针对运动目标感知的动静态双坐标探测系统

杨 卫[1,2],赵 迪[1,2],刘前进[1,2]

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051;
2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室,山西 太原 030051)

摘 要: 在被动式红外检测的条件下,针对动态目标探测的可靠性及军事防卫需求,提出了一种动/静态双坐标感知探测系统。静态感知系统是一个标准的二维坐标体系,也是运动目标检测的基准;动坐标感知系统是在水平面内以恒定的角速度在 90°范围内来回摆动的十字坐标系统, 该系统的提出解决了传统热释电红外传感器探测感知距离与视场角成反比的矛盾,实现了全方位战场态势感知的功能。文中建立了感知系统的理论模型和数学模型。经实验验证,该理论切实可行,构建的感知系统稳定可靠,具有一定的实际应用价值。

关键词: 运动目标; 红外检测; 动/静双坐标体系; 理论模型; 探测系统

中图分类号: TN212.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0279-05

Moving targets′ perception of static and dynamic double coordinate detection system

Yang Wei[1,2], Zhao Di[1,2], Liu Qianjin[1,2]

(1. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In the passive infrared detection conditions, according to the dynamic target detection reliability and military defense needs, a dynamic/static double coordinate sensing system was put forward in this paper. Static sensing system was not only a standard-two-dimensional coordinate system, but also a benchmark of moving target detection; and moving coordinate sensing system was a cross coordinate system in the horizontal plane, swinging back and forth in the range of 90° at a constant angular speed. So the proposed system solved the problem of pyroelectric infrared sensor that perceived distance was inversely proportional to the angle of field contradictions, and it realized full range perception of battlefield. A theoretical model and mathematical model of perception system was presented. Verified by experiment, the theory, which has a certain practical value, is practicable, and the system established is reliable.

Key words: moving targe; infrared detection; dynamic/static double coordinate system; theoretical model; detection system

收稿日期: 2013-04-15; **修订日期:** 2013-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(50675213)

作者简介: 杨卫(1957-),男,教授,主要从事微系统集成、MEMS、微惯性器件等方面的研究。Email:yangwei@nuc.edu.cn

0 引 言

在现代军事应用中，高技术战争及新型军事装备的发展对军事侦察和值守的水平提出了越来越高的要求，尤其对敌方目标的探测，成为满足先敌开火，首发命中的前提条件[1]，感知系统是武器单元探测及其自主识别的核心部分。对运动目标的探测方法一般有雷达探测，光电探测。光电探测跟踪测量精度高，抗电磁干扰能力强，隐蔽性好。但是全天候工作能力不如雷达，受大气传输影响严重，作用距离不如雷达[2]。光电探测方法在军事领域起到重要的作用，目前在军事车辆火控系统中应用较广泛。光电探测技术有红外探测技术[3]，激光探测技术和光电综合探测技术。红外探测对运动目标定位的信号源具有低功耗，低数据量和低信道资源消耗，适用于无人小车在野外作战、防卫长期监控且能量有限的工作条件。在红外检测中，对运动目标的定位方法有应用监控区域分割与相交细化[4]。此种定位方法局限于人体定位。

红外探测系统中红外夜视仪和热像仪发展成熟，热释电的探测受传感器物理特性的限制应用不完善[5]。文中基于热释电传感器的使用，解决对动态目标距离和全方位的探测，满足在条件有限的野外作战时，实现长时间值守的问题，提高全系统对动态目标的定位标准，提出了一种小型动/静态双坐标感知系统。静态感知系统是一个标准的二维坐标体系，作为感知系统的一部分，动态感知系统是针对静态感知系统无法完成全范围探测提出。检测方法集合了先检测后跟踪方法和直接检测目标方法。

1 感知系统原理

动/静态双坐标感知系统由动态探测系统和静态探测系统组成。静态感知系统由四个红外探头构成一个十字交叉的坐标系，四个红外探头的中心为坐标原点。动态感知系统与静态坐标系重合，是将另一套静态感知系统安装在可旋转的 Z 轴上。

