

# 基于嵌入式系统的室内移动机器人定位与导航

胡春旭 熊 泉 任 慰 何顶新

(华中科技大学自动化学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 在一种新型混合实时移动机器人平台基础上,将开源机器人操作系统(ROS)内核移植到嵌入式系统当中,设计了一套低成本、高性能的室内移动机器人定位与导航方案,并进行了仿真与实验.室内移动机器人选用高性价比的微软 Kinect 作为核心传感器,采集周围环境的三维点云数据后利用 FPGA 进行高速预处理;然后使用 ROS 的分布式框架无线传输到计算机上,实现地图构建、定位与导航等复杂算法与界面显示,同时下发运动状态指令,控制机器人移动.仿真与实验结果证明了该方案的灵活性和高效性.

**关键词** 移动机器人; 嵌入式系统; 机器人操作系统; 地图建模; 定位; 导航

**中图分类号** TP242 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2013)SI-0254-04

## Localization and navigation for indoor mobile robot on embedded system

Hu Chunxu Xiong Xiao Ren Wei He Dingxin

(College of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** The open source robot operating system (ROS) was ported to the embedded system kernel based on a new hybrid real-time mobile robot platform, to design a low-cost and high-performance indoor mobile robot localization and navigation program. The indoor mobile robot took a full scan of the environment, collecting 3D point cloud information with a microsoft Kinect sensor and transferring data to field programmable gate array (FPGA) for acceleration of complex computing and interface display. This data was then wirelessly sent to a computer through the distributed node of ROS. The computer worked on simultaneous localization and mapping while sending motion commands to control the robot's movements. Simulation and experimental results demonstrate the flexibility and efficiency of this program.

**Key words** mobile robot; embedded system; ROS; simultaneous localization and mapping (SLAM); localization; navigation

机器人技术的迅猛发展,使机器人逐渐走进人们的生活,服务型室内移动机器人更是得到了广泛关注.但室内机器人的普及,还存在许多问题亟待解决,定位与导航就是其中的关键问题之一<sup>[1]</sup>.在这类问题的研究中,须要把握三个重点:一是地图精确建模;二是机器人准确定位;三是路径实时规划.就以上的三个重点,在近几十年的研究中,出现了多种有效的解决方法,例如:即时定位与地图构建<sup>[2]</sup>,蒙特卡罗定位算法<sup>[3]</sup>,动态窗口逼近避障算法<sup>[4]</sup>等等.

相比机器人硬件技术的不断成熟,软件开发

却显得力不从心.首先,层出不穷的机器人平台采用了多种处理器架构和传感器等硬件模块,硬件成本不断上升的同时,软件的复用性和移植性却逐渐下降.其次,现代机器人系统开发的规模日益庞大,对软件分布式的兼容性提出了更高的要求.面对这样的挑战,2010年 Willow Garage 公司发布了开源机器人操作系统 ROS,在机器人研究领域掀起了一场革命.

本研究的主要工作是在一种新型混合实时移动机器人平台的基础上,将 ROS 内核移植到嵌入式系统当中,设计一套低成本、高性能的室内移动

收稿日期 2013-07-10.

作者简介 胡春旭(1989-),男,硕士研究生,E-mail: huchunxu@hust.edu.cn.

机器人定位与导航方案,并进行仿真与实验,实现了一种低成本、高性能的室内移动机器人定位与导航方案。

## 1 ROS 介绍

ROS 起源于斯坦福大学与机器人技术公司 Willow Garage 的个人机器人项目。它提供类似操作系统所提供的功能,包括硬件抽象描述、底层驱动程序管理、共用功能的执行、程序间的消息传递、程序发行包管理,也提供一些工具程序和库用于获取、建立、编写和运行多机整合的程序<sup>[5]</sup>。

### 1.1 主要特点

ROS 的主要设计目标是在机器人研发领域提高代码的复用率<sup>[6]</sup>。根据这个设计目标,ROS 被设计成为一种分布式的进程框架:每个执行程序可以独立设计,然后在运行时松散、实时的组合起来。同时,ROS 具备以下几个重要特点:

#### a. 点对点设计

在 ROS 中,每一个进程都是以一个节点的形式运行,可以分布于多个不同的主机。节点间的通讯消息通过一个带有发布和订阅功能的 RPC(远程过程调用)传输系统,从发布节点传送到接收节点。这种点对点的设计,可以分散定位、导航等功能带来的实时计算压力,适应多机器人协同工作遇到的挑战。

