基于智能空间的家庭服务机器人混合定位方法

王田苗 陶 永 魏洪兴 陈殿生

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘 要：智能空间在家庭服务机器人的应用中具有重要的作用，服务机器人的定位是其中的难点.首先提出了一种家庭环境下实现服务机器人进行家庭辅助操作的智能空间架构，然后对一种低成本的服务机器人混合定位方法进行了研究，该方法首先基于加权概率匹配定位算法的无线网络信号强度确定位置范围，然后读取智能空间中的无线射频标签进行位置计算，最后基于比例不变特征变换算法进行最终位置的视觉定位.在家居环境下的实验证明了该混合定位方法的有效性，该混合定位方法为服务机器人走入家庭提供了一种低成本、高可靠性的定位解决方案.

关 键 词：服务机器人；智能空间；无线射频标签；无线网络信号强度；比例不变特征变换

中图分类号：TP 242.6

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)02-0231-05

Hybrid location method for home service robot based on intelligent space

Wang Tianmiao Tao Yong Wei Hongxing Chen Diansheng

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the requirement of service robot operation in home environment, an intelligent space framework for service robot was proposed, which was composed of smart objects, RFID (radio frequency identification) tags, wireless access points, home server and a service robot. After that, the hybrid location method for home service robot based on intelligent space was given. The WLAN (wireless local area network) location based on RSSI (received signal strength indication) was introduced; then, analysis methods of the RFID decision-maker and vision location based on SIFT (scale invariant feature transform) were proposed. The integration of the three methods was proposed using the different features of the RSSI, RFID decision-maker and SIFT algorithms. Finally, the result was verified through experiment in home environment. With the help of intelligent space, the hybrid location method can provide a low-cost and reliable solution for the service robot entering families.

Key words: service robot; intelligent space; RFID(radio frequency identification) tags; RSSI(received signal strength indication); SIFT(scale invariant feature transform)

目前，机器人进入家庭作业仍受到很大的限制，其中家庭服务机器人的重要功能为定位、导航和物体识别，而家庭环境不同于工业现场固定和可编程的环境，家庭环境由于没有固定的空间结构模型，且存在很多不确定性的因素，如家庭成员随机的移动、家具等物品的位置调换等，从而造成了家庭环境更加的复杂.家庭服务机器人工作环境的复杂性，导致传统的定位方法如 GPS 等不能满足室内定位的要求；另外，目前服务机器人本体所需携带的传感设备种类繁多、功能有限且价格昂贵，在家庭中的应用受到较多限制.

日本 AIST 的 Bong Keun Kim 提出一种称

收稿日期：2008-07-20

基金项目：国家 863 基金资助项目(2007AA041701，2007AA041702)

作者简介：王田苗(1960—)，男，湖北武汉人，教授，wtm_itm@263.net.

为 u-RT 空间的信息空间，构成了一种机器人空间/定位处理能力的知识管理方法[1]. 德国的 Jan Koch 提出一种基于主动和被动的无线射频标签(RFID，Radio Frequency Identification)技术的智能空间原型，对室内环境中的人、机器人和市场用品进行定位[2]. 韩国工业科技研究所(KITECH)的 Seung-Ho Baeg 提出基于 RFID 和无线传感网络搭建服务机器人的智能家居环境，用于未来服务机器人进行各种家庭辅助操作，并介绍了智能家居的构成及功能的实现[3]. 国内山东大学的田国会介绍了应用于家庭服务机器人的智能空间的构成、特点及其相关技术[4]. 上海交通大学的谷红亮设计了一种用于智能空间的室内定位系统 Cicada，基于射频和超声波到达时间差来测量距离，并采用滑窗滤波和卡尔曼滤波的方法计算位置[5].

本文将智能空间应用于家庭服务机器人，提出了一种家庭环境下服务机器人的智能空间架构. 在智能空间的支持下，服务机器人能在复杂的家庭动态环境中进行服务工作. 然后，对基于智能空间技术的室内家居环境下的混合定位方法进行了研究，并对信息融合的方法进行了介绍，使得机器人在家庭环境中利用智能空间提供的信息准确地定位控制，从而减少对未知环境的学习，提高自主定位的效率. 最后，在家居环境下的实验，验证了该智能空间架构和混合定位方法的有效性.

1 智能空间架构

针对家庭环境的特点，本文提出了一种应用于家庭服务机器人的智能空间架构，该智能空间中的各部分通过无线传感网络互相连接，包含较少传感器的轻量级服务机器人能够在复杂的家庭环境中执行各种操作.

