文章编号：1001-0920(2009)10-1589-04

二元传感器网络目标定位与跟踪研究

周红波，程远国，邢昌风
（海军工程大学 电子工程学院，武汉 430033）

摘 要：传感器的通信带宽和能量资源有限使传统的位置测量传感器的应用受到了限制，对此，选择利用二元传感器网络进行相应的研究. 基于二元传感器传送信息量少的特性，提出一种新的二元传感器网络目标定位与跟踪算法. 仿真结果表明，该算法在传感器个数和探测半径较大、采样周期较短的情况下较质心算法具有更好的性能.

关键词：传感器网络；二元传感器；目标定位与跟踪；质心算法
中图分类号：TP393 **文献标识码**：A

Target location and tracking with binary sensor network

ZHOU Hong-bo, *CHENG Yuan-guo*, *XING Chang-feng*
(College of Electronic Engineering, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China. Correspondent: ZHOU Hong-bo, E-mail: hbzhou01@163.com)

Abstract: Conventional position measuring sensors are restricted in this applicaton because of limited communication bandwidth and energy resource of sensors. Therefore, binary location and tracking algorithm is applied to the research on the target location and tracking. Based on the characteristic of binary sensor's low transmission, a new target location and tracking algorithm is proposed. Simulation results show that the algorithm has better performance than centroid algorithm on the situation of big sensor number, large detection range and short sampling period.

Key words: Sensor network; Binary sensor; Target location and tracking; Centroid algorithm

1 引 言

近几年来，随着无线通信、集成电路、传感器以及微机电系统等技术的发展和日益成熟，低成本、低功率、多功能的微型传感器的大量成产成为可能. 无线传感器网络就是由部署在监测区域内大量的微型传感器节点，通过无线电通信形成的一个多跳自组织网络系统[1]. 其中无线传感器网络的一个重要应用就是目标定位与跟踪[2]. 由于传感器网络的通信带宽和计算资源有限，传统的位置测量传感器的应用受到限制，因此二元传感器网络是一个很好的选择. 二元传感器是指，传感器只能根据目标是否在其探测区域内而提供单比特信息(1 或 0)，因此其通信量较少. 国内外对二元传感器网络目标定位与跟踪进行了相应的研究[3-6]. 文献[3,4]主要采用质心算法及加权质心算法对目标进行定位，再利用线性拟和进行跟踪. 质心算法及加权质心算法当传感器的探测范围较小时具有较好的性能，但当传感器的探测范围较大时，其性能大大降低. 文献[5,6]首先将所有二元传感器探测的信息传送给汇聚节点；然后利用粒子滤波对所有探测进行滤波，实现对目标的跟踪. 但粒子滤波计算复杂，而且将所有的探测信息传送到汇聚节点需要消耗大量的能量.

本文提出一种新的二元传感器网络目标定位与跟踪算法. 在新的算法中，将传感器节点的探测范围作为以传感器节点为中心，探测距离 R 为半径的圆. 因此当目标进行运动时，能探测到目标的传感器位于以目标为中心，探测距离 R 为半径的圆内. 当传感器首次探测到目标或首次失去目标时，可认为目标到传感器的距离为传感器的探测半径，并称这样的节点为定位节点. 当某一时刻获得足够的定位节点时，可利用最小二乘法得到目标的位置，再利用最小二乘滤波对目标进行跟踪. 最后，通过 Monte Carlo 仿真验证了本文算法的有效性.

2 传感器网络模型

传感器网络由 N 个传感器节点组成，所有节点按照均匀分布密度函数随机布设在检测区域内. 传

收稿日期：2008-12-13；**修回日期**：2009-04-02.
基金项目：国家 863 计划项目(2007AA012309)；湖北省自然科学基金项目(2007ABA299).
作者简介：周红波(1984—)，男，山西运城人，博士生，从事无线传感器网络目标定位与跟踪的研究；邢昌风(1957—)，男，安徽芜湖人，教授，博士生导师，从事舰载作战系统等研究.

