

A Robot Automatic Inspection System for RFID Intelligent Warehouse

Yuan Li¹ Wei Zou¹ Wenhao He^{1,2} Yu Liu¹ Kui Yuan¹

¹) Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China (yuan.li@ia.ac.cn)

²) Key Laboratory of Measurement and Control of CSE, Ministry of Education, Nanjing, China(wenhao.he@ia.ac.cn)

Abstract— This paper introduces a robot automatic inspection system for intelligent warehouse based on RFID technology. In the warehouse there is a RFID tag on each storage goods, and RFID tags are attached on the floor to provide robot the localization information. The robot's control and sensor system adopt embedded system with high performance and low power consumption to ensure its compute and endurance capacity. RFID tag, visual, and odometer information are fused to accomplish robot's autonomous navigation and recharging in warehouse. The Automatic Inspection system can patrol the warehouse, collect storage information and find goods' location, which can greatly improve the efficiency of the automatic warehouse goods management system.

Keywords—RFID, Intelligent Warehouse, Robot, Automatic Inspection

一种用于 RFID 智能仓库的机器人自动巡检系统

李园¹ 邹伟¹ 何文浩^{1,2} 刘禹¹ 原魁¹

¹) 中国科学院自动化研究所, 北京, 中国

²) 东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 南京, 中国

摘 要 本文介绍一种适用于 RFID 智能仓库的机器人自动巡检系统, 该系统工作的智能仓库地面布置有 RFID 标签为机器人提供定位信息, 且仓库中存放的物品均贴有 RFID 标签。机器人控制与感知系统采用高性能、低功耗的全嵌入式系统以保证计算能力和续航能力。机器人通过融合地面 RFID 标签信息、视觉信息以及里程计信息来实现其在智能仓库中的自主导航与充电, 并能够完成对智能仓库中物品的巡检和盘点以及自动查找该环境中指定物品的位置, 从而大大提高智能仓库物品管理系统的工作效率。

关键词 RFID, 智能仓库, 机器人, 自动巡检

1. 引言

随着社会的发展, 信息化程度不断提高。企业货物仓库、物流中心、图书馆、博物馆等单位或机构, 都需要对其内部存储的物品进行有效的管理。目前最常见的方法是利用条形码技术对每件物品编号, 这样可以在巡检、盘点时降低一定的工作量。条形码信息具有采集速度快、可靠性高、设备结构简单、成本低等优点, 但是条码存储数据相对较少, 使用寿命短, 且需要近距离单次扫描, 进行一次全部库存盘点耗时费力, 巡检和盘点工作经常对企业或机构的日常运营造成影响。因此需要一种能够快速批量远距离读取, 且非人工参与的机器人自动巡检和智能化的物

品管理系统, 提高物品存储自动化管理的效率, 降低工作人员的劳动强度。

射频识别(Radio Frequency Identification)通称 RFID, 是一种利用射频识别技术实现的非接触自动识别技术。它可以实现对电子标签的快速读写, 其设备具有体积小、形状多样、使用寿命长、可重复使用、存储容量大、能穿透非导电材料等特点, 并且可以实现多目标识别和移动目标识别, 通过与互联网技术的结合可以实现全球范围内物品的跟踪与信息的共享。RFID 技术用于物流、制造与服务等行业可以大幅提高企业的管理和运作效率, 并降低流通成本; 用于身份识别、资产管理等领域可以实现快速批量的识别和定位, 并根据需要进行长期跟踪管理。随着技术的进一步完善和应用的广泛推进, RFID 产品成本将迅速降低, 其带动的产业链将成为一个新兴的高技术产业群, 基于 RFID

国家 863 计划项目支持 (资助号: 2008AA040204, 2008AA040209, 2009AA043902-02)

技术的智能化支撑环境建设也将对提高社会信息化水平、促进经济持续发展、提高人命生活质量、加强公共安全与国防安全等产生广泛的影响^[1]。基于射频识别的自动巡检机器人系统,将给物品存储自动化管理领域带来新的变化。

