

## PIR 单节点阵列目标轨迹预测和定位技术

卢云, 杨卫, 赵俊江, 郑建生, 邓立齐

(中北大学 电子测试技术重点实验室 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:** 针对提高单节点 PIR 阵列探测和感知能力, 减少网域探测成本投入, 提出了利用 PIR 单节点阵列实现对目标轨迹预推。在该研究中, 为了简化结构, 同时提高单节点功能, 仅使用四个双元热释电红外传感器组成一个单节点阵列, 同时, 利用 PIR 处于静止状态, 测得目标的运动方向及目标距节点距离, 并在 PIR 转动状态, 测得运动目标被探测到时的角度和时间, 利用测得数据便可实现单节点目标运动轨迹的预推, 并经过该节点对目标的不断探测, 得到新数据, 从而对轨迹进行逐步修正, 增加轨迹预推的可靠性。经实验证明, 该方法突破以往多节点定位和轨迹预推, 同时创新地提出了仅使用四个 PIR 传感器的单节点阵列, 代替先前四动四静共八个 PIR 传感器, 极大降低探测成本的投入, 具有很高的实用价值及可靠性。

**关键词:** 轨迹预推; PIR; 单节点阵列; 测距测角;

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1026002

## Technology of forecasting target trajectory and location with PIR single node array

Lu Yun, Yang Wei, Zhao Junjiang, Zheng Jiansheng, Deng Liqi

(Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Key Lab of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Aiming at improving the PIR array's detectivity and perception, reducing the domain in detect cost, a PIR single node array was put forward to push the target trajectory. In order to simplify the structure, only four dual pyroelectric infrared sensors were used to compose a single node array. Meanwhile, when the PIR is in the stationary state, it can detect the direction of the movement and the distance from the target to the panel point. And when the PIR is in rotational state, it can detect the angle and time of the moving target. Then they can use these data to achieve the target trajectory only by a single node. After pushing a target's trajectory, it continues the detection to the target, and will get new data. Thus it can correct the trajectory step by step, which will increase the reliability of the trajectory pushing. Proved by experiment, this method breaks through the past multi-node localization and trajectory pushing. Meanwhile, instead of the previous eight PIR sensor-four dynamic four static, the author innovatively come up with the single node array just containing four PIR sensors, which greatly reduces the detect cost and has a very high practical value and reliability.

**Key words:** push the target trajectory; PIR; single node array; detect the distance and angle

收稿日期: 2016-02-25; 修订日期: 2016-03-13

作者简介: 卢云(1991-), 女, 硕士生, 主要从事电子科学技术方面的研究。Email: 805935195@qq.com

导师简介: 杨卫(1957-), 男, 研高工, 硕士生导师, 主要从事测试技术方面的研究。Email: yangwei@nuc.edu.cn

## 0 引言

热释电红外传感器是一种被动式感知传感器,是由于其探测目标及对目标定位不需要主动发射检测信号,仅靠接受物体对外辐射的红外信号,功耗低,能长期可靠工作,由于其不发射任何类型的辐射信号,不易被常规手段侦查到,隐蔽性好,所以在安全侦控领域得到大量应用。

比较先前有关利用 PIR 传感器实现对目标的轨迹预推和追踪技术的研究,文中针对单节点结构及单节点功能两个方面都做了很大改进和提升。在结构上,已往是由四路静态和四路动态,共八路 PIR 传感器组成动静相结合的单探测单元。若应用在网域环境下,如果网域内有 50 个节点,每个节点包含八路 PIR 传感器,那么一共需要四百个传感器,同时也会需要与传感器数目相对应的信号收集、处理及计算电路,数目之多,势必会增大网域监控的难度和资金、人力的投入,所以急需简化结构,因此文中提出仅用四路传感器替代已往八路传感器的单节点结构,便可满足轨迹预推的功能需求。在功能方面,先前的相关研究是需多个探测单元共同配合,彼此之间进行信息交汇,从而实现对目标的交叉定位及轨迹预推。这不仅要求感知需要多节点共同配合,而且对各节点间的一致性有极高要求,同时定位和预推轨迹算法复杂这就对软、硬件提出更高要求。文中以 PIR 单节点为基础,通过较简单算法,实现了对目标的轨迹预推和定位,极大提升了 PIR 单节点功能。

