

电力机器人的自主导航与视觉辅助定位融合方法

谢晓娜¹, 刘曦², 常政威², 彭倩², 许硕¹

(1. 成都信息工程大学控制工程学院, 四川 成都 610025;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 为了改进电力作业现场复杂环境下机器人定位精度, 提出了一种自主导航与视觉辅助定位融合方法。在激光传感器即时定位与地图构建的基础上, 基于视觉图像处理, 对机器人位置进行校准, 使其能够准确停靠在任务位置。应用结果表明, 所提方法能够有效提高机器人定位精度, 定位误差小于1 cm。

关键词: 电力机器人; 自主导航; 视觉定位; 校准

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2020)03-0048-05

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.03.010

A Vision Assisted Positioning Method with Autonomous Navigation of Electric Robot

Xie Xiaona¹, Liu Xi², Chang Zhengwei², Peng Qian², Xu Shuo¹

(1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610025, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to improve the localization accuracy of the robot in the complex environment of electric power operation site, a vision assisted positioning method with autonomous navigation is proposed. Based on laser simultaneous localization and mapping, the robot position is calibrated using the robot vision information and image processing algorithm, so that it can accurately stop at the task position. The application results show that the proposed method can effectively improve the positioning accuracy of the robot and the localization error is less than 1 cm.

Key words: electric robot; autonomous navigation; vision location; calibration

0 引言

中国大力推进“科技兴安”战略,在重点行业领域开展“机械化换人、自动化减人”,大力提高企业安全生产科技保障能力。在电力行业,变电站巡检机器人^[1-2]、地下电缆巡检机器人等移动机器人覆盖了发电、输电、变电、配电、用电等各环节,代替人工巡视、操作,发挥日益重要的安全保障作用。

导航是机器人在工作过程中要解决的最重要问题之一,也是实现机器人智能化和完全自主移动的关键技术^[3]。变电站等场所的电力机器人导航方式,经历了巡线、轨道和全场定位等^[4]。此外,基于视觉的导航方式^[5],是通过摄像机实时采集图像进

行目标点的监控与识别,指导机器人进行移动定位和导航。但仅依靠视觉定位导航是无法满足电力作业现场等复杂环境下的要求,与其他导航方式相融合是一个新的研究方向^[6]。

目前,基于激光传感器即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)的定位和导航方式^[7]是变电站巡检机器人主要采用的技术。SLAM不需要依靠应用场所的辅助物,机器人前进、后退、转弯、掉头环节稳定可靠。但对于电力作业现场复杂环境下,机器人需要准确到达任务位置,并准确巡视预置位图像以识别故障或安全隐患时,仅靠激光SLAM全场定位方式,可能导致定位不满足要求,迫切需要研究新的多数据融合机器人导航方式。

为了改进变电站、高电压实验室等电力作业现

基金项目: 四川省科技计划应用基础研究项目(基于多数据融合的复杂电力作业环境机器人导航技术研究 2018JY0386)

场的机器人定位精度,提出了一种自主导航与视觉辅助定位融合方法,在基于激光 SLAM 的自主导航基础上,对机器人位置和视觉角度进行再次校准,使其能够准确获得预置位图像。在实验室的应用结果表明,所提方法定位精度可达到 1 cm。

1 问题简介

以实验室内配电变压器试验过程中的安全巡检为例,电力机器人可在试验作业过程中,自主导航到达不同的预设位置,实时对典型安全风险、不安全行为进行实时识别和预警提醒,如表 1 所示。

表 1 机器人巡检要点

序号	实验流程	巡检要点
1	设备叉装	须有人员在设备叉装过程中进行监护
2	温升试验阶段	试验设备状态环境监测、禁区入侵检测
3	试验接线拆除	须进行设备放电接地操作
4	设备叉装	须有人员在设备叉装过程中进行监护

