

一种用于智能空间的多目标跟踪室内定位系统

谷红亮¹⁾ 史元春²⁾ 申瑞民¹⁾ 陈 渝²⁾

¹⁾(上海交通大学网络教育学院 上海 200030)

²⁾(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

摘 要 定位系统是智能空间位置感知计算的基础部件,它不仅要能较精确定位多目标,而且在方向性、可携带性等方面也要满足要求.文中设计了一种室内定位系统 Cicada,该系统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.实验表明它对静止和移动目标都能提供平均 5cm 的定位精度,拥有全向型的工作区域,便于携带,具有较好的规模伸缩度以及易部署性,能较全面地满足智能空间定位的需求.

关键词 普适计算;位置感知计算;定位系统;扩展卡尔曼滤波;滑窗滤波器

中图法分类号 TP391

A Multi-Object Tracking Indoor Positioning System for Smart Space

GU Hong-Liang¹⁾ SHI Yuan-Chun²⁾ SHEN Rui-Min¹⁾ CHEN Yu²⁾

¹⁾(Network Education College, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

²⁾(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The location sensing system (also called positioning system) is an underlying component for location-aware computing in Smart Space, which not only demands the location sensing system to locate multiple objects with desirable precision, but also superimposes the requirements, such as directional characteristic and portability etc, on it. This paper presents an indoor location sensing system, Cicada. This system is based on the TDoA (Time Difference of Arrival) between radiofrequency and ultrasound to estimate distance, and employs a technology integrating Slide Window Filter and Extended Kalman Filter to calculate location. As the experiments prove, Cicada can provide the average 5cm location precision both for static objects and for mobile objects, owns a nearly omni-directional working area ranging from -90 degree to $+90$ degree. Besides, it is able to run independently, mini and light so that it is convenient to be portable and even embedded into people's paraphernalia. Further, it is also flexible in scalability, for neither quantity range nor constraint of structure form is demanded on its infrastructure. Last, it is fairly facile to be employed, attributing to the wireless connectivity in its infrastructure. Those advantages illuminate that it is able to be competent for all-round location sensing requirements of Smart Space.

Keywords pervasive/ubiquitous computing; location-aware computing; positioning system; extended Kalman filter; slide window filter

收稿日期:2005-11-12;修改稿收到日期:2007-01-21. 本课题得到国家自然科学基金(60672066)和国家“八六三”高技术研究发展计划项目基金(2006AA01Z131)资助. 谷红亮,男,1977年生,博士,讲师,研究方向为位置感知计算、嵌入式系统、分布式多媒体. E-mail: hlgu@sjtu.edu.cn. 史元春,女,1967年生,教授,博士生导师,研究领域为人机交互、分布式多媒体、普适计算. 申瑞民,男,1967年生,教授,博士生导师,研究领域为E-Learning网络教育技术、多媒体网络协同工作. 陈 渝,男,1972年生,博士,讲师,研究方向为嵌入式系统、操作系统.

1 引言

当前位置感知正成为许多新型计算领域(如普适计算^[1]、移动计算等)的一个最重要的特征和追求目标,此外它还带来了一些新型应用,如依赖于位置的信息服务^[2]、觉察位置的教学^[3]等. 定位系统(或称位置传感系统)是提供目标位置的系统,它是位置感知计算最基础的部件. 尽管全球定位系统 GPS^[4]在对室外目标定位上获得了广泛的应用,但是因为其信号无法穿透房间的建筑材料而使其难以适合于室内环境的应用. 智能空间^①是一个典型室内环境,为智能空间中实现位置感知计算我们需要可用于室内环境的定位系统. 不仅要求能提供目标的位置,智能空间还要求其定位系统具有以下特点:

(1)精度要求. 在智能空间中,作为最重要的定位目标——人往往可能紧挨着的. 为了能区别人形大小目标,定位系统的精度希望能达到分米以下. 且由于人是不断移动的,因此定位系统应该能对移动目标提供跟静止目标差不多的定位精度.

(2)多目标跟踪. 智能空间是一个多人协作的空间,其定位系统应该能跟踪多个对象,准确地区分其 ID.

(3)方向性要求. 在室内,被人携带的定位单元往往会随着人们的日常活动而不定地改变朝向(方向). 例如,如果将定位单元固定于用户头部,当用户弯腰、从椅子上站起来以及摇头时,定位单元的朝向往往会有很大的变化. 在这些情况下系统不应该中断或丢失位置的跟踪,或产生大的定位偏差. 因此我们希望系统能对方向的改变有一定的免疫力.

(4)携带的方便性. 定位单元应该小巧、轻便,便于携带甚至嵌入到日常用品中去. 此外,定位单元应该能独立工作,即它不需要附着在某个携带设备(如笔记本电脑或 PDA)上,也能跟踪到目标位置.

(5)规模伸缩度(scalability)和易部署性. 一个好的智能空间定位系统在规模上应该有较好的伸缩度,同时也应该在一定程度上便于部署.