通过查阅相关外文文献,目前国外有关热释电红外传感器目标感知定位技术发展趋势主要有两大方向:一是利用红外热像仪等图像、视频采集系统进行图像信息采集,再经过相关复杂算法进行图像处理,最后提取目标,并对目标进行感知定位;二是使用无线热释电红外传感器网络技术,即利用配有菲涅尔透镜的 PIR 传感器阵列及无线通信等模块实现目标定位。由于配有菲涅尔透镜的 PIR 视场角较大,因此需要通过多传感器阵列对感知区域进行划分并编码,然后综合各传感器采集的电压信号对目标进行区域定位,同时传感器越多划分区域越小,定位精度越高。

与国外发展现状相比,文中创新性地提出了轨迹预推的概念,不仅能感知当前目标位置,还能预先

推测目标将出现的位置和运动轨迹,这对接下来进行目标的围捕、组织攻击等提供充足的时间准备;同时本文使用的双元热释电红外传感器具有响应速度快,体积小,成本低,功耗低等优点,使用传统的红外热像仪或摄像头等进行人体跟踪是准确的,但价格昂贵,并且由于无线传送图像,数据量非常大,数据传送成本及时间都耗费巨大;文中采用的是匹配红外透镜的 PIR 传感器进行目标信息采集,红外透镜具有视场角小,感知距离远的特点,相比菲涅尔透镜的视场角大,感知距离近的特点,各有优劣,但文中采用动态扫描的方法,实现零真空点的感知区域,这样即保留了红外透镜感知距离远的优点,也消除了视场角小的劣势。最重要的是文中实现了对目标的点定位,相比于区域定位,文中定位方法精度更高。

## 1 整体硬件结构的搭建

在以往相关资料的介绍中,单节点的硬件设计是由四路静态和四路动态,共八路 PIR 传感器组成(如图 1 所示)。为了简化硬件结构,文中利用四路传感

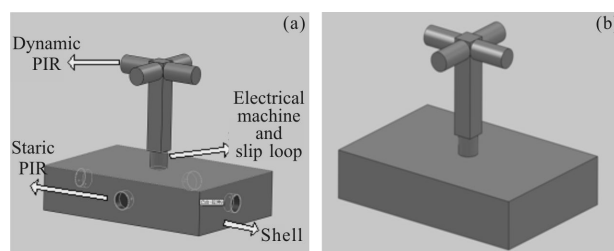


图 1 先前的硬件结构(a)与改进的硬件结构(b)对比图

Fig.1 Comparison figure of previous hardware structure (a) and improved the hardware structure (b)

器分时段进行动、静状态间相互转换的方式来实现先前八路传感器才能完成的数据采集功能。同时为了实现静态 PIR 能够探测目标运动方向的功能,文中选用的是可以利用波形形状判断目标运动方向的双元热释电红外传感器。在该单节点中,四路传感器彼此间呈  $90^\circ$  均匀分布在竖直探测轴顶部的四个侧面,在探测轴的正下方是滑环和电机,该节点实际构成示意图如图 2 所示,其中滑环的作用是解决探测轴转动时线路转动问题,而电机则是带动探测轴转动的驱动部件,最低端是一个空腔壳体,内部放置信号处理、时钟等电路板以及电子罗盘、GPS 和天线等,同时底部壳体还有保持机构稳定的作用。

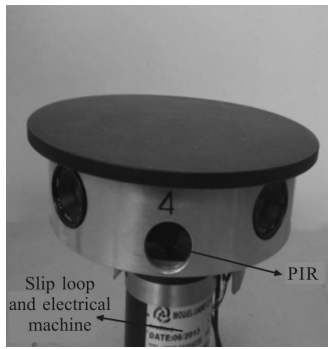


图 2 PIR 单感知节点实物图

Fig.2 Real picture of PIR perceptive single node array

## 2 硬件电路的设计

该设计整体需实现对目标的感知、对感知信号的处理、对目标数据的处理并通过无线模块进行结果的传输等,因此硬件电路应包括以下几部分:红外感知模块、模拟信号处理模块、数字电路模块、无线通信模块及电源模块,以上几个模块之间的逻辑关系如图 3 所示。

