



物联网定位与位置感知研究

肖竹^{①②*}, 王东^①, 李仁发^①, 易克初^②

① 湖南大学信息科学与工程学院, 长沙 410082

② 西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 西安 710071

* 通信作者. E-mail: zhuxiao@hnu.edu.cn

收稿日期: 2013-04-10; 接受日期: 2013-09-06

国家高技术研究发展计划 (批准号: 2012AA01A301-01)、国家自然科学基金面上项目 (批准号: 61301148, 61272061)、教育部博士点基金 (批准号: 20120161120019)、综合业务网理论与关键技术国家重点实验室开放课题 (批准号: ISN12-05)、湖南省高校创新平台开放基金 (批准号: 11K017) 和湖南大学“青年教师成长计划”资助项目

摘要 物联网是近年来广受关注的新兴研究领域, 被认为是信息网络在现实世界的延伸, 是我国国民经济的重要增长点, 将在未来科技创新和社会进步中扮演关键角色. 物联网系统中, “物”节点位置是反映网络状态的重要信息之一. 同时, “物”节点采集信息以及相应的信息交互过程都与节点位置信息密切相关. 本文主要讨论物联网中定位与位置感知研究中的若干关键问题. 探讨了物联网节点定位理论与方法, 包括基于测距和非测距定位、物联网协作式定位、多传感器位置感知等议题, 结合物联网中不同网络层次、应用场景和定位需求对节点位置感知技术进行归纳和总结. 最后指出了仍存在的问题和值得进一步探讨的方向.

关键词 物联网 位置感知 位置测量 测距定位 非测距定位 协作 无线传感网 数据融合

1 引言

物联网 (Internet of Things, IOT) 是信息行业发展到 21 世纪的新兴领域^[1], 有望引领信息产业发展的第三次浪潮. 近年来物联网的研究及其相关技术正处在持续的蓬勃发展之中^[2]. 世界各国均把物联网的研究与应用提到了国家级的战略高度, 我国的“十二五规划”已经把物联网产业作为战略性新兴产业^[3].

对物联网直观的理解是将“things”利用网络相互联系起来. 2010 年, 我国政府工作报告所附的注释中对物联网进行了说明: 物联网是通过传感设备按照约定的协议, 把各种网络连接起来, 进行信息交换和通信, 以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络. 从中可看出, “物”的位置信息将在物联网发展和应用中占据重要地位.

邬贺铨院士归纳了物联网发展的支撑技术^[4], 其中关于“全球识别方案、管理和寻址技术”、以及“设备发现、分布存储、定位、实际与虚拟实体的映射的发现与搜索技术”, 这涵盖了对获取物联网节点位置信息的技术需求. 事实上, 物联网应用时节点采集的信息和节点本身位置信息是密切相关的, 只有明确物节点自身位置, 才能进一步获得“在什么位置或区域发生了特定事件”. 因此, 物联网定位与节点位置感知将是物联网科学发展和应用的主要课题之一.

引用格式: 肖竹, 王东, 李仁发, 等. 物联网定位与位置感知研究. 中国科学: 信息科学, 2013, 43: 1265–1287, doi: 10.1360/112013-135

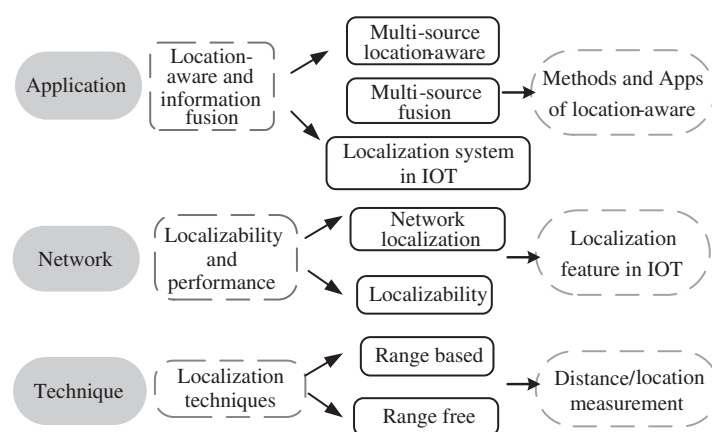


图 1 物联网定位与位置感知

Figure 1 Localization and nodes location-aware in IoT

本文根据物联网研究与应用蓬勃发展的大趋势, 针对物联网中定位与位置感知技术及相关研究进行综述. 借鉴物联网的层次特点, 将定位与位置感知从三个层面上理解, 如图 1 所示: 技术层面通过设计合适的定位技术来获得基本的距离或定位测量信息, 一般地, 定位技术可分为测距定位和非测距定位; 其次, 物联网中的物节点定位都是在具备某种形式和特征的网络中完成的, 其中分布式和协作等特性都可用于完成定位; 在应用层面, 位置感知是以定位技术为基础、针对位置和定位应用的方法研究与实践.

图 1 也列出了当前物联网定位和位置感知研究的主要相关议题, 后续章节将从物联网的异构性和移动性出发, 讨论位置感知和定位的特点, 介绍用于物联网无线定位的信号体制. 然后详细论述了位置感知的两类方法: 测距定位和非测距定位. 探讨了物联网的网络定位能力和可定位性, 进而结合研究与应用现状, 讨论了多源定位和信息融合的位置感知方法. 最后, 归纳了物联网定位值得进一步研究的议题, 并对技术难点和应用实现进行了展望.

2 物联网位置感知与无线定位

2.1 网络异构性和移动性

物联网建设是一个多学科、多领域交叉的泛在复杂系统, 其基本特征之一是异构互联和网络融合^[2]. 文献 [5] 认为物联网应当支持异构性和移动性, 文献 [6] 通过对当前物联网现状的分析, 认为未来物联网的异构和移动特性将更加显著, 将有更多移动通信和无线通信网相关技术参与进来.

物联网是利用各种感知技术, 通过“物”节点对所获信息进行处理和应用, 然后完成对客观世界的理解. 不论“物”的何种特性或采集何种信息, 与之相伴出现的位置信息至关重要, 因为我们关心“物”在“何时”、“何地”发生了什么. 同时, 物联网具有移动性, 即“物”节点位置在很多应用场合下是不断变化的. 因此, 物联网中定位与位置感知也可归结为移动性、异构性以及泛在性. 这意味着定位与位置感知将伴随着物联网应用深入到各种不同层次的应用场景, 渗透到各个行业, 遍布人们生活的各个方面.

图 2 简单描绘当前社会的普遍经济模式“原料—生产—消费”, 以此为例结合物联网应用说明

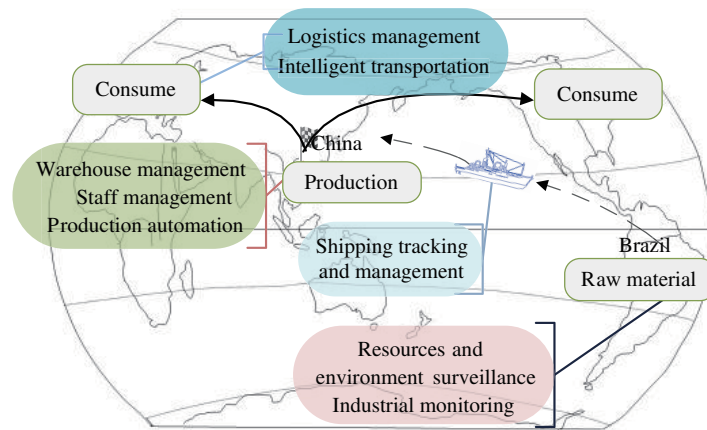


图 2 定位与位置感知示例

Figure 2 Illustration of localization and location-awareness

定位和位置感知的必要性. 在巴西开采原材料 (如橡胶), 在开采过程中的不同环节都可以看到物联网定位应用, 如布置传感节点进行不同区域的森林资源监控、工业监控和环境感知与保护等. 将原材料加工为产品 (如牙刷), 同样也包含定位应用, 如仓储管理和生产者管理等, 且定位应用一直延伸到整个消费过程. 实际上, 空间位置信息获取一直都是信息科学领域的前沿课题之一, 物联网应用时要求每一件物体均可寻址, 每一件物体均可通信, 每一件物体均可控制. 因此, 对物联网的定位与位置感知环节是必不可少的.

2.2 物联网定位的无线信号体制

当前的无线通信技术, 从大范围的卫星通信、到城域网范围的移动通信、以及短距离通信, 都可以作为物联网的传输手段^[7]. 这些技术也可作为定位应用时的信号体制, 有的专用于定位, 有的则兼具节点通信和定位双重功能.

表 1 给出了物联网定位应用时的多种无线定位信号体制, 并对比了各自特点. 首先从定位范围来看, 以 GPS 为代表的卫星定位系统覆盖最广^[8], 利用移动蜂窝基站定位 (cellular based localization) 提供的位置服务则次之, 蓝牙 (Bluetooth) 和 RFID 范围最小. 实际中可根据定位场景的需求选择相应技术, 如 GPS 适用于车联网定位, 蜂窝定位支持 3G 移动应用. GPS 支持节点移动性, 其定位优势表现在室外, 室内环境信号衰减严重, 且容易受到其他无线通信系统干扰. 蜂窝网定位是基于蜂窝移动通信技术开发的, 同样是干扰受限系统. WiFi 和 UWB (ultra wide band) 等技术定位范围相对较小, 常用于完成局部范围内的相对定位. WiFi, ZigBee 和 Bluetooth 都工作 (或部分工作) 在 ISM 开放频段, 因此共存能力不强而易受干扰. UWB 信号由于占据带宽很大, 可达 GHz, 功率谱密度很低, 其共存性能最好^[9]. 灵活性和系统成本是相对应的, GPS 和蜂窝基站定位运行成本较高, 但覆盖范围大, 可以弥补灵活性的不足. WiFi, UWB 和 ZigBee 等都支持移动性且灵活性高.

