

基于模块化的导航机器人设计与地图构建^①

周海冰, 陶重彝, 孙云飞, 班建民, 高涵文

(苏州科技大学 江苏省建筑智慧节能重点实验室, 苏州 215009)

摘要: 为解决目前导航机器人对于通用性和兼容性的要求, 按照模块化设计思想, 设计了一款由微处理器模块、电机模块、通信模块、感知模块和电源模块组成的导航机器人实验平台. 并针对导航机器人在环境地图构建时产生的累积误差问题, 提出了一种融合了先验估计的最大期望概率建图算法, 并利用该导航机器人平台开展了建图与自主导航实验. 利用室内运动捕捉系统获取的坐标作为参照物, 验证了该算法能有效减少机器人建图时产生的累积误差.

关键词: 导航机器人; 模块化设计; 最大期望概率; 地图构建

引用格式: 周海冰, 陶重彝, 孙云飞, 班建民, 高涵文. 基于模块化的导航机器人设计与地图构建. 计算机系统应用, 2018, 27(7): 260-264. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/6442.html>

Navigation Robot Modular Design and Mapping

ZHOU Hai-Bing, TAO Chong-Ben, SUN Yun-Fei, BAN Jian-Min, GAO Han-Wen

(Jiangsu Key Laboratory of Building Intelligent Energy Saving, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: In order to solve the requirements of navigation robot for universality and compatibility, this study designs a navigation robot experiment platform accord to the concept of modular design, which consists of a microprocessor module, motor module, communication module, sensing module, and power module. Meanwhile, aiming at the cumulative error problem of the navigation robot in the construction of an environment map, a maximum expected probability mapping algorithm, which combines prior estimation and maximum likelihood estimation, is proposed to solve the cumulative error. Finally, the navigation robot platform is used to carry out the experiment of mapping and autonomous navigation. The coordinates obtained by the indoor motion capture system are used as a reference to validate the algorithm, which can effectively reduce the cumulative error generated by the robot.

Key words: navigation robot; modular design; maximum expected probability; mapping

引言

近几年来, 导航机器人研发势头良好, 许多国内外的研究机构已经开发出了各种类型的导航机器人平台. 但依旧存在机器人研发成本高、智能化水平低等问题^[1]. 一些导航机器人平台是基于承载能力有限的小型移动

底盘开发而来. 由于缺少相应计算与感知能力的支持, 因此对于机器人的导航精度或信息处理能力产生影响, 比如 iRobot Create 扫地机器人; 另一些导航机器人平台是按照定制要求设计的. 其硬件通用性与扩展性较差. 比如 Willow Garage 公司的 PR2 机器人、波士顿

① 基金项目: 国家自然科学基金(61401297); 江苏省高等学校自然科学基金项目(17KJB120011); 苏州市科技局计划项目(SYG201708); 江苏省物联网移动互联网技术工程实验室资助项目(JSWLW-2017-016); 江苏省建设系统科技项目(2017ZD066)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61401297); Research Project for Natural Science of Institutions of Higher Education of Jiangsu Province (17KJB120011); Project of Science and Technology Bureau of Suzhou (SYG201708); Project of Internet of Things Mobile Internet Technology Engineering Laboratory of Jiangsu Province (JSWLW-2017-016); Science and Technology Project for Construction System of Jiangsu Province (2017ZD066)

收稿时间: 2017-11-20; 修改时间: 2017-12-15; 采用时间: 2017-12-20; csa 在线出版时间: 2018-06-27

动力公司的 RTCs 导航机器人和斯坦福大学的 STAIR1 导航机器人平台等;还有针对教学与科研而开发的全套尺寸导航机器人,比如 Pioneer 系列的导航机器人。但是该类机器人不仅硬件兼容性较差,而且价格昂贵^[2]。

