

激光和视觉融合 SLAM 方法研究综述

马争光, 赵永国, 刘成业, 刘广亮, 朱琳

(1. 山东省科学院自动化研究所, 济南 250014; 2. 山东省机器人与制造自动化技术重点实验室, 济南 250014; 3. 齐鲁工业大学(山东省科学院), 济南 250014)

摘要: 激光和视觉传感器在 SLAM 应用中都有其局限性, 基于激光和视觉传感器融合的 SLAM 方法能够有效的利用各个传感器的优势, 弥补传感器在某些特殊环境下的劣势, 成为当前研究的热点之一; 在分析激光 SLAM 和视觉 SLAM 优缺点的基础上, 对激光和视觉融合的 SLAM 方法的研究现状进行概括和总结; 介绍了激光和视觉融合 SLAM 的主要标志性成果, 总结了激光和视觉传感器融合 SLAM 的关键性问题, 包括激光和视觉传感器数据的外部标定、激光和视觉传感器数据融合方法, 对激光和视觉融合 SLAM 方法的优缺点和主要的应用领域进行了总结; 最后, 对激光和视觉融合 SLAM 的主要发展趋势及研究热点进行了讨论。

关键词: 激光和视觉融合; 同步定位与建图; 外部标定; 数据融合

Survey of SLAM with Laser—Camera Fusion Sensor

Ma Zhengguang, Zhao Yongguo, Liu Chengye, Liu Guangliang, Zhu Lin

(Institute of Automation, Shandong Academy of Sciences, Shandong 250014, China;

Provincial Key Laboratory of Robot and Manufacturing Automation Technology, Shandong 250014, China;

Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Shandong 250014, China)

Abstract: Both the laser-based simultaneous localization and mapping (SLAM) and vision-based SLAM have limitation in specific environment, the SLAM with laser-camera fusion sensor can take advantage of outstanding features and make up the disadvantages of each sensors in these environment. Therefore, the SLAM with laser-camera fusion sensor has got much attention. The research of SLAM with laser-camera fusion sensor are reviewed and some outstanding achievements are presented to get a better understanding. Then the extrinsic calibration of camera and laser and laser-camera data fusion are analyzed in detail. And the advantages and disadvantages of the SLAM with laser-camera fusion sensor and its main application fields are summarized. In the end, the main trends and research hotspots of SLAM with laser-camera fusion sensor are discussed.

Keywords: laser-camera sensor fusion; SLAM; extrinsic calibration; data fusion

0 引言

Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) 是移动机器人自主完成作业任务需要解决的基本问题, 特别是在未知环境的情况下, 移动机器人既要确定自身在环境中的位姿, 又要根据确定的位姿来创建所处环境的地图, 这是一个相辅相成、不断迭代的过程, 因此, SLAM 问题是一个复杂的耦合问题。

SLAM 问题最初的概念是由 Peter Cheeseman, Jim Crowley 和 Hugh Durrant-Whyte 等研究者将概率估计方法应用到机器人定位与建图时提出的^[1-2]。1986—2004 年, 由于概率方法的广泛应用, SLAM 问题的研究得到了快速的发展, 这一时期也被称作 SLAM 问题的“经典时期”

(classic age), 主要研究方法包括扩展卡尔曼滤波 (Extended Kalman Filters, EKF)、Rao-Blackwellized 粒子滤波和最大似然估计等^[3]。这些方法遇到的最大瓶颈是计算的复杂度, 受限于当时的计算水平, 难以满足构建大规模地图的要求。2004~2015 年, SLAM 问题的研究进入“算法分析时期” (algorithm-analysis age), Dissanayake 等人从状态的可观性、状态估计的收敛性、一致性和算法计算效率等角度对这一时期的部分工作做了综述^[4], 很好的描述了 SLAM 基本特性研究的进展。同时期, Cesar 等人对 SLAM 的研究做了系统性的综述, 包括算法的鲁棒性、应用的可扩展性、地图表示形式 (度量地图和语义地图) 等问题, 并且分别针对这些方面的研究提出了一些有待解决的问题^[5]。这一时期, 研究者们发布了许多有效的开源 SLAM 方法, 包括 Catrographer^[6], Hector SLAM^[7], Gmapping^[8], KartoSLAM^[9] 等基于激光传感器的 SLAM 方法和 MonoSLAM^[10], ORB-SLAM^[11], LSD-SLAM^[12], RGB-D-SLAM^[13], DSO^[14] 等基于视觉传感器的 SLAM 方法。