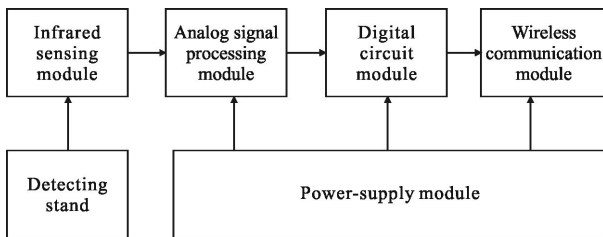


图 3 模块逻辑关系图

Fig.3 Logic diagram of module

热释电红外传感器探测到目标后输出的信号非常微弱,只有毫伏级,很容易被一些噪声干扰甚至淹没,因此模拟信号处理模块应有放大、去噪等功能的信号调理电路。数字电路模块主要是根据处理过的模拟信号进行帧差法,发现目标,并报出对应时间和角度,无线通信模块主要是实现和上位机联系的作用,在网域工作环境下,无线通讯模块还负责各节点间的信息通信。

## 3 方法原理介绍

### 3.1 工作过程介绍

为了更好地进行轨迹预推,首先利用内部的电子罗盘和 GPS 进行寻北并建立坐标,坐标建立之

后,驱动电机使 1# 传感器摆到坐标 Y 轴的方向,把 2# 传感器摆到坐标 X 轴的方向。当目标出现之前,PIR 阵列处于零点静止状态(如图 4 所示),当有目标通过任意一个静止的 PIR 感知线时,静态传感器进行红外测距测向,检测出目标距感知点的距离 EO (如图 5 所示),同时时钟从零开始计时,并根据传感器静态时测得目标运动方向,控制电机做与目标运动方向相反的转动,带动 PIR 阵列进行角速度不变的匀速转动,在转动过程中,不断对外界进行扫描,并通过帧差法判断是否发现目标,若发现目标,则计算目标被发现时的角度及时间,即利用动态 PIR 测角(如公式(1)~(8)所示),当目标被动态 PIR 感知两次时,即可利用数字电路模块通过特定算法(如公式(7)~(11)所示)推算出目标匀速直线运动的轨迹和速度,之后只需再发现一次便可推算出下一个轨迹,通过多次感知多次轨迹预推,能得出一条近似于实际轨迹的折线,并通过当前已知的折线轨迹拟合出一条直线,也就是最后预推目标的轨迹。然后通过无线模块将预推轨迹和目标运动速度传输给上位机。至此整个工作过程便完成。

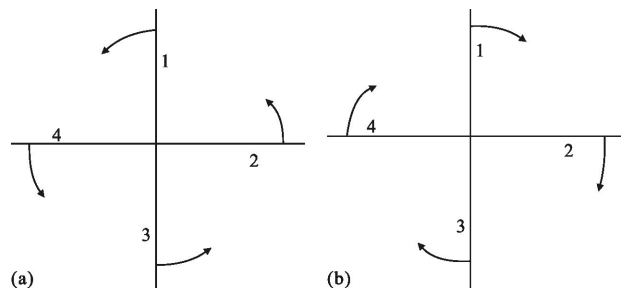


图 4 PIR 阵列由初始状态向逆时针和向顺时针转动示意图

Fig.4 Schematic diagram of PIR array rotating from the initial state to counter clockwise and to clockwise

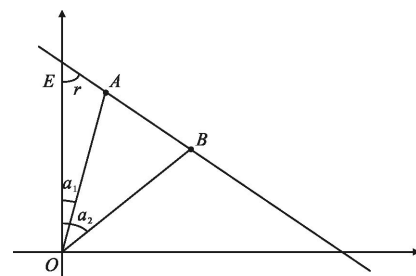


图 5 目标轨迹预推示意图

Fig.5 Target trajectory pushing schematic diagram

在以前的网域探测感知中,需要整个网域中的

各个节点进行协同工作,要求每个传感器需摆动同步,从而进行多节点的交叉定位。因此动态传感器做 90°的来回摆动,之所以不是转动,而是摆动是因为通过校准极限位置,及时对摆动角度进行修正,否则将出现越来越大的累计误差。但先前使用 90°摆动方法的弊端是不能在整个过程中一直保持匀速转动,因为有启动和停止的步骤,其中一定包括加速和减速的过程,因此若按匀速转动来计算角度必然会在误差。然而文中采用的单节点目标定位,对各节点的一致性没有特殊要求,不需要多个节点进行配合,也就不需要节点同步,因此每个节点可以进行 360°的循环转动,便可保持整个过程是匀速转动,增加了角度计算的精度。