目前室内大范围复杂环境下机器人的自主定位与导航问题一直没有得到较好地解决。主要原因是:当机器人工作于室内环境时,由于无法通过 GPS 等方式获得自己在全局地图中精确的位置以及周围的环境信息,机器人必须通过自身所带的传感器识别所在位置的各种路标(人工路标和自然路标),并根据路标识别结果完成自主定位工作,但是在目前的研究水平和技术条件下,机器人还难以利用自身的传感器系统在复杂环境中准确、快速地完成各种路标识别工作。机器人通过航位推算、模式匹配、混合方法等其他方法实现机器人定位也都存在着一定的固有缺陷,难以满足大范围室内环境内机器人自主定位与导航的需要。RFID 技术近年来越来越多被应用于机器人定位^[2,3,4]、地图构建^[2]、导航^[5]、环境探索与营救^[6]等,但是这些研究目前还未能形成较成熟的应用和示范。

因此,本文提出一种适用于 RFID 智能仓库的机器人自动巡检系统,该系统工作的智能仓库地面布置有 RFID 标签为机器人提供定位信息,且仓库中存放的物品均贴有 RFID 标签。机器人通过融合地面 RFID 标签信息、视觉信息以及里程计信息来实现其在智能仓库中的自主定位与导航,并能够完成对智能仓库中物品的巡检和盘点以及自动查找该环境中指定物品的位置,从而实现对智能仓库物品的自动管理。在机器人系统搭建时充分考虑了机器人续航能力和计算能力,机器人控制与感知系统采用高性能、低功耗的全嵌入式系统,同时系统还具有自动充电功能,保证机器人能够长时间稳定运行。

2. 系统介绍

2.1 自动巡检机器人工作环境介绍

机器人自动巡检系统工作的智能仓库环境如图 1 所示,环境中货架上的物品均贴有 RFID 标签(以下称为物品标签),货架可以是不同高度和多层;仓库地面上机器人的工作区域和运行路径上贴有 RFID 标签(以下称为地理坐标标签)为机器人提供定位信息;并且地面具有比较明显边缘信息的机器人导航线。大多数环境中方形地板之间的间隔线就可以直接作为自动巡检机器人的导航线;在没有这种边缘信息的地面,可以通过在地面铺设具有一定区分度的线条来实现;对于新建的环境,可以通过铺设内嵌 RFID 标签的专用智能地板来直接实现所需环境。因此该系统的工作环境相对比较容易实现。

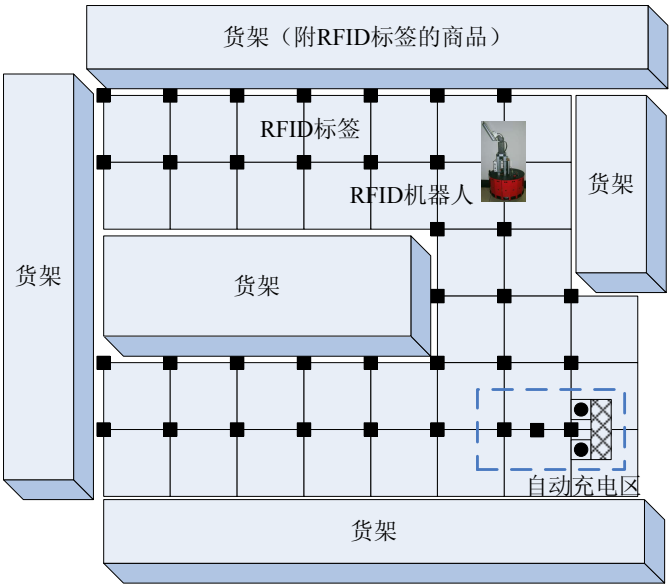


图 1 RFID 智能巡检机器人工作环境

2.2 自动巡检机器人系统介绍

基于 RFID 的仓库智能巡检机器人系统结构如图 2 所示,主要由 RFID 读写设备、基于 DSP 的云台及控制驱动系统(二自由度云台)、基于 DSP 的机器人本体驱动控制系统(驱动控制电路和本体驱动电机)、基于 DSP 的非视觉传感器处理系统(超声和红外)、基于 DSP 和 FPGA 的视觉信息处理系统、嵌入式上位机系统及机械本体等组成。