SLAM 的应用场景也比较广泛, 研究人员针对不同的

收稿日期:2018-12-20; 修回日期:2019-01-10。

基金项目:山东省科学院青年基金项目(2019QN0015);山东省重点研发计划(2017CXGC0916)。

作者简介:马争光(1989-),男,山东安丘人,博士,助理研究员,主要从事移动机器人控制,同步定位与建图,多智能体系统等方向的研究。

应用场景下提出了不同的 SLAM 算法,覆盖室内^[15]、室外^[16]、水下^[17]及航空航天^[18]等应用环境,在这些应用场景下,激光和视觉的传感器都有一定的局限性。比如激光 SLAM 在环境特征不明显、动态环境等情况下性能欠佳,而且由于其重定位能力较差,在追踪丢失后难以回到工作状态^[19]。虽然视觉 SLAM 能够很好的完成环境中的点云匹配和回环检测,有效降低累计误差^[20],但在无纹理或者光照弱的环境下表现较差,而且在距离未知的情况下,单目相机具有需要初始化、尺度不确定、尺度漂移等缺点。并且在视觉 SLAM 应用中存在一些共同的困难,包括相机运动过快,相机视野不够,计算量大,遮挡,特征缺失,动态物体或光源干扰等。

鉴于激光和视觉单独使用都有其局限性,而传感器融合能够弥补不同传感器在某些特殊环境下的劣势。许多研究者开始从事激光和视觉融合 SLAM 的研究,有效的利用不同传感器的优势。因此,本文综述了激光和视觉传感器融合 SLAM 的关键性问题,主要涉及激光和视觉传感器数据的外部标定、激光和视觉传感器数据融合方法。其次,对激光和视觉融合 SLAM 方法的优缺点和主要的应用领域进行了总结。最后,讨论了激光和视觉传感器数据融合 SLAM 的主要发展趋势及研究热点。

1 激光视觉融合 SLAM 的关键性问题

激光和视觉传感器数据融合的前提条件是不同传感器对同一目标在同一时刻的描述^[21-22]。因此,不同传感器数据之间的自动标定以及不同传感器的数据融合是激光和视觉融合 SLAM 需要解决的关键问题。

1.1 激光和视觉传感器数据的外部标定

传感器的标定方法可以分为两种,第 1 种是按照给定的相对变换关系安装传感器;第 2 种则是根据不同传感器数据之间的约束关系来计算两个传感器之间的相对变换关系。当传感器发生故障维护后第一种方法需要重新校正,而且移动机器人运动过程中的振动会使得相对误差逐渐增大,因此更多的采用第 2 种标定方法,这种标定方法类似于单目相机的内参标定^[23],比如论文 [24] 中对于激光和数据融合的外部标定方法,通过给定的标定板,利用几何约束关系构建坐标转换系数矩阵方程,从而确定相机坐标系和激光雷达坐标系之间的转换关系。而且,针对未标定过或者标定误差较大的单目相机,这种标定方法还可以采用全局优化的方法同步优化相机内部标定和外部标定。在已有的文献中,相机和激光雷达外部标定的方法可以按照表 1 所示进行分类。

其中无给定目标的激光-视觉传感器外部标定主要是利用激光雷达得到的边缘深度和相机图像中的深度进行自动对齐,并利用代价函数来优化标定参数和融合结果^[25]。针对给定目标的激光-视觉传感器外部标定,则是通过使用平面棋盘标定板^[24,26]、直角三角形标定板^[27]、正交三面

