栅格地图模型中的 角点与环境线段等特征,提高了算法的运行效率及分 类的性能 ^[15] 。											

表2 无线局域网(WiFi) SLAM方法和RGB-D SLAM方法的分类、组成、原理、优缺点及其研究现状

传感器	无线局域网(WiFi)SLAM方法	RGB-D SLAM方法
组成	Wifi、低成本的传感器、机器学习和模式识别等算法。由红外点云投射器、彩色相机和红外相机三种硬件组成。	
原理	运用手机中的各种传感设备(如磁力计、陀螺仪、Wifi等)来定位,并通过各种模式识别算法以及机器学习算法等将获取的数据来创建室内环境地图。	利用结构光成像方法将获取的环境深度信息,利用坐标转换与颜色信息进行融合。
优点	WiFi设备便宜、功耗低、无线接入点多,通过无线流量可以进行室内外定位,WiFi信号可以在遮挡和不透视的情况下应用。	RGB-D相机是一种能够同时获取深度和颜色信息的传感器,其相比传统的三维设备价格便宜、操作简单,还可以有效的捕获对象的深度信息和彩色信息,是一种很有发展前途的传感器。
缺点	定位精度低(使用 WiFi 和低成本的传感器结合一般室内定位精度在 1.69 ~ 3 m),无线信号强度的测量由于衍射、散射、反射和吸收等现象产生非常大的噪声。	RGB-D相机只能提供深度有限的距离(通常小于 5 m),并且噪声点比较多,水平视场比较小,因为相机分辨率与视场的局限性,一帧深度图一般只能重建整个环境场景中的小部分,并且还要把每一帧都匹配到统一坐标系下。
研究现状	人跟踪 ^[16] ;位置感知计算 ^[17] ;工业场景中的导航传感器 ^[18] ;使用信号强度衰减参数模型的参数来确定用户的位置 ^[19] ;使用 WiFi 结合低成本的传感器定位精度 3 m ^[20] ;几何-拓扑地图结合 WiFi 使定位精度达到 1.69 m ^[21] 。	TOF 相机光学射线方向和测量深度方面存在扭曲,Kim ^[22] 等人提出了一个原理纠正了这些扭曲;Gu ^[23] 等人提出了深度 TOF 相机的扭曲与镜像对称和场景有关;Kinect 设备也显示出径向对称的扭曲,并提出失真矫正组件作为平均残差坐标的一个指标 ^[24] ;文献[25]研究了彩色与深度图像之间的关系,但依然没有解决变形的深度值;文献[26]提出了根据观测到的差异来进行差异失真矫正。

2 SLAM 算法

当前移动机器人在自身位置不确定和完全未知的环境中,运用各种传感器获取场景中的环境信息并完成 SLAM 任务。其原理是利用获取当前局部地图与已经获得全局地图之间的对应关系,降低造成移动机器人自主定位与导航的不确定性^[27],来获得机器人当前的位姿信息以及创建全局场景地图。

状态估计的问题是 SLAM 本质,有两种求解的方法^[28~29]:基于图优化和基于滤波器的方法。图优化的方法是运用场景信息来估计机器人的轨迹和创建场景地图。此类方法是根据位姿图表示场景地图特征之间的关系,通过改进场景特征节点的位姿,对位置和姿势的漂移及错误的匹配进行一定的纠正,使机器人的运动轨迹更加准确。而滤波器的方法是贝叶斯估计方面的问题,把数理统计基础知识运用到移动机器人自主定位与导航的实践中,对移动机器人行进中可能出现位置设置一定的概率。依据移动机器人在运动过程中,利用传感器感知环境中的新环境信息去改变可能位置的概率,减小移动机器人位置不确定性概率,使移动机器人的位姿状态可信度达到最佳。