UWB 技术可获得的理论定位精度最高, GPS 尽管定位精度不高 (不考虑差分修正等), 但相对定位精度 (RA) 最好. ZigBee 具有高效且低成本的组网能力, 因此适用于网络定位和监控等^[10]. CSS (chirp-spread-spectrum) 属于线性调频技术, 常被用于机器人跟踪与定位^[11], ZigBee 和 CSS 在精度和相对精度间能获得较好平衡. RFID 实现成本低, 用于人员的识别定位并不侧重位置精度, 若结合信号

表 1 用于位置感知的物理层技术特点对比^{a)}

Table 1 Comparison of physical technologies in location-aware application

	GPS ^[8]	Cellular	WiFi	UWB ^[9]	CSS ^[11]	Zig-Bee ^[10]	Bluetooth	RFID ^[12]
Coverage	***	***	**	**	**	**	*	*
Reliability	**	***	***	***	***	**	**	**
Coexistence	*	**	**	***	***	**	**	**
Mobility	***	***	**	**	**	**	**	*
Flexibility	***	***	***	***	***	***	**	**
Cost	*	**	***	**	**	***	**	***
Response	*	***	**	***	***	***	**	***
Accuracy	< 50 m	20 m	10 m	< 0.3 m	< 1 m	1~3 m	>3 m	—
RA ^{b)}	***	*	**	***	***	**	*	—
EC ^{c)}	*	*	**	**	**	***	***	***
Application	VANET	3G mobile service	Smart City	Industrial automation	Robot tracking	Ecology control	Smart appliances	Staff management

a) *: evaluates each metric of the physical technologies; b) RA: relative accuracy; c) EC: energy consumption

强度检测等方法和充分部署参考节点, 也能获得较好的定位性能, 现有应用系统如 Landmarc^[12]. GPS 接收机成本较高, 响应速度较慢. 我国的北斗系统已明显提升了定位响应速度, GPS 首次定位需要约 1 分钟, 北斗系统约 1~3 s. 在能量消耗 (EC) 方面, 大范围的定位技术如 GPS 较高, 短距离如 ZigBee 和 RFID 等, 则功耗很低.

表 1 也给出了这些无线技术在物联网定位中具有代表性的应用场景, 这也体现出物联网有着广泛的定位需求. 后续两节内容将结合物理层无线技术的定位特性, 主要探讨测距定位和非测距定位这两种定位和位置感知的基本方法, 并论述在不同物联网定位场景下的研究与应用.

3 基于测距定位的位置感知

以测距 (range base) 为基础的无线定位可广泛用于物联网节点位置感知^[13,14], 特别适用于需要获知空间实际距离或方位的物联网定位应用. 测距定位的特点是利用物理层无线信号 (如表 1 所示), 根据定位几何关系获得定位测量, 进而解算位置 (坐标) 信息. 测距定位方法主要通过三种方式: 信号时延估计、利用接收信号强度 (received signal strength, RSS) 和信号方位信息来完成.

图 3 给出了测距定位方法的示意图, 其中 A, B, C 表示锚节点也是定位源, X 表示未知节点. 其中无线信号时延估计可分为: 基于到达时间/差/和 (time/time difference/time sum of arrival, TOA/TDOA/TDOA) 估计. 二维定位时, 这些定位方法位置轨迹分别为圆、双曲线和椭圆. 定位 RSS 利用定位双方所处环境的无线信号传播模型, 方位信息通过到达角度 (angle of arrival, AOA), 可利用如天线方向阵列实现.

3.1 到达时间估计

3.1.1 时延估计方法

TOA 等方法都是以定位信号到达时延估计为基础的. 一般的, 实际定位应用环境多表现为多径传

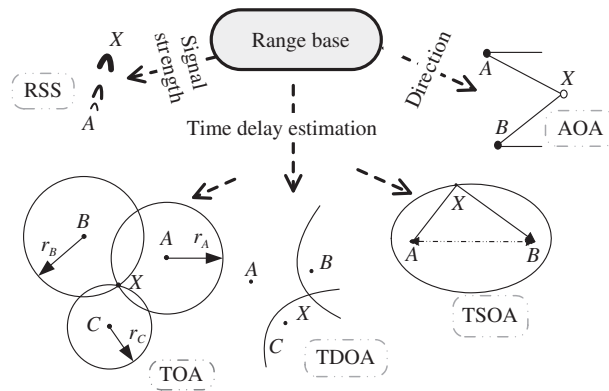


图 3 基于测距定位的位置感知方法

Figure 3 Range based methods of location-awareness

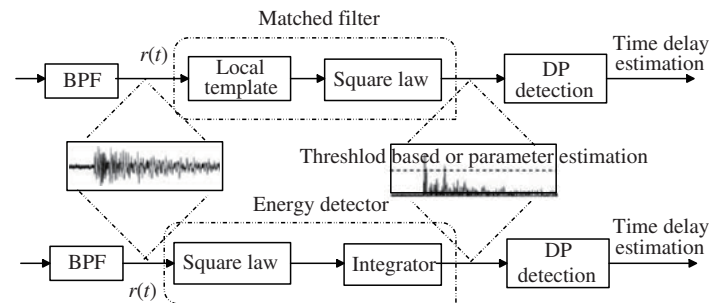


图 4 测距定位: 时延估计方法

Figure 4 Range based localization: time-delay estimation

播, 时延估计一般针对多径信号中的直射路径 (direct path, DP) 检测来完成. 以超宽带信号为例, 对接收信号 $r(t)$ 的处理分为两种形式^[15]: 使用本地模版信号匹配滤波 (matched filter, MF) 的相干检测和基于能量检测 (energy detect, ED) 的非相干检测方法, 或者是结合这两种方式的两步估计算法. 图 4 给出了时延估计方法的示意图, BPF 表示理想带通滤波, 相干形式的匹配滤波 (MF) 包括本地模板信号与平方率器件, 非相干的能量检测 (ED) 过程由平方率器件和积分单元组成. 这两种方式体现了实现复杂度和估计精度的折中.

对于密集多径和非视距 (non-line-of sight, NLOS) 情形, 在数目非常大的多径分量中检测 DP 复杂度较高, 准确性也不易保证, 此时阈值搜索、或参数估计如最大似然 (maximum likelihood, ML) 也可用于 DP 检测进而完成时延估计^[16]. 文献 [17] 探讨了信道噪声、多径效应、频选衰落和波形失真等因素的影响, 分析了阈值搜索在相干/非相干时延估计中的特点, 并指出在较好的信噪比条件下, 阈值搜索能获得与最大似然 (ML) 相近的性能.

3.1.2 时延估计的理论性能界

时延估计方法存在理论性能界, 对性能界的探讨有助于测距定位算法和精度的评估, 本小节将介绍两种主要的性能界: Cramér-Rao 下界 (Cramér-Rao lower bound, CRLB) 和 Ziv-Zakai 下界 (Ziv-Zakai lower bound, ZZLB).

对于 CRLB 的推导, 是将 TOA 视为多径信号中直射路径 (DP) 时延 $\{\tau\}$ 的估计, 其方差 σ_τ^2 应不小于 Fisher 信息阵的逆阵^[18]: $\text{var}(\tau) = \sigma_\tau^2 \geq F^{-1}$, 根据文献 [19,20] 的推导, 若 T 表示传输时间, $\text{PSD}_M(f)$ 表示定位信号功率谱密度, N_0 表示噪声功率, 收发两端距离为 d , $H(f)$ 表示信道特性, 则 CRLB 可写为

$$\sigma_\tau^2 = \frac{N_0}{8\pi^2 T \int f^2 |H(f)|^2 \text{PSD}_M(f) df}. \quad (1)$$

ZZLB 是另一种形式的时延估计性能下界^[21], 其表示形式可以从均方误差估计中推得

$$E\{\delta^2\} = \frac{1}{2} \int_0^\infty z \mathbb{P}\{|\delta| \geq z/2\} dz. \quad (2)$$

上式中 $E\{\delta^2\}$ 是关于所接收定位信号 $\{r(t), \tau\}$ 的期望, 寻求 $\mathbb{P}\{|\delta| \geq z/2\}$ 的下界即为 ZZLB^[22]. 通过将此问题转化为求解采用发射波形 $s(t|\tau)$ 和 $s(t|\tau+z)$ 的二元通信系统最小错误概率问题, 假定时延估计 τ 随机分布于 $(0, T_a]$, $P_{\min}(\tau, \tau+z)$ 不依赖于时延 τ , ZZLB 一般形式可表示如下:

$$\text{ZZLB} = \frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} z (T_a - z) P_{\min}(z) dz. \quad (3)$$

对于 AWGN 条件下的单径情形 (single path), $P_{\min}(z)$ 可表示为

$$P_{\min}(z) = Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0} (1 - \rho_g(z))}\right), \quad (4)$$

其中 $\rho_g(\cdot)$ 表示接收信号波形 $g_{\text{RX}}(t)$ 的自相关函数 $\rho_g(\tau) = \frac{1}{E_s} \int_{-\infty}^\infty g_{\text{RX}}(t) g_{\text{RX}}(t - \tau) dt$. 脉冲波形、信道噪声、干扰和多径幅度增益等都将影响信号所占带宽和信噪比.

一般地, 利用时延估计方法定位时, 若接收端能够获得较高的信噪比, 则 CRLB 给出一个“紧”的性能界, 此时利用最大似然 (ML) 的时延估计算法在高 SNR 时能逼近 CRLB. 而对于中等和低信噪比情形, CRLB 较为松散, ML 或其他估计算法都难以达到这个性能界. 因此, ZZLB 能在较宽的 SNR 范围内提供“紧”的下界^[23], 因此实际定位时更适合作为时延估计的性能界. 而相比于 CRLB, ZZLB 难以给出显式表达, 不适合作为性能界的理论分析与推导.

