

基于声强的无线传感器网络目标跟踪方法研究

陈积明 张艳平 曹向辉 申兴发 孙优贤
(浙江大学工业控制技术国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 为有效解决无线传感器网络对具有声音特性移动目标跟踪问题, 该文利用声音随距离的能量衰减模, 并结合声强特性, 给出了基于动态组管理机制的目标跟踪方法。仿真实验结果表明无线传感器网络中基于声强特性的方法, 能够有效实现对移动目标跟踪, 结合 Kalman 滤波算法提高了实验结果的跟踪精度。

关键词: 无线传感器网络; 目标跟踪; 声强; 组管理

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)11-2791-04

Acoustic Energy Based Scheme for Target Tracking in Wireless Sensor Networks

Chen Ji-ming Zhang Yan-ping Cao Xiang-hui Shen Xing-fa Sun You-xian
(State Key Lab of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To solve the tracking problem of maneuver target with acoustic characteristic in wireless sensor network, according to the attenuation model of acoustic energy with distance, an acoustic-energy based target tracking algorithm is proposed based on dynamically greedy group management scheme. The simulation results show that the proposed algorithm can effectively track the target and the tracking error can be decreased by using Kalman Filter.

Key words: Wireless sensor networks; Target tracking; Acoustic energy; Group management scheme

1 引言

无线传感器网络(WSNs)是传感器、微机电系统和无线通信等技术的集成^[1], 是因特网从虚拟到物理世界的延伸。它是由大量具有传感、数据处理和无线通信能力的传感器节点构成的自治系统, 通常用来监视一个特定地理区域的事件。目前, WSNs 的应用已经由军事领域扩展到反恐、环境监测、医疗保健、家居、工业等众多领域^[1-3]。

移动目标的实时定位是 WSNs 的重要应用。比如环境监测中, WSNs 能够定位异常情况的位置; 战争中, 可以用 WSNs 跟踪无 GPS 支持的车辆等位置。要实现定位功能, 往往需要知道目标的特征信息。本文着重研究 WSNs 中利用声音传感器对目标实时跟踪的方法。

利用 WSNs 进行目标定位与跟踪的方法有多种, 比如利用目标的声音、温度等信号随距离变化的特性。然而利用电磁信号或温度等的方法对目标有特殊的要求, 与实际的目标不可预见的特点不相符合。由于声音信号的普遍性, 能够满足一般的应用要求。

基于 WSNs 的目标定位和跟踪, 已经有许多相

关研究。要完成对移动目标的定位和追踪, 主要任务包括两个方面, 首先由传感器节点采集目标的特征信息, 如: 声音、温度、射频信号强度等; 然后对传感器获取的数据分析计算目标位置。

本文主要研究在 WSNs 中, 利用声音传感器采集目标的声音信号以计算移动目标位置, 最终实现对移动目标的定位和跟踪。目前已经有很多利用声音信号进行目标定位和追踪的例子, 例如声纳就是利用水听器采集声波在水下的传播, 完成水下目标探测和通讯任务^[4]。视频会议也是利用麦克风阵列采集声音信息来实现对讲话人的室内定位^[5,6]。在空旷区域建立传感器网络, 可以通过采集移动设备的声音特征来实现对它的定位和追踪^[7]。

WSNs 中利用声音信号进行定位跟踪的方法主要有以下几种: 基于到达时间差 TDOA 的定位方法, 如 MIT 开发设计的 Cricket 系统^[8]; 基于到达角度的 AOA^[9]和基于声音信号强度的定位方法。AOA 和 TDOA 对声音信号的带宽、频率等物理特性以及实验中的测量都有较高的要求, 而声强是随着距离的增加而衰减, 在物理学上已有研究^[10]。本文利用声音信号的特点, 结合简单的定位方法可以实现对目标的定位和跟踪, 并满足一定的精度要求。

