

文章编号: 2095-4980(2014)02-0195-07

基于射频识别的室内定位技术综述

刘 鹏, 卢潭城, 高 翔

(复旦大学 信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘 要: 用于室内定位的技术主要包括红外传播技术、802.11 WLAN 技术、无线传感器网络 (WSNs)、超声波定位。而射频识别 (RFID) 技术依赖其合理的系统造价、良好的定位精确度、较强的抗干扰能力、无接触通信以及 RFID 射频标签的部署、携带便捷等诸多优点, 正逐渐应用于室内追踪定位中。本文从用于室内定位的 RFID 标签的角度出发, 将当前主要的 RFID 室内定位技术分为无源、有源和半无源 RFID 定位 3 类, 并对每一类中涉及到的主要定位算法的当前发展状况及其优缺点做了详细分析。

关键词: 室内定位系统; 射频识别标签; 射频识别定位; 2-D 定位

中图分类号: TN925

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201402.0195

A review of Radio Frequency Identification based indoor localization technology

LIU Peng, LU Tan-cheng, GAO Xiang

(School of Information Technology and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The technologies used in the indoor localization mainly contain infrared propagation technique, IEEE 802.11 Wireless LAN, Wireless Sensor Networks (WSNs), and ultrasonic localization. Instead, Radio Frequency Identification (RFID) technique, with its numerous advantages of reasonable system cost, excellent location accuracy, strong anti-interference, contactless communications, convenient deployment and carry, has been widely used in indoor localization. From the point of RFID tags used in the indoor localization, the primary RFID-based indoor localization techniques are classified into three categories, namely, passive localization, active localization, and semi-passive localization. The analysis about the state of the art of the primary RFID-based localization algorithms is presented in detail, as well as the advantages and disadvantages of each technique.

Key words: indoor localization; Radio Frequency Identification tag; Radio Frequency Identification localization; 2-D localization

普适计算是信息技术的下一代主要技术, 意味着像人类、物品、建筑物等都将装有嵌入式处理器, 且能够和网络相连进行计算和交互。定位作为普适计算系统的一种具体应用受到广泛关注, 普适定位技术的发展和基于技术的普适计算系统不可或缺^[1]。全球卫星定位系统 (Global Positioning System, GPS) 具有监控范围广、定位精确度高、服务价格合理等优点, 被广泛用于室外环境中的追踪、导航和定位。然而, 由于建筑物的遮挡、墙壁阻隔等因素的存在, 以及室内环境的复杂性, GPS 无法实现精确的室内定位。

为克服 GPS 的定位缺陷并实现在复杂室内环境中的精确定位, 研究人员在室内定位中引入了红外传播技术、802.11 WLAN 技术、超声波技术、RFID 技术等多种技术。其中, 红外传播技术原理简单, 系统造价低, 是较早用于室内定位的技术。然而, 红外信号要求直线视距传输, 且信号传输的视角范围窄, 在室内定位中具有一定的局限性, 同时, 红外信号易受外界光线干扰, 导致定位精确度有限, 较为典型的应用系统有 Active Badge^[2]。IEEE 802.11 WLAN 技术是最早将无线射频信号用于室内定位的技术。这种定位系统易于构建, 所需基站数目较少, 且可以利用现成的无线网络。然而, 在进行定位时, 被追踪的目标必须携带无线射频信号接收器, 这对于体积小、

收稿日期: 2013-05-11; 修回日期: 2013-07-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 基金资助项目 (2011AA100701)

能耗受限的设备是很不方便的,且定位精确度也不够理想,较为典型的应用系统有 RADAR^[3]及其改进型 RADAR^[4]。超声波技术利用超声波测距原理实现室内定位,定位精确度高,抗干扰能力强。然而,构建这种定位系统需要部署大量的基础设施,如超声波测距设备,进而增加了系统成本,较为典型的应用系统有 Cricket^[5]和 Active Bat^[6]。RFID 技术作为一种快速发展的技术,凭借其无接触通信、高数据速率和安全性、非视线识别、低成本等优点^[7],在室内定位中获得了广泛应用。