然而,目前几种流行的定位系统,或者在满足智能空间的多方面需求上存在一些不足,或在国内应用推广上存在一些不可忽视的障碍(如价格、核心技术等). 对此,我们设计和实现了一种用于室内环境的能对多个目标进行定位的系统:Cicada. 此系统无论对静止目标还是移动目标都能提供厘米级的定位精度. 而且它在方向性、便携性、规模伸缩度、易部

署性等方面都具有一定的优势.

2 相关工作

Active badge^[5]是早期的也是最著名的室内定位系统. 该系统根据是否能收到用户携带的徽章发射的调制红外信号来判断该徽章是否在某个读卡器的检测区域内,如检测到了则认为用户的位置就是该检测区域. 该系统是一种粗略定位系统,其定位精度是“房间级”的,这种精度难以满足智能空间的广大需求.

微软公司的 RADAR^[6]是基于无线局域网的信号强度来判断目标的位置. 该系统中基站利用无线网卡发射的信号强度和信噪比来计算携带该网卡的设备的二维平面位置. 该系统一半的误差在 3~4.3m 内. 这种定位精度使该系统在智能空间的应用大打折扣,而且定位的目标需要绑定在计算机上,不便于携带.

LANDMARC^[7]是基于用户携带的主动射频标识 RFID 来定位的. 该系统通过读取主动 RFID 的信号强度来确定目标的位置. 该系统一半的误差在 1m 内,此外它定位出一个目标需要 30s,这种特性在拥有大量移动目标的环境中简直无法容忍.

PinPoint 公司的 3D-iD 系统^[8]可以说是一种室内 GPS,它通过测量目标携带的标签发出的射频信号到达基础设施中各天线的时间差来确定目标的位置. 3D-iD 的定位精度为 1~3m,这种精度在智能空间中也不尽如人意.

与 3D-iD 纯粹基于射频信号到达时间差 TDoA (Time Difference of Arrival)定位的原理不同,MIT 的 Cricket^[9]和 AT&T 公司的 Active BAT^[10]利用射频和超声波的 TDoA 来测量距离,采用三角测量法来计算位置. Active BAT 是主动工作型系统. 该系统中用户携带的设备 BAT 主动地发射信号,而基础设施接收信号并计算目标的位置. Active BAT 的平均定位精度为 9cm 左右. Active BAT 基础设施中的接收器是以规则形状位置(如矩阵的形式)部署,且采用有线连接,不便于扩容和部署. Cricket 是一种被动型系统,作为基础设施的信标器可以任意数量在任意位置部署,其规模伸缩度较好. Cricket 定位的平均平面误差在 40~50cm^[11]. 此外 Cricket 对方向敏感,它只能在一个狭窄的扇形区域内接收

① <http://www.nist.gov/smartSPACE/>

到信号. 由于采用被动模式使得 Cricket 有两个特点: 一个是它不能独立工作, 即其携带部分必须连接到由用户同时携带的计算单元(如 PDA)计算机上, 由计算单元来计算位置; 另一个特点是对移动目标的定位精度不如静止目标.

与以上系统不同, 一些利用用户的生理特征来定位的系统不要求用户携带定位单元. Smart Floor^[12]和 Active Floor^[13]都是通过嵌入压力传感器的地板来感知用户的位置. 此外 Scott Stillman^[14]和 Barry

Brumitt^[15]等人采用视觉的方法来定位. 然而这些方法存在难以区分多对象 ID、受环境干扰影响大、鲁棒性不强等缺点.

3 工作原理和框架

跟 Cricket 的工作原理有些相似, Cicada 也是基于射频和超声波的 TDoA 来定位的. 与前者不同的是 Cicada 是属于主动模式, 其框架如图 1 所示.

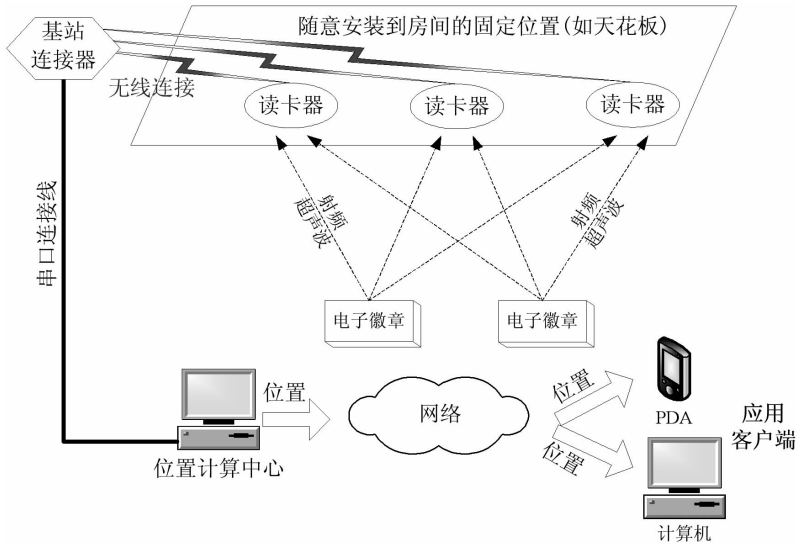


图 1 Cicada 的工作原理和框架

Cicada 由电子徽章、读卡器、基站连接器、位置计算中心等四部分组成. 电子徽章由用户携带或安装在需定位的目标上, 它周期性地同时发射射频和超声波信号, 而射频信号调制了该电子徽章的 ID. 读卡器部署在房间的固定位置, 如天花板上, 其位置可用手工或其它方法测得. 因为射频和超声波的传播速度不同, 所以两者从电子徽章到读卡器的