2 问题描述

本文考虑利用目标的声音信号随距离的增加而强度衰减的特性进行目标的定位与跟踪。将 N 个节点预先部署在特定区域, 入侵者(称为目标)进入可检测区域, 其声音信号将被邻近的节点检测到; 这些节点在网络协议的支持下协同工作, 从而得到目标的相对甚至绝对位置。本文着重考虑跟踪过程, 所以假设网络中节点静态部署, 并且自身位置已知。

首先考虑声强的衰减特性。假设声音在空气中的传播是各向同性的, 其强度随着距离的增加而衰减。若不考虑波形叠加等因素, 假设声音随距离衰减的模型为

$$E(i) = \frac{A}{\|X(i) - x\|^\alpha} + w(i), \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

其中 $E(i)$ 表示节点 i 处检测到的声音能量, $X(i)$ 为节点 i 处的位置信息, x 是目标的位置信息, $\alpha (> 0)$ 为衰减系数, $w(i)$ 表示传感器测量噪声。根据声音的衰减特性, 由声强值 $E(i)$, 可对应节点 i 与目标的距离。当有多个节点测量值, 就可得到目标的位置信息。

目前, WSNs 节点普遍采用 MICA2。由于硬件限制, 在 MICA2 上不宜运行复杂算法, 本文充分考虑其特点, 利用传感板上的麦克风采集声音; 给出了基于声强的组管理机制, 结合同一时刻各节点的声强, 计算目标位置; 最后, 本文结合声音的能量衰减模型, 设计了目标跟踪仿真, 分析了影响跟踪效果的几个重要参数, 并通过 Kalman 滤波对跟踪效果进行优化。

3 基于声强的目标跟踪方法

目标出现时, 其周围节点传感器板上的麦克风模块开始周期性采集声强信息, 同时节点进入组管理状态, 综合组成员检测得到的声强实现跟踪。

3.1 声强的计算

本文以带发声器的可编程机器人作为目标对象, 基于 MICA2 节点板和 MIB510 编程板, 设计声强采集系统。TinyOS 操作系统及其开发环境, 主要用于支持低能耗的 Ad hoc 传感器网络。为尽可能避免声音信号的反射和折射对信号强度的影响, 实验选择在空旷地进行。

在 MICA2 节点以给定的采样频率, 通过传感器板上的 Microphone 周期性的采集声强, 经数字滤波处理得到与声强对应的数值, 再将数据按一定格式封装成数据包发送。由于硬件和软件处理的原因, 最终得到的数据并非分贝值。

根据采样定理: $w_s \geq 2w_f$, 即采样频率 w_s 必须

不小于对象频率 w_f 的两倍; 同时, 考虑节点的处理能力, 采样频率过高又会对节点造成运算上的负担。本实验中机器人发声频率介于 100 Hz 到 1000 Hz 之间, 因此满足 $f \geq 2000$ Hz 即可, 本实验中 $f = 3000$ Hz。

3.2 基于声强的组管理机制

目标跟踪问题中引入组管理的概念以来, 充分体现了能量优化的特点。由于定位过程只需要首领节点和组成员节点即可完成, 它优化了整个网络的能量消耗。

由于射频信号随距离的衰减远小于声音信号的衰减, 声音信号的传输半径 R_s 和射频信号的传输半径 R_f 满足: $R_s < R_f / 2$ 。那么所有检测到目标声音的节点都可以实现相互通讯。

3.3 组的建立和维护

本文的组管理机制是基于文献[11]提出的贪婪式首领选举方法。当某节点 i 检测到目标的声音信号(实际上检测到的声音强度值为 $E(i)$)时, 启动一个与该强度成反比的定时器 $T_i \propto 1/(E(i))$ 。当 T_i 计时至 0 时, 节点 i 广播一个招募信息。收到招募信息的节点变为 i 的成员节点, 而 i 则变为首领节点。如果节点 i 在计时到 0 之前收到节点 j 的招募信息, 则 i 就成为 j 的成员节点。如果有两个节点同时发布招募信息, 则比较自己所在位置的声音强度值和各自的能量值, 竞选出一个首领。之后, 首领节点会周期(T_1)地发送招募信息, 来保证成员节点的更新, 成员节点也会相应地回复首领节点(Ack)。理论上, 节点离目标越近, 它检测到的声强 $E(i)$ 值就越大, 其定时器 T_i 计时越短, 该节点担任首领节点的概率越高。