对于当前提出的各种基于 RFID 的室内定位算法,不少研究人员对其技术发展状况进行了较为细致的归类,如 T Sanpechuda 和 L Kovavisaruch 根据被追踪目标携带的对象,将 RFID 定位分为阅读器定位和标签定位^[8]; Mathieu Bouet 和 Aldri L dos Santos 将其分为距离估计、场景分析和邻近判别 3 类^[9]。二者对每一类算法的定位原理及其优缺点均作了详细分析,但它们都是 2008 年以前出现的定位算法的归类总结,未能涵盖最近几年的典型定位算法,尤其是基于射频的混合室内定位 COCKTAIL^[10],基于接收信号相位差的室内定位^[11],以及使用特制半无源标签的室内定位^[12]等新型定位算法。本文从室内定位中使用 RFID 标签的角度出发,将当前主要的 RFID 室内定位分为无源、有源和半无源 RFID 定位 3 类,并对每一类中涉及到的主要定位算法的技术发展状况及各自的优缺点进行详细分析。

1 无源定位

该定位方法通过无源电子标签实现定位。无源电子标签内部不含供电电源,使用波束供电技术,从读写器发射的射频信号中获取能量,驱动标签工作,因而读写器需要发射较高功率级别的射频信号,以便为标签提供足够的驱动能量。无源标签通常使用反向散射技术与阅读器通信,在散射射频信号的同时,将自己的身份标识 ID(Identity)等认证信息调制在散射信号中供阅读器识别。这种无源标签尺寸小,价格便宜,工作寿命长,对环境要求不高,但其作用距离相对较近。使用超高频、微波通信的无源标签作用距离通常在 10 m 以内^[13],能够满足室内定位需求,因而室内定位中使用的无源标签通常工作在高频、超高频段。

无源射频标签仅提供是否处于阅读器监测范围内的信息,无法提供用于定位的其他直接信息,如接收信号强度信息等,因而在进行定位时,需要构建某种定位模型或采用其他手段进行间接定位。使用无源射频标签进行室内定位的系统较多,本文仅对其中 4 种典型的无源定位算法进行分析,指出系统的定位原理及其优点和存在的缺陷。

声表面波(Surface Acoustic Wave, SAW)电子标签是一种将 SAW 技术应用于电子标签的产物。Thomas F Bechteler 等人使用 SAW-ID 标签实现了室内目标的 2-D 定位,定位误差在 20 cm 以内^[14]。他们在定位区域内放置收发天线和附有 SAW 标签的定位目标,利用 TOA(Time of Arrival)测距原理,获得阅读器与目标之间的距离 d ,目标位置最终由以收发天线为焦点的多个椭圆的交点坐标确定,如图 1 所示^[14]。

其中目标位置以极坐标表示,发射天线处于坐标原点,则距离 d_i 由式(1)^[14]确定:

$$d_i = \frac{T_{\text{total},i} - T_{\text{SAW}} - T_{\text{sys}} - T_{\text{cable},i}}{c_0}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中: $T_{\text{total},i}$ 表示信号传输延时; T_{SAW} 表示 SAW 标签响应延时; T_{sys} 表示系统硬件处理延时; $T_{\text{cable},i}$ 表示天线到解调器之间的信号传输延时; c_0 为真空中光速。

该定位系统使用完全无源的 SAW 标签,工作在完全免费的工业科学医疗(Industrial Scientific Medical, ISM)频率 2.5 GHz 上,系统构建成本较低,且 SAW 标签具有一定程度的抗干扰能力,定位精确度不至于受环境影响过大^[14]。时间延迟 $T_{\text{total},i}$, T_{SAW} , T_{sys} , $T_{\text{cable},i}$ 均与系统硬件有关,使得距离 d_i 太依赖于系统硬件设施,且测量不便,给系统定位带来了一定的困扰;此外,系统根据计算出的椭圆交点确定目标位置,然而多数情况下,由于各种因素的存在,椭圆并不能完全交于一点,而是交于多个点,构成某一区域,算法没有考虑该情况下目标位置的确定;再者,阅读器的部署形状、多 SAW 目标标签的存在、封闭环境中墙壁反射回波等都会影响定位精确度,在一定程度上限制了监测区域的范围和追踪目标的数目^[14]。