TDoA 正比于其距离, 而比例系数就是声速(射频的传播时间忽略不计). 根据此原理读卡器便能推算出它离电子徽章的距离, 并无线连接将距离数据传给基站连接器, 最后通过串口线将其报告给专用计算机——位置计算中心. 位置计算中心收集全部的距离数据并计算出电子徽章(目标)的位置. 应用程序可作为客户端访问位置计算中心获得其所需要

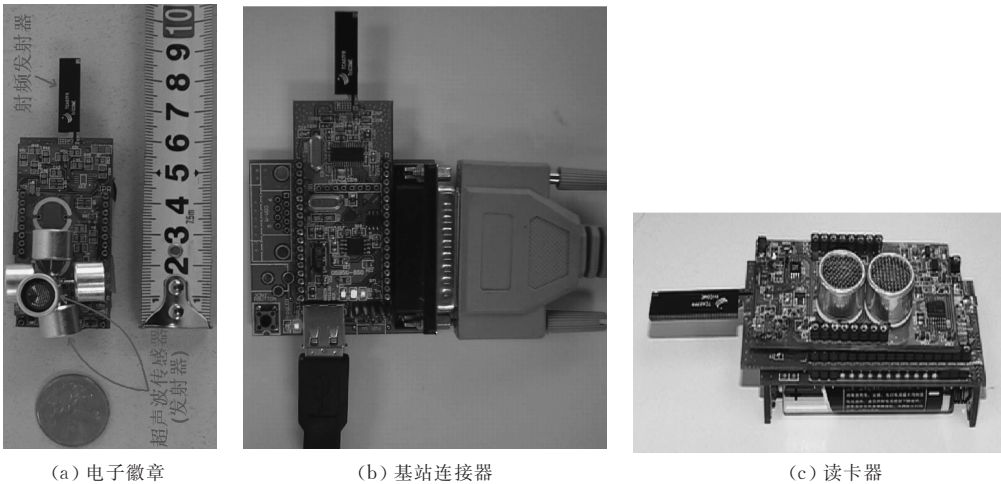


图 2 电子徽章、读卡器、基站连接器

的目标位置.

电子徽章、读卡器、基站连接器显示在图 2 中. 1 元硬币和厘米尺放在旁边作为其大小的对比. 电子徽章正面有一个全向超声波发射器, 该发射器由 5 个彼此正交的超声波传感器组成. 基站连接器有两个接口: 一个是 USB 口, 该口连接一个 USB 转 COM(串口)的转接器; 另一个是并口, 该口连接计算机的并口. 并口用于烧制读卡器板上程序. 读卡器大小与电子徽章差不多, 它采用两个相邻的同平面的传感器作为超声波接收器.

电子徽章、读卡器、基站连接器的无线射频单元采用的是相同模块. 射频模块既需要在电子徽章与读卡器之间完成测距, 同时也负责将读卡器计算出来的距离数据报告给基站连接器. 对于射频发射, Cicada 采用了统一的介质访问控制机制, 该机制既实现了电子徽章的准确定位, 同时也完成了读卡器与基站连接器的数据通信. 要说明的是, 读卡器在空间中部署的数量不限, 位置不限, 一般地说在一个空间内应至少部署 4 个, 且避免将其放置在一个圆上.

4 定位算法

从读卡器获得距离数据后, 如何推算出目标的坐标位置关系到一个定位算法的问题. Cicada 的定位算法包括两个阶段, 一个是距离过滤, 另一个是位置计算.

4.1 距离过滤

由于室内墙壁、家具等设施对超声波的反射和阻挡, 使得超声波的多径效应特别明显. 相当一部分的距离数据由于它们走的并不是视觉直线而无效. 在距离数据进入位置计算之前, 这些无效数据必须被过滤掉. 对此 Cicada 采用的是滑窗滤波器.

从读卡器接收的数据可表示为四元组 $[i, b, d, t]$, i 为读卡器 ID, b 为电子徽章 ID, d 为距离值, t 为信号发射时的时间戳(电子徽章的系统时间). 对于每对读卡器和电子徽章, 其距离数据可表示为二元组集合 $[t_i, d_i]$, $i=1, 2, \dots$, 集合中元素按时间序排列. 我们定义距离元组 D 为 $D_i = \{t_i, d_i, v_i\}$, 其中 $v_i = (d_i - d_{i-1}) / (t_i - t_{i-1})$. 每个滑动窗口是一个为每对读卡器和电子徽章存储近来距离元组的循环队列.