体^[28]、任意的三面体^[28]或者 V 形标定板^[29]等等实现传感器标定。而这样所有的标定方法又可以根据不同传感器的感知范围有无重叠分为感知范围有重叠(充足或部分重叠)^[24-31,33-42]和感知范围无重叠^[32,43-44]两种情况。

表 1 激光和视觉传感器外部标定方法

	感知范围有重叠 (充足或部分重叠)	感知范围无重叠
无目标标定方法	[25 - 27]	[28]
给定目标标定方法	平面棋盘标定板[24,29] 直角三角形标定板[30] 正交三面体[31] V 形标定板[32] 任意的三面体[33] 其他:[34 - 42]	平面棋盘标定板[43 - 44]

激光和视觉传感器外部标定方法比较丰富,其中一部分成果还给出了相应的 MATLAB 标定工具包^[45]或 ROS 功能包^[46]。

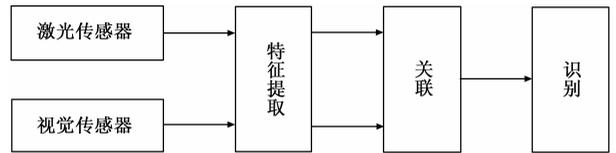


图 1 特征层数据融合

1.2 激光和视觉传感器数据融合

传感器数据融合层次一般分为 3 种:数据层融合、特征层融合和决策层融合。激光和视觉传感器是异质的,因此数据无法在数据层进行融合,而决策层融合预处理代价高,而且融合的结果相对而言最不准确,因此激光和视觉传感器数据融合主要是特征层的数据融合,如图 1 所示。相应的传感器数据融合方法有:

1.2.1 估计理论数据融合方法

主要包括卡尔曼滤波方法、协方差融合方法、最小二乘法等。这种方法是比较简单、直观的数据融合方法,主要是以估计理论作为基础,为不同的传感器数据建立状态空间模型,然后对其进行状态估计,从而实现数据融合^[47-50]。

1.2.2 分类数据融合方法

主要包括参数分类方法和非参数分类方法,参数分类方法包括参数模板法和聚类分析法,非参数分类方法包括自学习决策树、人工神经网络、支持向量机等。分类方法是将多维特征空间首先划分为不同的数据类,后检测到的特征向量通过与特征空间的划分方法相对比,从而划分到不同的数据类^[51-52]。

1.2.3 推理数据融合方法

主要包括贝叶斯估计法和 Dempster-Shafer (D-S) 证据推理法等。贝叶斯估计法属于静态环境信息融合方法,

信息描述为概率分布, 适应于具有可加高斯噪声的不确定性信息处理。多贝叶斯估计把每个传感器作为贝叶斯估计, 将环境中各个物体的关联概率分布结合成联合的后验概率分布函数, 通过使联合分布函数的似然函数为最大, 提供最终融合值, D-S 证据推理法是贝叶斯估计法的扩展方法^[53-54]。

1.2.4 人工智能数据融合方法

主要包括模糊逻辑、神经网络方法等。模糊逻辑是一种多值逻辑, 隶属度可视为一个数据真值的不精确表示。在数据融合的过程中, 存在的不确定性可以直接用模糊逻辑表示, 使用多值逻辑推理, 根据模糊集合理论的各种演算对各种命题进行合并, 进而实现数据融合。神经网络是根据系统所接受的样本相似性确定分类标准, 发这种确定方法则体现在网络的权值分布上^[55-56]。

除了这些数据融合方法之外, 还可以根据所处环境合理的选择单个传感器或传感器融合数据作为关键帧构建地图^[57]。这种根据环境状况合理选择传感器数据的方式能够降低数据融合的计算复杂度并且更好的适应于复杂的动态环境。