尽管无源射频标签无法提供除了是否处在阅读器监测范围内以外的其他直接信息,但 Cesare Alippi 等人提

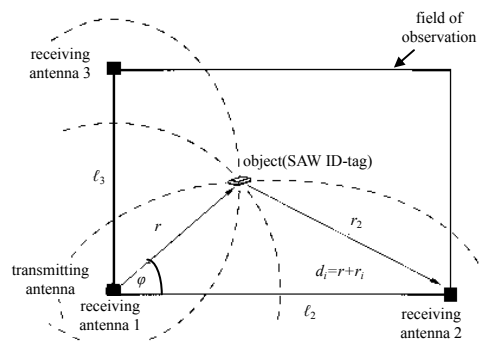


Fig.1 Principle of target localization

图 1 目标定位原理图

出了一种基于贝叶斯概率检测模型的天线极面定位方法^[15],实现室内定位。它们将阅读器发射的询问信号分为若干个功率级别,同时构建不同功率(0.1 W~3 W)级别下阅读器的检测概率映射图,再辅之以先验概率映射图,通过计算得到贝叶斯后验概率,使后验概率达到最大的位置坐标,即为目标的检测位置。

该定位系统构建成本低,且对非视距(Non Line of Sight, NLOS)信号不敏感。其定位的关键在于构建多功率级、多天线方向下的检测概率统计模型映射图,该图的准确性在一定程度上会影响目标的定位精确度。同时,其定位精确度还依赖于阅读器的分布及数目^[8]。

除了构建检测概率模型实现定位外,ZHANG Yi-min 等人将天线阵列的信号到达方向 DOA(Direction of Arrival)估计技术应用于 RFID 标签定位,提出了一种新型的基于 DOA 技术的室内定位算法^[16]。他们在特定位置布置 2 组双天线阵列,通过测量信号的 DOA,获得倾斜角 θ_1 和 θ_2 ,辅之以两天线阵列中心距离 H ,利用三角测量原理,获得目标位置,如图 2 所示^[16]。

其中两天线阵列中心分别位于 $(0, H/2)$ 和 $(0, -H/2)$ 处, θ_1, θ_2 分别为两天线阵列中心对于目标标签的倾角,则目标标签的坐标 (x_e, y_e) 由式(2)获得:

$$x_e = H \frac{\tan \theta_1 \tan \theta_2}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2}, y_e = \frac{H}{2} \frac{\tan \theta_1 - \tan \theta_2}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \quad (2)$$

该定位算法既可以定位静止目标,也可以定位移动目标,在获得多组观测数据情况下,可使用最小平方拟合技术进一步降低估计误差^[16]。

多数 RFID 室内定位系统都受到阅读器或标签分布的影响,YANG Po 等人在具体分析 RFID 定位系统的定位精确度与标签分布密度之间的关系后,提出了基于无源标签稀疏分布的定位算法^[17]。他们首先构建了用于定性测定 RFID 系统定位精确度和精密度^[17]的标签分布测量模型,然后基于实验观测数据提出了反应标签分布密度和 RFID 系统不确定性的关系函数,最终从数学分析的理论层面上,提出了无源标签的稀疏分布定位算法。该算法使用 Han^[18]定位算法,见式(3),在保证一定精确度的前提下,尽量改善对移动目标的定位精密度。

$$\begin{cases} f_x = \frac{\min(x_1, x_2, \dots, x_m) + \max(x_1, x_2, \dots, x_m)}{2} \\ f_y = \frac{\min(y_1, y_2, \dots, y_m) + \max(y_1, y_2, \dots, y_m)}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)$ 表示被检测到的无源标签坐标; f_x, f_y 分别表示计算目标坐标的算法。

该定位方法尽管只提出了在保证一定精确度的前提下提高定位精密度的定位算法,但却是从数学分析的理论层面上提出,并进行了实验验证,具有很高的说服力。然而该系统只能使用 Han^[18]中基于矩形的特征选择方法,对采集的 RFID 数据进行过滤,对于其他的特征选择方法,该算法则无效,这在一定程度上限制了其扩展性和改进性。