3.2 接收信号强度 (RSS)

根据路径损耗模型, 定位节点之间距离可以通过接收端信号强度 (RSS), 利用理论和经验模型将传输损耗转化为距离测量. 理想情况下, 可以通过在足够长时间内计算接收信号强度的平均值来消除多径和阴影衰落造成的影响, 路损模型可表示为

$$\bar{P}(d) = P_0 - 10n_p \log_{10}(d/d_0), \quad (5)$$

式中, n_p 为路损指数, $\bar{P}(d)$ 表示距离发射源为 d 时的平均接收功率, P_0 是距离发射信号较近的 d_0 处接收信号的平均功率.

文献 [24] 将对数尺度下的阴影衰落视为均值为零、方差为 σ_{sh} 的高斯随机过程, 则接收信号功率可表示为 $P(d) \sim N(\bar{P}(d), \sigma_{\text{sh}})$. 经推导 RSS 方法距离估计值满足

$$\sqrt{\text{var}(\hat{d})} \geq \frac{\ln 10}{10} \frac{\sigma_{\text{sh}}}{n_p} d. \quad (6)$$

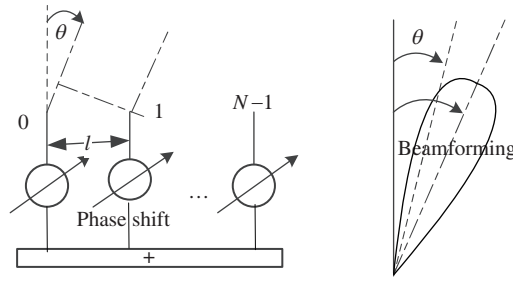


图 5 基于方向估计的测距定位

Figure 5 Range based localization via direction estimation

以 IEEE 802.15.4a 信道标准中 CM1 和 CM2 为例^[25], CM1 中参数分别为 $n_p=1.79$, $\sigma_{sh}=2.22$, 则在定位距离为 10 m 的时候其距离估计的偏差为 2.86 m. CM2 中参数取 $n_p=4.58$, $\sigma_{sh}=3.51$, 10 m 时其距离估计的偏差为 1.76 m. 该实验结果仅针对静态信道仿真, 信道环境不同信号传播特性以及衰落特性也相应变化^[26], 因此定位应用时 RSS 的准确性将受到所处环境的影响较大.

3.3 方位估计

方位信息可以通过到达角度估计 (AOA) 获得, 在这类定位方法中, 接收节点通过天线阵列来感知发射节点信号的到达方向 (来波方向), 计算收发节点间的相对方位或者角度, 再通过三角测量法计算出节点的位置. 对于 2D 定位, 只需得到节点间的直线角度即可. 图 5 给出了利用方向天线阵和波束成形进行 AOA 的示意图.

以方向天线阵方式为例, 假设 t 时刻定位信号 $s(t)$ 以 θ 入射至均匀线性阵列天线, 到达每个阵元的方向都可视为是平行的, 测量不同阵元的信号到达相位差就可以得到 AOA 估计^[27]. N, l 表示阵元个数和阵元间距, 阵列信号模型可表示为

$$y = A(\theta)s(t) + n(t), \quad (7)$$

$A(\theta)$ 为 $N \times 1$ 的方向向量, 表示各阵元接收到入射信号的相对相位延迟, 其中元素可表示为

$$a_i(\theta) = \exp \left[j \frac{\omega l}{c} \left(i - \frac{N-1}{2} \cos \theta \right) \right], i = 0, 1, \dots, N-1, \quad (8)$$

ω 表示 $s(t)$ 的中心频率, c 为电磁波传播速率. 式中噪声项 $n(t)$ 也是 $N \times 1$ 的, 各元素是相互独立的复高斯过程, 噪声方差为 σ^2 , AOA 方法的 CRLB 可表示为^[28]

$$\text{CRLB}_{\text{AOA}} = \left[\frac{A^2}{\sigma^2} \left(\frac{\omega l}{c} \right)^2 (\sin \theta)^2 \frac{N(N^2-1)}{12} \right]^{-1}. \quad (9)$$

3.4 测距定位方法比较

3.4.1 特性对比

就精度而言, 时延估计 TOA/TDOA 较高, 因为可以利用到无线信号较高的时间分辨率, 如 GPS, UWB 信号. TOA 要求定位双方节点时间同步, 对于低成本需求的传感节点, 无法配制精确同步时钟;

TDOA 仅要求定位源节点同步, 源端同步相对较容易实现, 因此相比 TOA 实际应用更广泛. RSS 和 AOA 定位应用时无同步要求, 但 AOA 需要配置方向天线或天线阵, 同样增大了物节点的硬件成本. 相比之下, RSS 实现成本最低, 精度也较低, 当前缺乏统一的无线信号传播模型, 所以定位性能对传播环境极为敏感. 因此文献 [29,30] 联合使用这些方法搭建混合定位系统, 这也是物联网采用测距定位方法进行位置感知的常规思路, 如文献 [31] 综合运用上述测距定位方法, 设计了物联网机器人位置感知的混合定位方案.

无线定位性能与精度易受到多径传播和 NLOS 的制约, 如何克服这两方面因素、特别是 NLOS 的影响是定位研究的难点问题 [32~36], 文献 [37] 综述了 NLOS 定位算法的研究进展, NLOS 定位也将是物联网位置感知研究中的重要议题.

3.4.2 测距定位方法应用

TOA/TDOA 和 AOA 方法适用于固定的物联网场景, 如果所需定位的节点移动性较强, 也可灵活布置定位源来完成 2D 或 3D 节点位置感知. RSS 在定位应用场景变化时性能不稳定, 偏差较大. 若能针对相对固定的物联网应用场景, 如厂区内提前布置大量 RSS 源节点, 则可完成对人员的定位和监控. 无线网络定位时常使用的 Fingerprint 匹配算法 [38,39], 就是以 RSS 作为匹配特征的, 需要根据环境传播特性进行训练, 建立 RSS 数据库, 并能够及时修正和更新, 这种定位方式常被运用于 WiFi 和 RFID 等技术中 [40~42].

文献 [43] 给出了一种物联网定位模型, 考虑到传感节点能量和存储量的限制, 不能完全剔除错误 RSS 数据, 因此设计容错算法来去除 RSS 中错误数据对定位性能的影响. 文献 [44] 针对物联网定位应用, 搭建室内场景跟踪和监控系统, 基于 RSS 来完成 WSN 和 RFID 定位, 实测实验表明该方案能增强室内定位性能, 且能适用于密集多径的传播环境.

总之, 物联网位置感知方法中, 测距定位方法的应用是以获得实际距离或方位为基础的. 同时注意到, 在物联网节点数目较大的应用场景, 无需获得实际距离测量的非测距 (range free) 定位方法有广泛的应用空间.

4 基于非测距定位的位置感知

在某些物联网应用中, 如资源环境监控、物节点间具备通信功能, 但由于客观条件的限制, 而无法承担额外的定位模块来实现测距定位、比如不能在节点中配备成本较高的 GPS 接收机. 对此类情形, 非测距定位被视为有效的解决方案. 与 range base 不同, 非测距定位不直接进行距离 (或方位) 测量, 而是通过估计节点间的欧式距离或确定包含未知节点的可能区域, 进而确定未知节点的位置.

4.1 经典的非测距定位方法

DV-Hop (distance vector-hop) 是典型的非测距定位方法 [45], 其基本原理如图 6 所示. 图中 (20, 30, 50) 表示锚节点 A , B 和 C 两两之间的 Hop 距离, 对应的平均每跳实际距离 (P_A , P_B , P_C) 为 (8.75, 8.33, 10), 如 $P_A = (20+50)/(3+5) = 8.75$. 选择未知节点 X 到锚节点跳数最小的点, 作为 X 的平均每跳距离, 即 P_B . 利用该距离根据跳数得出与 A , B 和 C 的距离分别为 (16.66, 8.33, 24.99), 最后根据锚节点位置通过三边测量得到 X 的位置.

定位原理类似的非测距定位方法还包括基于节点邻近关系的方法 [46~49], 如多维定标法 (将临近

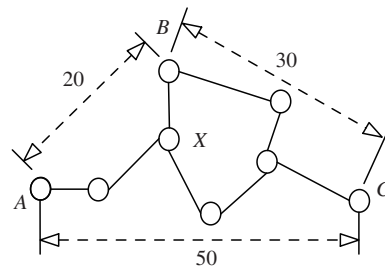


图 6 非测距定位: DV-Hop

Figure 6 Range free localization: DV-Hop

关系映射成距离关系), 质心定位和 APIT 方法等. 文献 [50] 论述了这些方法的各自特点和改进方案.

4.2 非测距定位的距离度量与连接性

以 DV-Hop 等为代表的非测距定位方法是采用 Hop 距离来代替实际距离, 非测距定位原理较为简单, 能体现低成本和低功耗特性, 但定位精度不高, 该类方法的主要研究集中在距离度量方法和网络连接特性.

4.2.1 节点距离度量

无论从节点之间跳数还是邻近关系, 非测距方法都基于同质网络 (isotropic networks), 即节点分布较为均匀, 节点实际距离和 Hop 数目成正比或近似正比关系, DV-Hop 方法能获得较好的定位效果. 但正如本文开篇时提到的, 物联网的异构特性, 将面临很多非同质网络 (anisotropic networks) 的情形, 节点数增多使得 Hop 数目增大, 导致误差累积, 并产生多跳模糊度, 影响节点的多跳统计特性, 会极大的降低非测距方法的定位性能.

4.2.2 连接性

连接性 (connectivity) 是考察非测距方法的另一角度. 例如对于简易的质心定位, 未知节点的位置由其通信范围内的锚节点几何质心确定. 以图 6 为例, 不需要计算跳数和距离, 锚节点 A, B 和 C 的质心即视为 X 的位置.

连接性较好的网络会由于节点间功率不均衡、或其他无线系统的干扰、或恶意攻击导致连接性改变, 形成连接空洞 (holes), 路由选择时需绕过空洞, 这将增加跳数和相应距离, 并影响节点间定位的几何关系.

