

# 基于粒子群算法的动态热释电目标跟踪

王泽兵 杨 卫 秦 丽

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

**摘要** 热释电传感器用于红外目标跟踪, 可以通过光学调制探测到运动目标的相对方向, 而不能确定其准确距离, 对此提出一种群智能搜索的动态热释电跟踪方法。传感器在摆动状态下感知红外目标, 发现目标时, 记录其探测角, 通过分析探测角序列与运动目标轨迹离散点在极坐标系下的关系, 将目标轨迹的确定转化为极径序列的确定, 然后建立关于极径序列的多维粒子群空间, 并构造评价粒子优劣的适应度函数, 实现了运动目标轨迹的跟踪。该方法扩大了热释电探测范围, 提高了目标跟踪精度, 通过人体目标直线、曲线运动跟踪实验得出平均定位误差不超过 0.4 m, 表明方法有效。

**关键词** 探测器; 热释电传感器; 动态; 探测角; 粒子群; 跟踪

**中图分类号** TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1004001

## Target Tracking Based on Particle Swarm Optimization Using Dynamic Pyroelectric Infrared Sensor

Wang Zebing Yang Wei Qin Li

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi, 030051, China)

**Abstract** In infrared target tracking, the pyroelectric infrared (PIR) sensor can detect the relative direction of a thermal moving target through optical modulation, but cannot get its accurate distance. For this, a swarm intelligence search approach is proposed. At the swing state, PIR can feel the moving target, at the same time, the detection angle is recorded. By analyzing the relationship between the detection angle sequence and the discrete points of moving target trajectory in polar coordinates, finding that the target trace is determined by the polar radius sequence. Multi-dimensional polar diameter particle swarm optimization space is established. Meanwhile, a fitness function to evaluate the particle's merits is proposed. The target trajectory can be obtained. The proposed method is an effective solution to enlarge the detection range and improve the accuracy of target tracking. Human body's tracking experiment is performed. The average localization error is not more than 0.4 m. The findings demonstrate the effectiveness of the method.

**Key words** detectors; pyroelectric infrared sensor; dynamic; detection angle; particle swarm optimization; tracking

**OCIS codes** 040.1240; 040.1880; 040.3060; 230.0040

## 1 引 言

红外目标检测与跟踪是智能监控领域的关键技术, 在军事、医疗、安防以及监护等领域有着广泛的应用价值。热释电红外(PIR)传感器以非接触形式检测环境中红外辐射的变化, 对人体运动具有非常高的敏感度, 并且具有成本低、隐蔽性强和技术性

能稳定等优点, 因此基于 PIR 的定位与轨迹获取技术受到关注。

现有文献大都是通过光学调制, 采用多个静态热释电传感器, 对平面几何空间进行切割划分、编码, 当目标运动时, CPU 通过各传感器输出的开关信号来判断目标位置, 文献[1-2]在此基础上使用

**收稿日期**: 2014-04-22; **收到修改稿日期**: 2014-05-29

**基金项目**: 国家 863 计划(011AA040404)、国家自然科学基金(60871041)、山西省回国留学人员科研资助项目(2013-077)

**作者简介**: 王泽兵(1972—), 男, 博士, 讲师, 主要从事传感器网络目标定位及群体智能等方面的研究。

E-mail: wangzebing@nuc.edu.cn

多个传感器系统协作实现了较高精度的目标定位。文献[3-5]是将单节点中多个热释电传感器的可见区域进行环形调制编码,并利用相邻的多个节点相互协作实现了目标定位。这些定位方法只能对小范围区域的运动目标进行定位,且需要的热释电数量较多,体积较大。

徐薇等<sup>[6]</sup>提出基于动态热释电感知定位的方案,减少了节点设计中的传感器数量,缩小了传感器体积。文献[6]使用4个红外传感器实现了360°全方位覆盖监测,文献[7]通过研究影响探测距离的因素,经过改进,提高了静态热释电红外传感器对目标(行人)的探测距离,文献[8]采用测向测距的方法对目标进行定位,测距依靠经验值获取,但受天气状况及目标(行人)影响因素较大,定位精度不高。文献[9]根据4次发现目标的时间差,结合人体一般运动特征实现了直线轨迹的定位,而对曲线运动的目标定位未能解决。