成员节点收到招募信息后, 便向首领发送加入消息。之后该成员以周期 T_2 ($T_2 < T_1$) 向首领发送估算声音信号的强度值。若成员连续 3 个 T_1 周期没收到首领的招募消息, 就自动进入选举状态。首领建立并维护一个成员表, 包含成员的位置、声强和时间戳。如果连续 $3T_1$ 内没有收到某成员的数据包, 则认为此节点已退出该组或意外死亡, 将其从成员表中删除。首领在收集到成员的声强后, 选出能量最强的 n 个成员, 利用基于信号强度的加权算法估计目标的当前位置信息。 n 的大小也直接影响着定位和跟踪的精度。如式(2)所示。

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n E(i) X(i)}{\sum_{i=1}^n E(i)}, \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^n E(i) Y(i)}{\sum_{i=1}^n E(i)} \quad (2)$$

其中 $E(i)$ 是成员 i 处的声强; $X(i)$ 和 $Y(i)$ 是成员 i 的

位置信息。

3.4 首领的移交

首领应该是监测到声音能量最强的点, 所以当首领节点处的声强逐渐减弱时就应该让出首领的位置。但过于频繁地进行首领移交, 就会给整个网络带来不必要的通信负担。本文采用折中的办法, 当首领检测到的声强值在成员表中仍然排列在前 1/3 的位置里, 就继续担当首领, 否则就选择成员表中声强值最大的成员, 向它发送首领移交信息。若首领节点移交成功, 新的首领会重新发布招募信息。否则各节点重新进入 3.3 节所描述的组建立过程。

首领是组管理的核心, 担任着的通讯和计算任务, 所以首领必须有足够的能量, 如果能量较低则应让出首领位置, 向成员表中声音强度值最强的成员节点发出首领移交信息。

4 仿真实验

利用前面的声强计算方法得到一系列声强与距离的对应数据, 通过 Matlab 拟合, 得到本系统中声音随距离的能量衰减模型; 基于此模型本文设计了目标跟踪的仿真实验, 着重研究了影响跟踪效果的几个因素, 并通过 Kalman 滤波对跟踪效果进行改进。

4.1 能量衰减模型

根据 3.1 节的实验方法, 按照离机器人由近到远分布多处测试点。在每个测试点进行多次实验然后取平均值, 得到该测试点的声强值。在 Matlab 中利用非线性最小二乘法拟合出衰减模型中的参数为 $A = 120$, $\alpha = 0.5$; 拟合曲线和数据(点)如图 1 所示。

分析实验数据和函数拟合结果发现, 就本文的实验系统和目标对象而言, 当距离超过 1 m 以后, 实验数据偏离理论数据较大。真实环境中由于存在环境噪声等, 网络中部署传感器节点越密集, 计算结果会越准确。

4.2 目标跟踪仿真实验

利用前面拟合得到的声音衰减模型, 在 25×25 的方形区域里仿真实验。着重讨论影响跟踪效果的

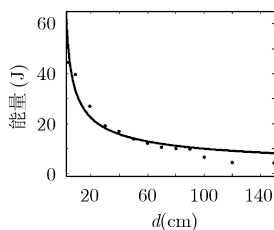


图 1 声音强度衰减函数

几个因素, 包括对噪声的滤波, 节点密度及参与定位的节点个数。假设声音强度信息严格按照拟合函数衰减, 并假设噪声模型满足正态分布: $w \sim N(0,1)$ 。若容许的误差为 Error, 最大延时为 T_d , 目标的速度必须满足 $v < \text{Error} / T_d$, 网络才能实施有效跟踪。