总体而言, 实际中物联网常呈现出非同质特性, 因此非测距定位时节点距离度量方法的设计都是针对非同质网络. 对于网络连接性, 则从考虑影响网络连通特性的因素来进行研究. 表 2 中归纳了近年来节点距离度量和连接性研究的一些代表性成果.

4.3 测距与非测距定位方法对比

通过结合物联网定位的应用特点, 表 3 从定位特点和复杂度等方面归纳了测距和非测距定位方法. 从以下方面对两种方法特性和应用做进一步论述.

1) 定位目的.

测距定位以距离 (或方位) 测量为目的, 通常希望获得未知节点的. 非测距定位不做实际距离测

表 2 非测距定位中节点距离度量和连接性研究

Table 2 Studies of node distance measurement and connectivity in range free localization

	References	The proposed methods and ideas
Node distance measurement	Wu, et al, 2010 ^[51]	A relative loose distance measurement, Regulated Neighborhood Distance, RND) was proposed to replace the Euclidean distance. The designed method was to cope with the Ambiguity issue and the idea was based on the principle of dividing the anisotropic network into a set of isotropic networks.
	Xiao, et al, 2010 ^[52]	Various causes were studied, which can lead to anisotropic network, such as the blocking of obstacle, the sparsity of node distribution. The entire localization network was separated to a set of isotropic networks and anisotropic networks. The localization robust was investigated.
	He, et al, 2011 ^[53]	By considering the received signal strength and connectivity, a Regulated Signature Distance (RSD) was proposed and its feasibility in large-scale network was proved.
Connectivity	Li, et al, 2010 ^[54]	Through the study of geometrical characteristic of 'holes' and to find the least path of nodes, a Path compensation protocol based range-free localization method was proposed, which is suitable for the anisotropic networks with fixed number of anchor nodes.
	MacLean, et al, 2008 ^[55]	By assuming the round coverage of the node communication range, the local area connectivity was investigated and the localization performance bound was studied.
	Chan, et al, 2011 ^[56]	The log-normal shadowing was taken into consideration in wireless environment, an analytical expression of the localization performance bound of range-free method was presented, which can be used as a benchmark of the performance in specific node connectivity.

表 3 测距和非测距定位

Table 3 Range based and range free localization

	Range based localization	Range free localization
Accuracy	High, need localization measurement	Low, no need for localization measurement
Error source	Multipath, NLOS, timing drift	Node distribution, connectivity
Complexity	High, need additional positioning devices	Low
Application	High requirement of node	Node with mass deploy scenario

量, 精度较低, 部分方法并不试图获得准确的未知节点坐标值, 而仅关心节点所处大致区域. 这也使得两种方法有不同的应用场景, 如测距定位适合需要解算出未知节点坐标的应用, 非测距定位更关心网络的连通状况, 可应用于网络拓扑管理^[57], 局部区域流量监测等.

2) 复杂度与应用.

测距定位方法精度较高, 无论节点间是否具备通信功能 (如 GPS 接收机仅用于定位), 还需额外的定位硬件设备. 通常定位源和未知节点的配置硬件复杂度不同, 尽管定位过程可由定位源或未知节点发起, 但定位从属关系较固定, 无法互换. 非测距方法要求节点互连, 对定位几乎没有额外的设备要求,

节点间关系平等, 根据需要任何节点都可作为源节点, 这种灵活性适用于具备自组织特性的物联网定位应用, 但也要求能够大量部署“物”节点.

4.4 测距与非测距方法的结合

测距和非测距定位可以结合使用. 非测距方法关键是节点间跳数是否和距离成比例, 这一点在非同质网络难以成立, 使得节点跳数不能反映节点间距离关系. 利用物联网节点连接性只能部分缓解多跳模糊问题.

注意到测距定位方法中, 若从节点成本考虑、不论是未知节点或锚节点, RSS 都是测距定位方法中最低的, 是一种相对简单又可判断节点间距离的方法, 因此将 RSS 运用到非测距定位, 既能提供实际距离判断的根据, 又避免了系统复杂度过高, 是一种理想的折中方案^[53,58,59]. 这种测距与非测距的配合使用是很自然的, 也是当前物联网位置感知研究的重要思路之一.

上文中提到文献 [54] 和 [56] 分别考虑了物联网连接空洞和阴影衰落对节点连接性的影响, 也体现了将 RSS 视为衡量网络连接程度的重要参量. 而对于配置复杂的物联网节点, 时延估计方法, 比如 TOA, 也可用于计算节点间实际距离, 再结合多跳数完成定位. 文献 [60] 展示了节点位置感知在海洋资源监测中的应用, 通过收集节点间的距离, 提出一种垂直交叉算法来确定节点间的相互位置关系, 设计的原型系统表明了测距与非测距方法结合应用的有效性.

4.5 协作式定位

测距/非测距的定位技术本质上都是协作式的, 并不是单节点能够完成的, 体现出协作定位特性. 协作定位 (cooperative localization) 是提升定位性能和可靠性的常用方法.

如文献 [61] 所论述的, 无线网络定位一般是协作式的, 物联网位置感知也是节点相互协作的过程, 这需要定位信息交互, 首先得益于 M2M 在物联网中的广泛应用^[62], 这种通信方式并不直接用于定位, 但信息的交互能给位置感知提供有效信息. 物节点之间可相互定位, 并不要求固定的源节点, 能改善网络连接性. 这也会增加网络时延和同步负担, 文献 [63] 给出一种协同算法来同时完成网络节点同步和测距. 在大规模布置的物联网应用中, 大部分研究都以协作式定位作为基础.

5 物联网定位能力和可定位性

5.1 网络定位能力

物联网定位通常表现出网络化^[64], 物联网结构从感知和传输层面, 可以是“扁平的”自组织网形式, 也可以是“分层”异构^[65], 物联网定位通过不同层次的物节点的广泛参与, 是利用网络特性来完成定位和位置感知过程.

物联网定位能力是指根据网络特性来提高与定位相关的指标, 如网络定位时的覆盖区域, 是否具备一定的定位实时性、能否利用网络结构特性克服对定位的不利因素等. 其中的关键问题可归结为如何挖掘物联网定位时的空时特性. 文献 [66] 提出动态网络中的空一时协作是一种较新的协作观点: 从时间和空间两种尺度来利用网络特性进而完成定位. 时域协作是根据节点移动性模型, 通过状态估计来协助定位. 而空间域是指在每个时隙或定位时间间隔, 利用节点间相对位置关系和拓扑特性来完成

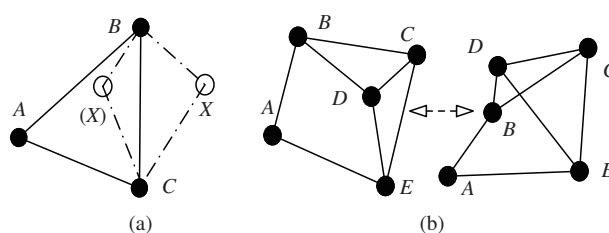


图 7 刚性图的非连续形变

Figure 7 Rigid network with discontinuous deformation. (a) Flex ambiguity; (b) flip ambiguity

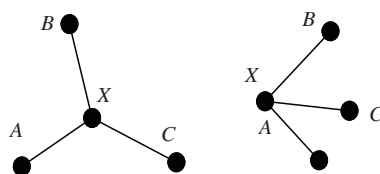


图 8 不同的节点分布的网络定位

Figure 8 Network localization in different node distribution

定位. 空时化定位涵盖了影响网络定位的多种因素, 如拓扑结构、连接特性、无线传播环境、干扰和网络同步偏差等, 因此能从原理上探求网络定位的理论基础和性能 [67].

5.2 可定位性研究

物联网应用中, 网络结构将对可定位性产生影响. 文献 [68] 利用图论和刚性理论对网络的可定位性 (localizability) 进行了细致论述分析. 一般地, 点形的完全刚性是网络可定位的充要条件, 但刚性图可能发生两种非连续形变破坏完全刚性. 如图 7 所示, 图 7 (a) 为翻转模糊, 未知节点 X 有连两个可能位置. 折转模糊则是经过连续形变过程得到, 如图 7(b) 所示, 先去除边 (B, C) , 图形 $\{A, B, D, E\}$ 进行连续形变后, 找到一个位置使得边 (B, C) 长度不变, 再将 (B, C) 加入得到另一种图形. 设置更严格的条件可保证网络图形的刚性 [69], 如未知节点需要维持三个连接 (3-connectivity). 从图论出发, 上述推理的基础是能够获得准确距离或者方位信息、或不存在误差 (error free) 为前提.

文献 [70] 明确提出节点可定位性的概念, 探讨了对节点定位的基本问题: 在特定网络结构下, 有多少物节点是能够被定位的? 是否存在不能被定位的物节点? 通过理论分析和实验, 在稀疏和中等连接程度的物联网定位场景下回应了这两个问题, 其结果可部分作为定位应用时物节点部署的依据.

注意到实际定位应用时距离测量不一定精确, 节点的分布也会影响定位性能, 如图 8 所示, 可以预见在锚节点 A, B 和 C 以左图中分布时的最终定位误差应小于右图. 文献 [71] 利用半正定规划理论探讨了存在误差时的网络定位性能界. 总之, 不论基于测距定位、还是非测距定位方法, 对节点距离误差的研究, 将在物联网定位能力和定位性能研究中占据重要地位.

归纳起来, 现有研究主要从图论和刚性理论以及优化理论出发分析定位性能、消除定位模糊度 (定位唯一性), 从不同角度和考虑不同影响因素探讨可定位性, 表 4 对这方面的相关研究做了进一步归纳.