目前比较流行的 SLAM 算法有 RGB-D SLAM 算法和 ORB(特征提取与匹配)算法,现对 RGB-D

SLAM 算法和 ORB 算法的原理,优缺点,研究现状,研究成果及其改进思想进行了总结如表 3 所示。

3 SLAM 移动测量系统的评价标准与发展趋势

3.1 评价标准

SLAM 测绘仪器室内移动测量系统是利用 SLAM 传感器获取三维空间数据和根据 SLAM 算法进行轨迹解算组成的系统。SLAM 目标是充分利用自我运动测量和环路闭合来建立全球一致的环境表示方式。在初期的应用,是通过车轮编码器获得的测距。从车轮测距迅速获得的姿势估计,使得估计在数米后就无法使用。环路闭合测距忽略了环路闭合的机器人解释世界是一个“无限走廊”,其中机器人不断探索无限的新领域。环路闭合事件通知机器人,这种“走廊”是相交的,从而使环路闭合的优点显得更突出。通过查找环路闭合情况,机器人了解环境模型真实的拓扑结构,并且能够找到最佳路径。被动视觉传感器获得的信息量大、灵活性高、成本低、能提取环境模型中的多种特征信息;主动视觉传感器具有感知漂移、测量精度高、算法简单、计算量小、实时性强等特点; WiFi-SLAM 可以在不通视或遮挡的情况下进行定位; RGB-D SLAM 传感器能够获得颜色和深度信息,能够在大场景下建立高精度稠密地图并且能够保存细节信息; ORB 算法能够快速的

表3 SLAM 算法的原理、优缺点、研究现状、研究成果及其改进思想的分析

方法	RGB-D SLAM 算法	ORB 算法
原理	利用图像颜色信息进行提取与匹配特征点,依据图像深度信息 进行起始位置和姿态的估计,接着运用 ICP(最近点迭代)算法结合图像深度信息优化起始位姿。用起始位姿作为特征点,再运用 Hog-man 分层图优化算法进行优化,进而得到全局统一的三维场景地图。最后将得到的多帧数据叠加就可以得到三维点云场景地图。	从场景获得的图像中任意一点作为圆心,以 3.4 个像素圆为半径,设置圆上 16 个像素点的灰度值为阈值,如果 M16 中多个连续的点灰度值大于该点阈值范围内的灰度值,就判定该点为特征点。
优点	能够在大场景下建立高精度地图并且能够保存细节信息。	可以快速的完成提取与匹配图像特征,减少冗余场景地图,减小轨迹的漂移,提高环境场景信息模型。
缺点	在建立场景地图时,Kinect 的轨迹是围绕对象物体旋转,创建的是不完整的场景地图。并且输出的三维点云数据仅仅是将各帧点云数据简单的相加,产生大量的冗余点云数据。	由于该算法中没有识别动态标志,过滤掉了动态标志,使生成的地图误差增大,环境模型精度的减低。
研究现状	文献[30]研究了 Hog-man 图优化算法,运用了 SURF 特征来进行帧间特征点的检测;卡耐基梅隆大学 ^[31] 研究了多边形重构与融合算法;美国 WillowGarage(柳叶车库)实验室 ^[32] 开发了一种基于 ICP 算法及 BA 算法的建图方法;文献[33]提出了将 RGB-D 运用到 SLAM 方法中,结合 ICP 算法与视觉特征,提高了配准的程度;文献[34]研究了一个在公共数据集上得到了验证的类似的系统 ^[35] 。	文献[43]在扩展卡尔曼滤波基础上提出了一种增广扩展卡尔曼滤波 SLAM 方法,该方法提高了创建 2D 地图的精度,但只可以创建 2D 的场景地图;文献[44]研究了室内三维场景建模的方法,该方法是基于 GPU-SIFT 的算法,不仅运行效率得到提高,而且实现了三维空间环模型的建立;Henry 等人 ^[45] 提出了一种基于 Kinect 交互式三维环境重建系统,但该系统依靠关键帧的选取,并且有时间复杂度高、计算量大等缺点。
研究成果	美国的华盛顿大学与微软实验室联合开发了一种图优化算法 TORO ^[36-37] ,运用实时视觉 SLAM ^[38] 系统进行建立三维场景地图。文献[39-40]都提出了图像匹配的 RGB-D-SLAM 算法;基于光度模型,Kerl 等人 ^[41] 和 Audras 等人 ^[42] 提出了一种密集特征追踪的方法。	文献[46-47]中提出了 Kinect Fusion,将 Kinect 传感器获取的深度信息结合 ICP 算法投影到 3D 环境中,建立了三维场景建模。
改进思想	首先是优化了子地图划分的标准,使三维场景拓扑关系多层图得到更直观和高效率的反映;其次是运用冗余点去除模块的功能,减少地图数据量,以提供更精确的数据;然后进行帧间配准通过加入场景中的平面信息,极大地改善了帧间配准算法的鲁棒性能;最后提出一种更能减少相机深度畸变对三维环境重建的影响的权重函数。	运用 KeyFrame 的词袋闭环检测算法来降低环境地图的冗余结构,最终生成一致性的三维环境地图;基于局部特征点的新型特征匹配算法能够更有效的对局部地图进行匹配,具有很好的鲁棒性能;而运用机器学习的 FAST 角点检测方法仅对比灰度值,其配准速度明显优于 SIFT 算法,运用机器学习能够提高算法的鲁棒性。