2 有源定位

该定位方法使用有源电子标签实现定位。有源标签内部嵌有供电电池,为标签内部各种电路提供能量,因而这种标签体积较大,成本较高,寿命有限,需要定期更换电池,在恶劣环境中性能较差^[13]。但其作用距离相对较远,具有自动应答功能,可实现与阅读器的主动通信,对运动物体具有较高适用性,还可以根据特殊用途附加额外功能,如存储器、传感器、加密模块^[9]等,因而在室内定位中获得广泛应用。

鉴于阅读器接收信号强度指示(Received Signal Strength Indicator, RSSI)与阅读器和标签之间距离 d 具有近似线性关系^[19],在有源定位中,往往通过测定 RSSI 并结合定位算法实现精确定位。此外,还可以利用接收天线获得的接收信号相位差信息进行定位,在保证一定信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)的情况下,该方法实现的定位具有更好的精度,不仅可以定位,还可以追踪物体的移动^[20]。选取较为典型的 4 种定位算法作为有源定位的代表,进行细致分析。

由 Hightower 等人提出的 SpotON^[21]是最早将 RFID 技术应用于室内定位的系统。他们依据经验数据建立接

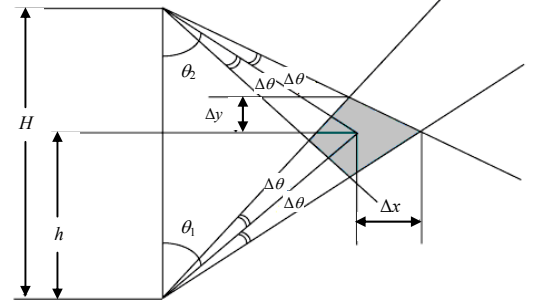


Fig.2 Localization principle and error analysis
图2 定位原理及误差分析图

收信号强度(RSS)与距离 d 的经验关系^[21], 基于对 RSS 的分析并结合聚合算法, 以簇为定位单元实现 3-D 定位。SpotON 首次使用 RFID 实现了空间中的 3-D 定位, 突破了 2-D 定位的局限, 然而其定位精确度却很差, 且耗时较长, 这很容易错过目标位置的关键变化, 实时性很差。尽管他们后来设计了新型的定位硬件, 在一定程度上改进了定位精确度, 但该硬件尚未开发完成, 且距离定位标签的尺寸尚有很大差距。

作为基于 RSSI 分析进行定位的经典定位系统之一, LANDMARC^[22]首次引入了参考标签的概念, 通过计算由 n 个阅读器获得的追踪标签的信号强度与 m 个参考标签的信号强度之间的欧几里得距离 $E_j, j \in (1, m)$, 并从中选出 k 个具有最小 E_j 值的参考标签, 利用式(4)^[22]实现定位。

$$(x, y) = \sum_{i=1}^k w_i (x_i, y_i); \quad w_i = \frac{1/E_i^2}{\sum_{i=1}^k 1/E_i^2} \quad (4)$$

式中: (x, y) 为追踪物体坐标; (x_i, y_i) 为邻近标签坐标; w_i 为对应的加权值。

该定位系统通过部署价格相对低廉的参考标签, 大大降低了系统成本。由于参考标签和追踪标签处于相同的环境中, 受到环境的影响基本相同, 这在一定程度上降低了环境因素对定位精确度的干扰, 相比之前的定位系统, 定位精确度有了很大改善。然而该系统仍存在着某些潜在缺陷: 首先, 在寻找邻近参考标签时, 所有的参考标签都被视作候选者参与计算, 许多不必要的计算被引入, 从而增加了系统计算量; 其次, 目标位置由邻近参考标签坐标获得, 其定位精确度取决于参考标签的部署情况, 如部署密度、形状等。密度过小, 由邻近参考标签构成的多边形范围越大, 势必增大定位误差^[1]; 不同的部署形状, 其定位精确度也不同。

对于 LANDMARC 存在计算量大的问题, 文献[1]通过设计新的邻近标签候选算法, 大大降低计算量, 并使用平均估计误差对定位结果进行修正, 进一步降低了误差。文献[19]通过引入参考标签坐标的加权估计误差, 对追踪标签的坐标进行修正, 进而提高定位精确度。VIRE^[23]通过引入虚拟参考标签, 将相邻参考标签构成的区域进一步细分为虚拟网格单元, 通过线性插值法获得虚拟参考标签的坐标, 从而缩小定位区域, 提高定位精确度。