表 4 定位性能和可定位性的相关研究

Table 4 Studies of localization performance and localizability

	References	Objectives, methods and ideas
Uniqueness and performance of localization	Sugihara, et al, 2011 ^[71]	Considering the localization with error, the weakness of Rigidity Theory was presented. The localization performance bound was studied by using the semidefinite programming approach. An iterative algorithm was designed to resolve the SDP problem under large-scale network.
	Zhu, et al, 2010 ^[69]	The Universal Rigidity (UR), which is stricter than the global rigidity, was investigated. The proposed localization method based on trilateration graph, which satisfies the Universal Rigidity, was able to remove the ambiguity and improve the network localizability.
Condition of localizability	Liu, et al, 2010 ^[42]	The localizability in 2-D space. The generic global rigidity of point formations in the network is the necessary and sufficient condition of network localizability ^[42,68] . Under the case of the non-rigidity discontinuous deformation, the equivalent conditions for global rigidity should contain 3-connectedness, redundant rigidity and at least 3 anchor nodes ^[68] .
	Wan, et al, 2011 ^[68]	
	Steven, et al, 2010 ^[73]	The generic framework of global rigidity was systematically studied. The condition of rigidity was investigated in 3-D space, while the network localizability in high-dimensional space is still an open issue.
Localizability	Liu, et al, 2010 ^[72]	The evaluation and verification of localizability. In order to identify the localizable nodes in the network, a WHEEL method that satisfies the global rigidity and the optimal distributed localization algorithm were proposed. The effectiveness of the proposed methods was proved by prototype testing system.
	Yang, et al, 2012 ^[70]	Node localizability problem in sparse and moderate connected wireless networks. The definition of node localizability was derived. Two required conditions, RR-3P or RR3P, were investigated.

6 物联网多源位置感知和信息融合

物联网本身具有异构多域融合特征, 对于获得物节点的位置信息、以及在此基础上的高层次应用, 多源位置感知和信息融合能充分利用物联网特性完成定位及相关应用.

6.1 多源定位的位置感知

当前的位置感知研究都是基于无线定位的, 这归功于无线网络技术用于通信和定位的双重优势. 物联网应用广泛, 所采用的定位技术多样化, 获得定位信息的途径也趋于异构多源化. 随着物联网中微系统和微传感技术的快速发展^[72,73], 位置感知技术已超出了无线定位的范围. 物联网中物节点并不限于单一化终端, 比如广泛使用的智能手机配备了多种感应设备, 大多都属于成本和能耗较低的微传感器. 表 5 给出了一些常用传感器, 无需借助无线定位技术, 在获知初始位置的前提下, 这些传感器可以完成运动轨迹跟踪, 典型的应用如航位推测法 (dead reckoning, DR).

目前, 无线定位与多传感器结合构成的多源定位是极具潜力的物联网位置感知策略. 值得注意的是, 地理信息 (GIS) 的辅助在很多场景中也是必不可少的^[74], 典型例子如车载导航系统, 若缺乏地图信息而仅靠 GPS 等定位手段是无法工作的.

表 5 无线定位和多传感器的位置感知

Table 5 Location-aware via wireless localization and multi-sensor

Method	Technology	Measurement
Wireless localization	GPS/3G/WLAN	Range measurement
Non-wireless methods: multi-sensors based localization	Accelerometer	Acceleration
	Gyroscope	Angular velocity
	Barometer	Altitude/height
	Magnetometer	Heading direction
	Camera	Environment aware

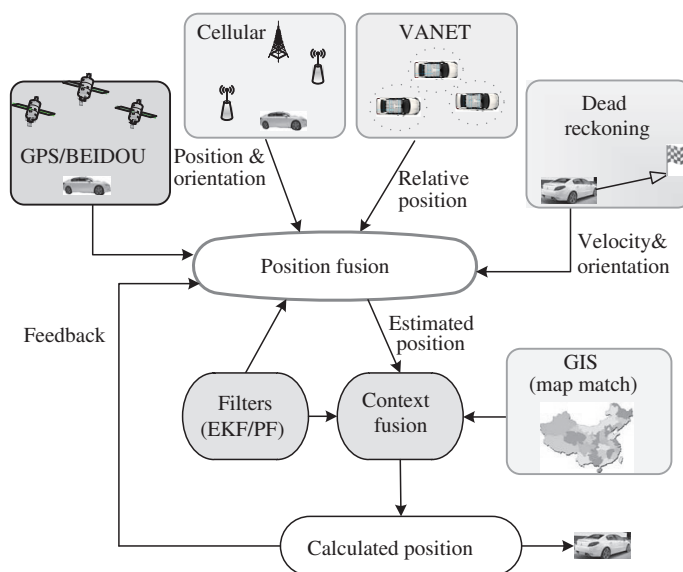


图 9 车辆定位和跟踪为例的定位信息融合

Figure 9 Data fusion in vehicle tracking and localization

6.2 多源信息融合

基于多源定位的位置感知的关键问题是信息融合. 图 9 以物联网应用中的车辆跟踪和智能交通为例, 说明了位置信息融合的作用. 由图中所示, 车辆通过 GPS 或者蜂窝定位获得距离信息, 车辆间又可组成 VANET 来进行非测距定位, 车辆行进中可利用各种运动传感器、若速度计、陀螺仪等, 完成航位推测, 再加上地理信息辅助, 来测定车辆方位和完成轨迹跟踪. 显然, 该种物联网应用涵盖的多种网络形式, 具有明显的异构性, 因此包含了多种与位置信息相关的信息来源.

通常, 这种异构的多源位置信息融合应从两个层面考虑, 首先是提高各种单一定位信息来源的准确性, 如文献 [75] 提出卫星定位精度的修正方案, 文献 [76] 旨在克服 NLOS 传播来改善蜂窝定位性能.

另一方面则是如何在融合过程中获得各种位置信息的统计增益, 当前研究主要通过卡尔曼滤波器 (Kalman filter, KF) 和粒子滤波 (Particle filter, PF) 来解决该问题, 这也代表了位置信息融合的两种出发点. 表 6 对二者做了对比说明. 卡尔曼滤波可用于位置估计, 对于位置分布为单峰的高斯模型能获得较好的估计效果. 但不适于具有多峰值分布的非高斯模型, 比如对物节点移动的物联网定位应用, 在

表 6 卡尔曼滤波和粒子滤波
Table 6 Kalman filter and Partial filter

	Kalman filter	Partial filter
Principle	To minimize the least mean square of localization error	Monte Carlo methods, randomly sampling
Predict	Gaussian model	Sequential importance sampling
Measure	Unique measurement value	measurement value for each particle
Calibrate	Parameter update via observation and actual values	Particle probability update via observation and actual values
Weakness	Unsuitable for non-linear and non-Gaussian	Particle sample deletion or impoverishment

NLOS 情形下被障碍物遮挡, 则无法预知其具体运动形式为前进、或停止或是转向, 此时 KF 只能输出不确定性的预测值. 此时位置的不确定性表现为多峰值分布的非高斯模型, 位置信息融合能提供的先验知识有限. 改进后的增强卡尔曼滤波 (EKF) 能部分的改善该问题 [77].

粒子滤波则是通过寻找一组在状态空间传播的随机状态粒子对其概率密度函数进行近似, 以样本均值代替积分运算, 是一种顺序重要性采样法 [78]. 多源的位置感知能为粒子状态提供多方面的信息, 该方法能适用于许多非线性非高斯的定位应用, 典型应用如在 SLAM 系统中的运用 [79]. 文献 [80] 研究了粒子滤波对非线性的运动估计数据的平滑作用. 两种滤波方法都可分为预测、测量和修正, 如表 6 所示, 可以看出各自特性和不足. 粒子滤波能适用更为复杂的定位应用场景, 位置感知来源的多样化, 物联网部署的异构性越明显, 则越能体现其优势. 而就算法实时性而言, 卡尔曼滤波更具优势.

6.3 利用多源位置感知的物联网定位

物联网定位应用中, 多源位置感知和信息融合最能体现出其系统特性, 本小节通过几种可应用于物联网位置感知的实例, 来讨论多源位置信息融合的研究进展.

1) GPSone.

GPSone 是一种综合定位平台, 可以提供基于位置的无线服务, 可以广泛用于物联网中的物流管理、人员定位和跟踪等. GPSone 综合了卫星定位和蜂窝移动定位 (主要基于 CDMA), 室外主要借助 GPS, 在 GPS 无法接收的区域, 则通过蜂窝基站来保证定位成功率. GPSone 系统综合这两种信息源 [81], 只要有一颗卫星和一个基站就可以完成定位. 该方法主要采用测距定位技术, 并不体现移动物节点之间的定位协作. 通过借助室内地图, 和接入热点 (如由 WLAN 或 Femtocell 提供), 该方案还可推广至室内导航 [61].

2) First Response.

文献 [82] 展示了一种快速反应的物联网定位应用, 综合多传感器, 与 UWB 定位结合, 利用 EKF 获得统计定位增益. 节点运动时可进行协作式定位, 可以完成 3D 定位且刻画运动过程中多种参量, 如位置信息, 速度、方位和加速度等, 运动传感器是可穿戴式的. 携带该系统的人员还可组成一个小范围内的移动自组织网, 充分利用了定位信息交互、协作式定位以及定位信息融合.

3) 利用 WiFi 信号特征和多源数据的位置感知.