4.2.1 Kalman 滤波 本文选用卡尔曼滤波算法, 利用系统噪声和观测噪声的统计特性, 对追踪得到的位置信息进行滤波处理, 得到更加接近实际曲线的平滑轨迹。

考虑跟踪系统的信号模型为

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k) + \mathbf{W}(k) \quad (3)$$

$$\text{式中 } \mathbf{X}(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \\ v_x(k) \\ v_y(k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W}(k) =$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix}, \quad T \text{ 是采样周期, } \mathbf{W}(k) \text{ 为过程噪声, 它是零}$$

均值, 方差阵为 $\mathbf{Q} = 1$ 的高斯随机序列。

系统的观测模型为

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}\mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k) \quad (4)$$

$$\text{式中 } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V}(k) = \begin{bmatrix} v_1(k) \\ v_2(k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V}(k) \text{ 为测}$$

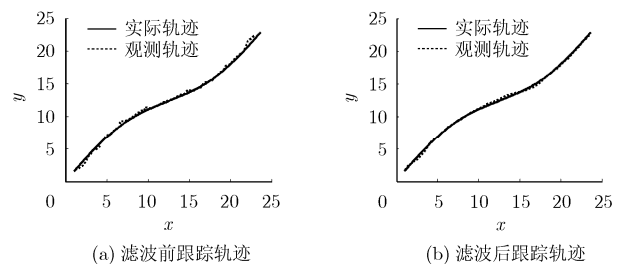
量噪声, 它是零均值, 方差阵为 $\mathbf{R} = 1$ 的白噪声, 且与 $\mathbf{W}(k)$ 无关。

定义追踪误差为

$$\text{Er}(k) = \sqrt{(X_t(k) - X(k))^2 + (Y_t(k) - Y(k))^2} \quad (5)$$

式中 $X(k)$, $Y(k)$ 是第 k 次采样时目标的真实位置; $X_t(k)$, $Y_t(k)$ 为计算得到的目标位置。

假设网络包含 400 个点, 参与计算节为 $n = 6$, 移动目标的运动速度满足跟踪条件。通过上述跟踪算法和滤波处理, 得到的跟踪效果和误差对比统计分别如图 2, 图 3 所示。



(a) 滤波前跟踪轨迹

(b) 滤波后跟踪轨迹

图 2

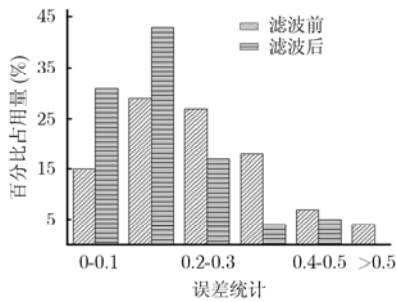


图3 滤波前后的误差统计图

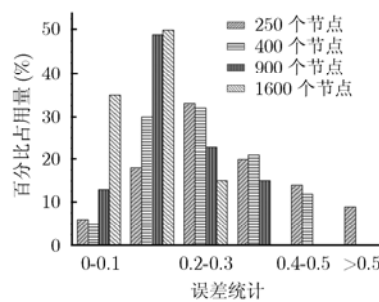


图4 节点密度不同时的误差统计图

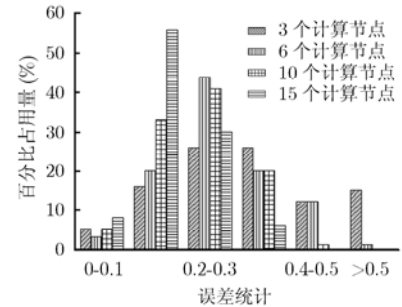


图5 计算节点个数不同时的误差统计图

图2所示为跟踪效果图, (a)为不加滤波的跟踪轨迹, (b)为滤波后的跟踪轨迹。滤波前后的最大跟踪误差分别为: 0.7192, 0.4544。

图3为滤波前后的误差统计图, 斜线填充为滤波前的误差, 横线填充为滤波后的误差。图中的误差统计柱状图, 以0.1为统计区间步长, 统计了滤波前后两组误差数据分别位于(0,0.1], (0.1,0.2], (0.2,0.3], (0.3,0.4], (0.4,0.5]和 $e > 0.5$ 区间的分布情况。滤波后的跟踪误差更集中于前面几组统计区间。可以看出Kalman滤波能够有效降低系统误差。