鉴于 RSSI 和 WSNs 在室内定位中的优缺点^[10], ZHANG Dian 等人提出了基于 RF 的混合型室内定位算法 COCKTAIL^[10]。他们将定位过程分 2 个阶段进行:

1) 通过稀疏部署的 WSNs 获得动态 RSSI 信息, 即 RSSI 的方差, 确定目标所在的子区域。他们将定位区域用稀疏部署的无线传感器节点划分为多个网格单元, 如图 3 所示^[10]。

最终, 目标所在子区域由式(5)确定:

$$W_i = \sum_{j=1}^z (w1_i^j + w2_i^j) \quad (5)$$

式中: W_i 表示第 i 个网格单元的权重; $w1_i^j, w2_i^j$ 分别表示第 i 个单元内, 两交叉的受影响连接的权重值; z 表示第 i 个单元内总的内插点数目, 即受影响连接的交点数目。具有最大 W_i 值的网格单元即为目标所在的子区域。

2) 在子区域内, 使用基于密集部署的参考标签的静态 RSSI 信息分析定位算法 SA-LANDMARC 和 SA-SVR, 精确定位目标^[10]。

该定位算法在充分分析基于 RSSI 和 WSNs 定位优缺点的基础上, 将二者有效融合, 形成优势互补, 将定位精确度比多数纯粹依靠单一 RF 信息的定位算法提高了 40%^[10]。由于事先确定了目标所在的子区域, 从而克服了 LANDMARC 存在的冗余计算问题, 大大降低了计算量。然而, 在确定目标所在子区域时, COCKTAIL 依靠动态 RSSI 信息确定目标所在子区域的前提必须是, 目标物体能够引发传感器检测到明显的 RSSI 的动态变化, 这对目标物体的大小、是否运动、运动快慢等因素提出了限制。此外, COCKTAIL 的定位精确度还受到传感器和参考标签的部署距离和形状的影响。

除了基于 RSSI 信息分析进行定位外, Cory H-W 等人提出了基于标签发射信号与天线接收信号间相位差的定位算法^[20]。他们基于信号相位差 $\Delta\phi$ 和标签与接收天线间距离差 Δd 的对应关系, 实现了室内目标的 3-D 定位, 如式(6)所示^[20]。

$$\Delta d = \frac{\Delta\phi}{360} \frac{c}{f_c} \quad (6)$$

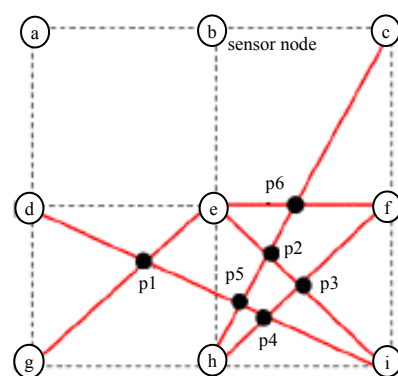


Fig.3 Distribution of the affected intersections in the grid units

图 3 网格单元内受影响连接交叉点分布图

式中: c 为光速; f_c 为信号载波频率。

该定位算法在确定信号相位差时,要求收发时钟严格同步,稍有偏差,便会造成本地频率与载波频率的失配,导致较大的相位差偏移^[20];此外,信号相位差的测定要求接收 SNR 不能太小,这要求阅读器天线必须确保一定的发射功率;最后,由于相位差的固有特性,标签和阅读器天线间的距离差不能超过 c/f_c ,这在一定程度上限制了标签和阅读器的部署。尽管如此,该定位算法不仅可以定位目标,还可以检测目标的移动状况,具有一定的环境感知监测能力;可以对目标进行 3-D 定位;结合其他定位算法,如基于 RSS 的场景分析法,可进一步提高定位精确度^[20]。

3 半无源定位

这种定位方法使用的标签是半无源标签。半无源标签是介于无源和有源标签之间的新型标签,内部嵌有电池,但只为标签内部部分电路提供能量,如存储调制电路,同样需要反向散射阅读器的射频信号实现通信。这种半无源电子标签兼具无源和有源标签的部分特性,内置电池与有源标签相同,反向散射同无源标签相同,平时处于休眠状态,进入阅读器的识别范围时,由阅读器的射频询问信号唤醒。目前,在室内定位系统中很少使用这种标签。