2 激光视觉融合 SLAM 的优缺点分析

激光雷达和视觉传感器的融合能够有效的避免单个传感器的局限性, 融合两个传感器的优势, 提高机器人定位的精度、通过视觉回环检测降低累计误差等。视觉传感器得到的环境深度信息能够匹配到激光雷达构建的 2D 地图上, 因此可以利用激光雷达和视觉融合信息发现单个传感器(激光雷达)所不能发现的障碍物^[58], 提高移动机器人的路径规划和避障性能。尤其对于动态变化的室外环境, 激光雷达创建地图辅助视觉惯性定位方法能够提高系统的鲁棒性。混合光束法平差框架将视觉构建地图和激光雷达构建地图融合对齐, 同步提高地图构建的精度, 并且对于环境的变化有较强的鲁棒性^[59]。在多线激光雷达上, 可以获取的信息包括方向、距离和目标点的反射率信息, 反射率信息构成的数据可以看作一种纹理信息, 从而激光雷达和视觉的融合可以使用视觉算法和纹理信息构成的重定位方法, 并且这些信息可以与高精度地图融合, 这样的高精度地图就可以在点云和纹理两种形式间快速切换^[60]。但激光雷达和视觉传感器数据的融合也会造成计算复杂度提升, 提高了环境特征提取、数据融合以及系统实时性方面的难度。

3 激光视觉融合 SLAM 的主要应用领域

SLAM 主要应用的领域非常广泛, 包括移动机器人的自主定位与导航、AR、无人机等等, 但受激光雷达规格影响, 在小型四旋翼以及 AR 领域激光视觉融合 SLAM 应用较少^[61-62], 主要以相机与惯性导航单元、相机与红外^[63]等多传感器为主, 激光视觉融合 SLAM 主要应用领域包括:

3.1 移动机器人自主运动、导航和定位

SLAM 的主要应用领域就是移动机器人的自主运动、导航和定位, 应用的环境场景包括结构化的室内环境和非结构化的室外场景等。比如扫地机器人、物流仓储机器人等室内服务机器人的导航以及路径规划^[57], 运动跟踪^[44], 变电站巡检等领域。

3.2 无人驾驶

无人驾驶作为未来汽车工业的发展方向, 其最基本、最重要的功能便是在未知环境下实现同步定位与建图, 利用激光雷达传感器获取点云数据, 并构建地图, 规避路程中遇到的障碍物, 实现路径规划, 检测道路边界等, 利用视觉检测车道线, 并与可通行区域结果进行融合, 得到车辆的行驶路径^[64]。

3.3 测绘

基于 SLAM 技术可以利用激光雷达和视觉传感器进行三维模型重建和地图构建, 这些三维模型及地图在测绘领域有着广泛的应用, 尤其是精准的三维模型数据和高精度地图。因此, 激光和视觉融合 SLAM 还可以应用到三维场景重建^[65]、遗迹数字化保存^[66]、测绘等相关领域。

4 激光视觉融合 SLAM 的主要发展趋势及研究热点

4.1 与深度学习的结合

随着深度学习在计算机视觉领域的快速发展, 研究者对深度学习在机器人领域的应用有很大的兴趣。激光和视觉融合 SLAM 中的特征匹配、闭环检测等模块都可以通过深度学习来获得更优的结果^[67]。

Hou^[68]等采用 caffe 深度学习框架下的 AlexNet 模型进行环境特征提取, 在光照变化明显的环境下, 采用深度学习的特征描述鲁棒性能明显优于传统特征, 并且特征提取的速度更快。Sunderhauf^[69]等利用 CNNs 模型提取图像区域特征描述子, 并且证明局部区域描述比全局图像描述更能有效地应对图像的视角改变问题, 因此提出了一种对于图像视角和外观变化有较强鲁棒性的场景识别方法, 能够有效地完成闭环检测。Bai^[70]等利用 CNNs 特征实现回环检测, 并且通过设置匹配范围有效避免了闭环场景误匹配, 通过特征压缩方法保证了深度学习框架下 SLAM 的实时性。

4.2 与多机器人系统的结合

多机器人系统在执行任务效率、灵活性、容错性、鲁棒性、可重构性、分散性和硬件成本等方面比单机器人系统更具优势。在大型、复杂、危险和人类难以到达的未知环境中执行灾难救援、资源勘探和空间探测等特殊任务时, 多机器人 SLAM 能够极大地提高效率, 有效解决大尺度环境的 SLAM 问题^[71]。