为了更好地描述感知系统的原理，把模型中涉及到的一些概念明确如下。

感知圆：以系统能够感知到的最远距离为半径的圆。

感知点：目标入侵路径和感知圆的交点。

感知角：目标轨迹和感知点所在直径夹角。

感知范围：感知圆以内的区域。

目标路径：目标通过感知范围的轨迹。

基于单个静态红外热释电传感器的感知范围随着探测距离的增加而减小[6-7]。实现全范围探测，需要多个传感器组成全系统感知，建立的全系统模型体积庞大，结构笨重，成本高。

动/静态双坐标感知系统的原理如图 1 所示：由动、静坐标系构成的动静态双坐标探测系统的最大感知圆外任意点的运动目标，若以匀速直线运动的方式进入，可以推知其轨迹必然与静坐标系 X、Y 轴至少相遇一次；而与动坐标系 X、Y 轴是否相遇则取决于运动目标进入的角度、时间、速度和动坐标系的转速和坐标系 X、Y 轴的当前位置。理论上设定运动目标速度上限，提高动坐标系摆动速度到某限值后就可保证动态坐标探测系统的最大感知圆外任意点的运动目标，以匀速直线运动的方式进入，必然与动坐标系 X、Y 轴至少相遇一次。动坐标系由四个极坐标轴构成动直角坐标系；动坐标系已恒定的摆动角速度在 90°范围内来回摆动。

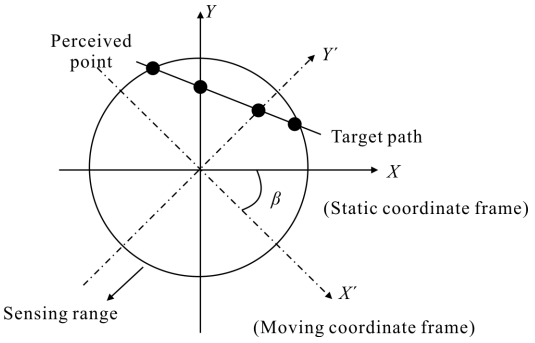

图 1 动/静态双坐标感知系统原理

Fig.1 Dynamic/static two-coordinate perceptual system principle

2 感知系统理论模型

假设单目标以匀速直线运动状态进入感知圆时，环境条件在室内，背景相对简单，降低外界因素影响。目标和感知系统的尺寸、体积不做考虑，仅当作点目标考虑，目标定位误差为 0，目标为匀速运动的人或车辆，排除转速差异、地面高低起伏的因素。运动目标如图 2 的入侵方式，全系统开始探测。ψ 是动态感知系统旋转过的角度，M 是动态感知系统发现目标的位置，E 是静态感知系统发现目标的所在

位置,线段 AE 是目标进入感知范围内的路径,其和 x 轴夹角为 θ (入侵角),ϕ 是动态感知系统发现目标的方位与 y 轴的夹角, 假设 E 在静坐标系的位置为 (x,y),M 在动坐标系中的位置为(x_1,y_1)。

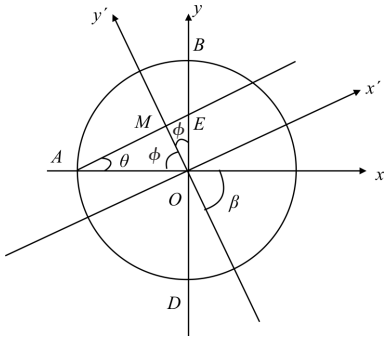

图 2 目标入侵方式

Fig.2 Intrusion way of target

3 感知系统数学模型

3.1 全系统数学模型

根据感知系统的探测原理, 可通过算法得出探测目标所在的位置。根据电机控制系统可知动态感知系统旋转过的角度 δ, 经过的时间 t 是已知因素。设定目标从起始值运动时,动态探测系统开始追踪,以全局坐标系的四分之一为例, 假设目标匀速移动的速度为$\vec{V}_1$,动态感知系统匀速旋转的角速度为$\vec{w}$,检测到目标时经历的时间为 t (目标定位误差为 0),第一次发现目标在 M 点。如图 2 所示,设定目标是经过 A 点以匀速直线运动进入, 那么在起始点静态探测系统发现目标一次,根据扫描到的波形图,用峰峰值来判定距离,用 R 表示。φ 是动态探测系统与水平方向的夹角。设定目标的速度上限,当动坐标的转速大于运动目标的速度时, 将会在感知范围内追击发现目标,即动态探测系统旋转动 90°,目标还在区域内匀速运动。