目前,导航机器人主要基于地图来实现运动路径的规划、运动控制与自主导航。然而,由于许多现有的导航机器人实验平台不仅硬件通用性、兼容性较差,而且存在传感器感知能力与计算能力不足等问题,从而导致在室内环境地图构建时普遍存在累积误差的问题。宋宇等人提出利用一种平方根容积 Rao-Blackwillised 粒子滤波 SLAM 算法,来减少非线性模型的累积误差,并提高环境地图的构建精度^[3]。杨鸿等人基于 Kinect 深度摄像头,首先利用 SURF 算子提取图像的特征点并匹配,并结合 RANSAC 算法剔除可能存在的误匹配点,完成初始配准,再运用 ICP 算法对采集到的深度图像进行精确配准,最后得到三维环境地图^[4]。该方法生成的地图虽然精度较高,但是计算量巨大,且较为耗时。Yu 等人提出利用双目视觉获得深度信息,并基于场景分割理论构建信息不确定数学模型,并根据概率的方法构建三维栅格地图^[5]。该算法需要对双目获取的图像进行融合,在解决地图精度的同时,也存在计算量较大的问题。

针对上述建图研究中普遍存在的累计误差问题,本文首先按照模块化设计思想开发一台导航机器人实验平台,并提出一种融合了先验估计的最大期望算法,用于修正建图时由于导航机器人车轮打滑产生的累积误差,从而实现准确的室内环境地图构建。

1 导航机器人硬件系统设计

本文选用 ARM Cortex-M3 微处理器作为导航机器人的主控系统,并包含通信、感知、电机、显示和电源五个终端模块。主控系统以集中式控制的方式实现数据存储与运算,终端只负责与主控系统间的数据传输。本文设计的主控系统按照模块化理念设计系统的各个部分,从而保证系统可扩展性^[6]。本文设计的导航机器人硬件总体结构如图 1 所示。

本文设计的导航机器人底盘如图 2 所示。主控系统是机器人的控制中心,主要负责整个系统的控制决策,以及机器人导航的实时计算。电源模块由一个

24 V 的蓄电池构成,经过电压转换处理后为机器人系统供电。显示模块由深度摄像头组成,主要通过把摄像头摄取图像信息传送到主控系统进行处理。通信模块利用无线网络向上位机传输数据,并由上位机负责对数据的进一步处理。电机驱动模块负责执行主控系统对步进电机的控制指令。

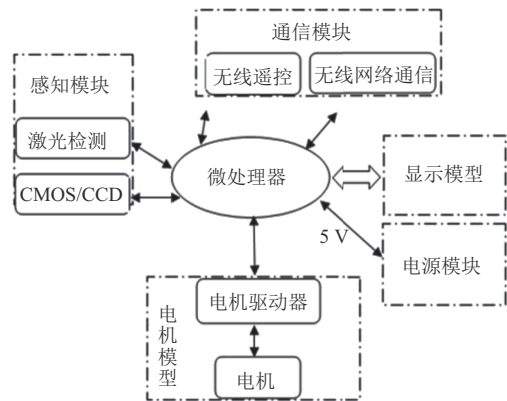


图 1 导航机器人硬件总体结构图

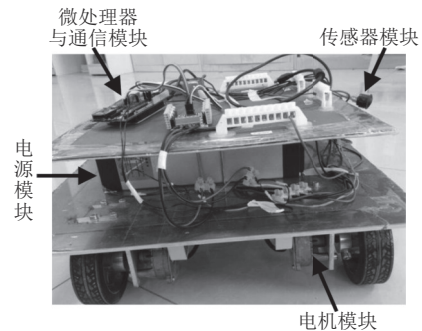


图 2 本文设计的机器人底盘

2 导航机器人软件系统设计

2.1 驱动模块软件设计

步进电机工作原理是实现电脉冲信号与角位移或线位移之间的转换。电机在额定功率范围内的转速只与信号的频率和脉冲数有关,与负载无关。因此在驱动模块的软件设计中只需考虑信号的频率和脉冲数^[7]。在本系统中由微处理器的定时器产生一定频率的脉冲信号,再通过步进电机驱动器转变,使其达到不同的速度。

本文设计的驱动模块程序流程图如图 3 所示,在对驱动模块进行初始化与复位后,确定目标距离,并计算出电机需要走的步数和脉冲当量。电机根据接受的信号以一定方向转动固定角度,同时分别利用脉冲个

数精确控制电机的角位移量, 利用脉冲频率控制电机转动速度与加速度, 从而实现调速.