本文综合分析探测角序列与运动目标轨迹离散点的关系,经极坐标形式表示后,发现目标轨迹的确定可转化为极径序列的确定,通过建立极径序列的

多维粒子群空间,有效利用了更多的测量数据,通过粒子群优化搜索不仅实现了人体目标直线的定位,而且解决了曲线运动下的跟踪定位,以下分别介绍系统感知定位原理、基于粒子群的系统模型,然后通过实验数据加以验证。

## 2 热释电感知定位原理

### 2.1 传统静态定位方法

传统方法采用多个热释电传感器对平面几何空间进行切割划分、编码,当目标运动时,中央处理器(CPU)可以获取各传感器输出的开关信号(0或者1),以此来判断目标位置。如图1所示,图1(a)为PIR传感器结构,装有多个此类传感器的阵列布局如图1(b)所示,每个热释电传感器检测一定区域,将感知区域进行编码(有目标进入则输出1,否则为0)。文献[1]在此基础上通过传感器协作能够获取高精度的目标位置信息,需要的传感器数量较多,感知范围不超过10 m。

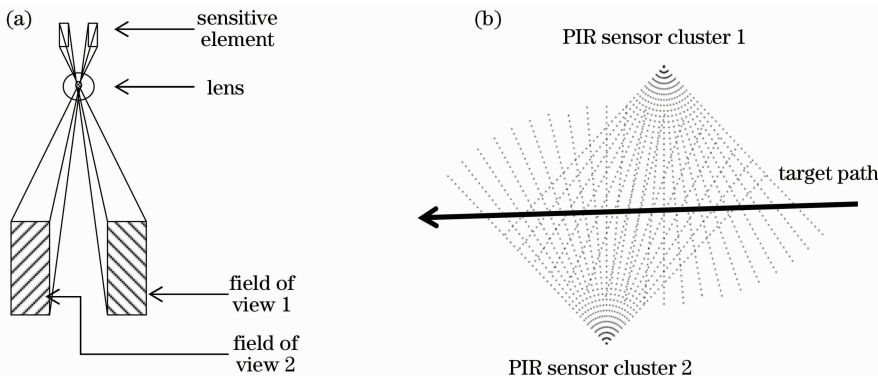


图1 热释电感知定位原理。(a) PIR传感器结构;(b)布局及定位原理

Fig. 1 PIR perception and localization principle. (a) PIR sensor internal structure; (b) layout and localization principle

### 2.2 动态定位方法

如图2所示,系统由多个节点组成网络,其中单节点由正交分布的4只红外传感器阵列构成,功能模块如图3所示。在转台模块驱动下,每个传感器都在90°范围内匀速往返摆动,分别对4个象限内的红外信号进行采集,输出信号经过调制、处理等过程,通过无线模块将目标方位角信息进行融合处理,通过模型实现目标轨迹跟踪定位。

节点设计中选用双元红外热释电传感器,它由两个敏感元件通过反极性串联或并联(较少)方式组成,可以抵消近环境背景热源的干扰,也可以减小相对静止热源的外部干扰,如图4所示,当无目标进

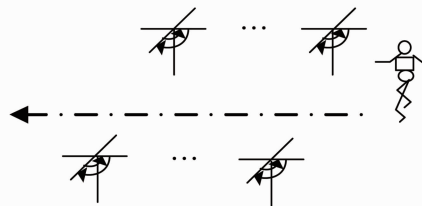


图2 热释电传感器网络

Fig. 2 PIR sensor network

入时,传感器输出信号基本上呈直线状态,否则会输出类正弦信号,系统发现目标。光学部分选用红外透镜,其红外光透射率大大高于菲涅耳透镜,探测距离也较菲涅耳透镜更远,可达50 m,探测角度仅为3°,缩小了红外目标方位角信息的误差<sup>[9]</sup>。