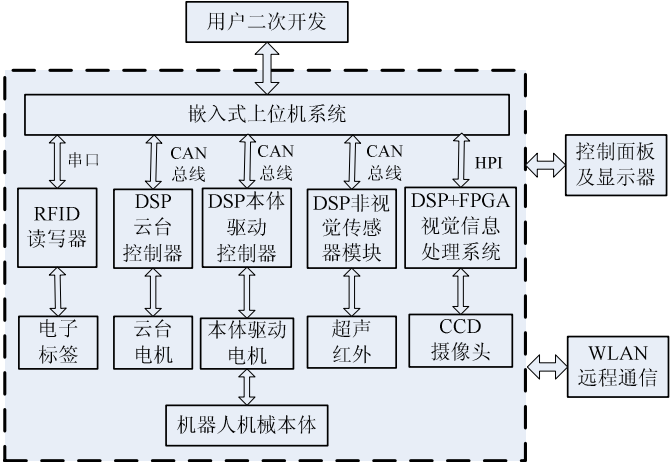


图 2 RFID 智能巡检机器人系统框图

RFID 读写设备有两类:一类是安装于机器人上方的超高频 RFID 读写设备(以下称为物品标签读卡器),主要用于读写仓库货架上物品的 RFID 标签,同时超高频 RFID 读写设备安装于二自由度云台上,可以保证 RFID 读写设备能够检测到不同高度货架上的 RFID 标签;另一类是安装于机器人下方的高频 RFID 读写设备(以下称为地理坐标标签读卡器),该读卡器读写距离较近,主要用于机器人读写布置于地面上的 RFID 标签从而为机器人提供定位信息。

为了降低机器人功耗,保证机器人具有较长的续航时

间, 本系统中机器人控制感知系统均采用嵌入式低功耗系统^[7], 同传统的机器人系统相比, 该系统有以下特点:

(1) 机器人本体电机和云台采用基于 DSP 的多轴伺服驱动控制单元, 实现了机器人平台多电机协调控制和驱动算法, 功耗低, 可靠性高。

(2) 非视觉传感器系统基于 DSP 实现, 能够支持多种类、多路传感器信息的采集和处理任务, 利用 DSP 资源实现底层传感器信息的滤波和融合算法, 从而降低了上位机计算负担, 提高了系统感知的丰富度和实时性。

(3) 视觉系统采用 DSP 和 FPGA 技术, 不但具备图像采集功能, 而且能够利用 FPGA 的并行处理能力和 DSP 的信号处理能力实现大量的常用视觉算法, 而不但在很大程度上提高视觉系统的实时性, 而且在很大程度上降低了上位机的计算负担, 使得上位机系统采用嵌入式方式成为可能。

(4) 由于视觉、非视觉传感器和控制子系统本身具有比较强大的计算能力和信息处理能力, 因而本机器人的上位机系统采用基于 ARM9 的嵌入式上位机系统, 该系统不但能够提供常用的接口资源, 而且最为关键的是, 它在很大程度上降低了系统功耗, 提高了机器人系统的续航能力。

基于 RFID 的智能巡检机器人平台实物如图 3 所示。



图 3 RFID 智能巡检机器人平台实物图

3. 功能实现及算法介绍

3.1 系统功能分析与设计

对于自动巡检系统, 必须能够扫描到任意货架上的物品标签。要完成不同的货物巡检和盘点任务, 巡检系统需要进行相应的任务规划。任务规划包括机器人的路径规划、二自由度云台的动作规划以及物品标签读写器的读写操作规划。为了提高系统的稳定性和可靠性, 假定自动巡检机