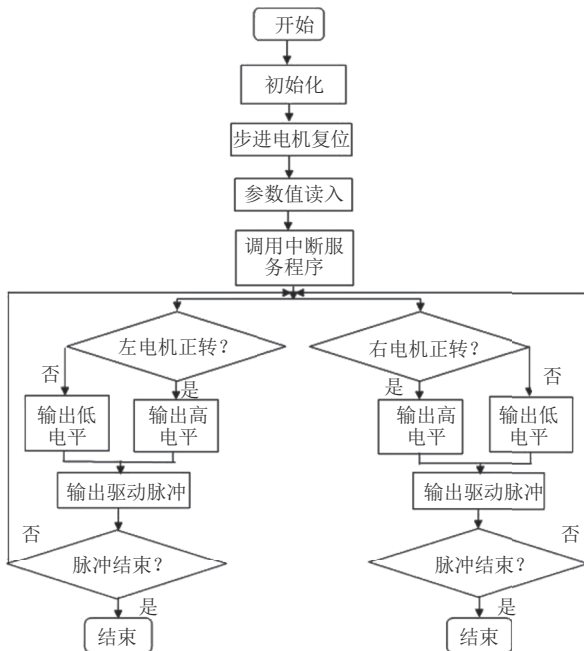


图3 驱动模块流程图

控制软件用于步进电机的速度的升降, 其结果对电机工作稳定性、速度升降快慢、以及定位精度等均会产生影响. 本文采用变速控制方法. 在启动时以低于响应频率的速度运行, 再逐渐提高速度直至恒定速度. 当即将抵达终点时逐渐减速, 直至低于响应频率速度, 最终速度降低至停机. 距离较长时的速度特性曲线如图4所示.

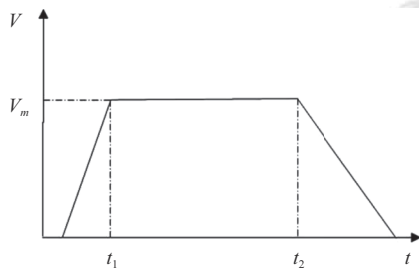


图4 机器人运行速度特性曲线

2.3 感知模块软件设计

感知模块的作用是使机器人具备感知外界环境的能力, 并对感知到的环境做出相应反应^[8]. 在感知模块软件设计中, 主要是对激光测距进行编程和实现. 激光测距的实现就是时差数据的采集过程. 本文设计的激

光测距控制程序流程图如图5所示. 该程序主要完成激光数据的循环采集, 并将随时间的变化量传回主控系统.

程序开始时的初始化包括定时器和外部中断的初始化. 反射光中断由外部中断触发, 中断程序由定时器实现. 比如在实验中按照 0.5 ms 实现一次中断. 可通过计算前后两次的中断次数得到时间变化量. 从而计算出障碍物与机器人之间的距离.

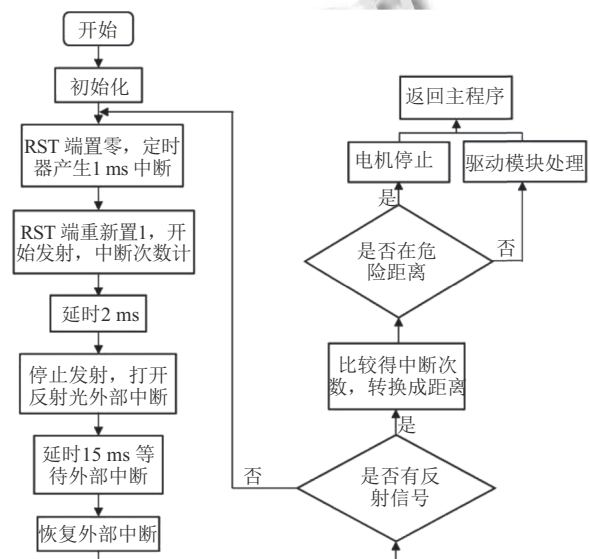


图5 激光测距控制程序流程图

3 最大期望算法的环境地图构建

常见的地图构建方法首先利用里程计和激光测距仪分别采集距离数据和位置数据. 在对机器人在地图中的坐标进行定位后, 再将其坐标信息添加至地图中. 然而, 由于机器人从动轮经常出现车轮打滑等原因容易产生累积误差. 传统建图方法无法有效地解决地图的闭合问题. 因此, 本文针对该问题提出了一种融合了先验估计的最大期望概率建图方法. 该算法实现过程如文.