在每个巡检步骤中,机器人必须准确导航到已设定的最优位置,才能保证准确拍摄和识别图像。以温升试验阶段巡检为例,如图 1 所示,只有准确定位后并完整拍摄围栏内区域,才能有效开展巡检图像分析,对人员误闯入、设备接线空间位置变化、冒烟等异常及时警示和报告。如果定位不准确,则可能拍摄的视频图像不完整、存在较大偏差,无法正确执行巡检任务。



图 1 温升试验阶段巡检监视图像

2 视觉辅助定位方法

2.1 激光 SLAM 导航与视觉辅助定位融合

结合现有的机器人架构,提出一种基于激光

SLAM 导航与视觉辅助定位相结合的方法,整个流程如图 2 所示。

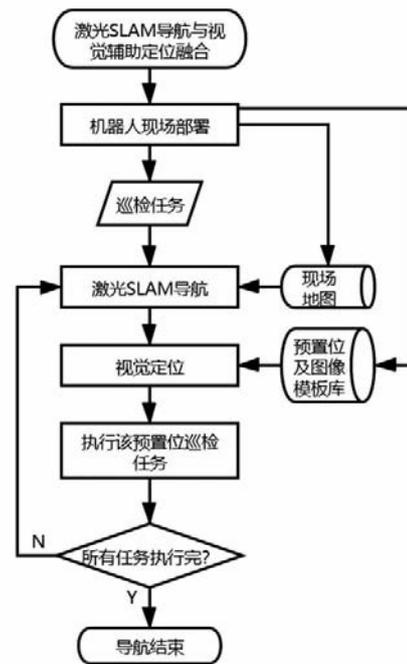


图 2 激光 SLAM 导航与视觉辅助定位

在部署环节,机器人通过激光传感器扫描,采用预建地图的方式,将地图存放于机器人数据库。同时,结合具体巡视任务,将机器人对应的停靠定位、拍摄的标准预置位图像模板保存在数据库中。

在根据接收到的巡检任务自主导航时,机器人根据所采样的信息,通过概率统计方式匹配地图中的位置,计算导航路径。同时,采用电子陀螺仪等辅助传感系统来定位和辅助机器人调控运动姿态,从而达到激光 SLAM 导航的目的。

机器人到达指定位置后,精度可能不满足特定巡视任务的要求,此时视觉定位模块通过对摄像头图像以及查询数据库得到的预置位图像模板进行分析处理,并对应调整机器人位置等,直到精度满足要求为止。

机器人准确定位后,利用可见光摄像机和红外摄像机执行在该预置位的巡检任务。然后,依次导航到其他位置并再次校准,执行每个预置位的巡检任务,直到完成所有的任务才回到充电位置,导航结束。

由此可知,与单一的激光导航方式不同,所提方法在部署环节即建立了预置位对应的图像模板库,作为视觉定位环节的校准图像依据。在巡检过程中,实现激光 SLAM 导航与视觉辅助定位的实时融合。

2.2 基于视觉图像的定位校准

机器人能够准确执行任务的前提是它可以精确导航并停靠在定位处,然而当由于环境的特殊性、机器人的误差等原因而导致无法满足定位要求时,提出采用一种基于视觉图像的定位校准算法,以减少定位误差和改进精度,其主要步骤如图 3 所示。

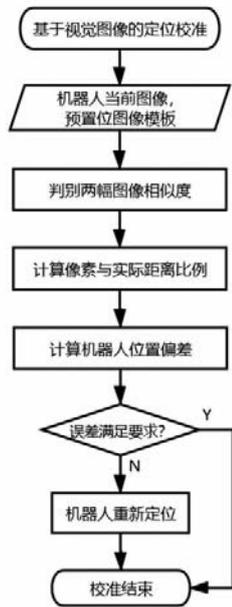


图 3 基于视觉图像的定位校准流程

首先,机器人读取在当前位置采集到的视频图像,提取图像的轮廓定位,并和已保存的该预置位图像模板比对,使用基于哈希 (Hash) 的图像匹配算法^[8]判别两幅图像的相似度。