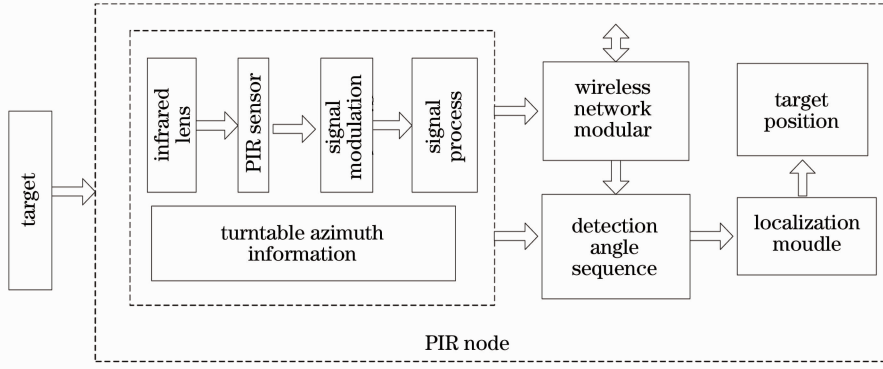


图3 单节点功能模块

Fig. 3 Single node functional module

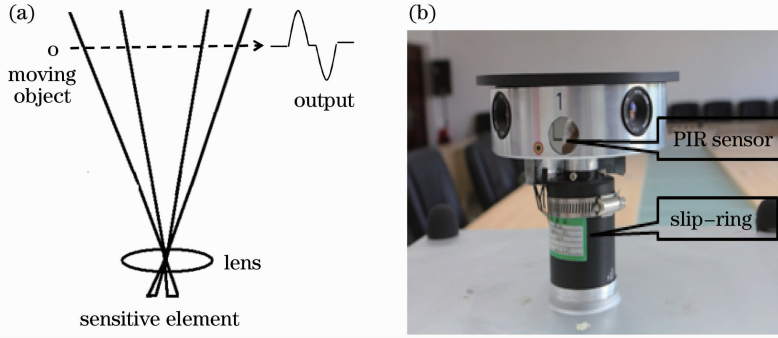


图4 热释电传感器。(a)探测原理;(b)实物图

Fig. 4 PIR sensor. (a) Principle; (b) physical diagram

### 3 系统跟踪理论模型

#### 3.1 目标轨迹的极径序列表示

假设监测群体  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$  共有  $N$  个节点,  $x_{S_i} \in R^2$  表示节点  $S_i (i = 1, 2, \dots, N)$  的位置, 每个节点性能相同, 网络传输没有延迟, 即当一个节点发现目标时, 群体内其他节点能够马上得到其探

测信息。 $S_{ij}$  表示节点  $S_i (i = 1, 2, \dots, N)$  的第  $j (j = 1, 2, 3, 4)$  个传感器,  $t$  时刻发现目标时的角度记为探测角  $\theta_{ij}(t)$ , 以  $S_{ij}$  为起点, 在最大感知距离  $r$  内  $\theta_{ij}(t)$  方向上的线段定义为  $S_{ij}$  的探测线, 其极坐标表示为

$$l_{ij}(t) = \{x \mid x = x_{S_{ij}} + \rho \{\cos[\theta_{ij}(t)], \sin[\theta_{ij}(t)]\}, 0 \leq \rho \leq r\}. \quad (1)$$

假设系统监测过程中发现目标  $D$  次, 得到  $D$  个探测角, 其输出结果表示为

$$S_O = \{[t_1, \theta_{i_1 j_1}(t_1)], [t_2, \theta_{i_2 j_2}(t_2)], \dots, [t_k, \theta_{i_k j_k}(t_k)], \dots, [t_D, \theta_{i_D j_D}(t_D)]\}. \quad (2)$$

对应探测线序列为  $l_{i_1 j_1}(t_1), l_{i_2 j_2}(t_2), \dots, l_{i_k j_k}(t_k), \dots, l_{i_D j_D}(t_D)$ , 其中  $i_k = 1, 2, 3, \dots, N, j_k = 1, 2, 3, 4, t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq \dots \leq t_{D-1} \leq t_D$ .

