

# 一种轨道式动态目标跟踪算法

卢莉萍<sup>1,2</sup> 李翰山<sup>2</sup> 张宏<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学计算机科学与技术学院, 南京, 210094; 2. 西安工业大学计算机科学与工程学院, 西安, 710032)

**摘要:** 研究了一种轨道式动态目标跟踪的算法, 建立轨迹式目标跟踪模型; 分析了目标跟踪的基本原理, 研究跟踪平台的光学结构和转台角度与轨道目标运动的跟踪算法, 给出了物像动态跟踪的计算方法; 研究 Mean shift 跟踪算法, 利用它的核密度估计和跟踪图像的帧图像关系, 确定目标检索中心位置, 以达到动态目标跟踪目的。通过试验验证, 提出的算法在外弹道轨道目标动态跟踪系统中是可行的。

**关键词:** 外弹道; 轨道; 目标跟踪; 跟踪平台; Mean shift 算法

**中图分类号:** TJ012.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2011)04-0511-04

## Tracking Algorithm for Orbit Dynamic Target

Lu Liping<sup>1,2</sup>, Li Hanshan<sup>2</sup>, Zhang Hong<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, China;

2. School of Computer Science and Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, 710032, China)

**Abstract:** The tracking algorithm of orbit dynamic object is studied and the contrail object tracking model is set up. The basic principle on object tracking is analyzed and the tracking algorithm for optic configuration, the angle of rotational platform of track platform and orbit object moving is studied. Then the numerical method of object image dynamic tracking is proposed. The Mean shift algorithm is studied. Using the relation between the kernels consistency estimate of Mean shift algorithm and frame image of track image the object search center is found, therefore the dynamic object is tracked. Experimental results validate that the proposed tracking algorithm is feasible for the dynamic object tracking system in the out ballistic trajectory.

**Key words:** ballistic; trajectory; object tracking; tracking platform; Mean shift algorithm

近年来, 在外弹道测试中, 动态目标跟踪参数的测量已成为武器系统的验证、定型和生产等重要指标, 特别是随着高速武器的发展, 高速弹丸目标的瞬间跟踪参数, 如弹丸的启动状态、加速状态、减速状态等, 是武器外弹道中需要关注的信息<sup>[1-2]</sup>。现今国内靶场在轨道式高速目标的弹道跟踪方面, 大多采用多个广角镜头静态分段捕捉的方式进行<sup>[3]</sup>, 这样会带来新的问题: (1) 成本高; (2) 各镜头交叉点的数据处理; (3) 镜头边沿图像的畸变。特别

是后两个因素在很大程度上影响着测试数据的有效性<sup>[4]</sup>。基于视觉的目标跟踪<sup>[5]</sup>广泛应用于视频监控、图像压缩、三维重构、机器人技术等各个领域, 由于物体的突然运动、目标或背景突然改变其外部表现形式、目标的非刚性结构、目标之间的遮挡、目标和背景之间的遮挡以及摄像头的运动等使得目标的实时跟踪非常困难。针对高速动态目标的跟踪问题, 基于目标跟踪理论, 提出一种基于改进的 Mean shift 目标跟踪算法。

**基金项目:** 陕西省教育厅自然科学基金(2010JK605)资助项目。

**收稿日期:** 2011-03-27; **修订日期:** 2011-05-05

**通讯作者:** 卢莉萍, 女, 博士研究生, 讲师, 1975年生, E-mail: llp21@126.com。

# 1 轨道式动态目标参数跟踪原理

## 1.1 轨道式动态目标跟踪原理

目标的成像跟踪,主要是基于光学系统,在已知条件下,利用物像几何关系,确定物方与像方的空间位置。针对固定轨道的目标跟踪,目标一般都是按轨道进行运动,目标的变化具有加速、匀速和减速过程,是由发射药系统控制。为了监视目标在轨道上的信息变化,需要借助侧向的跟踪平台进行实时检测。为此,需要建立相机转动角与轨道上目标运动过程的数学模型。轨道式目标跟踪的平面二维运动,可以利用图1所示进行描述。在图1几何光学系统中,因为任何空间物体的运动都可以抽象为三轴向直线运动以及围绕三轴进行的转动,根据轨道式目标的运动特点,目标的运动可简化为空间平面的一个二维运动。