在滑动窗口中, 尾指针指向的是最近的距离元组, 而头指针指向的是最早的距离元组. 滑动窗口的平均速度定义为 $\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$. 当接受到新的距离元

组 $N = \{t, d, v\}$ 时, 如果 $v \leq \min\{(1+\alpha)\bar{V}, V_{\max}\}$, 则将它入到滑动窗口中; 否则它作为无效值而拒绝. 上式中 V_{\max} 是室内目标的最大速度, 而 α 代表最大加速度.

在室内环境内, 多径效应主要是由超声波的反射引起的. 反射带来的主要效应是与前后测量的距离值有着急剧的变化, 实验也表明, 多径效应下测量到的距离值经常成倍地变化. 滑窗滤波器采用了一种相对简单的算法处理了此问题. V_{\max} 和 α 的设定可能有点武断, 经过多次实验比较, 我们发现 V_{\max} 设为 1.5m/s, $\alpha=1.5$, 能满足室内大多数移动目标定位需求, 其效果也比较理想.

4.2 位置计算

利用有效距离推算出目标的位置涉及到一个位置计算的问题. Cicada V1.0 采用的是最小二乘法, 经过比较分析后, Cicada V2.0 选取扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman Filter, EKF)的方法.

4.2.1 最小二乘法

记欲求的电子徽章的位置为 $\phi = (x, y, z)$, 则计算中心收到的数据集中对应该电子徽章 ID 且时间戳相同的数据可以组成一个二元组集 $R = \{[r_i, d_i]\}$, 其中 r_i 为第 i 个读卡器的位置(已知), d_i 为其报告的距离值, $1 \leq i \leq n$. 令

$$\delta = \sum_{i=1}^n (|\phi - r_i| - d_i)^2 \tag{1}$$

最小二乘法使 δ 取最小值, 最小二乘法直观、简单, 但存在以下缺点:

(1) 当某时刻收到的某电子徽章的距离数小于 4 时, 该方法将失效. 而当电子徽章进入盲区时, 这种情况经常发生.

(2) 该模型没有考虑距离的测量噪声.

由于来自硬件、软件 and 环境的种种因素, 读卡器测量出来的距离值多少偏离于实际值. 这种偏差称为测量噪声, 它是不可避免的. 例如, 由于环境温度的波动造成声音速度的波动, 从而使得距离计算不可避免地存在偏差.

(3) 容易受到病态阵系数的影响, 造成解的巨大偏差.

式(1)代表的最小二乘法在计算时将变换成一个非齐次线性方程组, 实验发现, 该非齐次线性方程组的系数矩阵容易变成病态阵, 结果测量噪声引起的系数矩阵元素的微小偏差都会带来解的成数十倍甚至更多的偏差. 尽管最小二乘法存在不少缺陷, 但是当我们检验位置计算算法效率时, 还是把它当作

一种参照对比方法来使用。

4.2.2 EKF 方法

卡尔曼滤波器 (Kalman Filter, KF)^[16] 是用于由高斯白噪声干扰的线性动态系统的最优估算法, 而扩展卡尔曼滤波器 EKF^[17] 是卡尔曼滤波器在非线性系统上的推广. EKF 由循环的迭代器组成, 每一步迭代称为一个时间步, 每一时间步由预测和纠正两个阶段组成, 同时每一时间步能保证估计值和实际值之间的误差协方差最小. EKF 采用迭代的计算方法, 它不要求测量值必须大于 4 个, 也不要求其同步, 这样对于那些一次不能得到多个观察数据的定位系统偏向于使用 KF 或 EKF 来计算位置. 此外在本系统中环境因素对 TDoA 推算距离形成的干扰确实服从高斯分布, 符合 EKF 的适用条件. 正因如此, 基于视觉的室内定位系统 HiBall^[18] 便采用了 KF 算法收到了比较好的效果, 而开发者 Greg Welch 则把此方法称为 SCAAT. 由于在本系统中观察量 (距离) 与状态量 (位置) 并不成线性关系, 因此 Cicada V2.0 选取了 EKF 作为其位置计算算法, 此算法采用了位置-速度模型 (PV 模型), 该模型对应的算法如下:

PV 模型将 EKF 的状态向量设为 6 维列向量, 记为 $\mathbf{X} = (x, y, z, u, v, w)^T$, 其中 (x, y, z) 是目标的 3D 坐标位置, 而 (u, v, w) 是目标在 3 个坐标轴方向的速度. 因为在 Cicada 中测量值仅仅是距离, 因此测量向量 m 为测量距离值, 为标量值. 因此系统方程 (带下标 k 的变量表示该变量在第 k 时间步的值, 下同) 为

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + u_{k-1} \Delta T + \frac{1}{2} \mu_{k-1} \Delta T^2 \\ y_k = y_{k-1} + v_{k-1} \Delta T + \frac{1}{2} \nu_{k-1} \Delta T^2 \\ z_k = z_{k-1} + w_{k-1} \Delta T + \frac{1}{2} \omega_{k-1} \Delta T^2 \\ u_k = u_{k-1} + \mu_{k-1} \Delta T \\ v_k = v_{k-1} + \nu_{k-1} \Delta T \\ w_k = w_{k-1} + \omega_{k-1} \Delta T \end{cases} \quad (2)$$