#### b. 精简与集成

ROS 中的功能都是以节点为单位开发,每个节点可以单独编译,容易对简单、精简的代码进行超越原型的移植和复用。同时,ROS 集成了许多其他开源项目的代码,而且还加入了三维可视化工具 rviz、物理仿真环境 gazebo 等一系列组件,便于搭建一套高效、友好的机器人软件平台。

#### c. 编程语言独立

ROS 中的软件开发主要使用 C++ 和 Python,同时兼容 Java、Lisp 等现代编程语言。为了支持多语言的编程,ROS 采用一种语言中立的接口定义语言(IDL)来描述消息的数据结构。每种编程语言的代码产生器会根据接口的描述,产生本种语言的目标文件。

#### d. 开源免费

ROS 遵从 BSD 许可,所有源代码都是公开发布的,而且允许各种商业和非商业的工程免费进行修改和应用。

### 1.2 缺陷与不足

ROS 的众多优点,促使它在短短 3 a 间,便得

到了广泛应用,但同时也显现出以下缺陷与不足:

a. ROS 中的绝大多数功能都是针对 PC 机设计,很难应用到中小型移动机器人的嵌入式系统当中;

b. ROS 本身不具有实时性,部分数据量较大的处理所消耗的时间不确定,影响系统性能;

c. 基于 ROS 的机器人往往价格昂贵,例如 PR2 机器人售价高达 40 万美元。

针对 ROS 的缺陷与不足,本研究在一种新型混合实时移动机器人平台 HRMRP(hybrid real-time mobile robot platform)的基础上,将 ROS 分布式框架移植到嵌入式系统当中,实现了一种低成本、高性能的室内移动机器人定位与导航方案。

## 2 混合实时移动机器人平台

现有的移动机器人从处理器架构到硬件接口,都千差万别,设计的复用性差。在之前的工作中,已经实现了一种具有软硬件可编程、灵活性强、模块化、易扩展、实时性强的混合实时移动机器人平台 HRMRP<sup>[7]</sup>。

### 2.1 系统架构

HRMRP 主要面向中小型移动机器人,采用 ARM-FPGA 混合架构的控制器,获得了良好的硬件灵活性。最初的 HRMRP 使用“ARM Cortex-M4+Xilinx Spartan6”的控制器结构,但是随着多核系统的快速发展,采用多核处理器成为一种有效的获取计算能力的方式。Xilinx 最新推出的全可编程 SoC 平台 ZYNQ 相对而言是一种更为合适的选择。ZYNQ 由处理器系统(ARM Cortex-A9 双核处理器)和可编程逻辑(FPGA)组成,对此 HRMRP 的系统架构作出了相应修改,如图 1 所示。

数据处理层的主要工作是实现传感器信息的采集、预处理,利用 FPGA 进行 I/O 扩展和硬件加速。实时控制层以微控制器和实时操作系统为核心,实现移动机器人的基本行为,相当于 HRMRP 的“神经系统”。而高性能处理层是 HRMRP 的“大脑”,使用源码编译的方式移植了 ROS 内核,并利用 ROS 组织多个节点,协作规划与决策机器人的行为。

### 2.2 软硬件结构

HRMRP 的软件结构如图 2 所示,其核心是开放实时嵌入式系统软件平台 TOPPERS<sup>[8]</sup>。TOPPERS 平台中包含针对同构多核处理器的 TOPPERS/FMP 内核。

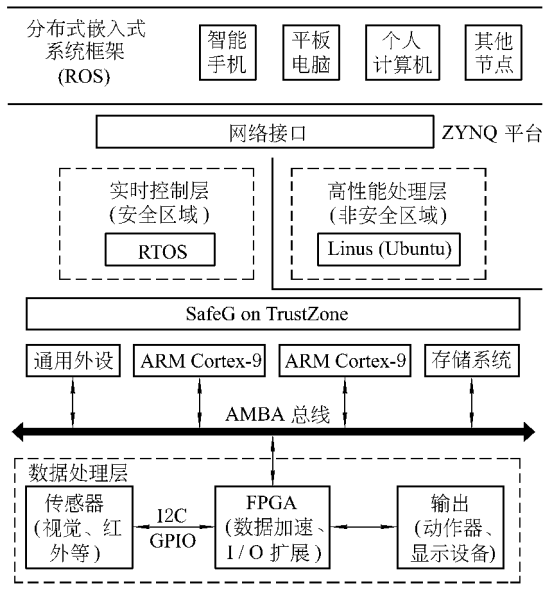


图 1 HRMRP 系统架构

HRMRP 使用了基于 ARM Trust-Zone 的嵌入式虚拟机 (SafeG), 使得实时操作系统 TOPPERS/FMP 和通用操作系统 Linux 可以同时运行, 前者负责机器人的实时控制, 后者运行 ROS 进行整体决策. 同时, 利用数据处理层的 FPGA 完成 I/O 扩展和硬件加速. 当构建一个移动机器人应用时, 先借助 ROS 丰富的功能, 将整个系统建模成不同的节点, 进行功能级的仿真. 再对节点进行划分, 映射到 HRMRP 的三层结构上, 进行软件实现.