文献 [83] 设计的 Unloc 是一种可实现无监督的室内定位跟踪方案, 适用于室内环境下的物联网定位应用, 如办公室人员监控、厂区工业自动化等. 该系统体现了多种定位方式的综合使用, 物节点识

别时使用 RFID, 定位时利用 WiFi 网络的指纹匹配算法, 运动跟踪时使用了多种惯性传感器、如加速计和陀螺仪等。

文献 [84] 通过研究 WiFi 网络 RSS 的空间关系, 同样借助了智能手机终端的多源数据采集, 结合节点移动特性, 提出构建高维指纹空间的室内定位系统, 无需预先获知 AP 的位置. 文献 [85] 提出的 WILL 系统与之相似, 同样借助了智能终端的多源数据采集, 不需要预先布置锚节点, 而是通过场景中已有物体, 如楼梯等接收或反射现有的 WiFi 信号, 并提取信号特征, 作为虚拟锚点, 用于消除跟踪过程中的误差累积, 以上系统应用都体现出了对环境的智能感知。

6.4 多源位置感知与信息融合的技术挑战

物联网的泛在通信能力、移动性以及网络结构的异构性, 在定位应用中给多源位置感知和信息融合技术带来较大挑战. 这表现为:

(1) 多“源”的选取. 就目前而言, 对于某种特定物联网场景下的定位应用, 并没有统一的标准来确定选择哪些位置信息的来源. 从理论上讲, 表 1 和表 5 所列出的无线技术和传感技术都能用于定位, 也能提供不同来源的位置信息, 因此在设计物联网系统来获得位置信息融合的优势时^[61], 需要综合考虑定位性能需求、物节点成本、特定物联网应用的网络组成等诸多因素, 合理选取定位信息源, 以达到多“源”的优化配置。

(2) 集中式或分布式. 对于传感器网络 (WSN) 定位, 由于传感节点众多, 且资源能耗受限, 因此常采用非测距定位和分布式算法. 物联网从物节点感知能力、网络层、业务和应用等多方面超越了 WSN. 因此就定位而言, 仅采用分布式定位是不够的^[67]. 特别对于多源位置感知, 集中式定位算法可从全局角度统筹规划, 能够获得相对精确的定位精度, 图 9 中给出的示例其实体现了集中式和分布式定位算法的结合。

(3) 异构多域融合与定位协同. 由于物节点在物联网中都能实现泛在互联, 定位技术和位置信息交互是基于异构网络平台^[64], 异构性造成各种定位技术和方法使用的空中接口和相关协议的差异^[2]. 多域融合是为了实现多层次的定位资源与位置信息共享, 此时, 不仅需要发挥不同定位方法的共性融合, 更需充分挖掘定位方法各自特点的协同作用。

7 值得进一步研究的议题

物联网是网络与信息化的应用拓展, 定位技术和位置感知作为物联网系统中的重要环节, 结合前文所述内容, 本节归纳物联网定位中值得进一步研究的议题。

7.1 群目标定位

未来物联网在采集信息即传感层面将是无所不在的, 真正意义上的每件物体都可寻址是最终趋势. 但若面对大规模的节点布置, 试图标定每一个节点是不切实际的. 在这类应用中, 可以转而求解另一个问题: 群目标地位^[86], 即不寻求确定所有节点的位置信息, 而是进行节点群 (组) 定位. 群目标定位有其实际价值, 一方面, “物”的活动具有群体化特性, 这是指节点采集或反映的信息和该节点群体的行为是类似的, 这和物联网中另一新的概念: 群智能感知^[87], 群目标的学习^[88], 都密切相关; 另一方面极大缩减了单一节点位置感知的开销. 未来将是海量级的节点数来构成物联网, 群目标定位将成为极具潜力的研究方向。

7.2 三维定位问题

就当前发展状况而言, 物联网应用时对节点位置的要求大多是平面或二维 (2D) 定位. 卫星定位如 GPS 能够提供三维 (3D) 坐标, 但结合到车联网等实际应用时, 也忽略了高程信息. 很多应用场景超出了 2D 定位的要求, 如大楼火灾等应急救援场景下的人员跟踪与监控, 要求 2.5D 定位, 即需要确定目标位于哪一层而不需要准确的高度坐标. 实际中还存在诸多要求准确 3D 位置信息的场景, 问题在于, 完成 3D 定位通常需要测距定位方法的综合使用^[89], 成本和复杂度较高. 此外, 文献 [90] 指出许多适合于 2D 的定位方法无法直接应用于 3D 场景, 特别是非测距定位方法, 其中如何利用节点信息来获得高程数据是具有实际意义的研究议题.

7.3 物联网位置信息安全

安全与隐私是信息与网络化时代的重要研究课题. 物联网的泛在连接性, 给网络安全和隐私保护带来了巨大挑战^[91]. 这其中位置信息又成了隐私保护的重要环节, 因为物节点采集的信息必须与物节点本身位置相关联才能体现出价值. 如水源生态监控采集的水质信息, 必须同时获知实时移动的传感节点位置. 这些信息的隐藏或者保密, 不论是国家和企业机密, 或者个人隐私, 若保护不当, 都将构成严重的安全威胁.

对于集中式和分布式定位, 位置安全有所差异. 集中式算法中, 节点位置信息会逐层传递, 而分布式算法能减少信息传递次数, 相较而言分布式定位安全性能更高. 文献 [92] 针对高速移动的车联网应用, 提出一种定位保障机制, 来防止错误位置信息的传播. 针对位置的攻击还可能改变网络连接特性, 进而影响定位性能. 总之, 针对物联网异构和移动特性的位置信息安全与保护仍有待深入研究.

7.4 移动模式和移动感知

文献 [93] 论述了一种智慧型的物联网 — 智能社区 (smart community) 及其两种应用: neighborhood watching 和 pervasive healthcare, 对其中的目标跟踪和检测提出了新的问题. 通常物联网应用场景下的定位与跟踪是时间和空间相关联的, 即“物”的移动模式 (mobility pattern) 和移动特征具有统计意义的相关性, 如车联网中车辆行进在道路范围内, 其位置移动变化不完全随机, 可以进行轨迹和移动性预测^[94].

对于一个可监控的智能社区, “物”的移动方式应分为两类, 一类是规则的或者善意的, 可以通过观测和训练来定义其移动模式; 另一类是恶意又较难预知的, 这一类则是智能社区重点关注的对象, 如潜在的犯罪行为. 对这些移动模式分析和移动感知需要借助物节点行为学的先验知识, 以统计学为基础, 必要时还可结合视频传感器网络节点定位, 引入社会网络和复杂网络等理论进行移动特征分析^[95], 并结合物理信息融合系统 (CPS) 来探讨可行的解决方案^[96]. 因此, 考虑意图和行为的移动模式和移动感知是物联网位置应用与研究中的重要议题.

7.5 众包定位

众包 (crowdsourcing) 最先用于描述互联网带来的新的生产组织形式, 即企业利用互联网来将工作分配出去、发现创意或解决技术问题. 通常问题以公开传播方式交予不确定的群体来提供解决方案, 这是一种分布式的问题解决和生产模式.

众包这一概念能够很好地用于室内定位应用中,也是当前研究中的热点问题.以 WiFi 指纹匹配进行室内定位为例,利用当前各种配置丰富的智能终端,定位节点对 WiFi 信号的 RSS 测量数据和惯性传感数据进行众包,完成多源位置感知.在此过程中不需要指定特定节点完成众包,能够自动建立 WiFi 数据训练集^[97],节点用户在参与过程中都能获益,如能在缺乏室内环境先验知识的情况下,自动重建内部的道路图^[98].

众包定位也存在一些技术问题^[99],一是智能终端的类型多样化,如品牌、采用芯片和天线存在差别,这会造成 RSS 测量数据不尽相同,在众包过程中需要对数据进行校正;二是众包意味着开放式的节点自愿参与,当未经训练的节点或恶意节点上传数据时,大量误差将随之产生,因此寻求有效的错误数据检测与滤除机制是众包定位系统中有待解决的问题.

8 结束语

物联网是信息化和网络化的新趋势,将成为未来网络发展的重要特征.在物联网应用中,往往需要确定移动终端或其所有者、设施与物品的位置信息,完成对物品或其所有者的定位、跟踪、监控和高层次开发,以实现物理空间和信息空间的融合.因此,位置感知技术研究将助力物联网技术的发展,扩展未来网络的感知范围和领域.

本文主要对物联网系统中位置感知技术研究的若干关键问题进行了探讨.详细论述了测距定位和非测距定位这两类定位策略,分析了各自的定位方法和应用特性.探讨了物联网系统中可定位性等相关问题,论述了多源位置感知和定位信息融合等方面的研究进展和解决方案.讨论了物联网定位应用以及值得进一步研究的方向.期望本文的介绍能继续推动正在蓬勃发展中的物联网研究,同时能为关注位置感知研究的同行学者提供有价值的参考.

参考文献

- 1 ITU Internet Reports. The Internet of Things. 2005. <http://www.itu.int/pub/S-POL-IR.IT-2005>
- 2 Zhu H B, Yang L X, Yu Q. Investigation of technical thought and application strategy for the Internet of Things. Chinese J Commun. 2010, 31: 2-9 [朱洪波, 杨龙祥, 于全. 物联网的技术思想与应用策略研究. 通信学报. 2010, 31: 2-9]
- 3 Ning H S, Xu Q Y. Research on global Internet of Things: developments and it's construction in China. Chinese J Electron, 2010, 38: 2590-2599 [宁焕生, 徐群玉. 全球物联网发展及中国物联网建设若干思考. 电子学报, 2010, 38: 2590-2599]
- 4 Wu H Q. Review on Internet of things: application and challenges. J Chongqing Univ Posts Telecomm (Natural Science Edition), 2010, 22: 526-531 [邬贺铨. 物联网的应用与挑战综述. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2010, 22: 526-531]
- 5 Gluhak A, Krco S, Nati M, et al. A survey on facilities for experimental internet of things research. IEEE Commun Mag, 2011, 49: 58-67
- 6 Zorzi M, Gluhak A, Lange S, et al. From today's Intranet of Things to a future Internet of Things: a wireless-and mobility-related view. IEEE Wirel Commun, 2010, 17: 44-51
- 7 Taleb T, Kunz A. Machine type communications in 3GPP networks: potential, challenges, and solutions. IEEE Commun Mag, 2012, 50: 178-184
- 8 Zhan H, Wen Z, Wu Y, et al. A GPS navigation system based on the Internet of Things platform. In: Proceedings of IEEE 2nd International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), IEEE, 2011. 160-162
- 9 Gezici S, Poor H V. Position estimation via ultra-wide-band signals. Proc IEEE, 2009, 97: 386-403
- 10 Han D M, Lim J H. Smart home energy management system using IEEE 802.15.4 and zigbee. IEEE Trans Consumer Electron, 2010, 56: 1403-1410