假设目标轨迹为  $x_T(t)$ , 它在探测线序列上的点列为  $P_1, P_2, \dots, P_k, \dots, P_D$ , 即  $x_T(t_k) = P_k \in l_{i_k j_k} (k = 1, 2, \dots, D)$ , 满足

$$\begin{cases} x_T(t_1) = x_{S_{i_1 j_1}} + \rho_1 r \{\cos[\theta_{i_1 j_1}(t_1)], \sin[\theta_{i_1 j_1}(t_1)]\}, & 0 \leq \rho_1 \leq 1 \\ x_T(t_2) = x_{S_{i_2 j_2}} + \rho_2 r \{\cos[\theta_{i_2 j_2}(t_2)], \sin[\theta_{i_2 j_2}(t_2)]\}, & 0 \leq \rho_2 \leq 1 \\ \vdots \\ x_T(t_M) = x_{S_{i_D j_D}} + \rho_D r \{\cos[\theta_{i_D j_D}(t_D)], \sin[\theta_{i_D j_D}(t_D)]\}, & 0 \leq \rho_D \leq 1 \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $\rho_k (k = 1, 2, \dots, D)$  为点  $P_k$  的位置参数, 决定  $P_k$  在方向  $\theta_{ij}(t)$  上的径向距离, 即极径。由(3)式可知, 若

能确定极径序列,就可以得到目标轨迹。

### 3.2 基于极径序列的粒子群目标跟踪模型

粒子群优化算法(PSO)最早是在1995年由美国社会心理学家 Kennedy 和电气工程师 Eberhart 共同提出的,是对鸟群觅食过程中的迁徙和聚集行为的模拟,算法实现方便、收敛速度快、参数设置少,是一种高效的搜索寻优算法<sup>[10-11]</sup>,已经成功地应用于红外目标检测与定位等领域<sup>[12-13]</sup>。

PSO 算法将每个个体看成  $D$  维空间中的一个随机粒子,每个粒子具有位置和速度两个特征,还有一个衡量每个粒子优劣的适应值,其大小由适应度函数决定,粒子通过个体经验及社会经验不断地

调整自己的位置,实现群体的迭代寻优。

针对人体目标运动点列  $P_1, P_2, \dots, P_D$ , 即  $x = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_D) \in [0, 1]^D$  的求解,构造  $D$  维空间解的搜索问题。

#### 1) 适应度函数构造

取上述  $D$  维空间内任意一点  $x$ , 对应唯一的点列  $P_1, P_2, \dots, P_D$ , 经过插值计算,能够得到一条目标行进的估计路径  $x_T(t)$ , 若被点列分割的每一段估计路径的长度都与目标实际走过的距离相等,并且估计路径总体平滑,则估计路径与实际路径重合度较好,如此可以构造函数为

$$\begin{aligned} \min f(x) &= \lambda_{f1} f_{\text{dis}}(x) + \lambda_{f2} f_{\text{cor}}(x), \\ f_{\text{dis}}(x) &= \sum_{k=1}^{D-1} \lambda_{dk} \exp \left[ \text{abs} \left( \| P_k P_{k+1} \| - \int_{t_k}^{t_{k+1}} v_T dt \right) \right] - (D-1), \\ \| P_k P_{k+1} \| &= \int_{t_k}^{t_{k+1}} \sqrt{[x_T(t)(1)]^2 + [x_T(t)(2)]^2} dt, \quad k = 1, 2, \dots, D-1, \\ f_{\text{cor}}(x) &= \sum_{k=1}^{D-2} \lambda_{ck} \exp \{ \text{abs} [ f_{\text{ang}}(\overrightarrow{P_{k+1} P_{k+2}} - \overrightarrow{P_k P_{k+1}}) ] \} - (D-2), \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq \dots \leq t_{D-1} \leq t_D$ ,  $x = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_D) \in [0, 1]^D$ ,  $v_T$  为目标速度,  $x_T(t)(1)$ ,  $x_T(t)(2)$  为  $x_T(t)$  点的横纵坐标,  $\lambda_{f1}$ ,  $\lambda_{f2}$ ,  $\lambda_{dk}$ ,  $\lambda_{ck}$  为权系数。