$$\begin{cases}\vec{w}t=90^\circ\\ \vec{V}_1 t\leqslant\dfrac{R}{\cos\theta}\end{cases}\tag{1}$$

$$AM=\vec{V}_1 t\tag{2}$$

$$OA=R\tag{3}$$

由图 2 可知:

$$\tan\varphi=\frac{y}{x}\tag{4}$$

$$\delta=\vec{w}t\tag{5}$$

$$\phi=\delta-90^\circ\qquad\varphi=180^\circ-\delta\tag{6}$$

根据判定距离的方法,在第一次发现目标 M 时,可知 $OM=r$ 的距离。

根据坐标转换,$r=\sqrt{x^2+y^2}$

$$\begin{cases}y=r\sin\varphi\\ x=r\cos\varphi\end{cases}\tag{7}$$

3.2 感知距离和范围的关系

在全范围内,如图 2 在三角形 AOE 中,入侵角 θ 固定,探测距离 AO 取不同的值,则发现目标的次数不同,次数越多,精度越高。根据三角形正弦定理:

$$\frac{\vec{V}_1 t}{\sin\varphi}=\frac{R}{\sin(180-\theta-\varphi)}\tag{8}$$

用已知量表示简化后:

$$\frac{\vec{V}_1 t}{\sin\vec{w}t}=\frac{R}{\sin(\vec{w}t-\theta)}\tag{9}$$

根据此公式可计算出在给定的感知距离内,入侵角一定,动态探测系统转动比目标运动快,不同的探测距离,都可以在 360°范围内探测目标,解决了热释电静态探测距离与视场角成反比[6]的矛盾及其静态探测范围有限的问题。

4 验　证

设定半径 25 m 的感知圆,即动静双坐标体系的感知范围, 由一个十字阵列式传感器组成静态二维坐标体系,动坐标系在此范围内往返 90°扫描。

以整个系统中任一个方向, 一个象限为例进行说明。如图 3 所示:设定任意一个入侵点 A,以这点与感知中心连接建立坐标系,轨迹 AB 是入侵的最大路径,B 点是静坐标系能感知到的极限。轨迹 AB 的入侵角是 45°。当入侵角小于 45°时, 入侵轨迹肯定通过静态感知范围,被静坐标系探测到两次;在动态扫描的区域内, 当动态坐标系的转速大于目标的运动速度, 可以通过追击和截取两种方式之一识别目标一次。

当入侵角很小,入侵轨迹接近半径时,则完全进入到独立传感器的探测范围内。

当入侵角大于 45°时,只有在起始点被静坐标体系发现一次。随着入侵角度的增大,在感知范围内的

入侵路径越来越小。入侵角为 θ,在可感知的最大范围内追击探测到目标时，动坐标系与水平方向夹角为 φ,运动目标经过的位移为 S,则可得出入侵角和动态探测旋转角度的关系：

$$\begin{cases} h=S\cdot\sin\theta=R\sin\varphi \\ S\cos\theta+R\cos\varphi=R \end{cases} \rightarrow \cot\theta+\cos\varphi=1 \tag{10}$$

转过的角度 $\varphi=wt$,随着入侵角的增大,探测时间变短,动坐标系转过的角度变小,角速度增大。在 $ABCD$ 外感知圆内的区域,是感知能力衰退区。当目标入侵通过两个象限时,被探测到的次数更多。

同一条路径,对目标以相反的方向入侵进行分析。以路径 AF 为例,从 $A\rightarrow F$,目标在 A 处被静坐标体系探测到,动坐标体系开始扫描追踪,最远在 F 处追击到。从 $F\rightarrow A$,在感知圆处的 F 点能否被发现是未知的,可能恰好与动坐标体系相遇,被探测到;也可能刚好错过。经过 A 处是必然被发现的。因此,以相反的路径方向进入时,只有一次静态探测是确定的,动态探测是个未知数。随着入侵角的增大,动态坐标体系探测到的可能性衰退。