- 11 Cho H, Kim S W. Mobile robot localization using biased chirp-spread-spectrum ranging. *IEEE Trans Ind Electron*, 2010, 57: 2826–2835
- 12 Ni L M, Liu Y, Lau Y C, et al. LANDMARC: indoor location sensing using active RFID. *Wirel Netw*, 2004, 10: 701–710
- 13 Hur H, Ahn H. Discrete-time H_∞ filtering for mobile robot localization using wireless sensor network. *IEEE Sensors J*, 2013, 13: 245–252
- 14 Conti A, Guerra M, Dardari D, et al. Network experimentation for cooperative localization. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2012, 30: 467–475
- 15 Guvenc I, Sahinoglu Z, Orlik P V. TOA estimation for IR-UWB systems with different transceiver types. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 2006, 54: 1876–1886
- 16 Gezici S, Tian Z, Giannakis G B, et al. Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks. *IEEE Signal Process Mag*, 2005, 22: 70–84
- 17 Dardari D, Chong C C, Win M Z. Threshold-based time-of-arrival estimators in UWB dense multipath channels. *IEEE Trans Commun*, 2008, 56: 1366–1378
- 18 Kay S M. *Fundamentals of Statistical Signal Processing – Estimation Theory*. Beijing: Electronic Industry Press, 2006 [Kay S M. 统计信号处理基础 – 估计与检测理论. 罗鹏飞等译. 北京: 电子工业出版社, 2006]
- 19 Cardinali R, de Nardis L, Di Benedetto M G, et al. UWB ranging accuracy in high-and low-data-rate applications. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2006, 54: 1865–1875
- 20 Huang J Y, Wan Q. Analysis of TDOA and TDOA/SS based geolocation techniques in a non-line-of-sight environment. *J Commun Netw*, 2012, 14: 533–539
- 21 Chazan D, Zakai M, Ziv J. Improved lower bounds on signal parameter estimation. *IEEE Trans Inf Theory*, 1975, 21: 90–93
- 22 Dardari D, Chong C C, Win M Z. Improved lower bounds on time-of-arrival estimation error in realistic UWB channels. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, IEEE, 2006. 531–537
- 23 Dardari D, Conti A, Ferner U, et al. Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments. *Proc IEEE*, 2009, 97: 404–426
- 24 Qi Y. *Wireless geolocation in a non-line-of-sight environment*. Dissertation for Ph.D Degree, New Jersey: Princeton University, 2004
- 25 Molisch A F. Ultra-wide-band propagation channels. *Proc IEEE*, 2009, 97: 353–371
- 26 Wang Y, Lu W, Zhu H. Experimental study on indoor channel model for wireless sensor networks and internet of things. In: *Proceedings of 12th IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT)*, IEEE, 2010. 624–627
- 27 Iwakiri N, Kobayashi T. Joint TOA and AOA estimation of UWB signal using time domain smoothing. In: *Proceedings of 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC'07)*, IEEE, 2007. 120–125
- 28 Subramanian A. UWB linear quadratic frequency domain frequency invariant beamforming and angle of arrival estimation. In: *Proceedings of IEEE 65th Vehicular Technology Conference*, IEEE, 2007. 614–618
- 29 Chiu W Y, Chen B S. A mixed-norm approach using simulated annealing with changeable neighborhood for mobile location estimation. *IEEE Trans Mobile Comput*, 2010, 9: 633–642
- 30 Ding G, Tan Z, Zhang L, et al. Hybrid TOA/AOA cooperative localization in non-line-of-sight environments. In: *Proceedings of IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, IEEE, 2012. 1–5
- 31 Liu B, Cheng L, Wu H, et al. Ubiquitous localization method on mobile robot in the Internet of Things. In: *Proceedings of International Conference on Modelling, Identification & Control (ICMIC)*, IEEE, 2012. 537–542
- 32 Takenaka T, Sahinoglu Z, Bhatti G, et al. Multi-hop localization using mobility (MLM) in mixed LOS/NLOS environments. In: *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, IEEE, 2010. 1–6
- 33 Prieto J, Mazuelas S, Bahillo A, et al. NLOS mitigation prior to range estimation smoothing for wireless location systems. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, IEEE, 2010. 1–5
- 34 Tsalolikhin E, Bilik I, Blaunstein N. A single-base-station localization approach using a statistical model of the NLOS propagation conditions in urban terrain. *IEEE Trans Veh Tech*, 2011, 60: 1124–1137

- 35 Enda K, Kohno R. UWB localization algorithm to improve accuracy under NLOS environment. In: Proceedings of IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), IEEE, 2011. 1187–1191
- 36 Chen H, Wang G, Wang Z, et al. Non-line-of-sight node localization based on semi-definite programming in wireless sensor networks. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2012, 11: 108–116
- 37 Guvenc I, Chong C C. A survey on TOA based wireless localization and NLOS mitigation techniques. *IEEE Commun Surveys Tutorials*, 2009, 11: 107–124
- 38 Oktem T, Slock D. Cramer-rao bounds for power delay profile fingerprinting based positioning. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), IEEE, 2011. 2484–2487
- 39 Jin Y, Soh W S, Wong W C. Indoor localization with channel impulse response based fingerprint and nonparametric regression. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2010, 9: 1120–1127
- 40 Tozlu S, Senel M, Mao W, et al. Wi-Fi enabled sensors for internet of things: A practical approach. *IEEE Commun Mag*, 2012, 50: 134–143
- 41 Welbourne E, Battle L, Cole G, et al. Building the Internet of Things using RFID: the RFID ecosystem experience. *IEEE Internet computing*, 2009, 13: 48–55
- 42 Liu Y, Yang Z, Wang X, et al. Location, localization, and localizability. *J Comput Sci Tech*, 2010, 25: 274–297
- 43 Gu J J, Chen S C, Zhuang Y. Wireless sensor network-based topology structures for the Internet of Things localization. *Chinese J Comput*, 2010, 33: 1548–1556 [顾晶晶, 陈松灿, 庄毅. 基于无线传感器网络拓扑结构的物联网定位模型. *计算机学报*, 2010, 33: 1548–1556]
- 44 Xiong Z, Song Z Y, Scalera A, et al. Enhancing WSN-based indoor positioning and tracking through RFID technology. In: Proceedings of Fourth International EURASIP Workshop on RFID Technology (EURASIP RFID), IEEE, 2012. 107–114
- 45 Niculescu D, Nath B. DV based positioning in ad hoc networks. *Telecommun Syst*, 2003, 22: 267–280
- 46 He T, Huang C, Blum B M, et al. Range-free localization schemes for large scale sensor networks. In: Proceedings of the 9th annual International Conference on Mobile Computing and Networking, ACM, 2003. 81–95
- 47 Shang Y, Ruml W. Improved MDS-based localization. In: Proceedings of IEEE International Conference on INFOCOM, IEEE, 2004. 2640–2651
- 48 Aslam F, Schindelhauer C, Vater A. Improving geometric distance estimation for sensor networks and unit disk graphs. In: Proceedings of International Conference on Ultra Modern Telecommunications & Workshops (ICUMT'09), IEEE, 2009. 1–5
- 49 Huang B, Yu C, Anderson B D O, et al. Connectivity-based distance estimation in wireless sensor networks. In: Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), IEEE, 2010. 1–5
- 50 Ma D, Er M J, Wang B. Analysis of hop-count-based source-to-destination distance estimation in wireless sensor networks with applications in localization. *IEEE Trans Veh Tech*, 2010, 59: 2998–3011
- 51 Wu G, Wang S, Wang B, et al. Multi-hop distance estimation method based on regulated neighbourhood measure. *IET Commun*, 2012, 6: 2084–2090
- 52 Xiao Q, Xiao B, Cao J, et al. Multihop range-free localization in anisotropic wireless sensor networks: A pattern-driven scheme. *IEEE Trans Mobile Computing*, 2010, 9: 1592–1607
- 53 Zhong Z, He T. RSD: a metric for achieving range-free localization beyond connectivity. *IEEE Trans Parallel Distr Syst*, 2011, 22: 1943–1951
- 54 Li M, Liu Y. Rendered path: range-free localization in anisotropic sensor networks with holes. In: Proceedings of the 13th annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, ACM, 2007. 51–62
- 55 MacLean S, Datta S. A lower bound on range-free node localization algorithms. In: Proceedings of International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS'08), IEEE, 2008. 628–632
- 56 Chan Y W E, Soong B H. A new lower bound on range-free localization algorithms in wireless sensor networks. *IEEE Commun Lett*, 2011, 15: 16–18
- 57 Feng K T, Chen C L, Chen C H. GALE: an enhanced geometry-assisted location estimation algorithm for NLOS environments. *IEEE Trans Mobile Comput*, 2008, 7: 199–213
- 58 Zhu J, Zhao H, Xu J Q, et al. Research on a novel fuzzy theory based localization model in WSNs. *Chinese J Electron*, 2010, 38: 1845–1851 [朱剑, 赵海, 徐久强, 等. WSNs 中一种新颖的模糊识别定位技术研究. *电子学报*, 2010, 38: 1845–1851]