$f_{\text{dis}}(x)$  约束点列各段路径长度与目标行进距离的差别,差别越大  $f_{\text{dis}}(x)$  值越大,当各段长度与目标路径长度相等时,  $f_{\text{dis}}(x) = 0$ 。

函数  $f_{\text{cor}}(x)$  的引入是考虑到目标行进中短时间内不反复做大幅度方向转换的情况,衡量目标行进点列  $P_1, P_2, \dots, P_D$  连接所成折线的总弧度,  $f_{\text{cor}}(x) \geq 0$ ,  $f_{\text{cor}}(x)$  值越小,路径越平滑,特别情况下当点列共线时,  $f_{\text{cor}}(x) = 0$ 。

适应度函数  $f(x)$  值越小,点列  $P_1, P_2, \dots, P_D$  与目标轨迹重合度越好,则插值后所得  $x_T(t)$  越接近目标轨迹。

对于约束条件  $\rho_k \in [0, 1]$ , ( $k = 1, 2, \dots, D$ ), 构造罚函数:

$$\begin{aligned} g(x) &= \sum_{k=1}^D \lambda_{gk} \mu(\rho_k), \\ \mu(\rho_k) &= \begin{cases} 1, & \rho_k \notin [0, 1] \\ 0, & \rho_k \in [0, 1] \end{cases}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $\lambda_{gk}$  为一足够大的常数,若  $\rho_k \in [0, 1]$  时,则  $g(x) = 0$ , 若  $\rho_k \notin [0, 1]$  时,  $g(x)$  函数值急增, 对非

可行域的点给予极大的惩罚,从而将解的搜索范围约束在可行域内。

由此将约束优化问题转化为无约束优化问题:

$$\min F(x) = f(x) + g(x). \quad (6)$$

#### 2) 粒子构造及进化方程

在  $D$  维空间中,假设第  $t$  代群体中第  $j$  个粒子的位置及速度分别为

$$\begin{aligned} x_j(t) &= [x_{j1}(t), x_{j2}(t), \dots, x_{jD}(t)] \in [0, 1]^D, \\ v_j(t) &= [v_{j1}(t), v_{j2}(t), \dots, v_{jD}(t)] \in [0, 1]^D, \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $x_{jk}(t)$ ,  $v_{jk}(t)$  ( $k = 1, 2, \dots, D$ ) 分别为粒子  $j$  的位置及速度分量。

粒子  $j$  的进化方程为

$$\begin{aligned} x_j(t+1) &= x_j(t) + v_j(t), \\ v_j(t+1) &= \omega v_j(t) + c_1 r_1 [p_j(t) - x_j(t)] + c_2 r_2 [p_g(t) - x_j(t)], \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $\omega$  为惯性权重,  $c_1$  为个体认知系数,  $c_2$  为社会认知系数,  $r_1, r_2$  为随机数,  $p_j(t)$  为个体历史最优位置,表示粒子  $j$  在前  $t$  代搜索到的最优位置,其更新规则为

$$p_j(t) = \begin{cases} p_j(t-1), & f[p_j(t)] > f[p_j(t-1)] \\ x_j(t), & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

式中  $p_g(t)$  为群体历史最优位置,表示群体历史搜索到的最优位置,其更新规则为

$$p_g(t) = \operatorname{argmin}\{f(p_j(t)) \mid j = 1, 2, \dots, n\}, \quad (10)$$