将 t 时刻机器人最可能的位置表示为

$$\hat{s}_t = \arg \max_{s_t} P(s_t | o_t, a_{t-1}, \hat{s}_{t-1}) \quad (1)$$

首先对公式 (1) 采用梯度下降方法求解, 再将求解出的位置 \hat{s}_t , 对应的激光测距仪探测数据 o_t , 分别添加至地图 m_t . 从而得到新地图 m_{t+1} :

$$m_{t+1} = m_t \cup \{ \langle o_t, \hat{s}_t \rangle \} \quad (2)$$

紧接着, 利用 Markov 定位算法对机器人位置后验

概率 $Bel(s_t)$ 进行计算. 此处的后验概率 $Bel(s_t)$ 表示在已知条件下机器人位置的概率分布:

$$Bel(s_t) = P(s_t | d_t, m_{t-1}) \quad (3)$$

在 $t=0$ 时, $Bel(s_0)$ 位于坐标系原点. 已知 $t-1$ 时刻机器人位置 s_{t-1} 概率分布为 $Bel(s_0)$. 那么结合测距数据 o_t 和机器人的运动 a_{t-1} 可得:

$$Bel(s_t) = \eta P(o_t | s_t, m_{t-1}) \int P\{s_t | a_{t-1}, s_{t-1}\} Bel(s_{t-1}) ds_{t-1} \quad (4)$$

其中, η 表示归一化量, m_{t-1} 是已知的地图.

利用 Markov 定位算法更新公式 (4):

$$\begin{aligned} Bel(s_t) &= P(s_t | d_t, m_{t-1}) = P\{s_t | d_{t-1}, a_{t-1}, o_t, m_{t-1}\} \\ &= \eta \cdot P\{o_t | s_t, m_{t-1}\} \int P\{s_t | a_{t-1}, s_{t-1}\} Bel(s_{t-1}) ds_{t-1} \end{aligned} \quad (5)$$

再根据公式 (5) 的后验概率 $Bel(s_t)$ 来计算位置估计 \bar{s}_t :

$$\bar{s}_t = \arg \max_{s_t} Bel(s_t) \quad (6)$$

最后, 利用最大期望概率算法更新后的地图如公式 (7) 所示:

$$m_{t+1} = m_t \cup \{(o_t, \bar{s}_t)\} \quad (7)$$

在环境地图构建过程中, 给定机器人位置的返回修正量可以表示为:

$$\Delta s_t = \bar{s}_t - \hat{s}_t \quad (8)$$

其中, \hat{s}_t 和 \bar{s}_t 由公式 (1) 和 (6) 分别计算获得. Δs_t 表示最佳估计值与最佳后验概率估计值之间的差值. 如果 $\Delta s_t = 0$, 那就表示地图可以闭合, 累积误差可以忽略. 反之, 若 $\Delta s_t \neq 0$, 则表示机器人的位置需要修正.

4 室内环境建图实验

在安装有运动捕捉系统的实验室, 利用本文提出的基于最大期望值的增量式建图算法, 开展二维环境建图和导航机器人自主导航实验. 运动捕捉系统在实验中用于准确地提供机器人实时坐标. 本文设计的导航机器人在 Linux 操作系统中完成编程, 并用于实际实验, 以便验证本文提出算法在修正累积误差方面的效果. 该型导航机器人实物图如图 6 所示.



图 6 本文设计的导航机器人实验平台

实验过程是利用本文设计的导航机器人在对室内环境建图的同时, 对机器人自身进行定位, 并且地图和机器人位置信息将不断更新. 利用本文提出的最大期望算法将电机里程计修正数据与传感器获取的环境信息进行融合, 并在构建好的地图中进行路径规划和自主导航. 导航机器人路径规划和自主导航过程如图 7 所示.