本文提出的智能空间框架见图 1. 家庭服务机器人的智能空间主要由 3 部分组成：①智能物品(smart objects)、具有无线传感功能的设备和无线网络节点(无线 AP)；②用于数据管理、保持智能设备和家庭服务机器人互联的家庭服务器(家庭网关)；③完成家庭操作任务的服务机器人.

智能物件(smart items)是具有 RFID 标签的物品，是本文所提出的智能空间的基本组成元素，只能被读卡器或其他智能设备识别；智能物品具有 RFID 读卡器或发射器，具有独立的处理器和家庭服务器进行通讯. 家庭服务器对智能物品进行管理，采集智能设备网络中的数据信息，并基于采集到的数据做出决策，进而发出指令进行控制和操作. 家庭服务机器人通过传感器网络和周围的环境发生交互，控制和管理周围的智能物品，进行可靠的操作和服务.

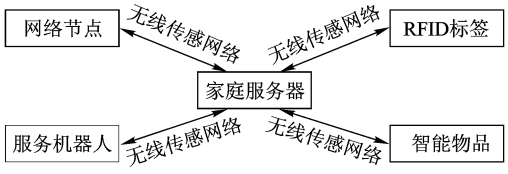

图 1 面向家庭服务机器人的智能空间框架

家庭环境的布局如图 2 所示，其中各个家具及地板上安装有 RFID 标签，无线网络节点分布于家庭中各个房间. 智能空间作为连接家庭中的人、服务机器人和家庭环境的桥梁，将采集到的各种传感信息通过无限网络进行传输，并通过家庭服务器实现高水平的信息处理和数据融合.

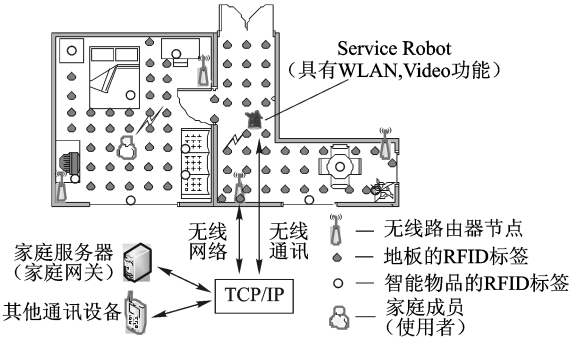

图 2 用于家庭服务的智能空间的构成

2 混合定位方法

2.1 无线网络定位

针对室内环境的特点，在定位算法方面，对传统的概率匹配定位算法进行了改进，选用概率较大的多个点进行加权运算，形成了加权概率匹配定位算法.

2.1.1 室内环境中的信号强度表示

为了描述室内定位环境中的某一点的信号强度值，引入高斯信号的概率密度函数，由数学期望和方差这两个统计量参数来描述，在统计信号处理时，采用基于二阶统计量的信号处理方法对信号进行处理[6].

对于采集的信号强度值(RSSI，Received Signal Strength Indication)，从正态总体 $N(\mu,\sigma^2)$ 抽样 $X_1,\cdots,X_n$，未知参数为 μ 和 σ^2. μ 和 σ^2 的最大似然估计为

$$\left.\begin{aligned}\mu^* &= \overline{X}\\ \sigma^{*2} &= \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i-\overline{X})^2\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

对于采样信号的处理，在抽取一定的样本空

间后,可认为计算的结果 μ^* 和 σ^{*2} 为真实值,并将 μ^* 作为该点的信号强度.

2.1.2　基于信号强度的无线网络定位

离线训练状态下,构建无线信号强度地图,首先在要定位的区域内选取参考点,然后使用测量或者数学模型分析的方法,得到各个参考点无线 AP 的信号强度.由于室内环境一般存在家具、墙壁等的遮挡,所以无线信号传播模型为

$$P(d)=P(d_0)-10\alpha\lg\left(\frac{d}{d_0}\right)-\begin{cases}n_W W_{AF} & n_W\leqslant C\\ CW_{AF} & n_W\geqslant C\end{cases}\tag{2}$$

其中,$P(d)$为距离无线 AP 点 d 处的信号强度;$P(d_0)$为距离无线 AP 点 d_0 处的信号强度;n_W 为测试点与 AP 之间障碍物的数量;C 为使得衰减因子变化的障碍物数量的临界值;W_{AF} 为障碍物的衰减因子.