尽管半无源标签内嵌有小型电池,但其与阅读器的通信方式与无源标签几乎无异,因而也需要像无源标签那样进行间接定位。Akshay Athalye 等人设计了一种称为“感知标签 Sensatag(sense-a-tag)”的新型标签,用于室内定位^[12]。该标签具有两大主要功能:检测并解码周围无源参考标签的反向散射信号;使用自定义定位协议完成与阅读器的通信^[12],如图 4^[24]所示。由于标签内部嵌有小型电池,因而是一种“半无源标签”,只不过和通用的无源标签有所差异而已。

在定位中,他们采用了 3 种定位方式:关联性定位、形心定位和加权形心定位,各自对应的目标位置 l_1, l_2, l_3 分别由式(7)^[12]确定:

$$\begin{cases} l_1 = \text{pos}(\max_{p_i \in \Omega} (p_i)) \\ l_2 = \sum_i x_i / N \\ l_3 = \sum_i p_i x_i = \sum_i \frac{n_d^i}{n_q} x \end{cases} \quad (7)$$

式中: p_i 为目标周围标签的检测概率; Ω 为目标附近参考标签构成的空间; $\text{pos}(m)$ 表示 m 对应的标签位置; x_i 为参考标签位置; N 为目标附近参考标签数目; n_d^i 为目标 Sensatag 检测到 i 标签的次数, n_q 为阅读器询问次数。

实现该定位方法的关键在于 Sensatag 对于周围标签反向散射信号的检测和解码。Sensatag 检测到的信号不仅仅是周围单个标签的反向散射信号,而是多个反向散射信号与阅读器的连续波询问信号相叠加的混合信号,解调如此信号,对硬件的要求较高。此外,该方法需要首先构建检测概率模型,即获得 p_i ,然而,该概率会随着目标的移动、阅读器与目标的距离、天线方向、阅读器发射信号功率级别及外界环境的变化而变化。一旦目标移动或上述影响因素中的任意一个发生变化,就必须更新 p_i ,这势必会降低定位的实时性和准确性,提高硬件性能要求,增加成本。

基于对 RFID 的定位系统的分类,表 1 列举了每一类中用到的几种典型的定位算法及各定位算法的性能。

4 结论

依据当前 RFID 定位系统中使用的射频标签的不同,将 RFID 定位系统分为无源定位、有源定位和半无源定位系统,并以每一种定位系统所使用的典型定位算法为例,对当前 RFID 定位系统的技术发展状况进行了详细分析。针对不同的应用系统,选择不同的定位标签,所获得的定位精确度是不同的。同时,由于 RFID 系统的工作频率很宽,从低频到微波均可使用,因而,选择合适的系统工作频率,能保证或提高系统精确度。

未来基于 RFID 的室内定位,对系统的可靠性、实用性、精确度及环境的自主感知能力等提出了更高的要求,鉴于单一的定位技术无法满足具体应用的需求,未来各种定位系统和算法的融合,如 RFID 与 WSNs 的融合^[10],将是一大大发展趋势。此外,鉴于人们对于三维位置信息需求的增加及定位系统在空间中实用性的增强,室内 3-D

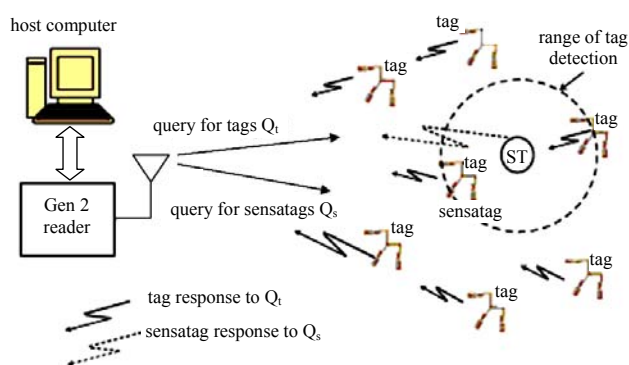


Fig.4 Communication framework between Sensatag and reader

图 4 Sensatag 同阅读器的通信架构

定位也将被广泛研究并获得迅速发展^[25-27]。未来的室内定位系统,还将能够更好地定位移动目标,对周围事物具有自主感知和处理能力,以更好地适应外界环境,满足某些特殊应用的需求。