计算机器人位置偏差的前提,是计算像素与实际距离比例。图 4^[9-10]为摄像机成像模型: (x_c, O_c, y_c) 表示摄像机坐标系;原点 O_c 为摄像机中心的位置;平面 π 为成像平面; m 为摄像目标物体,其映射在 π 上得到点 m' 。显然,可知:

$$p = \frac{x_r}{x} = \frac{y_r}{y} \quad (1)$$

式中, p 为实际坐标与像素坐标的比例关系。

考虑机器人摄像机当前图像和预置位图像模板中,机器人与目标物体的垂直距离基本相同。根据前面计算得到的图像轮廓,计算当前图像中窗体中心的坐标值 (x', y') ,而图像模板窗体中心在其坐标系下的坐标值记为 (x, y) ,计算得到机器人的位置偏差:

$$\Delta d \approx p \cdot (x' - x) \quad (2)$$

根据 Δd 与机器人允许的最大误差值相比,如不满足要求,则机器人据此重新定位。

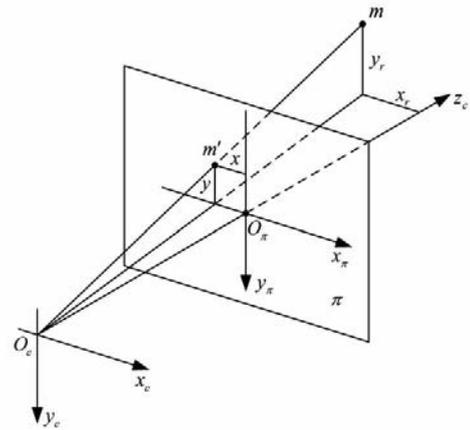


图 4 摄像机成像模型

3 视觉辅助定位方法的应用

3.1 应用环境及测试方法

如图 5 所示,为了验证所提视觉定位方法的精度,在某配电变压器实验室现场进行导航和定位性能测试,图中左下角为工作中的机器人。由于在试验准备及进行过程中,存在叉车搬运、人员进入围栏区域等行为步骤,如机器人的定位和导航精度不高,可能会导致误碰撞或巡视结果不准确等后果。



图 5 实验室应用

机器人基于激光 SLAM 构建的实验室地图如图 6 所示。

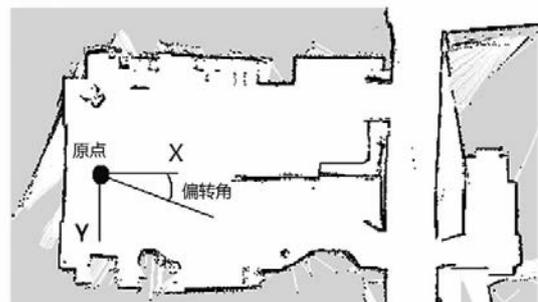


图 6 机器人构建的实验室地图

测试方法为:配置机器人预置点位,通过自主导

航的方式让机器人前往不同的预置点,同时测量机器人定位误差和角度误差。首先在实验室配置了11个点位,如表2所示。然后,基于激光SLAM定位方法对11个点位分别执行5次定位。经测量,最大定位误差在5 cm范围内。

表2 实验室现场配置点位

设定点位	X/m	Y/m	设定点角度/(°)
1	7.073 3	-1.076 0	0.538 582 310
2	11.011 9	-8.041 1	-89.497 624 170
3	19.014 1	-7.048 2	1.635 277 050
4	23.026 2	-16.031 5	-91.878 028 970
5	24.034 1	2.002 9	88.150 097 510
6	16.058 9	12.000 0	-1.406 073 712
7	14.012 5	7.030 5	177.193 021 300
8	7.008 8	15.082 9	178.379 417 100
9	0.078 7	16.011 7	-0.656 613 226
10	6.075 7	1.061 8	3.250 252 404
11	0.001 7	0.005 5	0.757 455 721