测定各个参考点处 AP 信号强度的平均值 e_{r_i} 和方差 d_{r_i},连同参考点的坐标一起构建数据库,使用概率的方法来估算位置,构建出室内环境中的无线信号强度地图[7].

在线定位时,采集各个 AP 的无线信号强度 r_i,与无线信号强度地图中的数据进行匹配,假设实际点与参考点的距离为 d,可推算出实际点处的信号强度,得到

$$\ln p(x,y)=\sum_{i=1}^{n}p_i(x,y)=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{(r_i-e_{r_i})^2}{2d_{r_i}^2}-\ln\sqrt{2\pi}-\ln d_{r_i}\right)=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\left(e_{r_i}-10\alpha\lg\left(\frac{d}{d_0}\right)-e_{r_i}\right)^2}{2d_{r_i}^2}-\ln\sqrt{2\pi}-\ln d_{r_i}\right)=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\left(-10\alpha\lg\left(\frac{d}{d_0}\right)\right)^2}{2d_{r_i}^2}-\ln\sqrt{2\pi}-\ln d_{r_i}\right)\tag{3}$$

在强度匹配定位时,首先选定 $p(x,y)$最大的点,然后选取与 $p(x,y)$量级相同或者相近的点作为预定位点.而当预定位点为 2 个或者 3 个时,本文通过添加加权系数来计算最后的结果.假设选取出的预定位点个数为 n,概率最大预定位点的对数值为 $\ln p(x_1,y_1)$.取 $a=|\ln p(x_1,y_1)|$,$b=|\ln p(x_2,y_2)|$,$c=|\ln p(x_3,y_3)|$,则使用式(4)的加权算法计算最终的定位点.

$$\left.\begin{aligned}x&=\frac{(b+c)x_1+(c+a)x_2+(a+b)x_3}{(n-1)(a+b+c)}\\ y&=\frac{(b+c)y_1+(c+a)y_2+(a+b)y_3}{(n-1)(a+b+c)}\end{aligned}\right\}\tag{4}$$

采取概率及加权计算的定位方法,能够显著地改进定位精度,但是由于无线信号传输的不稳定性,在定位过程中仍会出现错误的预定位点,而这些点的出现会对最后的结果产生明显影响.

2.2　RFID 定位方法

RFID 射频标签分为主动式和被动式两种,被动式标签比主动式标签更加小巧且价格低廉,具有几乎无限的操作生命周期,因此本文将其作为服务机器人定位的地标,与基于 RSSI 的无线网络定位相结合,缩小服务机器人定位的区域,进一步提高定位精度.

对于相同的 RFID 天线检测的频率,位于服务机器人上的 RFID 天线前面 0.5～2.5 m 的不同区域范围内检测频率是不同的,如图 3 所示,每一个天线发射的信号所能覆盖的范围为一个扇形,半径 2.5 m,扇形张角大约 120°[8],在 0.5～1.5 m 的距离内居于中央区域的标签最容易被读取,对应的权重也较高,这是进行 RFID 标签读取和位置估测的基础.

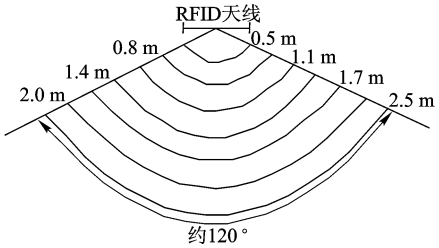

图 3　RFID 天线检测区域

RFID 定位通过在天线读取范围内检测到的 RFID 标签进行“投票决策”[9],投票决策是一种较简单的办法,但在检测区域边缘的标签容易出错.本文对其进行改进,提出将 RFID 读卡器检测到的标签分配不同的权重,在天线读取范围内不同位置的标签具有不同的权重,位于读取范围中间位置的标签的权重较大,而越靠近边缘区域则权重越小.

服务机器人根据读取到的最大权重的 RFID 标签,通过无线网络发送到家庭服务器,家庭服务器根据 RFID 的编号和相关位置信息,确定机器人所在的位置区域,并和无线信号强度确定的位置进行融合,为下面基于单目视觉的图像识别奠定基础.

2.3　单目摄像头视觉定位

David G. Lowe 在 2004 年提出了一种比例不变特征变换(SIFT, Scale Invariant Feature Transform)[10].本文基于 SIFT 算法,采用低成本的单目摄像头在前面无线网络和 RFID 定位的基础上,进行目标物品的识别.