感器只有两种探测状态，即它只能判断目标处于节点探测之内或者之外. 传感器的探测区域为以节点为中心，探测距离 R 为半径的圆. 为了使问题简单化，本文假设所有的传感器节点的探测半径相同，但本文算法同样适用于各个节点探测半径不同的情况. 传感器节点能检测出前后两个时刻的探测状态是否相同，当传感器节点检测到当前探测状态与上一时刻探测状态不同时，向汇聚节点发送其位置信息；否则，不发送任何信息. 传感器网络的拓扑结构一定，且每个节点都知道其邻居节点的位置. 另外，假设目标的运动速度相对节点的采样周期而言较小，这样当目标首次进入或首次离开传感器的探测区域时，可认为目标与传感器间的距离为传感器节点的探测半径.

3 传感器网络目标定位算法

3.1 定位原理

由传感器的模型可知，当目标在传感器网络覆盖的区域内运动时，距离目标为 R 以内的所有传感器都可以探测到目标，即它们的探测值为 1，距离目标为 R 以外的所有传感器的探测值为 0. 当某一传感器在 $k-1$ 时刻探测值为 0，而 k 时刻探测值为 1，则可认为该传感器在以目标为中心、传感器探测半径 R 为半径的圆上，即传感器与目标间的距离为 R，并存在一定的误差，本文称该传感器节点为定位节点. 同理，当某一传感器在 $k-1$ 时刻的探测值为 1，而在 k 时刻的探测值为 0，此时同样认为该传感器与目标间的距离为 R，并存在一定的误差，该传感器节点也被称为定位节点. 如图 1 所示，在 T_2 和 T_6 时刻，该传感器节点即为目标的定位节点.

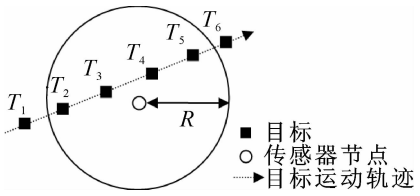


图 1 定位节点示意图

如果在 k 时刻，目标存在 $n(n\geqslant 3)$ 个定位节点，并假设 n 个定位节点的坐标为 (x_1,y_1)，(x_2,y_2)，$\cdots$，(x_n,y_n)，目标的坐标为 (x,y) 未知，则可得

$$\begin{cases}(x_1-x)^2+(y_1-y)^2=R^2+w_1,\\ \quad\vdots\\ (x_n-x)^2+(y_n-y)^2=R^2+w_n,\end{cases}\tag{1}$$

其中 $w_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为存在的误差.

式(1) 为非线性方程组，由其求解 (x,y) 的问题为非线性参数估计问题. 对此，问题的求解可利用非线性最小二乘估计，即求出使目标函数

$$Q=\sum_{i=1}^{n}w_i^2\tag{2}$$

达到最小值的 (x,y). 但由于非线性最小二乘估计计算复杂，不适用于无线传感器网络目标跟踪，本文无法直接求得 (x,y) 的最小二乘估计. 由上述方程组的特点，可将其转换成线性方程组，再利用最小二乘估计算法对 (x,y) 进行近似估计. 具体解法如下：

令式(1) 中的方程两两相减，并移项可得

$$\begin{cases}2(x_2-x_1)x+2(y_2-y_1)y=\\ x_2^2-x_1^2+y_2^2-y_1^2+w_1-w_2,\\ 2(x_j-x_i)x+2(y_j-y_i)y=\\ x_j^2-x_i^2+y_j^2-y_i^2+w_i-w_j,\\ 2(x_n-x_{n-1})x+2(y_n-y_{n-1})y=\\ x_n^2-x_{n-1}^2+y_n^2-y_{n-1}^2+w_{n-1}-w_n,\end{cases}\tag{3}$$

其中最小二乘解就是使目标函数

$$Q=2\sum_{i=1}^{n}w_i^2-2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=i+1}^{n}w_iw_j\tag{4}$$