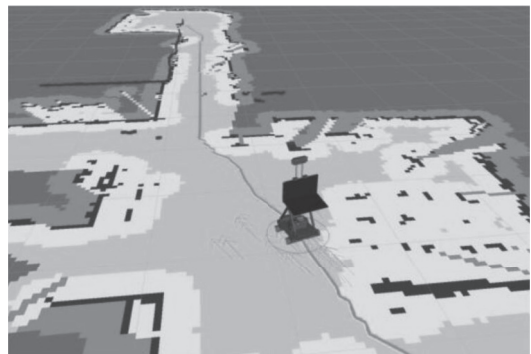


图 7 本文设计的机器人构建地图后进行自主导航

本文在地图中任意选择 6 个坐标点, 用于本文提出的算法对累积误差进行修正, 并对坐标修正的性能进行评估. 对应的 6 组实验结果如表 1 所示, 其中的坐标单位是米. 由表 1 中的数据可知, 利用本文提出地图构建算法修正后的坐标值接近实际值. 此外, 修正后的横坐标与纵坐标数据与实际坐标之间的平均误差分别为 5.3 cm 和 3.7 cm. 由于机器人的位置误差已达厘米级, 从而满足了室内环境地图构建的要求. 因此, 本文提出的增量式最大期望概率建图算法能有效地、准确地对室内环境进行地图构建.

5 结论

本文针对目前导航机器人设计中存在的通用性

差、计算能力和感知能力弱、硬件无法兼容等问题, 基于模块化设计思想设计了一台导航机器人. 并针对导航机器人在建图时普遍存在的累积误差问题, 提出了一种融合了先验估计的增量式最大期望概率建图算法. 由于导航机器人的工作环境通常较为复杂, 在完成环境地图的初步构建之后, 如何通过导航机器人具备不断维护随环境动态更新的地图, 将是下一步的研究内容.

表 1 本文算法修正前后坐标之间的比较 (单位: m)

| 坐标点 | 修正后坐标 | 实际坐标 | 偏差 |
|-----|--------------------|--------------------|------------------|
| A | (0.9624, 0.5581) | (0.8921, 0.5143) | (0.0703, 0.0438) |
| B | (-1.1831, 0.9741) | (-1.1456, 0.5143) | (0.0375, 0.0224) |
| C | (0.7995, 0.3519) | (0.7613, 0.3432) | (0.0382, 0.0087) |
| D | (1.5672, 0.7495) | (1.5368, 0.7128) | (0.0304, 0.0367) |
| E | (1.2607, 1.2659) | (1.1892, 1.2413) | (0.0715, 0.0246) |
| F | (-1.3769, -1.0468) | (-1.2928, -1.0153) | (0.0841, 0.0315) |

参考文献

1 科技部. 《服务机器人科技发展”十二五”专项规划》解读.

机器人技术与应用, 2012, (3): 6-9.

2 谭民, 王硕. 机器人技术研究进展. 自动化学报, 2013, 39(7): 963-972.

3 宋宇, 李庆玲, 康轶非, 等. 平方根容积 Rao-Blackwillised 粒子滤波 SLAM 算法. 自动化学报, 2014, 40(2): 357-367.

4 杨鸿, 钱堃, 戴先中, 等. 基于 Kinect 传感器的移动机器人室内环境三维地图创建. 东南大学学报 (自然科学版), 2013, 43(S1): 183-187.

5 Yu TS, Wang RS. Scene parsing using graph matching on street-view data. Computer Vision and Image Understanding, 2016, 145: 70-80. [doi: 10.1016/j.cviu.2016.01.004]

6 吴文强, 管贻生, 朱海飞, 等. 面向任务的可重构模块化机器人构型设计. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(3): 93-98. [doi: 10.11918/hitxb20140316]

7 赵涛, 陶重彝, 冯佳佳, 等. 基于 STM32 单片机的自动喷灌机器人. 计算机系统应用, 2017, 26(9): 279-282. [doi: 10.15888/j.cnki.csa.005963]

8 陶重彝, 刘壮宇, 孙云飞. 基于嵌入式系统的搬运机器人设计与路径规划研究. 计算机测量与控制, 2016, 24(8): 215-217.