其中 ΔT 是相邻两时间步的时间差, (μ, ν, ω) 目标的 3 个坐标轴上的加速度, 它是零均值高斯白噪声, 记为 $\mu, \nu, \omega \sim N(0, q)$. 系统方程的矩阵形式为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \Phi \mathbf{X}_{k-1} + \Gamma \mathbf{W}_{k-1} \\ m_k = h(\mathbf{X}_k) + \gamma_k \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \Delta T * \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix}$, $\Gamma = \begin{bmatrix} \frac{\Delta T^2}{2} * \mathbf{I}_3 \\ \Delta T * \mathbf{I}_3 \end{bmatrix}$, \mathbf{I}_3 是 3×3

维单位阵, $\mathbf{W}_k = \begin{bmatrix} \mu \\ \nu \\ \omega \end{bmatrix}$. γ_k 是测量误差, 它也是零均值

高斯白噪声, 记为 $\gamma \sim N(0, r)$, 其中 r 称为测量协方差阵. 由于 γ 是一标量, 所以 r 实际上是 γ 的方差.

$h(\mathbf{X}_k) = \sqrt{(x_k - x_R)^2 + (y_k - y_R)^2 + (z_k - z_R)^2}$, 其中 (x_R, y_R, z_R) 是读卡器位置. 定义 \mathbf{H} 为 h 的雅克比矩阵:

$$\mathbf{H}(\mathbf{X}) = \frac{1}{h(\mathbf{X})} [(x - x_R) \ (y - y_R) \ (z - z_R) \ 0 \ 0 \ 0] \quad (4)$$

由于白噪声 μ, ν, ω, γ 互相独立. 因而过程噪声协方差矩阵 \mathbf{Q}_k 为

$$\mathbf{Q}_k = E[\mathbf{W}_k \mathbf{W}_k^T] = q * \mathbf{I}_3 \quad (5)$$

根据 EKF 的理论, 我们能得 PV 模型的全部计算式子 (即迭代器) 如下:

(1) 预测阶段:

$$\mathbf{X}_k^{(-)} = \Phi \mathbf{X}_{k-1}^{(+)} \quad (6)$$

其中 $\mathbf{X}_k^{(-)}$ 表示预测状态.

$$\mathbf{P}_k^{(-)} = \Phi \mathbf{P}_{k-1}^{(+)} \Phi^T + \Gamma \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma^T \quad (7)$$

其中 $\mathbf{P}_k^{(-)}$ 表示预测误差协方差阵.

(2) 纠正阶段:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^{(-)} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^{(-)} \mathbf{H}_k^T + r)^{-1} \quad (8)$$

其中 \mathbf{K}_k 称为卡尔曼因子, 而 \mathbf{H}_k 是 $\mathbf{H}(\mathbf{X}_k)$ 的缩写.

$$\mathbf{X}_k^{(+)} = \mathbf{X}_k^{(-)} + \mathbf{K}_k [m_k - h(\mathbf{X}_k^{(-)})] \quad (9)$$

其中 $\mathbf{X}_k^{(+)}$ 表示纠正状态, 同时也是 EKF 的输出.

$$\mathbf{P}_k^{(+)} = \mathbf{P}_k^{(-)} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^{(-)} \quad (10)$$

其中 $\mathbf{P}_k^{(+)}$ 表示纠正误差协方差阵.

4.2.3 EKF 参数说明

PV 模型 EKF 的初始变量为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_0^{(+)} = E[\mathbf{X}_0] \\ \mathbf{P}_0^{(+)} = var[\mathbf{X}_0] \end{cases} \quad (11)$$

在很多情况下初始状态向量的期望值和协方差阵都是未知的. 因此实际上 $E[\mathbf{X}_0]$ 和 $var[\mathbf{X}_0]$ 被设置为任意值. 按照 EKF 的稳定性原理, 尽管最初时间步内误差会比较大, 但是随着时间步的增长, 误差协方差会一致收敛于一个稳定的最小值.

另一个问题是关于测量噪声方差和过程噪声协方差阵取值的问题. 也就是说 r, q 应取多大. 我们将电子徽章和读卡器面对面放置于无遮挡物的直线上, 从 0.2m 到 4m 的不同距离测试读卡器报告的距离值, 并记录下 300 组数据. 通过与实际值的比较, 得知测量误差的平均值为 4.3cm, 因此 $r = 4.3^2 \approx 18$. 相比于测量噪声方差, 过程噪声方差更难以决定. 在

对静止目标的定位实验中,设置 $q=0$;而在对移动目标的定位实验中,由于电子徽章沿着环形的轨道移动,而轨道的周长 C 和移动周期 T 可测出,故过程噪声可以近似地表示为

$$\sqrt{q} = \bar{a} = \frac{v}{T/4} = \frac{C/T}{T/4} = \frac{4C}{T^2} \tag{12}$$

5 性能分析

对定位系统的评价包括多方面的因素,而定位性能是其中最重要的因素. 本节先讨论定位性能,然后探讨方向敏感性,最后分析了其它性能.