图像在不同尺度下的尺度空间表示可由图像与高斯核卷积得到：

$$L(x,y,\sigma)=G(x,y,\sigma)\cdot I(x,y) \tag{5}$$

其中，(x,y)代表图像的像素位置；σ称为尺度空间因子；$G(x,y,\sigma)$是二维高斯函数.

指定算子的方向是在图像经过旋转变换后，仍能进行特征点的匹配，主要利用关键点邻域像素的梯度方向分布特性来实现.

$$m(x,y)=[(L(x+1,y)-L(x-1,y))^2+(L(x,y+1)-L(x,y-1))^2]^{1/2} \tag{6}$$

$$\theta(x,y)=\arctan\frac{L(x,y+1)-L(x,y-1)}{L(x+1,y)-L(x-1,y)} \tag{7}$$

式(6)和式(7)分别表示(x,y)处梯度的模值和方向，其中L所用的尺度为每个关键点各自所在的尺度.

本文中使用最近邻方法对SIFT方法提取出的特征点进行匹配，采用关键点特征向量之间的欧氏距离作为两幅图像中关键点的相似性判定度量. 取图像中的某个关键点A，并找出其与家庭服务器数据库的图像中与A欧几里德距离最近与次近的关键点B与C. 使用特征点与最近邻特征点的距离和与次近邻特征点的距离的比值来衡量匹配的质量. 如果满足公式(8)，那么认为A与B匹配.

$$\frac{|AB|}{|AC|}\leqslant r \tag{8}$$

其中r是常量且$0<r<1$，实际匹配时，设定阈值r，若距离的比值小于阈值，则认为这是一对匹配点，从而消除一些匹配误差过大的特征点对.

2.4 信息混合

信息混合定位流程如图4所示，首先通过服务机器人所具有的无线网卡获取智能空间中当前位置处AP的RSSI，根据当前的RSSI，利用概率匹配算法计算出预定位点，构建预定位点序列.

然后，使用服务机器人的RFID读卡器读取地面RFID标签及周围物品RFID标签的信息，并通过无线网络传输到家庭服务器进行查询，将RFID标签的位置限定在1～2.5 m的范围内，从而确定机器人所在的1～4 m^2的位置区域，并和前面RSSI所确定的几个预定位点进行信息融合，从而进一步将定位范围缩小.

最后，通过视觉信息对得到的预定位点再次进行筛选. 对每个预定位点进行筛选时，通过无线访问家庭服务器中的视觉信息数据库中预定位点附近的SIFT特征数据，与实时采集到的图像进行特征匹配，若匹配成功，则认为此预定位点可信，并将其加入筛选后的预定位点序列；若匹配失败，则把此预定位点从序列中去除. 最后使用加权定位算法，确定最终定位位置.

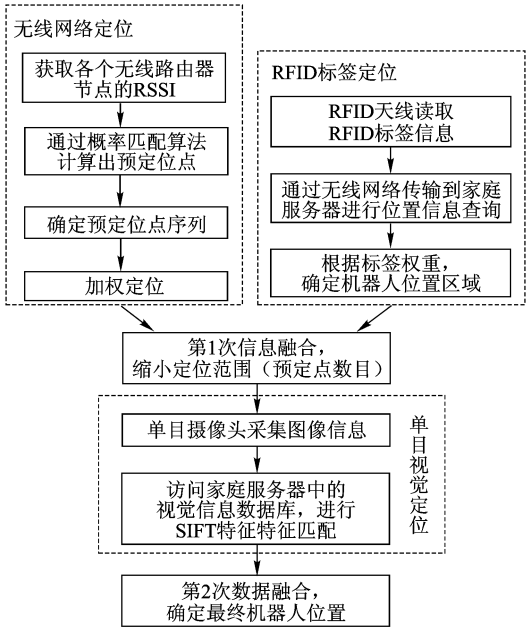

图4 混合定位方法流程图

3 实验验证

本系统实验采用Voyager-IIA地面移动机器人平台，如图5所示，其上使用DELL D640m笔记本作为主控制器，运行Red Hat Linux 2.6.18操作系统，以保证系统运行的实时性. 无线网卡为TP-LINK的TL-WN321型，AP点为NETGEAR WGR614无线路由，工作于2.4～2.483 5 GHz频段. RFID使用UP-TECH的RFID卡状标签及读卡器模块，摄像头采用罗技QuickCam Pro 5000. 家庭服务器的数据库采用开源数据库sqlite 3. 在视觉的处理方面，使用开源计算机视觉库OpenCV.