表 1 基于 RFID 的室内定位算法分类表
Table1 Classification of RFID-based indoor localization algorithms

type	system	tag type	technology	accuracy	devices & space	dimension
passive localization	SAW-ID ^[14]	passive	TOA distance measurement +intersection point of eclipses	within 20 cm	one SAW tag +three readers; 2 m×2 m	2-D
	Cesare Alippi etc. ^[15]	passive	Bayes maximum a posteriori probability	0.68 m	ten UHF tags +four readers; 4 m×5 m	2-D
	ZHANG Yi-min etc. ^[16]	passive	DOA triangulation	root square error of the individual measurements 1.05° Least-Square fitting 0.23°	one tag +two couples of antenna array; 2 m×1 m	2-D
	YANG Po etc. ^[17]	passive	sparse distribution algorithm+Han ^[17]	RE: grid type-within 12 cm; V type-within 5 cm; Z type-within 6 cm. RMSE: grid type-within 11 cm; V type- within 4 cm; Z type-within 4 cm.	some tags +one reader; 0.9 m×0.6 m	2-D
active localization	SpotON ^[21]	active	Ad-hoc localization	3 m (achieved) 1 m (not achieved)	at least three tags	3-D
	LANDMARC ^[22]	active	K neighbor tags	1 m-2 m	sixteen conference tags+one localization tag +four readers; 4 m×9 m	2-D
	COCKTAIL ^[10]	active	mixture of WSNs and RSSI	SA-LANDMARC: 0.7 m SA-SVR: 0.45 m	forty-nine tags +nine sensors +four readers; 6 m×6 m	2-D
	Cory H-w ^[20]	active	distance measurement of phase difference	...	two antenna arrays; 3 m×6 m×3.5 m	3-D
semi-passive localization	Sensatag ^[12]	semi-passive	association + centroid of the positions+ weighted centroid of the positions	14 cm (transmitting power 28 dB)	twelve tags +one Sensatag+ one reader; 1.6 m×1.3 m	2-D

参考文献:

- [1] JIN Guang-yao, LU Xiao-yi, Park Myong-Soon. An Indoor Localization Mechanism Using Active RFID Tag[C]// Proc. of the 2006 IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing. Taichung:[s.n.], 2006:5-7.
- [2] Want R, Hopper A, Falcao V, et al. The active badge location system[J]. ACM Transactions on Information Systems, 1992, 10(1):91-102.
- [3] Bahl P, Padmanabhan VN. RADAR: An in-building RF-based user location[C]// Proceedings of IEEE INFOCOM 2000. Tel-Aviv:[s.n.], 2000:775-784.
- [4] Bahl Paramvir, Padmanabhan Venkata N. Enhancements to the RADAR User Location and Tracking System[R]. Technical Report, MSR-TR-2000-12, 2000.
- [5] Priyantha N B, Chakraborty A, Balakrishnan H. The Cricket location-support system[C]// Proceedings of MOBICOM 2000. Boston, MA:[s.n.], 2000:32-43.
- [6] Harter A, Hopper A, Steggles P, et al. The anatomy of a context-aware application[J]. Journal of Wireless Networks, 2001, 8(2-3):187-197.
- [7] Yamano K, Tanaka K, Hirayama M, et al. Self-localization of Mobile Robots with RFID system by using Support Vector Machine[C]// Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and System. 2004:3756-3761.
- [8] Sanpechuda T, Kovavisaruch L. A review of RFID Localization: Applications and Techniques[C]// Proceedings of ECTI-CON. Krabi:[s.n.], 2008:769-772.
- [9] Bouet M, dos Santos A L. RFID Tags: Positioning Principles and Localization Techniques[C]// Wireless Days 2008. Dubai: [s.n.], 2008:1-5.
- [10] ZHANG Dian, YANG Yan-yan, CHENG Da-chao, et al. COCKTAIL: An RF-based Hybrid Approach for Indoor Localization[C]// 2010 IEEE International Conference on Communications. Cape Town:[s.n.], 2010:1-5.
- [11] Hekimian-Williams C, Grant B, LIU Xiu-wen, et al. Accurate Localization of RFID Tags Using Phase Difference[C]// 2010 IEEE International on RFID. Orlando, FL:[s.n.], 2010:89-96.
- [12] Athalye A, Savic V, Bolic M, et al. A Radio frequency identification system for accurate indoor localization[C]// 2011 IEEE International Conference on ICASSP. Prague:[s.n.], 2011:1777-1780.