5.1 定位性能

定位性能主要是测试定位精度. 为此我们在房间里布置了 6 个读卡器,进行了移动-最小二乘法、移动-EKF、静止 3 组实验. 在移动-最小二乘法中电子徽章安装在一高为 83.5cm 的小车的顶部,让小车以平均 11cm/s 的速度沿着一矩形轨道移动,而位置计算算法采用最小二乘法. 移动-EKF 实验的情景完全与移动-最小二乘法一样,唯一的不同的其位置计算采用 EKF. 静止实验中电子徽章分别安装在 9 个不同位置,位置计算算法同样采用 EKF. 整个实验的平面图见图 3.

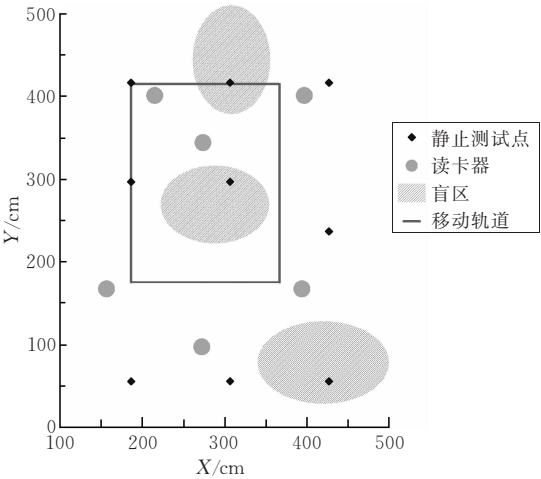


图 3 实验场景

实验记录下约 2780 组移动-EKF 数据、400 组移动-最小二乘法数据以及 90 组静止实验数据. 其中移动-EKF 的实验数据显示在图 4 中.

就我们目前的测量手段而言,由于还没有能精确控制运动速度的机器人小车,故难以确定移动目标在某个时刻的准确的实际位置,不过静止目标的实际位置可准确测量到. 由于 3 组实验中目标的高度是不变的,因此无论对于移动目标还是对于静止

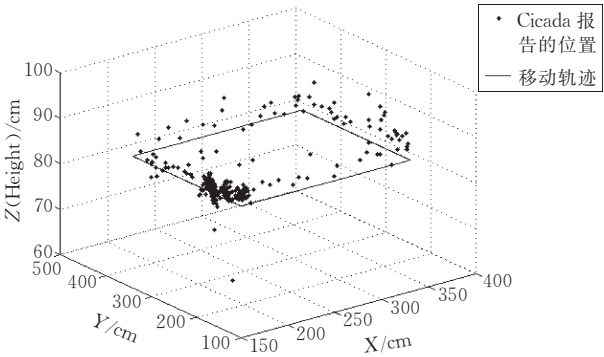


图 4 移动-EKF 实验的位置数据

目标 Z 轴的误差很容易测到. 考虑到这一点我们首先比较 3 组实验的 Z 轴误差,然后根据 Z 轴误差与距离误差的比例反推出距离误差. 3 组实验的 Z 轴误差的累积误差分布函数 CDF 显示在图 5 中.

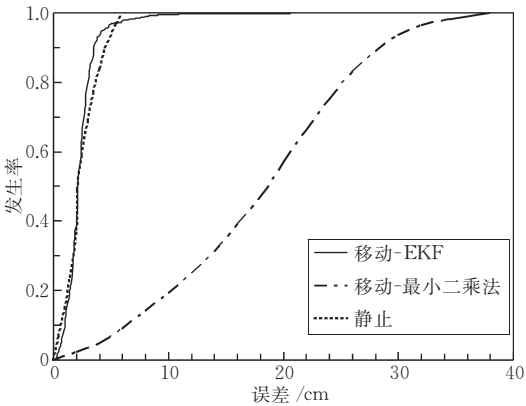


图 5 3 组实验的 Z 轴误差的累积误差分布函数

图 5 中可以看出,静止实验一半(概率为 48%)的误差不超过 2.2cm,而移动-EKF 一半(概率为 53%)的误差不超过 2.3cm,但是移动-最小二乘法一半(概率为 47%)的误差达到了 18cm. 前面两个的精度之所以好于最后一个的原因是前面两个都采用了 EKF 而最后一个采用的最小二乘法. 此现象说明 EKF 不仅能使高斯白噪声的影响最小,而且它对盲区的位置计算性能比最小二乘法更好. 即使只收到一个距离值,EKF 也能根据其历史数据完成状态的预测和更新. 相反,在这种情况下最小二乘法不能借助滑动窗口中时间戳最接近的距离数据来完成计算,这些违反了距离必须同时的条件,也增大了位置计算的误差.

图 5 中也可以看出,移动-EKF 实验的误差分布与静止实验非常接近,稍微的不同在于静止实验的最大误差不超过 6cm,而 99.8% 的移动-EKF 的误差不超过 12cm,且在 2780 个实验值中仅仅 5 个实验值的误差达到了 20.7cm. 两个实验结果的区

别很可能在于,在静止实验中滑窗滤波器有足够的时间过滤掉无效的距离值且 EKF 有充足的时间步来收敛于实际位置,而此条件在移动实验中难以得到满足.