达到最小值的 (x,y). 当 w_i 与 w_j 服从相同的零均值分布且互不相关时，式(4) 的第 2 项期望值为 0. 当 n 较大时，可认为式(4) 的第 2 项近似为 0，式(2) 和(4) 同时达到极小值，即式(1) 和(3) 具有相同的最小二乘解. 因此当 n 较大时，可利用式(4) 对 (x,y) 实现近似估计. 令

$$A=\begin{bmatrix}2(x_2-x_1) & 2(y_2-y_1)\\ \vdots & \vdots\\ 2(x_j-x_i) & 2(y_j-y_i)\\ \vdots & \vdots\\ 2(x_n-x_{n-1}) & 2(y_n-y_{n-1})\end{bmatrix},\tag{5}$$

$$b=\begin{bmatrix}x_2^2-x_1^2+y_2^2-y_1^2\\ \vdots\\ x_j^2-x_i^2+y_j^2-y_i^2\\ \vdots\\ x_n^2-x_{n-1}^2+y_n^2-y_{n-1}^2\end{bmatrix},\tag{6}$$

$$X=\begin{bmatrix}x\\ y\end{bmatrix}.\tag{7}$$

利用最小二乘法求解可得目标的位置为

$$\hat{X}=(A^{\mathrm{T}}A)^{-1}A^{\mathrm{T}}b.\tag{8}$$

当 n 较小，上述方法无法实现对目标进行定位时，本文仍采用质心法对目标进行定位. 经过仿真实验，将 n 的临界值设为 4，即当 $n\geqslant 4$ 时，采用上述方法对目标进行定位；当 $n<4$ 时，采用质心定位.

3.2 定位节点的修正

在实际的定位过程中，传感器节点是周期采样的，因此其第 1 次检测到目标或第 1 次失去目标的时刻，节点可能并不是正好在以目标为圆心，探测距离 R 为半径的圆上，而是有一点的偏差. 假设传感器

节点的采样周期为 T，目标的速度为 v. 则可知，定位节点的位置相对于以目标为圆心，探测距离 R 为半径的圆上位置的最大偏移值为 $-T*v$，最小值为零. 本文认为其偏移值在最大值与最小值之间均匀分布. 由此可见，上面假设中误差的均值并不为零. 因此，在得到定位节点以后，可对其位置进行 $T*v/2$ 的修正，即定位节点的位置若为 (x_i, y_i)，则将其修正为 $(x_i, y_i)+T*v/2$，即认为 $(x_i, y_i)+T*v/2$ 对应的位置在以目标为圆心，传感器探测距离 R 为半径的圆上. 在具体的计算中，用 $(x_i, y_i)+T*v/2$ 代替式(1) 中的 (x_i, y_i)，使其中的误差 w_i 服从均值为零的均匀分布，从而可利用式(4) 实现对式(2) 最小二乘解的近似估计. 如果目标的速度 v 已知，则可直接利用；如果目标的速度 v 未知，则可利用前一时刻的预测值. 由算法中原理可知，当 $T*v$ 的值越大时，式(1) 中的误差 w_i 的方差越大，算法的精度会越低，因此本文假设目标的运动速度相对节点的采样周期而言较小.

4　目标跟踪算法

考虑到二元传感器节点资源有限，先验统计信息缺乏，本文采用最小二乘滤波算法进行目标跟踪.

假设目标的状态方程为

$$X(k+1)=F(k)X(k)+GU(k), \tag{9}$$

则目标的测量方程为

$$Z(k)=H(k)X(k)+W(k), \tag{10}$$

其中 $Z(k)$ 为定位算法获得的目标位置. 则最小二乘滤波的递推计算公式为

$$\hat{X}(k+1)=F\hat{X}(k+1)+K(k+1)[Z(k+1)-H(k+1)(F(k)\hat{X}(k))], \tag{11}$$

$$K(k+1)=P(k)H(k+1)^{\mathrm{T}}[I+H(k+1)P(k)H(k+1)^{\mathrm{T}}]^{-1}, \tag{12}$$