Deutsch^[72]等人提出了多机器人协作实时 SLAM 的框架, 该框架将各个机器人的局部地图合并为一个全局地图, 然后将全局地图返回给各个机器人, 提高机器人建图和定

位的效率和精度。针对于多机器人 SLAM 中各机器人初始位置未知的情况, Bresson^[73]等提出了分布式的多机器人 SLAM 算法框架, 而且该框架可以适应于任意 SLAM 算法。Choudhary^[74]等提出了基于目标的多机器人 SLAM 方法, 该方法能够有效地降低数据存储和通信负担, 适应于通信带宽受限的场景。

5 结束语

近年来, SLAM 的研究有了较快的发展, 但是在实际应用中仍然有很多的问题。利用激光和视觉传感器融合的 SLAM 能够有效地解决部分问题, 为了更好的促进 SLAM 的实际应用, 还可以与惯性传感器 (IMU)、GPS、超声、红外等多种传感器融合, 使得系统性能更加稳定。当然, 多传感器融合必然带来计算复杂度的增加, 为了能够满足实际应用中实时性的要求, 仍然需要进行算法的改进, 提高系统的运算速度。

参考文献:

- [1] Bailey Tim, Durrant-Whyte Hugh. Simultaneous localization and mapping (slam): Part ii [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13 (3): 108-117.
- [2] Durrant-Whyte Hugh, Bailey Tim. Simultaneous localization and mapping: Part i [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13 (2): 99-110.
- [3] Aulinas Josep, Petillot Yvan, Salvi Joaquim, et al. The slam problem: A survey [C]. in Artificial Intelligence Research and Development, Proceedings of the International Conference of the Catalan Association for Artificial Intelligence, Sant Martí D'empúries, 2008: 363-371.
- [4] Dissanayake Gamini, Huang Shoudong, Wang Zhan, et al. A review of recent developments in simultaneous localization and mapping [A]. in IEEE International Conference on Industrial and Information Systems [C]. Kandy, 2011: 477-482.
- [5] Cadena Cesar, Carlone Luca, Carrillo Henry, et al. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32 (6): 1309-1332.
- [6] Hess Wolfgang, Kohler Damon, Rapp Holger, et al. Real-time loop closure in 2d lidar slam [C]. in IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2016: 1271-1278.
- [7] Kohlbrecher Stefan, Stryk Oskar Von, Meyer Johannes, et al. A flexible and scalable slam system with full 3d motion estimation [A]. in IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics [C]. Kyoto, 2011: 155-160.
- [8] Grisetti Giorgio, Stachniss Cyrill, Burgard Wolfram. Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23 (1): 34-46.
- [9] Konolige Kurt, Grisetti Giorgio, Kümmerle Rainer, et al. Efficient sparse pose adjustment for 2d mapping [A]. in IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. 2010: 22-29.
- [10] Davison J Andrew, Reid D Ian, Molton D Nicholas, et al. Monoslam: Real-time single camera slam [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29 (6): 1052-1067.
- [11] Mur-Artal Raúl, Montiel José María Martínez, TARD6S Juan Domingo. Orbslam: A versatile and accurate monocular slam system [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 31 (5): 1147-1163.
- [12] Engel Jakob, Schöps Thomas and CREMERS Daniel. Lsd-slam: Large-scale direct monocular slam [A]. in European Conference on Computer Vision [C]. Zurich, Springer International Publishing, 2014: 834-849.
- [13] Endres Felix, Hess Jürgen, Engelhard Nikolas, et al. An evaluation of the rgb-d slam system [A]. in IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Saint Paul, 2012: 1691-1696.
- [14] Engel Jakob, Koltun Vladlen, Cremers Daniel. Direct sparse odometry [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2016, PP (99): 1-1.
- [15] Vázquez-martín Ricardo, Nuñez Trujillo Pedro Miguel, Del Toro Lasanta José Carlos, et al. Adaptive observation covariance for ekf-slam in indoor environments using laser data [A]. in 13th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference [C]. Benalmádena, 2006.
- [16] Bailey Tim. Mobile robot localisation and mapping in extensive outdoor environments [D]. University of Sydney, 2002.
- [17] Williams S B, Newman P, Dissanayake G, et al. Autonomous underwater simultaneous localisation and map building [A]. in IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. San Francisco, 2000: 1793-1798.
- [18] Kim Jong Hyuk, Sukkarieh S. Airborne simultaneous localisation and map building [A]. in IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Taipei, 2003: 406-411.
- [19] Cadena Cesar, Carlone Luca, Carrillo Henry, et al. Simultaneous localization and mapping: Present, future, and the robust-perception age [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32 (6).
- [20] Taketomi Takafumi, Uchiyama Hideaki, Ikeda Sei. Visual slam algorithms: A survey from 2010 to 2016 [J]. IJCV Transactions on Computer Vision & Applications, 2017, 9 (1): 16.
- [21] Gallegos Gabriela, Rives Patrick. Indoor slam based on composite sensor mixing laser scans and omnidirectional images [A]. in IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Anchorage, 2010: 3519-3524.
- [22] Tessier Cedric, Cariou Christophe, Debain Christophe, et al. A real-time, multi-sensor architecture for fusion of delayed observations: Application to vehicle localization [A]. in IEEE