式中  $n$  表示粒子个数。

## 4 实验

如图 5 所示,采用无缝全覆盖的方式布局 9 个节点,每个节点覆盖半径 10 m 的圆域,并以节点  $S_1$  为基准确定节点位置坐标,传感器  $S_j$  初始探测角为:  $\theta_{i1}(0) = 0, \theta_{i2}(0) = \pi/2, \theta_{i3}(0) = \pi, \theta_{i4}(0) = 3\pi/2, i = 1, 2, \dots, 9, j = 1, 2, 3, 4$ ,其旋转角速度设为  $\omega = (\pi/18)/s$ ,为了验证该红外目标跟踪新方案,分别选取两条路径让受试人员通过感知区域,直线路径:起点  $x_T(0) = (-10, -10)$ ,入侵角  $\alpha_T = \pi/3$ ;

曲线路径:起点为  $(-15, -5)$ ,变化方向角为  $\pi/6 + \sin[(t/10)/15]$ ,行走速度  $v = 1 \text{ m/s}$ ,经过多次实验,处理后数据如表 1 所示。

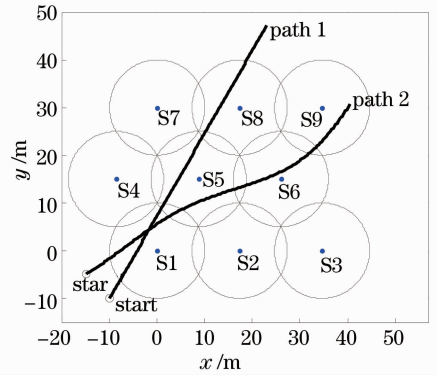


图 5 实验布局图

Fig. 5 Experimental layout

表 1 目标跟踪探测数据

Table 1 Target tracking detection data

Trajectory	Detection number	Detection angle /rad	Time /s	Node position $x$ /m	Node position $y$ /m
Line	1	1.3265	25.6000	0	0
	2	1.2566	28.8000	0	0
	3	0.2793	34.4000	-8.66	15
	4	0.4189	38.4000	-8.66	15
	5	1.3265	43.6000	8.66	15
	6	1.2566	46.8000	8.66	15
	7	1.3265	61.6000	17.32	30
	8	1.2566	64.8000	17.32	30
Curve	1	1.0472	24.0000	0	0
	2	0.7679	31.6000	0	0
	3	0.0349	44.8000	8.66	15
	4	1.1868	47.2000	25.98	15
	5	0.9076	48.8000	25.98	15
	6	0.8378	49.2000	25.98	15
	7	0.7679	58.4000	25.98	15
	8	0.7330	58.8000	25.98	15
	9	0.4189	69.6000	34.64	30

### 4.1 直线跟踪定位

粒子群搜索空间维数为 8,种群规模为 30,最大迭代次数为 200,个体学习因子及社会学习因子为  $c_1 = c_2 = 2$ ,惯性因子  $\omega = 0.6$ ,粒子的最大飞翔速度  $v_{\max} = 0.2$ ,适应度函数中,  $\lambda_{f1} = \lambda_{f2} = 0.5, \lambda_{dk} = \lambda_{ck} = 1, \lambda_{gk} = 100$ 。令粒子群搜索所得目标轨迹记为  $\hat{x}_T(t)$ ,实际轨迹为  $x_T(t)$ ,目标的计算位置与实际位置的距离为目标的定位误差,记为  $e(t) = \|\hat{x}_T(t) - x_T(t)\|$ ,经过 50 次运算,算法平均运行时间为 4.962063 s,群体平均最优位置为  $p_g(t) = [0.61414 \ 0.77317 \ 0.83852 \ 0.98309 \ 0.64734$

0.79855 0.69119 0.84224],最大定位误差为 0.34455 m,图 6、7 为定位结果及误差曲线。

### 4.2 曲线行走跟踪

搜索空间维数为 9,其他参数设置同直线定位设置相同,经过 50 次运算,得到平均运行时间为 5.357375 s,群体平均最优位置为  $p_g(t) = [0.49569 \ 0.83108 \ 0.79414 \ 0.09159 \ 0.1538 \ 0.18852 \ 0.64787 \ 0.70668 \ 0.42657]$ ,最大定位误差为 0.3973 m,比直线跟踪效果稍差,图 8、9 分别为定位结果及误差曲线。