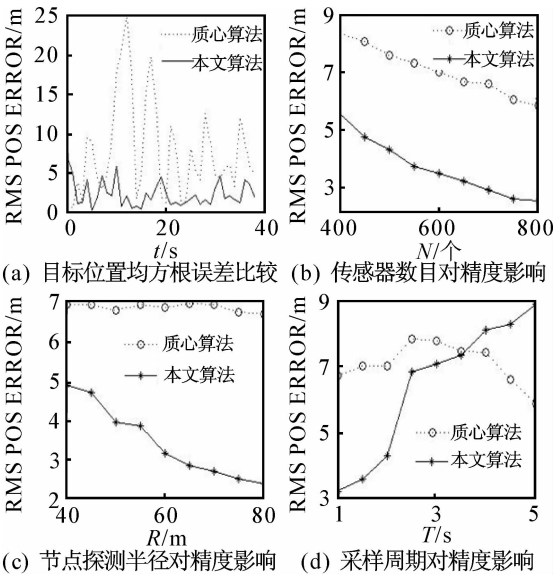
$$P(k+1)=[I-K(k+1)H(k+1)]P(k). \tag{13}$$

5　计算机仿真

为了验证本文算法的有效性，利用 Matlab 进行了 Monte Carlo 仿真，并与质心算法进行了比较. 假设 N 个二元传感器按照均匀分布密度函数随机布设在 $500\times500\,\mathrm{m}^2$ 的区域内，坐标原点设在传感器网络覆盖区域的左下角. 所有传感器的探测半径为 R，采样周期为 T，目标从传感器网络覆盖区域的左上角向右下角匀速运动，即目标的初始位置为(0，500 m)，速度为(10 m/s，−10 m/s). 传感器个数 N，探测半径 R 和采样周期 T 为变化的参数. 下面分别对精度和能量消耗进行仿真比较，每次仿真中 Monte Carlo 的仿真次数都为 100 次. 另外，实验统计结果都是在算法的稳定期进行的，即不考虑目标在传感器网络覆盖区域边缘时的情况.

5.1　精度比较

在传感器个数 $N=600$，探测半径 $R=60\,\mathrm{m}$，采样周期 $T=1\,\mathrm{s}$ 的条件下，对目标的位置估计精度的仿真结果如图 2(a) 所示.



(a) 目标位置均方根误差比较　(b) 传感器数目对精度影响

(c) 节点探测半径对精度影响　(d) 采样周期对精度影响

图 2　精度比较

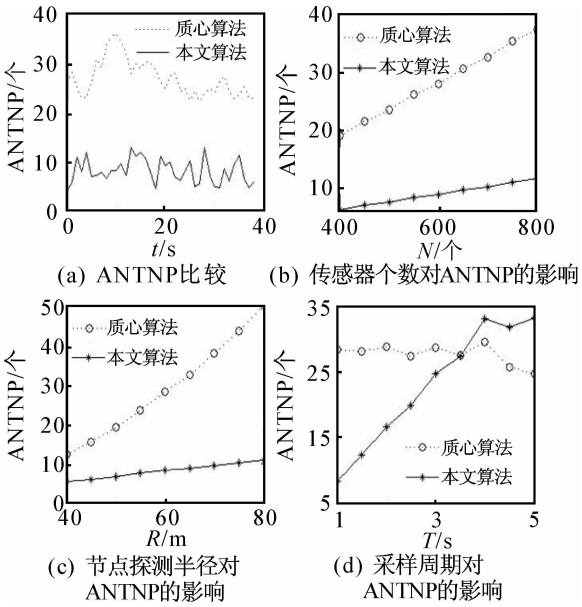
为了验证传感器个数 N，探测半径 R 和采样周期 T 等参数对位置估计精度的影响，分别做了 3 次 Monte Carlo 仿真：1) 假定传感器探测半径 $R=60\,\mathrm{m}$，采样周期 $T=1\,\mathrm{s}$，传感器个数 N 从 400 变化到 800，仿真结果如图 2(b) 所示；2) 假定传感器个数为 $N=600$，采样周期 $T=1\,\mathrm{s}$，传感器探测半径 R 从 40 变化到 80，仿真结果如图 2(c) 所示；3) 假定传感器个数为 $N=600$，传感器探测半径 $R=60\,\mathrm{m}$，采样周期 T 从 1 s 变化到 5 s，仿真结果如图 2(d) 所示.