- Intelligent Transportation Systems Conference [C]. Toronto, 2008: 1316 - 1321.
- [23] Zhang Zhengyou. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientation [J]. Proc Iccv, 1999, 1: 666 - 673.
- [24] Zhang Qilong, Pless Robert. Extrinsic calibration of a camera and laser range finder (improves camera calibration) [A]. in Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Sendai, 2005: 2301 - 2306.
- [25] Castorena Juan, Kamilov Ulugbek S, Boufounos Petros T. Autocalibration of lidar and optical cameras via edge alignment [A]. in IEEE International Conference on Acoustics [C]. Speech and Signal Processing, 2016.
- [26] Vasconcelos Francisco, Barreto João P. Nunes Urbano, A minimal solution for the extrinsic calibration of a camera and a laser-rangefinder [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34 (11): 2097 - 2107.
- [27] Li Ganhua, Liu Yunhui, Dong Li, et al. An algorithm for extrinsic parameters calibration of a camera and a laser range finder using line features [J]. 2007: 3854 - 3859.
- [28] Hu Zhaozheng, Li Yicheng, Li Na, et al. Extrinsic calibration of 2-d laser rangefinder and camera from single shot based on minimal solution [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2016, 65 (4): 915 - 929.
- [29] Sim Sungdae, Sock Juil, Kwak Kiho. Indirect correspondence-based robust extrinsic calibration of lidar and camera [J]. Sensors, 2016, 16 (6): 933.
- [30] Pandey Gaurav, McBride James R, Savarese Silvio, et al. Automatic extrinsic calibration of vision and lidar by maximizing mutual information [J]. Journal of Field Robotics, 2015, 32 (5): 696 - 722.
- [31] Levinson Jesse, Thrun Sebastian. Automatic online calibration of cameras and lasers [C]. in Robotics: Science and Systems, Berlin, 2013.
- [32] Napier Ashley, Corke Peter, Newman Paul. Cross-calibration of push-broom 2d lidars and cameras in natural scenes [A]. in IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Karlsruhe, 2013: 3679 - 3684.
- [33] Gong Xiaojin, Lin Ying, Liu Jilin. 3d lidar-camera extrinsic calibration using an arbitrary trihedron [J]. Sensors, 2013, 13 (2): 1902 - 1918.
- [34] Geiger Andreas, Moosmann Frank, Car Ömer, et al. Automatic camera and range sensor calibration using a single shot [A]. in IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Saint Paul, 2012: 3936 - 3943.
- [35] Khosravian Alireza, Chin Tat Jun, Reid Ian. A branch-and-bound algorithm for checkerboard extraction in camera-laser calibration [A]. in 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) [C]. Singapore, 2017: 6495 - 6502.