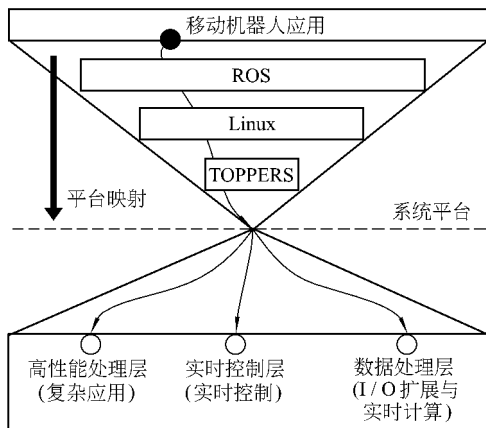


图 2 HRMRP 软件结构

HRMRP 的核心电路板采用基于 Xilinx Zynq-7000 扩展式处理平台的低成本开发板 Zed-Board. 而在核心传感器的选择上, 选用了性价比更高的微软 Kinect 传感器. Kinect 结合了标准 RGB 摄像头和红外深度传感器, 可以得到周围环境的三维点云信息, 而且解决了激光传感器价格昂贵、体积大的问题. 最终构成的移动机器人硬件结构如图 3 所示.



图 3 HRMRP 移动机器人平台

### 3 室内移动机器人定位与导航

移动机器人定位与导航的算法复杂, 须要大量的计算以及缓存空间, 不适宜在嵌入式系统中运行. 所以在 HRMRP 的嵌入式系统中, 只建立传感器数据采集及预处理的节点, 利用 ROS 的分布式框架, 将须要消耗大量资源的地图建模、定位、导航以及界面显示的节点转移到 PC 机上, 机器人和 PC 机之间使用无线网络进行点对点通信.

#### 3.1 总体框架

室内移动机器人定位与导航的总体框架如图 4 所示, 所有节点按照分布位置分为 HRMRP 端节点和 PC 端节点.

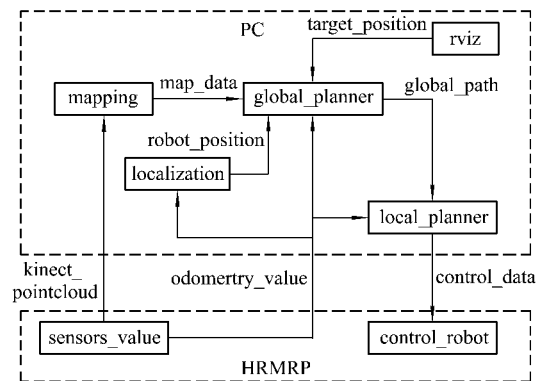


图 4 ROS 定位与导航框架

HRMRP 端节点负责数据采集和运动控制.

a. sensors\_value: 采集机器人所有传感器数据, 包括 Kinect 的三维点云数据、里程计的速度和距离信息等等, 并且将这些数据打包发布.

b. control\_robot: 接收 PC 端节点发布的速度和角度消息, 控制机器人快速、准确地根据指令移动.

PC 端节点负责大运算量的地图建模、定位与导航.

a. mapping:接收 HRMRP 端发布的三维点云数据,进行 SLAM 地图建模,并且发布地图数据。

b. localization:接收 HRMRP 端发布的里程计信息,负责机器人定位,并发布位置消息。

c. rviz:监控所有节点的运行状态,通过人机交互界面显示地图、机器人位置、导航路线等信息,同时可以点击选择导航的目标位置。

d. global\_planner:机器人导航的核心节点,根据地图数据、机器人位置信息、目标位置信息以及里程计信息,计算最优路线,并发布路线消息。

e. local\_planner:根据机器人里程计的速度和角度信息,同时计算每个控制周期的最优速度和角度。

### 3.2 地图建模实验

SLAM 要求机器人在未知环境中从一个未知的位置开始移动,在移动过程中根据位置估计和地图进行自身定位,同时在自身定位的基础上建造增量式地图。mapping 节点根据 Kinect 的红外深度数据,创建二维 SLAM 栅格地图。ROS 根据障碍物与机器人间的距离,赋给每一个栅格介于 0~255 之间的一个数值,表示栅格被障碍物占据的概率,栅格值越大概率就越大。地图建模的具体流程如下。