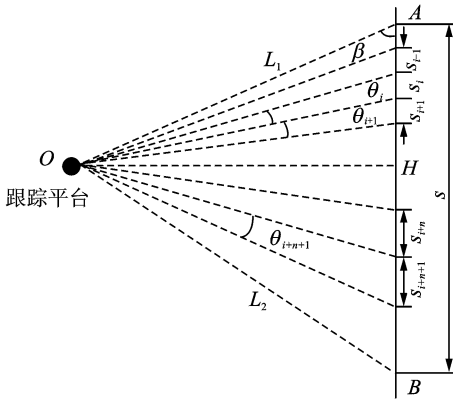


图1 轨道式目标跟踪示意图

假设A点为目标运动的起始点,B点为目标停止点,O为跟踪系统的观测位置。光学跟踪系统主要由成像光学物镜、跟踪架、启动控制器和监视平台组成。 $L_1$ 和 $L_2$ 分别为跟踪平台与目标运动的起始点和终点之间的距离; $\theta_i, \theta_{i+1}$ 和 $\theta_{i+n+1}$ 分别为跟踪平台的控制角度,其对应于相应的时间时刻; $s_{i+1}, s_i, s_{i-1}$ 及 $s_{i+n+1}$ 等分别为控制角度平台变化量对应出的在轨道上前观测点的位移量; $OH$ 为垂直轨迹垂线。

在跟踪系统中,当相机中心的水平面平行于或重合于目标的主要运动时,在简化或忽略次要运动的影响下,目标的运动就可以认为是一维直线运动。为了实时监测出目标的动态过程,需要光学跟踪系统与运动目标同步运动。在一定的时间段内,如果图像上的目标始终处于一个较小的区域范围内,则可以认定此时的目标与转台处于同步状态,

即单位时间内转台的转角与高速目标在轨道上的位移成一定的比例关系。

如果目标运动的速度为 $v$ ,在已知理论弹道的前提下,将理论弹道按相等的单位时间分为一系列的位移量,即在轨道距离为 $s$ 内,进行时分弹道。弹道各点前后位移量 $s_i$ 与总长度 $s$ 之间的函数关系表示为

$$s = \sum_{i=1}^n s_i \quad (1)$$

假设定义各个单位时间 $\Delta t$ 内,目标与观测点形成的理论转动角为 $\theta_i$ ,则在整个弹道上,跟踪系统的光轴需要转动的总角度 $\theta$ 可表示为

$$\theta = \sum_{i=1}^n \theta_i \quad (2)$$

为了满足跟踪条件,仅需使跟踪转台在各单位时间转动对应的理论转角就可以实现弹道目标的分时跟踪,监测出目标在轨道上的相应时刻图像,通过图像处理方式提供出相应的参数信息。

## 1.2 动态目标跟踪几何关系分析

结合跟踪系统的几何结构,假设测得弹道长度为 $s$ ,利用 $\triangle AOB$ 的几何关系和三角余弦定理,可以计算出弹道起点至观测点的直线与弹道间的夹角 $\theta$ 。

$$\theta = \arccos \frac{L_1^2 + L_2^2 - s^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2} \quad (3)$$

根据测量原理与几何关系,经第一个单位时间后弹道起点至观测点与目标至观测点间的直线形成了理论夹角 $\theta_1$ ,则有

$$\frac{\sin \theta_1}{s_1} = \frac{\sin(\pi - \beta - \theta_1)}{L_1} = \frac{\sin(\beta + \theta_1)}{L_1} = \frac{\sin \beta \cos \theta_1 + \cos \beta \sin \theta_1}{L_1} \quad (4)$$

可得

$$\theta_1 = \arctan \frac{\sin \beta}{(L_1/S_1) - \cos \beta} \quad (5)$$

式中: $\theta_1$ 为第一个单位时间内光轴与 $L_1$ 边的夹角; $\beta$ 为轨道线与 $L_1$ 的夹角。由此类推,可以得到各单位时间的理论转角为

$$\theta_i = \arctan \frac{\sin \beta}{\left( L_1 / \sum_{k=1}^i S_k \right) - \cos \beta} - \sum_{n=0}^{i-1} \theta_n \quad (6)$$

式中 $\theta_0 = 0$ 。根据弹丸速度 $v$ 和跟踪平台的单位时间内的定位架转动偏移量,可获得全轨道中的不同时刻的动态目标图像,然后,结合几何关系确定目标的具体位置,达到实时监控目标的目的。