经过已往大量实验可知,当传感器转动方向与目标运动方向相反时,目标被感知的波形幅值更大,更有利于发现目标。同时当转动方向与目标运动方向相反时,在相同时间内目标被感知的次数更多。因此文中根据 PIR 静态感知到的波形形状来判断目标运动方向,从而控制电机沿着目标运动相反方向转动。

### 3.2 感知目标角度计算

为了把传感器转动角度统一转化为坐标角度,需根据不同传感器编号和不同旋转方向进行特定的角度转化,以便统一计算算法,推算目标轨迹。

当 PIR 感知节点顺时针转动时,四个传感器发现目标后计算角度的公式分别是:

$$1\# \text{ 传感器: } \alpha = \omega \cdot t \quad (1)$$

$$2\# \text{ 传感器: } \alpha = 90 + \omega \cdot t \quad (2)$$

$$3\# \text{ 传感器: } \alpha = 180 + \omega \cdot t \quad (3)$$

$$4\# \text{ 传感器: } \alpha = -90 + \omega \cdot t \quad (4)$$

当 PIR 感知节点逆时针转动时,四个节点发现目标后计算角度的公式分别是:

$$1\# \text{ 传感器: } \alpha = -\omega \cdot t \quad (5)$$

$$2\# \text{ 传感器: } \alpha = 90 - \omega \cdot t \quad (6)$$

$$3\# \text{ 传感器: } \alpha = 180 - \omega \cdot t \quad (7)$$

$$4\# \text{ 传感器: } \alpha = 270 - \omega \cdot t \quad (8)$$

### 3.3 轨迹预推和目标定位

当目标入侵到该节点阵列的探测区时,首先被静态 PIR 探测到并测得据探测节点的距离  $OE$ (如图 5 所示),当动态 PIR 分别在  $A$  点和  $B$  点发现目标时,便可得到两组角度和时间的数据。并根据三角函数推导出该匀速直线运动的直线轨迹和速度的大小。

$$A = (\alpha_1, t_1)$$

$$B = (\alpha_2, t_2)$$

假设该目标做匀速直线运动,利用正弦定理可得:

$$\frac{EA}{\sin \alpha_1} = \frac{EO}{\sin(\pi - \gamma - \alpha_1)} = \frac{AO}{\sin \gamma} \quad (9)$$

$$\frac{EB}{\sin \alpha_2} = \frac{EO}{\sin(\pi - \gamma - \alpha_2)} = \frac{BO}{\sin \gamma} \quad (10)$$

式中:  $EA = Vt_1, EB = Vt_2$ 。代入公式(9)可得:

$$\frac{Vt_1}{\sin \alpha_1} = \frac{EO}{\sin(\pi - \gamma - \alpha_1)} \quad (11)$$

代入公式(10)可得:

$$\frac{Vt_2}{\sin \alpha_2} = \frac{EO}{\sin(\pi - \gamma - \alpha_2)} \quad (12)$$

由公式(11)、公式(12)可得:

$$\frac{t_1 \sin \alpha_2}{t_2 \sin \alpha_1} = \frac{\sin(\pi - \gamma - \alpha_2)}{\sin(\pi - \gamma - \alpha_1)} \quad (13)$$

由于  $t_1, t_2, \alpha_1, \alpha_2$  均已知,由此可算出方位角  $\gamma$  的值。

综上所述:通过静态传感器测得轨迹的纵截距(或者是横截距),并通过两个探测点算出方位角,便可得出该时段的近似运动轨迹。

将方位角  $\gamma$  的值及其他已知参数代入公式(11),可求出该物体在该时段的运动速度  $V$ 。至此便求出该匀速直线运动的所有物理量,因此可求出任意一个时刻目标所在位置,即实现目标的追踪和定位。

同理,假设在下一个时间段内依然做匀速直线运动,只要再发现一次目标,假设在  $C$  点( $t_3, \alpha_3$ ),利用上文  $B$  点及其坐标,便可推算出这个时段轨迹的方位角  $\gamma$ ,又由于已知上个时段的轨迹,便可求出  $B$  点距坐标原点的距离,便可推算出这个时间的运动轨迹、运动速度以及任意时刻的位置坐标。以后时刻便可依此类推。