器人在路径规划时一般情况下都沿着导航线运动, 并只在地理坐标标签处执行转向运动, 且一般停靠在地理坐标标签处。这样巡检系统的任务规划就可以分解为: 机器人在已知地图环境下进行拓扑导航控制, 地理坐标标签处为拓扑点, 在各拓扑点之间机器人沿导航线运动, 并在拓扑点位置执行机器人转向运动、二自由度云台的动作规划和物品标签读写器操作。

对于自动巡检任务来说, 主要的工作任务包括:

- (1) 机器人运动到指定节点完成扫描任务
- (2) 机器人完成用户指定路径及对应目标的扫描;
- (3) 机器人完成对整个仓库的巡检;
- (4) 机器人完成给定物体的查找和定位。

对任务进行分析可以看出, 机器人均需要具备在给定路径上完成自主导航的能力, 任务 1 和 2 需要机器人能够规划出机器人从起始节点(当前位置)至目标节点的最佳路径。任务 3 和任务 4 需要机器人能够规划出从起始节点(当前位置)出发遍历所有需要巡检节点的最优路径。在本系统中由于全局地图已知, 因此机器人路径规划算法已经非常成熟, 相对比较容易。

3.2 机器人路径规划

(1) 对于机器人从当前位置到目标位置最优路径的规划来说, 根据各个节点的连通性, 可以转化为图论中的最短路径问题。采用一些成熟的图论算法就可以解决最优路径搜索, 如 Dijkstra, Floryd 和 A*算法。本系统中采用的方法是 A*算法。

(2) 对于机器人当前位置出发遍历所有需要巡检节点的路径规划, 本系统采用的方法是, 根据各个节点的连通性, 首先以当前位置为起始点, 利用 A*算法搜索从起始点搜索其他所有未巡检节点的最优路径, 选取最优路径最近的巡检节点作为目标节点。然后以该目标节点为起始点继续搜索, 依次求解出所有巡检节点的巡检顺序和最优路径。

3.3 基于视觉的导航控制

机器人在给定路径上的自主导航通过基于视觉的导航控制来实现, 机器人通过视觉识别沿着导航线行驶可以保证长时间直行时的方向误差能够控制在一个很小的范围内。基于视觉的循线运动可以分为直线提取和循线控制。

直线提取工作在基于 DSP 和 FPGA 的视觉信息处理系统中完成, FPGA 在完成对图像采集的同时, 实时对图像进行 Canny 算子操作提取边缘^[8], 直线的拟合和曲率计算工作由 DSP 完成^[9]。视觉信息处理系统可以实时完成对直线的提取并传输给上位机系统。

循线控制主要包括直线选取和循线策略。由于机器人视野中可能出现多条直线, 因此需要对视觉信息处理系统提取出来的多条直线进行选取, 本系统中假设目标直线离

机器人本体中心位置不远,并且与机器人朝向的夹角不大。选取距离机器人本体中心距离最近的直线为跟踪直线。在机器人的运动过程中,由于光照条件的变化,可能会出现选取出来的被跟踪直线瞬时大幅度跳跃或者频繁小范围跳动的情况。为了保证机器人沿着期望的方向平稳的行进,当出现以上情况时,本系统采用虚拟直线的方法来消除短时间的扰动。具体的循线控制算法及策略介绍,详见工作[10]中的介绍。

3.4 基于里程计的辅助定位系统

虽然自动巡检系统在沿导航线行驶过程中一般不会偏离导航线,但是一些突发意外情况可能导致机器人偏离出导航线。这时候就需要辅助的定位系统将机器人重新引导至导航线上运动。本系统中机器人实时采集电机码盘的信息并利用航位推算估算机器人的方向和位置作为辅助信息。由于航位推算法长时间具有较大的累积误差,而地理坐标标签可以提供较为精确的坐位位置。因此在采用航位推算法的同时,利用读到的标签信息对里程计信息进行校正,从而为机器人提供机器人定位的辅助参考信息。机器人在读到地理坐标标签信息后并不立刻对里程计信息进行校正,而是在运动到至下一地理坐标标签时,判断机器人的运动逻辑正确后,再校正上一时刻里程计信息。