- [36] Mei Christopher, Rives Patrick. Calibration between a central catadioptric camera and a laser range finder for robotic applications [A]. in IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Orlando, 2006: 532 - 537.
- [37] Wasielewski S, Strauss Olivier. Calibration of a multi-sensor system laser rangefinder/camera [C]. in Proceedings of the Intelligent Vehicles '95 Symposium, Detroit, 1995: 472 - 477.
- [38] Ha Jong Eun. Extrinsic calibration of a camera and laser range finder using a new calibration structure of a plane with a triangular hole [J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2012, 10 (6): 1240 - 1244.
- [39] Krause Stefan, Evert Robert. Remission based improvement of extrinsic parameter calibration of camera and laser scanner [A]. in International Conference on Control Automation Robotics & Vision, Remission based improvement of extrinsic parameter calibration of camera and laser scanner [C]. 2012: 829 - 834.
- [40] Hillemann M, Jutzi B. Ucalmicel-unified intrinsic and extrinsic calibration of a multi-camera and a laserscanner [J]. Isprs Annals of Photogrammetry Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2017, IV-2/W3: 17 - 24.
- [41] Shi Kunfeng, Dong Qiulei, Wu Fuchao. Weighted similarity-invariant linear algorithm for camera calibration with rotating 1-d objects [J]. 2012: 3806 - 3812.
- [42] Underwood James, Hill Andrew, Scheduling Steve. Calibration of range sensor pose on mobile platforms [A]. in Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. San Diego, 2007: 3866 - 3871.
- [43] Bok Yunsu, Choi Dong Geol, Kweon in so. Extrinsic calibration of a camera and a 2d laser without overlap [J]. Robotics & Autonomous Systems, 2016, 78 (18): 17 - 28.
- [44] Ahmad Yousef Khalil M, MOHD Bassam J, AL-WIDYAN Khalid, et al. Extrinsic calibration of camera and 2d laser sensors without overlap [J]. Sensors, 2017, 17 (10): 1 - 24.
- [45] Bouguet Jean-yves. Camera calibration toolbox for matlab [EB/OL]. <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj>. 2013.
- [46] Guindel Carlos, Beltrán Jorge, Martín David, et al. Automatic extrinsic calibration for lidar-stereo vehicle sensor setups [A]. in IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems [C]. Mielparque Yokohama, 2017.
- [47] Wen Shuhuan, Othman Kamal Mohammed, Rad Ahmad B, et al. Indoor slam using laser and camera with closed-loop controller for nao humanoid robot [J]. Abstract and Applied Analysis, 2014, 2014 (1): 1 - 8.
- [48] Amarasinghe Dilan, Mann George K I, Gosine Raymond G. Integrated laser-camera sensor for the detection and localization of landmarks for robotic applications [A]. in IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Pasadena, 2008: 4012 - 4017.
- [49] Zhang Xinzhen, Rad A B, Wong Y K. Sensor fusion of mo-