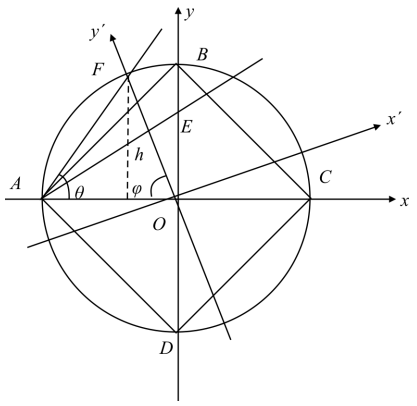

图 3 探测范围

Fig.3 Detection range

在野外作战的车辆,由于环境条件,车载所限,速度不会过快，不容易探测到目标受运动目标的入侵角,动坐标系的转速,旋转方向,感知范围等因素的影响。

设定目标从 A 点匀速进入时，动态探测系统开始追踪,如图 3 所示,以第一象限为例说明。实验验证方案如表 1，运动目标分为人和车两种,speed 为运动目标速度,position 为目标实测位置,system speed 表示探测系统转速,detecting location 表示探测系统测得目标在坐标系中的位置。

表 1 实验验证数据分析

Tab.1 Experimental validation data analysis

Target	Speed /m·s^{-1}	Angle /(°)	Position /m	System speed /(°)·s^{-1}	Detecting location
People	1	30	50	5	(−50,0) (15,24) (26,5)
People	1	30	30	5	(−30,0) (13,7.5)
Car	5	30	50	10	(−50,0) (25.5,6)
Car	5	30	30	10	(−30,0)
Car	5	30	50	5	(−30,0)
Car	5	30	30	5	(−30,0)

由上述实验数据可知,在一定感知范围内,相对目标的不同速度，转速随之变化，距离探测系统越远,发现目标次数越多。如果转速过小,将不会发现目标。

目标不变，静态探测视场角和探测距离的关系如图 4 所示。

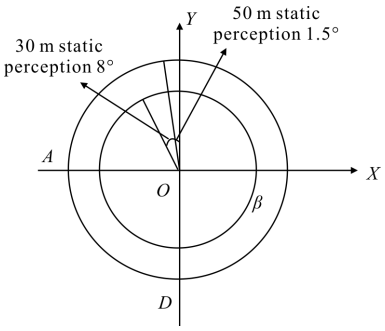

图 4 静态探测距离和视场角的关系

Fig.4 Relation between distance and viewing angle of static detection

5 结 论

文中提出了一种针对运动目标感知的动静双坐标探测系统。在给定假设条件和理想环境因素下,应用热释电传感器探测到目标的可靠性高，是更准确的得出目标在全系统内坐标值。经过大量的实验验证，动静态双坐标感知系统对运动目标的探测在给定前提下,原理可行。该探测系统的提出,是被动式红外在探测领域的一个重大突破，解决了热释电探测距离和范围的矛盾。动静双坐标体系的结合,是实

现无盲区探测的创新。随着光电探测的进一步发展，红外热释电也将发挥越来越重要的作用。

参考文献:

[1] Lu Jun, Lv Tongguang. Application and development of optoelectronic detection technology in fire control system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41 (4): 1047-1051. (in Chinese)
陆君，吕彤光. 光电探测技术在火控系统中的应用及发展[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1047-1051.

[2] Zhang Junping. Space application on opto-electronic detection technology[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 1986, 16(2): 1-9. (in Chinese)
张钧平. 光电探测技术的空间应用 [J]. 红外与激光工程, 1986, 16(2): 1-9.

[3] Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(12): 3145-3153. (in Chinese)
范晋祥,杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3145-3153.

[4] Huang Xin. Design and implementation of pyroelectric infrared wireless sensor network human positioning system [D]. Guangzhou: SUN YAT-SEN University, 2009. (in Chinese)
黄鑫. 热释电红外无线传感网络人体定位系统设计与实现[D]. 广州: 中山大学, 2009.

[5] Bai Hongbin. Infrared detectors used in weapons systems[J]. ***Aviation Ordnance***, 2001(3): 47-48. (in Chinese)
白洪斌. 红外探测器在武器系统中的应用 [J]. 航空兵器, 2001(3): 47-48.

[6] Sun Qiao, Yang Wei. New target location method based on dynamic pyroelectric infrared sensor [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(9): 2288-2292. (in Chinese)
孙乔, 杨卫. 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.

[7] Hussain T M, Baig A M, Saddawi T N, et al. Infrared, pyroelectric sensor for detection of vehicular traffic using digital signal, processing techniques [J]. ***IEEE Trans Veh Technol***, 1995, 44(3): 683-689.