3.5 自动充电功能

机器人使用可充电的蓄电池组来给自身供电,但是一般只能维持几个小时,一旦电能耗尽,必须采用人工干预的方法来给机器人充电,否则机器人执行任务失败。因此机器人能够可靠、快速高效地实现自动充电是一项至关重要的技术。对于自动充电来说,如何对充电座进行定位非常重要,当机器人距离充电座较远时,一般使用视觉识别^[11]、红外线信号灯、可见光源^[12]和导航线等方式来探测充电座位置。在近处一般在充电座上方设置便于传感器识别的特殊形状标记来调整相对充电座的位置和角度,然后实施自动对接。

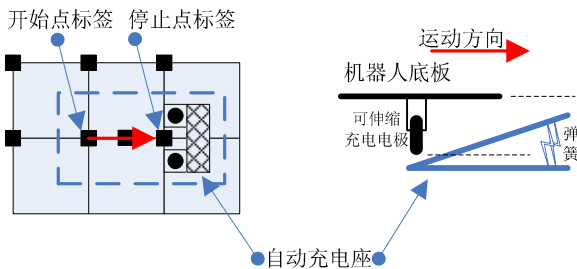


图4 机器人自动充电示意图

本系统的自动充电座放置于已知 RFID 地理坐标标签处(如图4所示)。自动充电座的总高度略低于机器人底板高度,自动充电座提供的两个电极板是两块高度可伸缩的斜面,机器人底板下安装的机器人端充电电极是两个具有

一定伸缩性的圆柱形导电电极,因此该系统的自动充电装置在机器人充电电极与充电座电极板对接时,横向和纵向方向上均允许一定的连接误差。

当机器人需要进行充电时,机器人需要自主导航至自动充电区的开始点标签位置,并沿箭头指定的方向缓慢靠近自动充电座,在开始点标签和停止点标签之间除有导航线外,还布有相对其他区域更为密集的地理坐标标签以提供更为精确的定位信息。机器人进入自动充电区后从开始点位置沿导航线运动至停止点标签停止并完成与自动充电座的对接。这时机器人下方的地理坐标标签读卡器能够检测到停止点标签,同时机器人两个充电电极能够检测到充电电压时开始充电。充电完成后,机器人沿相反方向退回至开始点标签位置后,继续执行其他任务。