## 2 改进的 Mean shift 目标跟踪算法

建立在动态目标跟踪的原理上,针对获取的各个阶段时刻的目标图像,采用了改进的 Mean shift 目标弹道轨迹跟踪算法。在目标图像中,目标模型是灰度值和局部标准差的概率密度函数,并采用核密度估计,核函数选用 Epanechnikov 核,因为该核在连续空间中能够产生最佳的积分均方误差 (MISE)<sup>[6]</sup>。两个 Epanechnikov 核的级联形式如下

$$K_1(x) = \begin{cases} 3(h^2 - x^2)/(4h^3) & x < h \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$K_2(x) = \begin{cases} 2(h^2 - \mathbf{x}^T \mathbf{x})/(\pi h^3) & \mathbf{x}^T \mathbf{x} < h^2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

第一个核作为特征直方图的加权因子,即以特征值为中心放置一个一维核。第二个核是通过特征的空间位置与目标质心之间的欧氏距离来确定特征的空间关系, $K_1(x)$ 和 $K_2(x)$ 为核函数, $x$ 为像素位置, $h$ 表示核函数的带宽,即目标的半径。

利用核密度估计方法建立目标特征的概率密度分布,实现目标模型的描述。假设包含目标的搜索窗口中,第 $u$ 个特征值的概率密度函数

$$\hat{q} = C \sum_{i=1}^n k \left( \left\| \frac{x_0 - x_i}{h} \right\|^2 \right) \delta[b(x_i) - u] \quad (9)$$

式中: $x_0$ 为搜索窗口的中心像素坐标; $x_i$ 为第 $i$ 个像素的坐标; $k(\|x\|^2)$ 为核函数; $b(x_i)$ 和 $\delta$ 函数的作用是判断目标区域中像素 $x_i$ 的特征值 $b(x_i)$ 是否属于特征值 $u$ ;  $C$ 为归一化函数<sup>[7]</sup>。

在轨道式的动态目标跟踪中,往往都是连续图像交替变换,前一幅图像和后一幅图像包含共性特性,因而可以利用后续图像特征进行分析。运动目标在第二帧及以后的每帧中可能包含目标的区域称为候选区域,设其中心坐标为 $y$ ,也是核函数的中心坐标。该区域中的像素用 $\{x_i\}_{i=1, \dots, n_j}$ 候选模型的特征值 $u=1, \dots, m$ 的概率密度为

$$\hat{p}_u(y) = C_h \sum_{i=1}^{n_h} k \left( \left\| \frac{y - x_i}{h} \right\|^2 \right) \delta[b(x_i) - u] \quad (10)$$

相似性函数描述目标模型和目标候选之间的相似程度,使用 Bhattacharya 系数<sup>[1]</sup>作为相似性函数

$$\hat{\rho}(y) \equiv \rho(\hat{p}(y), \hat{q}) = \sum_{u=1}^m \sqrt{\hat{p}_u(y) \cdot \hat{q}_u} \quad (11)$$

其值在 $0 \sim 1$ 之间。 $\hat{\rho}(y)$ 的值越大,表示两个模型越相似,在当前帧中不同的候选区域计算得到的候选

模型,使得 $\hat{\rho}(y)$ 最大候选区域即是在本帧中目标的位置<sup>[8]</sup>。

在本跟踪系统中,为了稳定目标在光学视场内,需要对连续目标图像进行连续帧图来处理。假定目标在第 $n$ 帧首次出现, $x_n$ 表示它的中心,利用核密度估计分别计算模板的灰度图像 $Q_L$ 和局部标准差图像 $Q_g$ 每一灰度级的核密度估计。直接通过最小化模板和目标之间的距离,定位目标位置 $y$ ,从而在当前帧中找到目标位置<sup>[9]</sup>。距离定义如下

$$d(y) = \sqrt{1 - \hat{\rho}(y)} \quad (12)$$

式中: $\rho(y)$ 为修改的 Bhattacharya 系数,它融合了图灰度和局部标准差的特征。修改的 Bhattacharya 系数可理解为模板与候选目标分布的相似程度。

为使式(10)中 $\hat{\rho}(y)$ 最大,在当前帧的目标中心先定位为前一帧中目标中心的位置 $y_0$ ,从这一点开始寻找最优匹配的目标,其中心设为 $y_0$ 。先计算目标候选模型 $\hat{\rho}(y_0)$ 处进行泰勒展开,计算出 $\hat{\rho}(y)$ 的最大值,以确定该位置的目标点。