由图 2 的仿真结果可以看出，本文算法能有效地对目标进行位置估计，从而实现对目标的跟踪. 在探测半径较大、采样周期较小的情况下，估计精度远远大于质心算法. 同时，本文算法的位置估计误差随着传感器个数和探测半径的增大而减小，随着采样周期的变长而增大. 从图 2(d) 可以看出，当采样周期大于 3.5 s 时，本文算法的精度不如质心算法. 这是因为当采样周期越长，本文算法中假设定位节点与目标之间的距离为 R 的误差越大的缘故.

5.2　能量消耗比较

在传感器网络中能量消耗主要是通信能量消耗[7]，而在质心算法和本文算法中通信能量消耗的大小都取决于每个采样时刻向汇聚节点发送信息的节点数目，并与之正相关. 因此，为了仿真的简单性，通过比较仿真期间平均每采样时刻发送信息的节点

数目(ANTNP)的大小来比较通信量的大小,从而实现对能量消耗的比较.在仿真环境与上节相同的情况下,仿真结果如图 3 所示.



(a) ANTNP比较 (b) 传感器个数对ANTNP的影响

(c) 节点探测半径对ANTNP的影响 (d) 采样周期对ANTNP的影响

图 3 能量消耗比较

由仿真结果可知,本文算法的能量消耗随着传感器个数和探测半径的增大而缓慢增大,而质心算法则急剧增大.另外,本文算法的能量消耗随着采样周期的变长而增大,质心算法的能量消耗与采样周期无关.这是因为当采样周期越长时,前后两个周期状态不同的节点数目越多,需发送信息的节点也越多.因此,当传感器个数和探测半径较大,采样周期较短时,本文算法较质心算法能够节省更多的能量,从而延长网络使用寿命.

6 结 论

目标定位与跟踪是传感器网络的一个重要应用方向.本文主要研究了二元传感器网络目标定位与跟踪,并提出一种新的目标定位与跟踪算法.在各种不同的假设下进行了大量的仿真实验.仿真结果验证了新算法在传感器个数和探测半径较大、采样周期较短的情况下,能够有效地对目标进行定位与跟踪.因此该算法较质心算法具有更好的精度,而且能节省更多的能量,从而延长网络使用寿命.当节点的采样周期变长时,误差和能量消耗急剧增大,因此本文算法并不实用.由此可知,本文算法主要适用于节点采样周期较短的场合.

参考文献(References)

[1] Chong Chee Yee, Kumar S P. Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges[J]. Proc of the IEEE, 2003, 91(8): 1247-1256.

[2] Li D, Wong K D, Hu Y H, et al. Detection, classification, and tracking of targets[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(2): 17-29

[3] Kim W, Mechitov K, Choi J Y, et al. On target tracking with binary proximity sensors[C]. Proc of the 4th Int Conf on Information Processing in Sensor Networks. Los Angeles, 2005: 301-308.

[4] Mechitov K, Sundresh S, Kwon Y, et al. Cooperative tracking with binary detection sensor networks[C]. Proc of the 1st Int Conf on Embedded Networked Sensor Systems. New York, 2003: 332-333.

[5] Djuric P M, Vemula M, Bugallo M F. Target tracking by particle filtering in binary sensor networks[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2008, 56(6): 2229-2238.

[6] Jing T, Hichem S, Cedric R. Binary variational filtering for target tracking in sensor networks[C]. Proc of 14th IEEE/SP Workshop on Statistical Signal Processing. Madison, 2007: 685-689.

[7] Malhotra B S, Aravind A A. Energy efficient on-site tracki- ng of mobile target in wireless sensor networks [C]. Proc of the 2004 Conf on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing. Melbourne, 2004: 43-48.

(上接第 1588 页)

[6] Peng L, Woo P Y. Neural-fuzzy control system for robotic manipulators[J]. Control Systems Magazine, 2002, 22(1): 53-63.

[7] Slotine J E, Li W. Applied Nonlinear Control[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

[8] Yoo B K, Ham W C. Adaptive control of robot manipulator using fuzzy compensator[J]. IEEE Trans on Fuzzy System, 2000, 8(2): 186-199 .