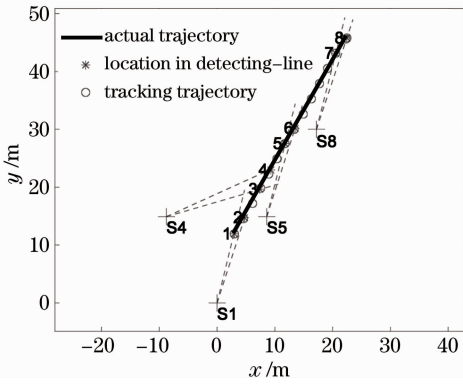


图 6 目标经过 8 条探测线

Fig. 6 Moving target through 8 detecting lines

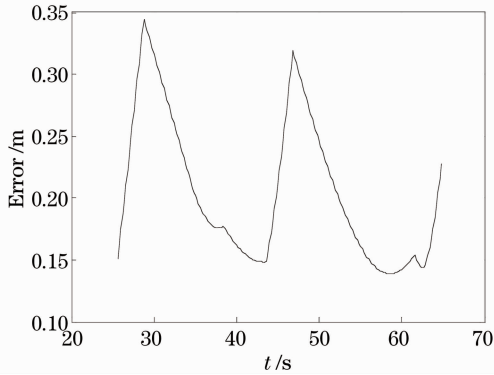


图 7 目标定位误差曲线

Fig. 7 Graph of target tracking error

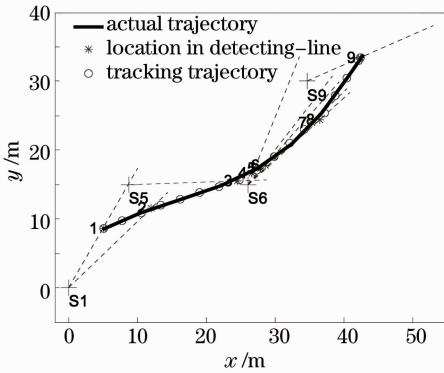


图 8 目标曲线跟踪结果

Fig. 8 Tracking result of target moving in curve

### 4.3 与其他红外定位方法比较

基于红外热释电技术的目标跟踪定位方法可以分为静态和动态两类,文献[1,4]采用了静态方法,定位精度较高,文献[1]定位误差小于 1.2 m,文献[4]定位误差达到了 0.45 m,但静态定位中,传感器用量较多,节点设计复杂,定位区域范围小,文献[1]最大定位距离不超过 12 m,文献[4]仅做了 3 m 范围内的直线与折线定位。文献[8]采用了动态方法,结构简单,传感器数量少,但定位误差大,定位效

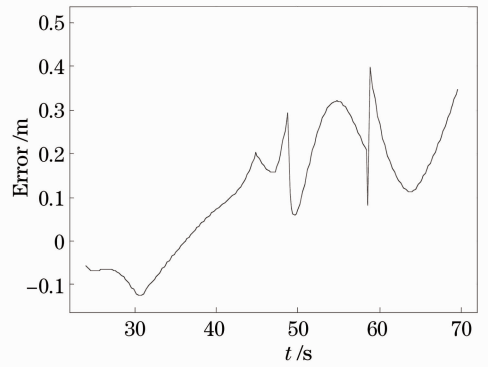


图 9 目标跟踪误差曲线

Fig. 9 Graph of target tracking error

率较低,不能满足需求。

本文将群体智能方法引入动态热释电目标跟踪,实现了 50 m 范围内人体目标的跟踪定位,定位精度高,直线定位误差为 0.34455 m 曲线定位误差为 0.3973 m,而且设计中传感器用量少,节点设计简单。不足之处是仅考虑了做匀速或近似匀速运动目标的跟踪,速度变化剧烈的目标定位有待进一步研究。