完成图像特征点提取与匹配,减小计算的复杂度,能有效的减少冗余地图结构,减小轨迹漂移,提高模型的鲁棒性。针对这些 SLAM 方法和算法,如何评价一个 SLAM 移动测量系统的好坏。现对这个问题做以下几个方面的分析:

SLAM 移动测量机器人系统:运动类型(如是动态还是静态,运行的最大速度等),可用传感器(如采样率、分辨率等);

系统的集成:SLAM 移动机器人进行精确的定位,激光扫描仪精确的测量环境距离信息。

环境:是二维平面的还是三维立体的环境,本来存在的标志还是人工设置的标志,动态标志的数量,感知混淆的概率等。

性能要求:在环境中,SLAM 移动测量机器人系统的准确性和状态的估计所需的精度,成功率(预计占所发生的试验百分比),预计等待时间,最长操作时间以及最大映射区域的大小。

3.2 发展趋势

二维室内环境中 SLAM 基于视觉的 SLAM 和缓慢移动测量系统的机器人 SLAM 被认为研究的比较成熟,其它 SLAM 移动测量机器人系统、环境、性能组合仍然值得做很多的基础研究。当前 SLAM 算法往往无法解决复杂场景的问题,针对 SLAM 测绘仪器移动测量系统的发展现状和未来的发展趋势做了一下分析:

(1) 强大的性能:SLAM 测绘仪器移动测量机器

人在任意环境中长时间工作故障率低,该系统包括故障安全机制,并且具有系统参数的选择,其激光扫描仪传感器能适应场景,具有自动调谐功能;

(2)高层次的认识:SLAM 测绘仪器移动测量机器人超越了基本的几何重建,以获得环境的高层认识(例如语义、适宜性、高层次的几何、物理);

(3)资源的认识:SLAM 测绘仪器移动测量机器人资源的计算,并且可以根据可用资源提供装置以调节运算负荷;

(4)任务驱动推断:所述 SLAM 测绘仪器移动测量机器人能够对地图自适应地表示,可以根据 SLAM 移动测量机器人系统所要执行的工作任务来改变其复杂性。

4 结语

通过三十年的发展,移动机器人 SLAM 导航技术获得了巨大的进步,除了新的算法还引入了新的传感器(例如二维激光测距仪传感器、三维激光雷达传感器等)。在过去十年里,大量的研究一直是致力于视觉传感器,并成功地应用于定位与导航。最近几年有很多学者在致力于 RGB-D 传感器和算法的研究。但目前,我们的 SLAM 移动测量机器人系统没有一个很好的灵活性和可操作性,是标准的高延迟和时间离散化的计算机视觉传感架构。延迟的时间是捕捉图像并处理它,离散化的时间是需要等到下一帧到来。高延迟和时间离散化在很大程度上制约了机器人平台的灵活性。因此,为了实现移动机器人灵活的运动,我们需要更快的传感器和低延迟处理,而 ToF(time of flight) 也是一种深度信息获取办法,具有很好的前景。传感器发射经调制的近红外光,遇到障碍物后反射,传感器通过计算光线发出和反射时间间隔或相位差换算得到距离信息,进而产生深度信息。该方法类似于雷达,但目前分辨率不高。此类传感器如动态视觉传感器,基于异步时间的图像传感器(ATIS)等成功地在一些场景中应用,但使用这种类型传感器算法的研究还很少。