## 4 实验验证

为了验证动态测角的灵敏度、静态测角的误差范围及轨迹预推的可施行性和准确性,有针对性地在室内、室外做了以下实验:

室内实验:对动态目标测角灵敏度的测试和对静态目标测角误差的测试。室内实验场景如图 6 所示。

室外实验:验证预推目标轨迹方法的可行性测试。



图 6 室内实验场景图

Fig.6 Indoor experiment scene graph

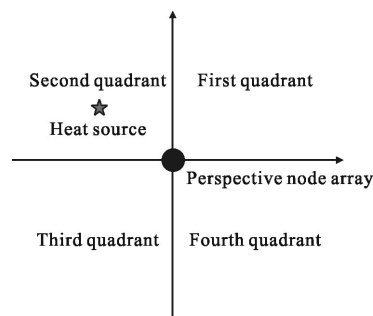


图 7 测角误差实验示意图

Fig.7 Experimental schematic diagram of angle measuring error

### 4.1 对动态目标测角灵敏度的测试实验

将该 PIR 单节点探测系统水平放置于桌面并将其启动,待系统运行稳定后,目标(人)以正常步速(1.1 m/s)匀速在感知区运动,当节点扫到目标 10 次,即感知目标 10 次后,查看并记录单节点感知系统控制端接受反馈角度的次数,并计算单节点反馈率,重复 10 次。由实验数据(表 1)可得出,PIR 单节点感知系统的反应灵敏度在 80%以上。

表 1 对动态目标测角灵敏度测试

Tab.1 Sensitive test of dynamic target angle

Route	Scan times	Feedback times	Reaction rate
1	10	8	80%
2	10	10	100%
3	10	9	90%
4	10	8	80%
5	10	9	90%
6	10	10	100%
7	10	10	100%
8	10	8	80%
9	10	8	80%
10	10	9	90%

### 4.2 对静态目标测角误差的测试实验

为了测试角度测量的误差范围,使用标准热源作为红外目标信号,如图 7 所示,将标准热源置于传感器不同象限的不同角度值上,查看并记录系统控制端反馈的角度值,验证上文中所阐述的测角算法并计算角度测量的误差值。每组实验重复 10 次,取最大误差值记入表 2。由实验结果(表 2)可以看出,文中所阐述的测角算法误差在 $\pm 2^\circ$ 以内。

表 2 对静态目标测角误差测试

Tab.2 Test of static target angle

	Exact angle	Feedback angle		Max error
		Clockwise	Anticlockwise	
First quadrant	13°	14°	13°	1°
	45°	45°	45°	0°
	67°	66°	68°	1°
	81°	80°	78°	2°
	103°	104°	104°	1°
Second quadrant	135°	134°	135°	1°
	157°	155°	156°	2°
	171°	173°	171°	2°
	193°	194°	193°	1°
Third quadrant	225°	225°	224°	1°
	247°	248°	247°	1°
	261°	262°	263°	2°
	283°	284°	284°	1°
	315°	315°	315°	0°
Fourth quadrant	337°	335°	337°	2°
	351°	351°	350°	1°

### 4.3 目标轨迹预推方法的可实施性验证实验

为了验证单节点预推轨迹的可行性,在室外做了验证实验,场景图如图 8 所示,将一个节点放置于一个相对广阔平坦的广场,启动节点电源,并与控制端进行无线连接,待系统运行稳定后,目标(人)沿特定轨迹,做匀速直线运动通过感知区,观察控制端随着采集数据的增多,反馈的折线轨迹以及拟合轨迹的变化,并保存最终轨迹结果。最后得到仿真后的轨迹如图 9 所示,虚线是利用感知点绘制出的折线轨迹,实线是最后通过拟合计算出的最终预推目标轨迹。经过与实际轨迹的对比,可知利用 PIR 单节点预推轨迹是可行的,具有很高的实用价值。