步骤 1 开发者在 PC 机上使用摇杆向机器人发送运动控制速度和方向的消息;

步骤 2 HRMRP 接收到运动控制的消息后采取相应的行动,并获取三维环境信息,经 FPGA 的高速预处理后,发送到 PC 上的数据接收节点;

步骤 3 PC 机根据机器人检测到的环境信息,通过 mapping 节点进行 SLAM 计算,产生环境地图的建模数据,可视化显示后,开发者可以实时观察到机器人地图建模的情况。

图 5 所示为移动机器人在室内环境中进行地

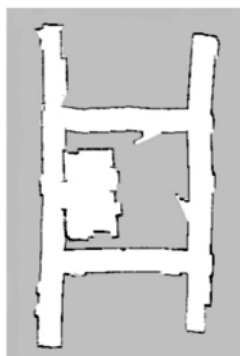


图 5 SLAM 地图建模结果

图建模的结果。建模过程中 ROS 会根据机器人的里程、速度以及传感器信息,对地图和机器人所处

的位置进行校正,确保地图数据的完整和准确。地图中灰色代表未知的区域,黑色是墙壁等障碍物,白色是机器人可以自由活动的空间。

### 3.3 定位与导航仿真

为了验证机器人定位与导航的正确性,首先使用 ROS 进行模拟仿真。如图 6 所示,在地图中选择导航的目标位置(图中右侧向下箭头所示的位置),global\_planner 节点根据机器人的当前位置规划得出到达目标的最佳路线(连接机器人到目标点的路线),local\_planner 节点对移动机器人的速度和角度进行实时的控制,最终顺利抵达目标位置。



图 6 利用 ROS 进行移动机器人定位与导航仿真

### 3.4 定位与导航实验

使用 HRMRP 在真实环境下进行定位与导航的测试,并且与相同位置的仿真结果进行对比,准确度较高,且没有与障碍物发生碰撞。当在地图中机器人前方随机出现障碍物时,机器人可以根据传感器检测到的实时障碍物的位置,对全局路径和实时路径进行相应的修正,安全躲避障碍物。

## 4 结论

不仅是移动机器人定位与导航,甚至是整个机器人领域的软件代码,都存在着移植性和代码复用性差的问题,ROS 的出现很好的解决了这个问题。但 ROS 本身不适合在嵌入式系统中使用,这也直接影响了 ROS 在中小型嵌入式移动机器人中的推广。本文在一套软硬件可编程的混合实时移动机器人平台 HRMRP 的嵌入式系统中,移植了 ROS 内核,使 ROS 的优势在嵌入式系统中得到了应用,而且在此基础上通过仿真和实验,实现了一种低成本、高性能的室内移动机器人定位与导航方案。

移动机器人在地图建模和定位、导航中,必然存在着大量的数据运算和算法处理,不利于实现软件的实时性。后续将在本研究的基础上,研究如何使用 HRMRP 中的 FPGA 对软件处理实现进一步的加速,以提升软件处理的效率。

(下转第 266 页)

- [7] Minguez J, Montesano L, Lamiraux F. Metric-based iterative closest point scan matching for sensor displacement estimation[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(5): 1048-1054.
- [8] Pomerleau F, Colas F, Siegwart R, et al. Comparing ICP variants on real-world data sets: open source library and experimental protocol[J]. Autonomous Robotics, 2013, 34: 133-148.
- [9] Chetverikov D, Svirko D, Stepanov D, et al. The trimmed iterative closest point algorithm[C]//International Conference on Pattern Recognition. Quebec City: IEEE, 2002: 545-548.
- [10] Lingemann K, Nuchter A, Hertzberg J, et al. High-speed laser localization for mobile robots[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 51: 275-296.
- [11] Censi A. An ICP variant using a point-to-line metric [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena: IEEE Press, 2008: 19-25.
- [12] Censi A. Scan matching in a probabilistic framework [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE Press, 2006: 2291-2296.

+++++

(上接第 257 页)

#### 参 考 文 献

- [1] Cox I J. Blanche-an experiment in guidance and navigation of an autonomous robot vehicle [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7 (2): 193-204.
- [2] Durrant-Whyte H, Bailey T. Simultaneous localisation and mapping