- [13] 周晓光,王晓华. 射频识别(RFID)技术原理与应用实例[M]. 北京:人民邮电出版社, 2006. (ZHOU Xiao-guang,WANG Xiao-hua. RFID Technical Principles and Application Examples[M]. Beijing:Posts & Telecom Press, 2006.
- [14] Bechteler T F,Yenigün H. 2-D Localization and Identification Based on SAW ID-Tags at 2.5 GHz[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003,51(5):1584–1590.
- [15] Alippi C,Cogliati D, Vanini G. A statistical approach to localize passive RFIDs[C]// Proc. of 2006 IEEE international Symposium on Circuit and System. Island of Kos:[s.n.], 2006:843–846.
- [16] ZHANG Yi-min,Amin MG,Kaushik S. Localization and Tracking of Passive RFID Tags Based on Direction Estimation[J]. International Journal of Antennas and Propagation, doi:10.1155/2007/17426.
- [17] YANG Po,WU Wen-yan,Moniri M,et al. Efficient Object Localization Using Sparsely Distributed Passive RFID Tags[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2013,60(12):5914–5924.
- [18] Han S S,Lim H S,Lee J M. A Efficient Localization Scheme for a Different-Driving mobile robot based on RFID system[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2007,54(6):3362–3370.
- [19] JIANG Xue-jing,LIU Ye,WANG Xiao-lei. An Enhanced Approach of Indoor Localization Sensing Using Active RFID[C]// IEEE WASE International Conference on Information Engineering. Taiyuan,Shanxi:[s.n.], 2009:169–172.
- [20] Hekimian-Williams C,Grant B,LIU Xiu-wen,et al. Accurate Localization of RFID Tags Using Phase Difference[C]// 2010 IEEE International Conference on RFID. Orlando,FL:[s.n.], 2010:89–96.
- [21] Jeffrey Hightower,Gaetano Borriello,Roy Want. SpotON:An Indoor 3D Localization Sensing Technology Based on RF Signal Strength[R]. Technical Report UW-CSE. Seattle WA: University of Washington, 2000.
- [22] NI Lionel M,LIU Yun-hao,Lau Yiu Cho,et al. LANDMARC:Indoor Localization Sensing Using Active RFID[J]. Wireless Networks, 2004:701–710.
- [23] ZHAO Yi-yang,LIU Yun-hao,Ni Lionel M. VIRE:Active RFID-based Localization Using Virtual Reference Elimination[C]// IEEE International Conference on Parallel Processing(ICPP 2007). Xi'an,China:[s.n.], 2007:56.
- [24] Athalye A,Savic V,Bolic M,et al. Novel Semi-Passive RFID System for Indoor Localization[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(2):528–537.
- [25] Manesilp J,WANG Chong,WU Hong-yi,et al. RFID Support for Accurate 3-D Localization[J]. IEEE Transactions on Computers, 2013,62(7):1447–1459.
- [26] Tlili F,Hamdi N,Belghith A. Accurate 3-D Localization Scheme Based on Active RFID Tags for Indoor Environment[C]// 2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications. Nice:[s.n.], 2012:378–382.
- [27] HAN Jin-song,ZHAO Yi-yang,CHENG Yan-shun,et al. Improving Accuracy for 3-D RFID Localization[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, doi:10.1155/2012/865184.

作者简介:



刘 鹏(1987–),男,安徽省宿州市人,在读硕士研究生,研究方向为数字系统与通信、智能控制、物联网.email:lperichfut@126.com.

卢潭城(1989–),男,广东省陆丰市人,在读硕士研究生,研究方向为智能控制、物联网.

高 翔(1989–),男,上海市人,在读硕士研究生,研究方向为数字系统与通信、物联网.