多传感器融合能够利用被动视觉传感器的冗余信息,进一步提高机器人的定位精度。尤其在一些复杂的场景中表现更为显著。一些研究者研究了 SLAM 中视觉传感器与激光传感器的融合和激光测距与 RGB-D 传感器融合以及将 IMU 与二维激光传感器融合来提高精度,增强 SLAM 系统的鲁棒性,进

而提高 SLAM 测绘仪器移动测量机器人的测量精度,获取高精度的点云数据。

参考文献:

- [1] VALIENTE D ,GIL A ,FERNANDEZ L , et al. A comparison of EKF and SGD applied to a view - based SLAM approach with omnidirectional images [J]. Robotics and Autonomous Systems 2014, 62(2) : 108 - 119.
- [2] 余建伟,危迟. 基于 SLAM 的室内移动测量系统及其应用 [J]. 测绘通报 2016(6) : 146 - 147.
- [3] THRUN S ,BURGARD W ,FOX D. A real - time algorithm for mobile robot mapping with applications to multi - robot and 3D mapping [C]: In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation , 2000: 321 - 328.
- [4] 连晓峰,郭培源,王小艺. 基于激光扫描的室内环境三维模型重建 [J]. 机器人技术与应用, 2008(2) : 43 - 46.
- [5] FRUEH C ,ZAHKHOR A. Fast 3D model generation in urban environments [C]: In International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems , Baden - Baden , Germany , 2001 , 2007 (18) : 165 - 170.
- [6] 张君华,马波,陈杰. 基坑变形的测量机器人自动监测系统开发与实现 [J]. 矿山测量 ,2016(1) : 30 - 32.
- [7] 谢欣鹏,周茂伦. 车载移动测量系统在露天矿测量中的应用研究 [J]. 矿山测量 ,2016 ,44(2) : 33 - 35.
- [8] 余建伟,张攀攀,翁国康,等. 中海达 iScan - P 便携式移动三维激光测量系统概述 [J]. 测绘通报 2015(3) : 140 - 141.
- [9] LOPEZ D G ,SJO K ,PAUL C , et al. Hybrid laser and vision based object search and localization [C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena , USA: IEEE , 2008: 2636 - 2643.
- [10] 杜钊君,吴怀宇. 基于激光测距与双目视觉信息融合的移动机器人 SLAM 研究 [J]. 计算机测量与控制 ,2013 ,21(1) : 180 - 183.
- [11] DAILEY M N ,PARNICHKUN M. Landmark - based simultaneous localization and mapping with stereo vision [C] //Proceedings of the 2005 Asian Conference on Industrial Automation and Robotics. Bangkok , Thailand: Springer LNCS ,2005: 108 - 113.
- [12] LOWE D G. Object recognition from local scale - invariant features [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Corfu , Greece:

- IEEE ,1999: 1150 – 1157.
- [13] JEONG W ,LEE K M. CV – SLAM: a new ceiling vision – based SLAM technique [C] // Proceedings of the IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton , Canada: IEEE , 2005: 3070 – 3075.
- [14] DAVISON A J ,MURRAY D. Simultaneous localization and mapbuilding using active vision [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence , 2002 ,24(7) : 865 – 880.
- [15] 许俊勇 王景川 陈卫东 . 基于全景视觉的移动机器人同步定位与地图创建研究 [J]. 机器人 ,2008 ,30 (4) :289 – 297.
- [16] 于金霞 蔡自兴 段琢华. 基于激光雷达的环境特征提取方法研究 [J]. 计算机测量与控制 ,2007 ,15(11) : 1550 – 1552.
- [17] 郑新元 严军 范浩 等 . 线性不稳定环境下的 WIFI 室内定位系统 [J]. 电子测量技术 2015 ,38(12) :121 – 124.
- [18] SMAILAGIC A ,KOGAN D. Location sensing and privacy in a context – aware computing environment [J]. IEEE Wireless Communications ,2002 ,9(5) :10 – 17.
- [19] HUGH D W ,PAGAC D ,ROGERS B , et al. An autonomous straddle carrier for movement of shipping containers [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine , 2007 , 14(3) :14 – 23.
- [20] Quigley M ,Stavens D ,Coates A , et al. Sub – meter indoor localization in unmodified environments with inexpensive sensors [C]// Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE Xplore ,2010: 2039 – 2046.
- [21] FERRIS B ,HAHNEL D ,FOX D. Gaussian processes for signal strength – based location estimation , Proc of Robotics Science and Systems ,2006.
- [22] KIM Y M ,CHAN D ,THEOBALT C. Design and calibration of a multi – view ToF sensor fusion system [J]. Computer Vision and Pattern Recognition Workshops . cvprw. ieee Computer Society Confe ,2008: 1 – 7.
- [23] CUI Y ,SCHUON S ,CHAN D , et al. 3D shape scanning with a time – of – flight camera [J]. Computer Vision and Pattern Recognition ,2010 ,23(3) :1173 – 1180.
- [24] LEEE BE Workshop on Consumer Depth Cameras for Computer Vision [J]. IEEE International Conference on Computer Vision Workshops ,2011: 21 – 22.
- [25] ZHANG C ,ZHANG Z Y. Calibration between depth and color sensors for commodity depth cameras , in: Interna-
- tional Workhop on Hot Topics in 3D , in conjunction with ICME ,2011.
- [26] DANIEL H C ,KANNALA J ,HEIKKILA J. Joint depth and color camera calibration with distortion correction [J]. IEEE Transactions on Software Engineering , 2012 ,34(10) :2058 – 2064.
- [27] LU F ,MILIOS E. Globally consistent range scan alignment for environment mapping [J]. Autonomous Robots , 1997 ,4(4) : 333 – 349.
- [28] 梁明杰 闵华清,罗荣华. 基于图优化的同时定位与地图创建综述 [J]. 机器人 2013 ,35(4) : 500 – 512.
- [29] 艾青林 余杰 胡克用 等 . 基于 ORB 关键帧匹配算法的机器人 SLAM 实现 [J]. 机电工程 ,2016 ,33 (5) :513 – 520.
- [30] NI K ,DELLAERT F. Multi – level submap based SLAM using nested dissection [J]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems ,2010 ,25 (1) :2558 – 2565.
- [31] BISWAS J ,VELOSO M. Depth camera based localization and navigation for indoor mobile robots [C]//RSS Workshop on RGB – D Cameras ,2011.
- [32] ENGELHARD N ,ENDRES F ,HESS J , et al. Real – time 3D visual SLAM with a hand – held RGB – D camera ,” in RGB – D Workshop on 3D Perception in Robotics at the European Robotics Forum ,2011.
- [33] HENRY P ,KRAININ M ,HERBST E , et al. RGB – D mapping: using depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments [J]. Springer Berlin Heidelberg , 2014 ,31(5) :647 – 663
- [34] ENDRES F ,HESS J ,ENGELHARD N , et al. An evaluation of the RGB – D SLAM system [J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation , 2012 , 162(4) : 1691 – 1696.
- [35] STURM J ,ENGELHARD N ,ENDRES F , et al. A benchmark for the evaluation of RGB – D SLAM systems [J] IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems ,2012 ,57(1) : 573 – 580.
- [36] GRISETTI G ,GRZONKA S ,STACHNISS C , et al. Efficient estimation of accurate maximum likelihood maps in 3D [C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems ,2007 : 3472 – 3478
- [37] GIORGIO G ,GYRILL S ,WOLFRAM B. Non – linear constraint network optimization for efficient map learning [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems ,2009 ,10(3) : 428 – 439.
- [38] HUGH D W ,BAILEY T. Simultaneous localization and