- nocular cameras and laser rangefinders for line-based simultaneous localization and mapping (slam) tasks in autonomous mobile robots [J]. 2012, 12 (1): 429–452.
- [50] Sun Fengchi, Zhou Yuan, Li Chao, et al. Research on active slam with fusion of monocular vision and laser range data [A]. in the 8th world congress on intelligent control and automation [C]. 2010: 6550–6554.
- [51] Shen Jiali, Hu Huosheng. Svm based slam algorithm for autonomous mobile robots [A]. in International Conference on Mechatronics and Automation [C]. 2007: 337–342.
- [52] Waske B, Benediktsson J A. Fusion of support vector machines for classification of multisensor data [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2007, 45 (12): 3858–3866.
- [53] Chang H J, Lee C S G, Lu Y H, et al. P-slam: Simultaneous localization and mapping with environmental-structure prediction [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23 (2): 281–293.
- [54] Gning A, Abdallah F, Bonnifait P. A new estimation method for multisensor fusion by using interval analysis and particle filtering [A]. in IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 2007: 3844–3849.
- [55] Das T, Kar I N. Design and implementation of an adaptive fuzzy logic-based controller for wheeled mobile robots [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14 (3): 501–510.
- [56] Stover J A, Hall D L, Gibson R E. A fuzzy-logic architecture for autonomous multisensor data fusion [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1996, 43 (3): 403–410.
- [57] Choi Dong Geol, Shim Inwook, Bok Yunsu, et al. Autonomous homing based on laser-camera fusion system [A]. in Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Vilamoura, 2012: 2512–2518.
- [58] Lin Kuenhan, Chang Chunhua, Dopfer Andreas, et al. Mapping and localization in 3d environments using a 2d laser scanner and a stereo camera [J]. Journal of Information Science & Engineering, 2012, 28 (1): 131–144.
- [59] Ding Xiaqing, Wang Yue, Li Dongxuan, et al. Laser map aided visual inertial localization in changing environment [EB/OL]. <http://arxiv.org/abs/1803.01104>, 2018.
- [60] Pascoe Geoffrey, Maddern Will, Newman Paul. Direct visual localisation and calibration for road vehicles in changing city environments [A]. in IEEE International Conference on Computer Vision Workshop [C]. Santiago, 2015: 98–105.
- [61] Huh Sungsik, Shim David Hyunchul, Kim Jonghyuk. Integrated navigation system using camera and gimbaled laser scanner for indoor and outdoor autonomous flight of uavs [A]. in Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Tokyo, 2013: 3158–3163.
- [62] Jutzi Boris, Weinmann Martin, Meidow Jochen. Weighted data fusion for uav-borne 3d mapping with camera and line laser scanner [J]. International Journal of Image & Data Fusion, 2014, 5 (3): 226–243.
- [63] Zeng Qinghua, Wang Yushu, Liu Jianye, et al. Integrating monocular vision and laser point for indoor uav slam [C]. in Ubiquitous Positioning Indoor Navigation and Location Based Service (UPINLBS), Corpus Christ, 2015: 170–179.
- [64] Milella A, Reina G, Underwood J, et al. Combining radar and vision for self-supervised ground segmentation in outdoor environments [A]. in Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. San Francisco, 2011: 255–260.
- [65] Chen Mengxiao, Yang Shaowu, Yi Xiaodong, et al. Real-time 3d mapping using a 2d laser scanner and imu-aided visual slam [A]. in IEEE International Conference on Real-Time Computing and Robotics [C]. Okinawa, 2018: 297–302.
- [66] Bok Yunsu, Jeong Yekeun, Choi Dong Geol, et al. Capturing village-level heritages with a hand-held camera-laser fusion sensor [J]. International Journal of Computer Vision, 2011, 94 (1): 36–53.
- [67] Fischer Philipp, Dosovitskiy Alexey, Brox Thomas. Descriptor matching with convolutional neural networks: A comparison to sift [J]. Computer Science, 2014.
- [68] Hou Yi, Zhang Hong, Zhou Shilin. Convolutional neural network-based image representation for visual loop closure detection [A]. in 2015 IEEE International Conference on Information and Automation [C]. 2015: 2238–2245.
- [69] Suenderhauf N, Shirazi S, Jacobson A, et al. Place recognition with convnet landmarks: Viewpoint-robust, condition-robust, training-free [C]. Springer International Publishing, 2015: 296–296.
- [70] Bai Dongdong, Wang Chaoqun, Bo Zhang, et al. Matching-range-constrained real-time loop closure detection with cnns features [J]. Robotics & Biomimetics, 2016, 3 (1): 15.
- [71] Lazaro M T, Paz L M, Pinies P, et al. Multi-robot slam using condensed measurements [A]. in Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Chicago, 2014: 1069–1076.
- [72] Deutsch I, Liu Ming, Siegwart R. A framework for multi-robot pose graph slam [C]. in IEEE International Conference on Real-Time Computing and Robotics, 2016: 567–572.
- [73] Bresson G, Aufrere R, Chapuis R. Consistent multi-robot decentralized slam with unknown initial positions [A]. in International Conference on Information Fusion [C]. 2016: 372–379.
- [74] Choudhary S, Carlone L, Nieto C, et al. Multi robot object-based slam [J]. 2016.