4. 软件实现与应用

4.1 系统软件实现

自动巡检系统的软件分为:客户端程序和机器人程序。客户端程序运行于自动巡检系统的管理终端,机器人端程序运行于机器人上位机系统。两部分软件的整体结构如图5所示。

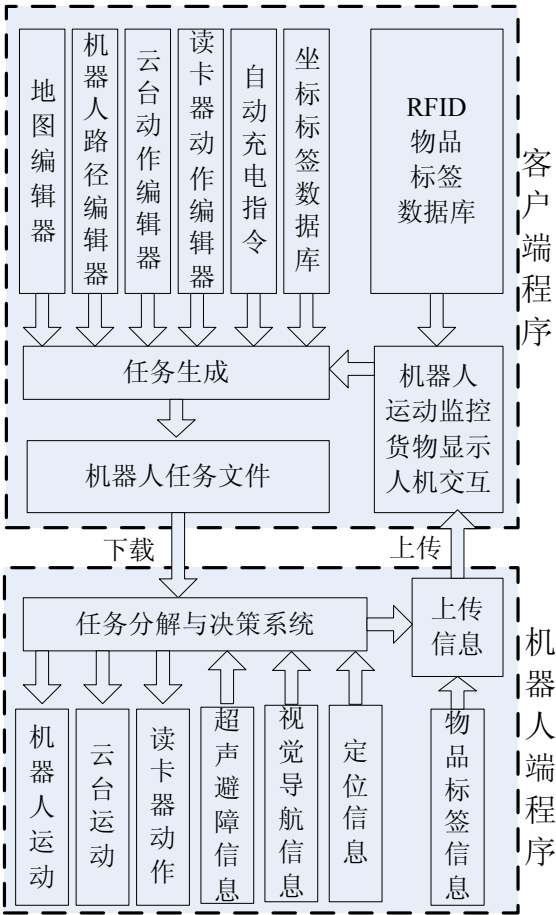


图5 RFID智能巡检系统软件框图

自动巡检机器人系统的管理终端的计算机系统中存储有两个数据库，一个是物品 RFID 标签数据库，该数据库的数据记录和物品的电子标签编码相对应；另一个是所在环境地理坐标标签数据库，该数据库的数据记录和各个地理坐标电子标签的位置坐标相对应。

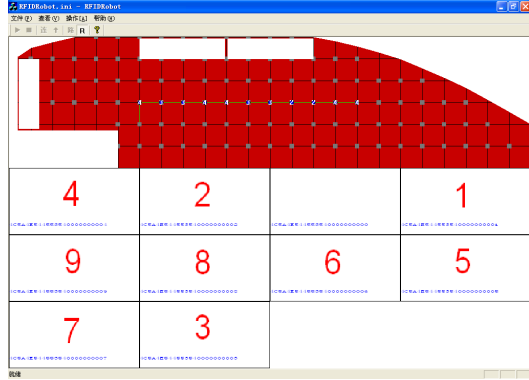


图 6 智能巡检系统客户端软件界面

巡检系统的操作和执行流程(软件界面如图 6 所示)主要包括以下环节：

- (1) 在客户端程序启动时，程序自动载入地理坐标标签数据库文件和物品标签数据库文件；
- (2) 用户在地图编辑器中对环境地图进行编辑，可以查看和修改地图中各节点的坐标以及与地理坐标标签的对应关系，并保存至地理坐标标签数据库；
- (3) 用户可以通过机器人路径编辑器设置和修改巡检机器人的巡检路径，通过云台动作编辑器和读卡器动作编辑器设定机器人在各坐标点的二自由云台的动作和物品标签读卡器的开关；
- (4) 用户编辑完成后，程序将自动生成机器人的任务文件并通过无线网络下载到机器人端的程序中，并点击开始执行，或保存环境地图和机器人任务文件以便下一次执行相同任务；
- (5) 当机器人当前位置处于用户指定的巡检路径起始点时，机器人直接开始执行巡检工作，否则，机器人还需首先规划出从当前位置至巡检路径起始点的路径，并自主导航至巡检路径起始点；
- (6) 机器人从巡检路径起始点开始，依靠视觉导航模块，依次走过指定的巡检点（运动过程中检测超声信息实施简单避障），并在各巡检点执行机器人的转向运动、二自由度云台的俯仰运动、以及控制物品标签读卡器的开关；

(7)机器人在巡检过程中，将扫描到的物品标签信息、机器人运动信息上传给客户端程序，客户端程序中可以实时查看机器人在地图中已走过的路径和实时位置，并通过搜索物品标签数据库显示机器人已扫描到物品标签对应的物品资料；

(8) 当机器人在执行过程中运到无法解决的错误时，会上传错误信息给客户端程序，由用户给出指令或重新编辑巡检任务。机器人在检测到电量将不足时也需要发出信息给客户端程序；

(9) 客户端程序收到电量不足的信息后，发出自动充电指令后，机器人规划出从当前位置至自动充电区起始点的路径，并开始进行自动充电。

4.2 应用



(1) 基于智能地板的 RFID 仓库环境



(2) 基于普通地板的 RFID 仓库环境



(3) 一般平坦地面下改造的实验环境

图 7 RFID 智能巡检机器人巡检过程

在实际应用时，机器人在三种工作环境下均能够较好地完成货物的巡检和盘点工作（如图 7 所示）。第一种环境中，仓库的地面铺有专用的 RFID 智能地板，该地板为正方形木质材料地板，并在一个顶角内嵌有 RFID 标签。第二种环境中，仓库中地面铺有普通方形大理石地板，在大