4.2.2 网络节点密度 针对节点密度的影响, 在4次实验中, 其他参数不变, 网络中分布的节点个数分别取值: 256, 400, 900和1600。4组实验中产生的最大误差分别是: 0.7557, 0.4710, 0.3821, 0.2709。将实验误差按大小分成6组, 并计算出每组在所有采样中所占的比重。

实验结果反映出, 节点密度越大, 跟踪误差越集中在较小的范围里, 跟踪效果就越好, 尤其是1600个节点的情况(右斜线填充), 所有误差都在0.3以内。但是, 节点密度越大, 构建网络的成本就越高, 所以在选取网络密度保证跟踪准确度即可。

4.2.3 计算节点个数 n 对于计算节点个数的影响, 本文也做了类似的实验和误差分析, 首先网络中分布节点数取400不变。 n 分别取值: 3, 6, 10, 15。4组实验的最大误差分别是: 1.0047, 0.5219, 0.4125, 0.3953; 误差统计图如图5所示。

结果显示 n 越大, 跟踪误差集中在较小的范围里。但可能把距离较远的节点包含进来, 在拟合实验中, 当节点距离超过一定范围时声强准确度会下降; 同时, n 越大节点上的计算就越复杂, 所以 n 的选取应结合网络密度和跟踪精度要求等选择合适的大小。

5 结论

本文基于实际系统设计了声强采集程序, 并给出声音衰减模型。本文还给出了基于声强的组管理机制, 定位只需要首领节点和组成员节点即可完成。最后, 结合声音衰减模型和组管理机制, 设计了仿

真环境下的跟踪实验, 并分析了各参数的影响。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W, and Sankarasubramaniam Y. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] 李良群, 姬红兵, 罗军辉. 杂波环境下被动多传感器机动目标跟踪新算法. *电子与信息学报*, 2007, 29(8): 1837-1840.
- [3] Cao X H, Chen J M, Zhang Y, and Sun Y X. Development of an integrated wireless sensor network micro-environment monitoring system. *ISA Transactions(Elsevier)*, 2008, 47(3): 247-255.
- [4] Tolstoy A. *Matched Field Processing for Underwater Acoustics*. World Scientific Publications, Singapore, 1993.
- [5] Brandstein M S, Adcock J E, and Silverman H F. A closed form location estimator for use with room environment microphone arrays. *IEEE Transactions on Speech, and Audio Processing*, 1997, 5(1): 45-50.
- [6] Meesookho C, Mitra U, and Narayanan S. On energy-based acoustic source localization for sensor networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(1): 365-377.
- [7] Yao K, Hudson R, Reed C W, Chen D, and Lorenzelli F. Blind beamforming on a randomly distributed sensor array system. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1998, 16(8): 1555-1567.
- [8] Priyantha N B, Chakraborty A, and Balakrishnan H. The cricket location-support system. *Proceedings of 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, Boston, Massachusetts, United States, Aug. 2000: 32-43.
- [9] Kim D H, Lee S H, Park K S, and Sung T K. Development of an AOA location method using covariance estimation. *Proceedings of Communication Systems and Networks*, Palma De Mallorca, Spain, 2007: 14-18.
- [10] Kinsler L, Frey A, Coppens A, and Sanders J. *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley and Sons, New York, NY, USA, 1982: 124-126.
- [11] 申兴发. 基于无线传感器网络的分布式定位跟踪系统. [博士学位论文], 浙江大学, 2007. 09.

陈积明: 男, 1978年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为传感器网络及协调控制。

张艳平: 女, 1982年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络。

曹向辉: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络。

孙优贤: 男, 1940年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为鲁棒控制系统、工业自动化、工业网络。