- mapping(SLAM) : Part I the essential algorithms [J]. Robotics and Automation Magazine , 2006 ,13 (2) : 99 – 110.
- [39] HENRY P ,KRAININ M ,HERBST E , et al. RGB – D Mapping: Using Depth Cameras for Dense 3D Modeling of Indoor Environments [C]. Springer Berlin Heidelberg , 2014 ,31(5) : 647 – 663.
- [40] ENDRES F ,HESS J ,ENGELHARD N ,etal. An evaluation of the RGB – D S LAM system [J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation , 2012 , 162 (4) : 1691 – 1696
- [41] KERL C ,STURM J ,CREMERS D. Cremers D. Robust odometry estimation for RGB – D cameras [C]//In Proc of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation. 2013: 3748 – 3754.
- [42] AUDRAS C ,COMPORTE A ,MEILLAND M ,et al . Real – time dense appearance – based SLAM for RGB – D sensors [C] . // In Proc Australian Conf Robotics and Automation . 2011.
- [43] 肖雄 李旦 陈锡锻 等. 一种基于增 EKF 的移动机器人 SLAM 方法 [J]. 机电工程 , 2014 ,31(1) : 109 – 113.
- [44] ANAND A ,JOACHIMS T ,SAXENA A. Semantic Labeling of 3D Point Clouds for Indoor Scenes [J]. Nips , 2011 (24) : 244 – 252.
- [45] HENRY P ,KRAININ M ,HERBST E ,et al. RGB – D mapping: Using Kinect – style depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments [J]. Springer Berlin Heidelberg , 2014 ,31(5) : 647 – 663.
- [46] NEWCOMBE R A ,IZADI S ,HILLIGES O ,et al. KinectFusion: Real – time dense surface mapping and tracking [C]//Proceedings of the 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Basel: IEEE Computer Society 2011: 127 – 136.
- [47] IZADI S ,KIM D ,HILLIGES O ,et al. KinectFusion : realtime 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera [J]. Proc Uist , 2011: 559 – 568.

作者简介:蔡来良(1983-) ,男 ,博士。主要研究方向:点云数据处理、矿山开采沉陷。

(收稿日期:2017-02-26)

(上接第 73 页)

- [2] 王非 ,蔡勇 ,贺志军 . RESTful Web Services 在信息系统中的应用 [J]. 计算机系统应用 , 2013 (2) : 221 – 225.
- [3] 唐旭华 邹峥嵘 . 基于 RESTful Web Services 的空间数据共享 [J]. 测绘科学 2010 (4) : 122 – 124.
- [4] Leonard Richardson , Sam Ruby. RESTful Web Services [M]. O'Reilly Media , 2007.
- [5] 吴波 ,王晶 . 基于基本 RBAC 模型的权限管理框架的设计与实现 [J]. 计算机系统应用 2011(4) : 50 – 54.
- [6] 徐开明 . 地理信息公共服务平台建设与现代测绘服务模式 [J]. 地理信息世界 2006(3) : 41 – 48.
- [7] 曾元武 陈泽鹏 ,钟远军 ,等 . 数字城市地理信息公共服务平台应用模式研究 [J]. 测绘通报 2013(3) : 36 – 39.

- [8] 唐秀良 . SOA 发展探索与研究 [J]. 中国电子科学院学报 2009(5) : 473 – 479.
- [9] 谢日星 . Entity Framework 技术在分层架构中的应用研究 [J]. 电脑知识与技术 2011(14) : 3326 – 3327.
- [10] 韩旭 ,王海波 柳克俊 . 基于 .NET Framework WCF 的面向服务 SOA 中间件设计 [J]. 小型微型计算机系统 2010(12) : 2359 – 2364.

作者简介:李治明(1987-) ,男 ,汉 ,甘肃华池人 ,工程师 ,注册测绘师 ,主要从事地下管线普查和数字城市建设等方面的工作。

(收稿日期:2017-03-14)

欢迎投稿,欢迎订阅!

(详见官方网站: <http://www.KSCLBJB.com>)