3.2 视觉辅助定位精度试验

基于激光SLAM与视觉融合定位,进行第1组定位试验,分别记录定位误差,如表3所示。

表3 第1组定位误差

点位	X 偏差/cm	Y 偏差/cm	角度偏差/(°)
1	-0.31	-0.23	-0.919 795 697
2	-0.06	-0.22	0.203 233 480
3	-0.24	-0.15	-0.078 461 069
4	-0.04	0.32	0
5	-0.19	0.05	-0.080 214 098
6	0.49	0.16	0.249 576 794
7	0.29	-0.04	-0.057 295 782
8	0.12	0.09	0
9	0.01	0.02	0
10	0.15	0.08	0.703 596 593
11	0.38	-0.02	-0.426 701 769

可以看出,最大的X偏差、Y偏差分别约为0.49 cm、0.16 cm,即最大定位误差为0.49 cm;最大角度偏差约为0.92°。

按照该方式进行多组定位测量,第2至第5组结果如表4所示。

表4 第2至第5组定位误差

定位试验	最大定位误差/cm	最大角度偏差/(°)
第2组	0.72	0.93
第3组	0.70	0.88
第4组	0.99	0.93
第5组	0.98	0.72

然后,选定一点进行连续20次定位测量,计算

定位误差和角度误差,如表5所示。可以看出,最大定位误差为第11次的Y偏差0.75 cm。

表5 同一定位点测量

序号	X 偏差/cm	Y 偏差/cm	角度偏差/(°)
1	0.659 367	0.566 3	-0.654 321 358
2	0.457 767	0.515 11	-0.826 212 299
3	0.453 805	0.228 998	-0.562 646 816
4	0.241 489	0.145 343	-0.482 431 889
5	0.238 652	0.201 593	-0.516 809 683
6	0.149 434	0.110 883	-0.849 131 223
7	0.421 691	0.466 65	-0.883 509 673
8	0.418 258	0.512 47	-0.929 347 731
9	0.304 707	0.204 752	-0.631 402 685
10	0.131 552	0.604 71	-0.459 513 383
11	0.132 133	0.752 07	-0.952 266 816
12	0.711 437	-0.120 604	-0.402 217 198
13	0.430 161	0.404 236	-0.654 321 358
14	0.423 72	0.375 249	-0.826 212 299
15	0.258 284	0.617 88	-0.562 646 816
16	0.598 191	0.429 893	-0.482 431 889
17	0.156 899	0.431 813	-0.516 809 683
18	0.172 195	-0.031 797	-0.849 131 223
19	0.431 705	0.202 103	-0.768 915 131
20	-0.085 118	-0.229 06	-0.803 293 408

综上,所提视觉辅助定位方法的定位精度小于±1 cm、角度精度小于±1°。与激光SLAM定位方法相比,定位精度提高了80%。经现场应用,满足了配电变压器检测试验的机器人巡视要求。

4 结 语

针对定位精度要求高的电力作业环境,提出了一种自主导航与视觉辅助定位融合方法。在激光SLAM导航基础上,通过机器人实时采集图像与预置位图像模板的比对分析,得到机器人定位误差,从而完成机器人定位校准。实验室应用结果表明,通过SLAM算法与视觉定位方法的融合,能够有效提高机器人定位精度。

下一步的工作,是进一步研究如何结合视觉图像的识别结果,提升电力机器人对动态环境下障碍物的判别能力和导航有效性。

参考文献

[1] 杨旭东, 黄玉柱, 李继刚, 等. 变电站巡检机器人研究

现状综述[J]. 山东电力技术, 2015, 42(1): 30-34.

[2] 唐法庆, 刘荣海, 耿磊昭, 等. 机器人路径规划及目标识别算法在变电站检测机器人中的应用[J]. 云南电力技术, 2017, 45(5): 78-81.

[3] 江渊, 刘珍, 张慕婕, 等. 机器人智能导航技术在变电站的研究与应用[J]. 电工技术, 2019(22): 126-127.