图5 服务机器人-实验平台

构建无线网络信号强度地图时，对室内环境使用1 m×1 m的网格进行划分；然后在各点处采集各个AP的RSSI，结合RFID标签的位置信

息构建成地图.视觉数据库的建立则根据机器人可能的运动路线分块构建,采集若干图像,提取出可用 SIFT 特征作为路标,构建成连续视觉地图.

实际定位时,机器人在室内二维空间内随意运动,比较混合定位系统给出的定位信息与机器人的实际位置,计算其欧式距离作为定位误差.在同样的实验环境中随机选取 16 个点,将本文提出的混合定位方法与其他的如 iGPS 和 ARTOS[2] 等室内定位方法进行对比,实验结果对比情况如表 1 所示,从中可得出:在 90%置信度内,本文提出的混合定位方法的定位精度可达 1.2 m,较现有其他定位方法的精度得到了提高,避免了单次定位时的粗大误差,且使用低成本的无线路由器、单目摄像头、RFID 标签等传感器,降低了系统实现的难度,易于进行推广和应用.

表 1　不同定位方法实验结果　　m

定位点序列	ARTOS 定位	iGPS 定位	混合定位
1	0.9	1	0.9
2	0.4	0.8	0.4
3	2.3	1.4	1.25
4	1.9	1.1	0.9
5	1	1.1	1
6	2.3	1.15	1.1
7	0.8	0.9	0.7
8	1.6	1.4	1.15
9	0.5	0.6	0.6
10	0.85	1.2	0.8
11	0.85	1.2	0.8
12	2	1.1	1
13	1.85	1.4	1.2
14	1.5	1	1
15	1.95	1.2	1.15
16	1.6	1.3	1.1

4　结 束 语

针对服务机器人在家庭等非确定环境下更加高效、精确的定位导航的需求,本文提出了一种家庭环境下的服务机器人智能空间架构.然后对基于智能空间技术的混合定位方法进行了研究,并对不同传感器的信息融合方法进行了介绍,最后在家居环境下的实验,证明了该智能空间架构和混合定位方法的有效性.

参考文献(References)

[1] Bong K K, Nobuyasu T, Kenichi O, et al. Ubiquitous localization and mapping for robots with ambient intelligences [C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2006:4809－4814

[2] Jan Koch, Jens Wettach, Eduard Bloch, et al. Indoor localisation of humans, objects, and mobile robots with RFID infrastructure[C]//IEEE International Conference on Hybrid Intelligent Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2007:271－276

[3] Baeg Seung-Ho, Park Jae-Han, Koh Jaehan, et al. Building a smart home environment for service robots based on RFID and sensor networks[C]//IEEE International Conference on Control, Automation and Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2007:1078－1082

[4] 田国会,李晓磊,赵守鹏,等.家庭服务机器人智能空间技术研究与进展[J].山东大学学报,2007,37(5):53－59
Tian Guohui, Li Xiaolei, Zhao Shoupeng, et al. Research and development of intelligent space technology for a home service robot[J]. Journal of Shandong University, 2007, 37(5):53－59(in Chinese)

[5] 谷红亮,史元春,申瑞民,等.一种用于智能空间的多目标跟踪室内定位系统[J].计算机学报,2007,30(9):1603－1610
Gu Hongliang, Shi Yuanchun, Shen Ruimin, et al. A multi-object tracking indoor positioning system for smart space [J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(9): 1603－1610(in Chinese)

[6] 张福渊,郭绍建,傅丽华.概率统计及随机过程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2001
Zhang Fuyuan, Guo Shaojian, Fu Lihua. Probabilistic statistics and stochastic process[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2001(in Chinese)

[7] 陈永光,李修和.基于信号强度的室内定位技术[J].电子学报,2004, 32(9):1456－1458
Chen Yongguang, Li Xiuhe. Signal strength based indoor geolocation[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(9): 1456－1458 (in Chinese)

[8] Milella A, Vanadia P, Cicirelli G, et al. RFID-based environment mapping for autonomous mobile robot applications [C]//IEEE International Conference on Advanced intelligent mechatronics. Piscataway, NJ: IEEE, 2006:1 －6

[9] Heesung Chae, Kyuseo Han. Combination of RFID and vision for mobile robot localization[C]//IEEE International Conference on Intelligent Sensors. Piscataway, NJ: IEEE, 2005:75－80

[10] Lowe D G. Distinctive image feathers from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91－110