静止实验中每一维的误差与记录误差显示在表 1 中.

	每一维误差			3-D (距离)
	x	y	z	
平均误差/cm	2.346	2.450	2.220	4.359
单维误差与 距离误差之比	0.538	0.562	0.510	

从表 1 可以看出,各维的平均误差与平均距离误差之比基本上相等,且都接近于 $\sqrt{3}/3\approx 0.578$. 此比例的意义是,各维的误差相当于单位立方体的边,而距离误差相当于立方体的对角线. 利用此比例能根据高度误差推算出移动实验中的距离误差:

$$E_d = \sqrt{3} \times E_h \tag{13}$$

其中 E_d 表示平均距离误差, E_h 表示平均高度误差. 从以上数据可以判断出 Cicada 无论是静止目标还是移动目标其平均定位精度约为 5cm.

5.2 方向敏感性

我们在 Cicada 和 Cricket 之间进行了方向敏感性的对比实验. 实验包括两组,分别测试 Cicada 和 Cricket. 在每一组中我们将一对 Cicada(即读卡器和电子徽章)或 Cricket(即收听器和信标器)放置 在无遮挡的 2m 的直线距离上,将其面向角调整到不同的角度,并记录下系统报告的距离值. 在每一角度上记录了约 230 组距离值,并将其分成 3 类:未收到、无效值和有效值. 未收到表示信号仅仅只有 RF 部分,无效值是在 185~215 范围之外的值,剩下的是有效值. 实验结果显示在表 2 中.

方向	Cricket 相对于全部数据的 比例/%			Cicada 相对于全部数据的 比例/%		
	未收到	无效值	有效值	未收到	无效值	有效值
$\pm 45^\circ$	0	0	100	0	0	100
$\pm 60^\circ$	43.5	0	56.5	0	0	100
$\pm 70^\circ$	47.9	47.8	4.3	0	0	100

从表 2 可以看出, Cicada 有一个全向型的工作区,其跨度为 -90° 到 $+90^\circ$;而 Cricket 对方向敏感,在角度仅为 $\pm 60^\circ$ 时它仅仅能收到一半的有效距离值. 其原因是由于发射器的单平面布局使得 Cricket 的超声波发射仅仅朝一个方向,而由于采用 5 个正交的发射器(如图 2(a)所示)使得 Cicada 的发射几

乎覆盖整个空间.

5.3 性能比较

Cicada 目前做出来的电子徽章尺寸为 $8.8 \times 3.0 \times 4.3\text{cm}$,带电池重量为 50g 左右,具有小巧和轻便等特点,且不需要附加到另外设备(如计算机等)就能工作,具有较好的可携带性.

从定位的精度来看, Cicada、Cricket、Active BAT 比 3D-iD 高. 究其原因是 3D-iD 是基于纯射频的 TDoA 来定位,而前三者都是通过射频和超声波 TDoA 来定位的,由于射频的传播速度太快,在时间差上的细微误差容易导致距离上的较大误差;相反,超声波传播速度比较慢,时间差上的误差不大容易放大到距离上. Cicada 定位精度之所以比 Cricket 高的很大部分原因在于 Cicada 是一种主动型系统,这样无论对静止还是运动目标都能较好地获得同时产生的信号时间差. Cicada 和 Active BAT 定位精度都在一个数量级(分米以下), Cicada 实验表明的定位精度略好于 Active BAT 声明的精度,这可能是由于我们的算法对误差具有更好的处理能力. 此外,作为 Cicada 主要基础设施的读卡器采用无线连接,部署数量和位置均不限,相对而言, Active BAT 的接收器需以规则形状部署,且采用有线连接,可以说在这一点上, Cicada 的规模伸缩度和易部署性更为突出. 此外 Cicada 能定位多个目标,快速、准确地区别其 ID,这是所有专用定位系统相对于基于生理特征定位的系统的共同优势.

6 结 论

本文设计了一种主动性跟踪多目标的室内定位系统 Cicada,它基于射频和超声波的 TDoA 来估算距离,并采用一种融合滑窗滤波和卡尔曼滤波的方法来计算位置. 实验表明它无论对静止目标还是移动目标都能提供平均 5cm 的定位精度,而且其工作区域是全向型的,另外它尺寸小、重量轻、能独立工作,便于携带或嵌入到日常用品中,具有较好的规模伸缩度以及易于部署的潜力. 这些特点表明 Cicada 较好地适应智能空间位置感知计算的需要. 尽管目前它还是一个原型系统,但随着制造工艺的成熟和成本的下降,它应该会拥有一个不错的市场前景的.