## 5 结 论

本文方法与静态感知定位方法相比减少了单节点设计中的传感器用量,利用少量传感器动态扫描实现了大范围内较高精度的人体目标定位,在多节点全方位大范围动态热释电感知情况下,获取目标探测角序列,通过粒子群搜索定位算法,实现了速率变化不大的人体目标的定位跟踪,系统搜索速度快、稳健性好、定位精度较高,避免了采用测向测距定位法时测距受环境温度、阳光等方面的影响。该方法为动态热释电目标定位提供了一种新的思路,同时也为以纯方位角定位的相关领域提供参考。下一步工作将对粒子群算法中适应度函数插值及轨迹评估进行研究,以期提高算法速度及目标跟踪精度。

## 参 考 文 献

- 1 Q Hao, D J Brady, B D Guenther, *et al.*. Human tracking with wireless distributed pyroelectric sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(6): 1683-1696.
- 2 M Shankar, J B Burchett, Q Hao, *et al.*. Human-tracking system using pyroelectric infrared detectors [J]. Opt Eng, 2006, 45(10): 106401.
- 3 Huang Xin. Design and Implementation of Pyroelectric Infrared Wireless Sensor Network Human Positioning System [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2009.  
黄鑫. 热释电红外无线传感器网络人体定位系统设计与实现 [D]. 广州: 中山大学, 2009.
- 4 Shen Baihua, Luo Xiaomu, Wang Guoli, *et al.*. An approach for

- motion detecting and localization using pyroelectric infrared sensor [J]. *J Optoelectronics·Laser*, 2010, 21(9): 1350-1354.  
 申柏华, 罗晓牧, 王国利, 等. 运动检测与定位的热释电红外传感新方法[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(9): 1350-1354.
- 5 Xiao Jia, Yang Bo. Target localization based on pyroelectric infrared sensing technology [J]. *Infrared*, 2011, 32(12): 17-22.  
 肖佳, 杨波. 基于热释电红外传感技术的目标定位研究[J]. *红外*, 2011, 32(12): 17-22.
- 6 Xu Wei, Yang Wei. Research on detection method of infrared sensor array [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 28(9): 16-18.  
 徐薇, 杨卫. 一种红外传感器阵列探测方法的研究[J]. *传感器与微系统*, 2009, 28(9): 16-18.
- 7 Zhang Ye, Yang Wei, Yue Yuan, *et al.*. Influencing factors research of detection range on pyroelectric infrared sensor [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2010, 29(6): 448-451.  
 张晔, 杨卫, 岳元, 等. 基于热释电红外传感器探测距离影响因素的研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(6): 448-451.
- 8 Sun Qiao, Yang Wei, Yu Haiyang, *et al.*. New target location method based on dynamic pyroelectric infrared sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2288-2292.  
 孙乔, 杨卫, 于海洋, 等. 动态下红外热释电传感器的目标定位方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2288-2292.
- 9 Sun Qiao, Yang Wei, Zhang Wendong, *et al.*. Research on target tracking based on dynamic pyroelectric infrared sensor network [J]. *J Optoelectronics·Laser*, 2013, 24(12): 2399-2403.  
 孙乔, 杨卫, 张文栋, 等. 动态热释电传感器网络目标跟踪技术研究[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(12): 2399-2403.
- 10 J Kennedy, R C Eberhart. Particle swarm optimization [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 1995. 1942-1948.
- 11 R C Eberhart, J Kennedy. New optimizer using particle swarm theory [C]. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1995. 39-43.
- 12 Gong Fang, Zhang Xuewu, Sun Hao. Detection system for solar module surface defects based on constrained ICA model and PSO method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0415002.  
 龚芳, 张学武, 孙浩. 基于独立分量分析和粒子群算法的太阳能电池表面缺陷红外热成像检测[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0415002.
- 13 Zhang Wenming, Wang Xin, Zhang Qiang, *et al.*. Positioning algorithm in multi-media refractive imaging system based on particle swarm optimization calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0515001.  
 张文明, 王鑫, 张强, 等. 基于粒子群标定的多介质折射成像定位算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0515001.

栏目编辑：何卓铭