[4] 廖佳威. 变电站巡检机器人定位导航技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.

[5] 郑争光, 任小洪, 程亚军, 等. 未知环境下单目视觉移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2018(3): 255-258.

[6] 张书玮. 基于机器视觉和雷达数据融合的变电站巡检机器人自主导航方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

[7] 薛永胜. 变电站巡检机器人SLAM算法及其应用研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015.

[8] He Z, Wang Q. A Fast and Effective Dichotomy Based Hash Algorithm for Image Matching [C]. Advances in Visual Computing, International Symposium, Isvc, Las Vegas, Nv, Usa, December, Part I, 2008.

[9] 王博达. 基于激光雷达与视觉的监所机器人建图定位算法研发[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

[10] 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川阿泰因机器人智能装备有限公司. 一种复杂环境下的视觉定位方法: 中国, 201910620329.0 [P]. 2019-07-10.

作者简介:

谢晓娜(1978), 博士, 副教授, 主要研究方向为物联网与智能电网;

刘 曦(1982), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网设备材料抽检。

(收稿日期: 2020-04-09)

(上接第11页)

1) 随着油膜介质老化程度的加深, 油膜介质在冲击电压的反复作用下生成了新的带电粒子, 去极化电流的最大值呈现出上升的趋势;

2) 冲击电压次数的增加导致油膜介质的绝缘状态不断下降, 新增的气泡与杂质使得油膜介质的在交流下的起始放电电压降低。

参考文献

[1] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.

[2] 彭倩, 吴广宁, 周力任, 等. 电容器绝缘检测技术的现状与发展[J]. 绝缘材料, 2008, 41(1): 67-70.

[3] 党晓强, 刘念. 电力电容器在线监测技术研究[J]. 四川电力技术, 2003, 26(6): 6-7.

[4] 叶建铸, 管春伟, 谢超, 等. 高压直流输电工程用电力电容器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(1): 71-75.

[5] 唐盼. 基于极化去极化电流法的变压器油纸绝缘状态研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.

[6] 彭倩, 吴广宁, 张星海, 等. 局部放电对脉冲电容器的绝缘老化及其失效的影响分析[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 489-492.

[7] Krishnan V, Nema R S. A Study on Partial Discharge Degradation of Polypropylene Films [C]. Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena - Annual Report 1987, IEEE, 2016: 120-125.

[8] 王鹏, 吴广宁, 罗杨, 等. 脉冲电容器绝缘老化和直流

局部放电测试系统[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1268-1274.

[9] 杨帆, 沈煜, 王彦博, 等. 基于极化/去极化电流法的交联聚乙烯电缆热老化程度判定[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 496-503.

[10] 周利军, 王林, 李先浪, 等. 基于极化/去极化电流法的油纸绝缘时域电导模型[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1433-1438.

[11] 赵荣普, 陈井锐, 赵威, 等. 基于极化-去极化电流法变压器油纸绝缘老化状态评估[J]. 绝缘材料, 2017, 50(12): 78-82.

[12] 田杰, 段绍辉, 许昊, 等. 温度及老化状态对油纸绝缘时域介电响应特性影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(S1): 69-75.

[13] 吴广宁, 宋臻杰, 杨飞豹, 等. 基于时域介电谱和去极化电量的变压器油纸绝缘老化特征量研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 195-202.

[14] 雷勇, 蒋世超, 周凯, 等. 基于极化-去极化电流方法的交联聚乙烯电缆绝缘无损检测[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2643-2649.

[15] 于成龙, 叶海福. 高压脉冲电容器的直流局部放电绝缘检测[J]. 高电压技术, 2006(6): 5-8.

[16] 司马文霞, 华杰方, 孙魄韬, 等. 冲击电压作用下冲击电容器用聚丙烯薄膜累积失效特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 358-365.

作者简介:

赵凯林(1996), 硕士研究生, 研究方向为电力电容器内绝缘与老化。

(收稿日期: 2020-03-20)