理石地板接缝处或者路线转弯处等关键点布置 RFID 标签。第三种环境中,地面为平坦路面,无任何条纹信息,通过粘贴导航线和布置 RFID 标签也可以较好地实现机器人的自动巡检。

5. 结论

本文提出的用于 RFID 智能仓库的机器人智能巡检系统通过融合地面 RFID 标签信息、视觉信息及里程计信息来实现其在智能仓库中的自主定位与导航,并能够完成对智能仓库中物品的巡检和盘点以及自动查找该环境中指定物品的位置,从而大大提高了智能仓库物品自动管理系统的效率。在机器人系统搭建时也充分考虑了实用性的要求,采用高性能、低功耗的全嵌入式系统,并结合 RFID 技术解决了机器人自动充电问题,保证了机器人能够长时间稳定运行。虽然该系统中使用的机器人路径规划等算法均是较为常用的方法,但是由于 RFID 信息的引入,在实际系统运行时保证了较好的稳定性。该系统人机交互和软件界面简单易操作,目前已经在一些单位和仓库中得到使用,获得较好的评价。

在后期工作中,我们将深入研究基于 RFID 信息的机器人同步定位与地图构建(SLAM)问题,提高智能巡检系统对未知环境的适应性,从而使得基于 RFID 的智能仓库及智能巡检系统在更大的范围获得应用。

参考文献

- [1] Guidong Liu, Wensheng Yu and Yu Liu, "Resource Management with RFID Technology in Automatic Warehouse System," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 2006, pp. 3706-3711.
- [2] Dirk Hahnel, Wolfram Burgard, Diter Fox, *etc.* "Mapping and Localization with RFID Technology", in *Proc. the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, New Orleans, LA, 2004, pp. 1015-1020.
- [3] Heesung Chae, Kyuseo Han, "Combination of RFID and Vision for Mobile Robot Localization", in *Proc. The International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, 2005, pp. 75-80.
- [4] Soonshin Han, HyungSoo Lim, JangMyung Lee, "An Efficient Localization Scheme for a Differential-Driving Mobile Robot Based on RFID System." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(6), pp. 3362-3369.
- [5] Vladimir Kulyukin, Chaitanya Gharpure, John Nicholson, *etc.* , "RFID in Robot-Assisted Indoor Navigation for the Visually Impaired", in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, 2004, pp. 1979-1984.
- [6] Alexander Kleiner, Johann Prediger, Bernhard Nebel, "RFID Technology-based Exploration and SLAM for Search and Rescue", in *Proc. the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Beijing, China, pp. 4054-4059.
- [7] 何文浩, 原魁, 邹伟. 一种嵌入式移动机器人控制系统. *高技术通讯*, 2007, 17(6), 595-599.
- [8] Wenhao He, Kui Yuan, "An improved Canny edge detector and its realization on FPGA", in *Proc. The 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Chongqing, China, 2008, pp. 6561-6564.
- [9] Han Xiao, Kui Yuan, Wenhao He, Wei Zou, "Line Object Extraction and Image Matching Based on an Intelligent Image Card", in *Proc. The 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Jinan, China, 2010, pp. 6408-6413.
- [10] Feng Wen, Kui Yuan, Wei Zou, *etc.*, "Visual Navigation of an Indoor Mobile Robot Based on a Novel Artificial Landmark System", in *Proc. the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, ChangChun, China, 2009, 3775-3780.
- [11] Milo C. Silerman, Dan Nies, Boyoon Jung and Gaurav S. Sukhatme, "Staying Alive: A Docking Station for Autonomous Robot Recharging," in *Proc. The IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington D.C. May 11-15, 2002, pp. 1050-1055.
- [12] Riccardo Cassinis, Fabio Tampalini, Paolo Bartolini and Roberto Fedrigotti, "Docking and Charging System for Autonomous Mobile Robots," *Tech. Rep. 2005-02-4. DEA*, University of Brescia, Italy, http://www.ing.unibs.it/~arl/docs/papers/05_008.pdf