图 8 室外实验场景图

Fig.8 Outdoor experiments scene graph

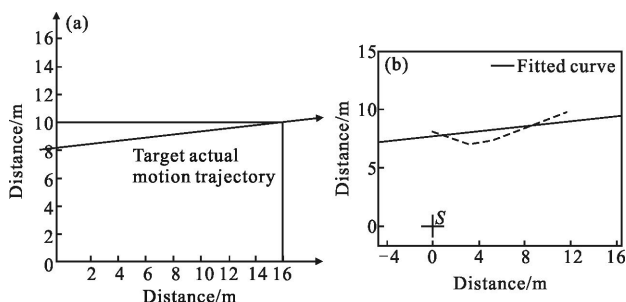


图 9 目标实际运动轨迹(a)和 PIR 单节点预推轨迹(b)

Fig.9 Actual motion trajectory(a) and PIR single node pushing trajectory (b)

分析造成预推轨迹误差的原因:第一,由于目标(人)步速不能完全保持匀速;第二,PIR 传感器测距、测角存在误差。

### 5 结论

该文利用传感器动态、静态相转化的方法,极大减少了单节点内 PIR 传感器数量,因此减少网域探测成本的投入,并且通过特殊算法实现单节点目标追踪,提高单节的感知能力。最后经试验证明该探测方法是可行的,同时在动态测角过程中有较高的灵敏度和探测精度,满足对目标探测及预推轨迹的要求,因此在网域和单个使用上都具有很高的实用价值。

### 参考文献:

[1] Sun Qiao, Yang Wei, Yu Haiyang, et al. New target location method on dynamic pyroelectric infrared sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2288-2292. (in Chinese)  
孙乔, 杨卫, 于海洋, 等. 动态下热释电红外传感器的目标定位方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2288-2292.

[2] Hou Shuang, Yang Wei, Liu Qianjin. Target localization method with dynamic and static combination of PIR [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015, 26(2): 315-319.

(in Chinese)  
侯爽, 杨卫, 刘前进. 一种动静 PIR 相结合的目标定位方法[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(2): 315-319.

[3] Huang Jianwei, Wang Changming. An improved direction-finding cross-location method [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2008, 24(4): 51-53.

[4] Li Boya, Li Fangmin, Liu Xinhua, et al. Design and implementation of single target tracking system based on PIR sensor [J]. *Journal of Sensor Technology*, 2014, 27(9): 1214-1220. (in Chinese)  
李博雅, 李方敏, 刘新华, 等. 基于 PIR 传感器的单目标跟踪系统设计与实现 [J]. *传感器技术学报*, 2014, 27(9): 1214-1220.

[5] Yi Jinqiao, Huang Yong, Liao Honghua, et al. Pyroelectric infrared sensor and its application in people counting system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1186-1192. (in Chinese)  
易金桥, 黄勇, 廖红华, 等. 热释电红外传感器及其在人员技术系统中的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1186-1192.

[6] Yang Wei, Zhao Di, Liu Qianjin, et al. Moving targets' perception of static and dynamic double coordinate detection system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 279-283. (in Chinese)  
杨卫, 赵迪, 刘前进, 等. 针对运动目标感知的双坐标探测系统[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 279-283.

[7] Hu Ning, Wu Hua, Wang Xing, et al. Analysis of the optimization and coordination of two machine cross position error and configuration distance [J]. *Fire and Command Control*, 2013, 38(1): 40-44. (in Chinese)  
胡宁, 吴华, 王星, 等. 双机交叉定位误差及配置距离最优优化协调分析[J]. *火力与指挥控制*, 2013, 38(1): 40-44.

[8] Zhao Di, Yang Wei, Liu Qianjin. Multiple target localization with multinode of PIR[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1284-1288. (in Chinese)  
赵迪, 杨卫, 刘前进. PIR 的多节点目标多次定位研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4): 1284-1288.

[9] Yang Bo, Li Xiaoshan, Luo Jing. A novel multi-human location method for distributed binary pyroelectric infrared sensor tracking system: region partition using PNN and bearing-crossing location[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 8(6): 35-43.

[10] Xiong Ji, Li Fangmin, Zhao Ning. Tracking and recognition of multiple human targets moving in a wireless pyroelectric infrared sensor network[J]. *Sensors*, 2014, 8(14): 7209-7228.

[11] Jung Yun Sik, Lee Sang Suk, Rho Shin Baek. A study on the target tracking algorithm based on the target size estimation [J]. *Journal of Institute of Control Robotics and Systems*, 2014, 5(20): 1-29.