- 59 Peng Y, Wang D. A review: wireless sensor networks localization. *Chinese J Electron Meas Instrum*, 2011, 25: 389–399 [彭宇, 王丹. 无线传感器网络定位技术综述. *电子测量与仪器学报*, 2011, 25: 389–399]
- 60 Guo Z, Guo Y, Hong F, et al. Perpendicular intersection: locating wireless sensors with mobile beacon. *IEEE Trans Veh Tech*, 2010, 59: 3501–3509
- 61 Wymeersch H, Lien J, Win M Z. Cooperative localization in wireless networks. *Proc IEEE*, 2009, 97: 427–450
- 62 Foschini L, Taleb T, Corradi A, et al. M2M-based metropolitan platform for IMS-enabled road traffic management in IoT. *IEEE Commun Mag*, 2011, 49: 50–57
- 63 Li Z T, Li R F, Wei Y H. Coordinated algorithm for time synchronization and distance measurement in wireless sensor networks. *Chinese J Comput Res Dev*, 2010, 47: 638–644 [李哲涛, 李仁发, 魏叶华. 无线传感器网络中时间同步与测距协同算法. *计算机研究与发展*, 2010, 47: 638–644]
- 64 Shen Y, Mazuelas S, Win M Z. Network navigation: Theory and interpretation. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2012, 30: 1823–1834
- 65 Akhtman J, Hanzo L. Heterogeneous networking: An enabling paradigm for ubiquitous wireless communications. *Proc IEEE*, 2010, 98: 135–138
- 66 Win M Z, Conti A, Mazuelas S, et al. Network localization and navigation via cooperation. *IEEE Commun Mag*, 2011, 49: 56–62
- 67 Shen Y, Wymeersch H, Win M Z. Fundamental limits of wideband localization – part II: cooperative networks. *IEEE Trans Inf Theory*, 2010, 56: 4981–5000
- 68 Wang X P, Luo J, Shen C X. Theory and algorithms on localization in wireless sensor networks. *Chinese J Comput Res Dev*, 2011, 48: 353–363 [王小平, 罗军, 沈昌祥. 无线传感器网络定位理论和算法. *计算机研究与发展*, 2011, 48: 353–363]
- 69 Zhu Z, So A M C, Ye Y. Universal rigidity: towards accurate and efficient localization of wireless networks. In: *Proceedings of IEEE International Conference on INFOCOM*, IEEE, 2010. 1–9
- 70 Yang Z, Liu Y. Understanding node localizability of wireless ad hoc and sensor networks. *IEEE Trans Mobile Computing*, 2012, 11: 1249–1260
- 71 Sugihara R, Gupta R K. Sensor localization with deterministic accuracy guarantee. In: *Proceedings of IEEE International Conference on INFOCOM*, IEEE, 2011. 1772–1780
- 72 Yang Z, Liu Y, Li X Y. Beyond trilateration: on the localizability of wireless ad hoc networks. *IEEE/ACM Trans Networking (TON)*, 2010, 18: 1806–1814
- 73 Gortler S J, Healy A D, Thurston D P. Characterizing generic global rigidity. *American J Mathematics*, 2010, 132: 897–939
- 74 Zhu Y J, Zhu X L, Zhu S X, et al. Intelligent transportation system based on Internet of Things. In: *Proceedings of World Automation Congress (WAC)*, IEEE, 2012. 1–3
- 75 Bourdeau A, Sahnoudi M, Tournet J Y. Constructive use of GNSS NLOS-multipath: Augmenting the navigation Kalman filter with a 3D model of the environment. In: *Proceedings of 15th International Conference on Information Fusion (FUSION)*, IEEE, 2012. 2271–2276
- 76 Yu K, Dutkiewicz E. Geometry and motion-based positioning algorithms for mobile tracking in NLOS environments. *IEEE Trans Mobile Computing*, 2012, 11: 254–263
- 77 Hammes U, Zoubir A M. Robust MT tracking based on M-estimation and interacting multiple model algorithm. *IEEE Trans Signal Processing*, 2011, 59: 3398–3409
- 78 Scharcanski J, de Oliveira A B, Cavalcanti P G, et al. A particle-filtering approach for vehicular tracking adaptive to occlusions. *IEEE Trans Veh Tech*, 2011, 60: 381–389
- 79 Ferris B, Fox D, Lawrence N D. WiFi-SLAM using Gaussian process latent variable models. In: *Proceedings of 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, 2007. 2480–2485
- 80 Wang J, Gao Q, Yu Y, et al. Toward robust indoor localization based on Bayesian filter using chirp-spread-spectrum ranging. *IEEE Trans Industrial Electron*, 2012, 59: 1622–1629
- 81 Ni L, Luo W K, Xiang J. Application of GPSone in IoT. *Chinese Commun Tech*, 2012, 45: 72–74 [倪磊, 罗万可, 向军. GPSone 在物联网中的应用探讨. *通信技术*, 2012, 45: 72–74]
- 82 Rantakokko J, Rydell J, Stromback P, et al. Accurate and reliable soldier and first responder indoor positioning: multisensor systems and cooperative localization. *IEEE Wireless Commun*, 2011, 18: 10–18

- 83 Wang H, Sen S, Elgohary A, et al. No need to war-drive: Unsupervised indoor localization. In: Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, ACM, 2012. 197–210
- 84 Yang Z, Wu C, Liu Y. Locating in fingerprint space: wireless indoor localization with little human intervention. In: Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, ACM, 2012. 269–280
- 85 Wu C, Yang Z, Liu Y, et al. WILL: wireless indoor localization without site survey. *IEEE Trans Parallel Dist Syst*, 2013, 24: 839–848
- 86 Galluccio L, Morabito G, Palazzo S. On the potentials of object group localization in the Internet of Things. In: Proceedings of IEEE International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), IEEE, 2011. 1–9
- 87 Ganti R K, Ye F, Lei H. Mobile crowdsensing: current state and future challenges. *IEEE Commun Mag*, 2011, 49: 32–39
- 88 Liu W, Yin L, Zhang W, et al. A general distributed object locating architecture in the Internet of Things. In: Proceedings of IEEE 16th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), IEEE, 2010. 730–735
- 89 Zhang Y, Liu S, Jia Z. Localization Using Joint Distance and Angle Information for 3D Wireless Sensor Networks. *IEEE Commu Lett*, 2012, 16: 809–811
- 90 Zhao Y, Wu H, Jin M, et al. Localization in 3D surface sensor networks: Challenges and solutions. In: Proceedings of IEEE International Conference on INFOCOM, IEEE, 2012. 55–63
- 91 Zhou L, Wen Q, Zhang H. Preserving sensor location privacy in internet of things. In: Proceedings of Fourth International Conference on Computational and Information Sciences (ICIS), IEEE, 2012. 856–859
- 92 Abumansoor O, Boukerche A. A secure cooperative approach for nonline-of-sight location verification in VANET. *IEEE Trans Veh Tech*, 2012, 61: 275–285
- 93 Li X, Lu R, Liang X, et al. Smart community: an internet of things application. *IEEE Commun Mag*, 2011, 49: 68–75
- 94 Teng J, Snoussi H, Richard C. Decentralized variational filtering for target tracking in binary sensor networks. *IEEE Trans Mobile Comput*, 2010, 9: 1465–1477
- 95 Li R F, Xie Y, Li R, et al. Survey of cyber-physical systems. *Chinese J Comput Res Dev*, 2012, 49: 1149–1161 [李仁发, 谢勇, 李蕊, 等. 信息 – 物理融合系统若干关键问题综述. *计算机研究与发展*, 2012, 49: 1149–1161]
- 96 An J, Gui X L, Zhang W D, et al. Social relation cognitive model of mobile nodes in the Internet of thing. *Chinese J Comput*, 2012, 35: 1164–1174 [安健, 桂小林, 张文东, 等. 物联网移动感知中的社会关系认知模型. *计算机学报*, 2012, 35: 1164–1174]
- 97 Rai A, Chintalapudi K K, Padmanabhan V N, et al. Zee: Zero-effort crowdsourcing for indoor localization. In: Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile computing and Networking, ACM, 2012. 293–304
- 98 Shen G B, Chen Z, Zhang P C, et al. Walkie-markie: indoor pathway mapping made easy. In: Proceedings of 10th USENIX Symposium on Networked Systems, Design and Implementation (NSDI), Illinois, 2013. 85–98
- 99 Yang S, Dessai P, Verma M, et al. FreeLoc: Calibration-free crowdsourced indoor localization. In: Proceedings of IEEE INFOCOM, Turin, 2013. 2481–2489

Localization and nodes location-aware in Internet of Things

XIAO Zhu^{1,2*}, WANG Dong¹, LI RenFa¹ & YI KeChu²

1 College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2 State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China

*E-mail: zhxiao@hnu.edu.cn

Abstract Internet of Things (IOT) has gained wide attention in recent years. As an emerging research area, IOT is regarded as an extension of information network to the real world. IOT turns out to be a crucial growth

point in the economic field of China and will play a key role both in the future scientific innovation and social progress. The location of things nodes is one of the significant features that reflect the status of IOT system. Furthermore, nodes' location has a major relevancy with information collecting and related information exchange. In this paper, we focus on the key technologies on the location-awareness for things nodes in IOT. We introduce localization theory and approaches, which cover the range-based and range-free methods, network cooperative localization and multi-sensor location-aware issues. We offer an overview for nodes location-awareness by taking various aspects into account, such as network layouts, application scenarios and localization requirements. Finally, we conclude the current challenges and future research trends.

Keywords Internet of Things, location awareness, position measurement, range-base, range-free, cooperative, wireless sensor networks, data fusion



XIAO Zhu was born in 1981. He received his Ph.D. degree in communication and information system from Xidian University, Xi'an, China in 2009. Currently, he is a lecturer with College of Information Science and Engineering, Hunan University. He is a member of China Computer Federation. His research interest includes wideband wireless communication, ranging and localization technology, and Internet of Things.



communications and mobile computing.

WANG Dong was born in 1964. He received his Ph.D. degree in computer science from Hunan University, Changsha, China in 2006. Currently, he is a professor and Ph.D. supervisor with College of Information Science and Engineering, Hunan University. He is a senior member of China Computer Federation and an honorable member of YOCSEF committee. His research interest includes network test and performance evaluation, Wireless Commu-



network, network and digital medium.

LI RenFa was born in 1957. He received his Ph.D. degree in computer science from Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China in 2006. Currently, he is a professor and Ph.D. supervisor of the College of Computer and Communication of Hunan University. He is a senior member of China Computer Federation, IEEE and ACM. His main research interest includes embedded computing, wireless



communication and communication signal processing.

YI KeChu was born in 1943. He received his Ph.D. degree in communication and information system from Xidian University, Xi'an, China in 1991. Currently, he is a professor and Ph.D. supervisor with the State Key Lab. of Integrated Service Networks (Xidian University) as a deputy director of the lab. He is a senior member of IEEE and an oversea member of IEICE. His main research interest includes wireless