参 考 文 献

[1] Xu Guang-You, Shi Yuan-Chun, Xie Wei-Kai. Pervasive/

- ubiquitous computing. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(9): 1042-1050(in Chinese)
(徐光祐, 史元春, 谢伟凯. 普适计算. 计算机学报, 2003, 26(9): 1042-1050)
- [2] Lee Dik Lun, Xu Jian-Liang, Zheng Bai-Hua et al. Data management in location-dependent information services. IEEE Pervasive Computing, 2002, 1(3): 65-72
- [3] Gu Hong-Liang, Shi Yuan-Chun, Xu Guang-You et al. A core model supporting location-aware computing in smart classroom//Proceedings of the 4th International Conference on Web-based Learning. Hong Kong, 2005: 1-13
- [4] McNeff J G. The global positioning system. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 645-652
- [5] Roy Want, Andy Hopper, Veronica Falcio et al. The active badge location system. ACM Transactions on Information Systems, 1992, 10(1): 91-102
- [6] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system//Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000). Tel Aviv, Israel, 2000: 775-784
- [7] Ni L M, Liu Yun-Hao, Lau Yiu Cho et al. LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID. Wireless Networks, 2004, 10(6): 701-710
- [8] Jay Werb, Colin Lanzl. Designing a positioning system for finding things and people indoors. IEEE Spectrum, 1998, 35(9): 71-78
- [9] Priyantha N B, Chakraborty Anit et al. The Cricket location-support system//Proceedings of the 6th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston, USA, 2000: 32-43
- [10] Andy Harter, Andy Hopper, Pete Steggles et al. The anatomy of a context-aware application. Telematics and Informatics, 2002, 8(2): 187-197
- [11] Allen Ka Lun Miu. Design and implementation of an indoor mobile navigation system [M. S. dissertation]. Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA, 2002
- [12] Orr R J, Abowd G D. The smart floor: A mechanism for natural user identification and tracking//Proceedings of the 2000 Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2000). Hague, Netherlands, 2000: 275-276
- [13] Addelesee M D, Jones A, Livesey F et al. The ORL active floor. Personal Communications, 1997, 4(5): 35-41
- [14] Scott Stillman, Rawesak Tanawongsuwan, Irfan Essa. A system for tracking and recognizing multiple people with multiple cameras//Proceedings of the 2nd International Conference on Audio-Vision based Person Authentication. Washington, DC, USA, 1999: 37-49
- [15] Barry Brumitt, Brian Meyers, John Krumm et al. Easyliving: Technologies for intelligent environments//Proceedings of the 2nd International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing (HUC 2000). Bristol, UK, 2000: 12-29
- [16] Anthony Ephremides. Kalman filtering. IEEE Control Systems Magazine, 1986, 6(1): 46-47
- [17] Grewal M S, Andrews A P. Kalman Filtering: Theory and Practice. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1993
- [18] Greg Welch, Gary Bishop, Leandra Vicci et al. The HiBall tracker: High-performance wide-area tracking for virtual and augmented environments//Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. London, UK, 1999: 1-10



GU Hong-Liang, born in 1977, Ph.D., lecturer. His research interests include location-aware computing, embedded system, distributed multi-media technology etc.

SHI Yuan-Chun, born in 1967, professor, Ph.D. su-

pervisor. Her research interests include HCI, distributed multi-media technology, pervasive computing.

SHEN Rui-Min, born in 1967, professor, Ph.D. supervisor. His research interests include E-Learning network education technology, multi-media network collaboration work.

CHEN Yu, born in 1972, Ph.D., lecturer. His research interests include embedded system, operation system.

Background

This research is supported by the National Natural Science Foundation of China under grants (60672066), the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China under grant No. 2006AA01Z131.

Pervasive computing (also called ubiquitous computing)

is a hot research field recently. Context-aware computing is a paramount characteristic of pervasive computing. Location (along with ID) is the most important kind of context, as well as most robustly acquired by actual means, so that it turns out to be an actual hot research field. By far the com-

prehension on location-aware computing popularly accepted by the most scholars is that the applications or services can accord to the location and spatial relationship of objects to modify their own behaviors unobtrusively or non-intrusively to adapt to user's purpose. Smart Space is a test-bed intensively embodying pervasive computing. The projects, Smart Classroom, SNC (Standard Natural Classroom) are the Smart Spaces applying in the fields of tele-education. In those projects, one of important objectives is to study how to realize location-aware computing in Smart Space.

Location sensing systems (also called positioning system) is the underlying components for location-aware computing in Smart Space, which are to provide objects' location for location-awareness. Until now, overseas there have emerged quite a few positioning systems, such as GPS, Active badge, RADAR, LANDMARC, 3D-iD, Cricket and Active BAT etc, some of which have even come into market in the international commercial fields. However, Smart Space, especially the one on tele-education, is a special in-

door environment, which owns its appropriate requirements distinct from the general purpose environments. Those requirements span a variety of factors, including location precision, functionality of tracking multi-objects, rigorous directional characteristic, convenience of portability, flexibility of scalability, and facility of employment etc. Though those already existent positioning systems are prominent in this or that performance, so as to succeed in dominating some commercial fields, they are difficult in meeting the all-round demands of Smart Space satisfyingly. Perhaps, what Smart Space needs is not a system excelling at the general purpose, but owning a synthetic performance covering various factors, which might as well be a tradeoff between various performance. For designing a tailored system for Smart Space, we have struggled for a long time. This paper is a skeleton narration on our system, Cicada. A prototype as it is, it is bound be to own a promising perspective. Now we are managing to apply a patent for it.