由于系统的跟踪采用的是侧向跟踪方法,致使在整个轨迹中,光学控制结构具有启动、加速、匀速、减速的过程。结合图1的几何关系,加上改进的 Mean shift 跟踪算法,可以确定出目标在光学系统中的位置,以达到轨迹上的目标跟踪目的。

## 3 试验分析

为了验证轨道式目标跟踪算法,结合某型号测试平台进行跟踪。系统在实地靶场试验整个过程中,跟踪系统的目标始终处于视场图像的中心区域。在控制转台中使用高精度角度编码器作为对比的实时角度读取,通过理论弹道速度与实测弹速之间的偏差,来确定跟踪效果。

表1为某次试验中测得的部分数据以及对数据和图像进行分析后得出的结果。跟踪平台转动角控制单位时间设置为 $0.3 \text{ s}$ ,可以根据测试空间的几何关系,进行自适应调节。

通过试验验证的数据表明,在开始转动阶段,由于转动角度小以及由机械响应所产生的抖动等问题,所以易产生较大的误差,进入平稳的跟踪阶段,数据比较稳定。通过对之后的各个图像采样点进行分析后表明,测算出的速度与理论弹道速度的相对平均误差不大于 $1\%$ 。系统的跟踪对象是直线轨道,目标在轨道上滑行受到轨道的各种因素影响,如目标滑轮与轨道的摩擦力,目标运动过程中

空气动力的阻力等,此外,跟踪转动平台也存在转动过程中外围和自身因素的影响,当目标以某一速度匀速运动时,侧向方向的跟踪平台运动将会出现加速、匀速、减速的过程。因此,跟踪转台在整个跟踪过程中实测角度与理论角度存在一定的误差。从数据结果看,利用的改进 Mean shift 跟踪算法,有效地改善跟踪系统的实时性,使得实测速度与理论弹道速度的平均差小于 $0.5\text{ m/s}$ 。同时,跟踪平台的转动在轨道上可实现同步跟踪,稳定性好,表明系统采用的方法是可行的。

表1 测试试验数据

预定跟踪所需角度/ $^{\circ}$	控制转台角度实际读数/ $^{\circ}$	理论速度与实测速度误差/ $\%$
0.176	0.166	3.60
3.911	3.818	0.11
7.318	7.307	0.17
14.751	14.508	0.08
22.881	22.763	0.12
34.106	34.008	0.24
54.918	55.081	0.36
65.175	64.869	0.52

## 4 结束语

根据跟踪对象的需求,建立了轨道式跟踪平台,推导出外弹道跟踪算法,并对高速运动目标进行分段跟踪;为了优化跟踪系统,研究了改进的 Mean shift 跟踪算法,该方法克服了传统 Mean shift 跟踪

方法对目标对比度低的跟踪效果不佳的现象,实现了轨道上目标实时跟踪。通过精确测角仪和图像处理技术,对高速目标的速度参数进行验证分析,从速度误差数据可以看出,提出的方法在一定的轨道范围内达到实时监测,为远程弹道模式的目标跟踪提供一定的理论依据。

## 参考文献:

- [1] 程建,杨杰.一种基于均值移位的红外目标跟踪新方法[J].红外与毫米波学报,2005,24(3):231-235.
- [2] 阎东,雷志勇.外弹道高速目标参数验证算法研究[J].光学技术,2007,33(6):816-818.
- [3] 杨炬,裴继红,谢维信.基于运动特征的远距离红外目标检测方法[J].电子与信息学报,2007,29(8):57-59.
- [4] 高国旺,刘上乾,秦翰林,等.复杂背景下的红外目标自动跟踪算法[J].光电工程,2010,37(6):78-83.
- [5] 王苑楠.图像边缘检测方法的比较和研究[J].计算机与数字工程,2009,37(1):121-127.
- [6] 王正明,段晓军.基于弹道跟踪数据的全程试验鉴定[J].中国科学E辑,2001,31(1):34-41.
- [7] 张涛,安玮,周一宇.主动段弹道定位与跟踪算法[J].弹道学报,2005,17(4):11-16.
- [8] Bar-Shalom Y, Tse E. Tracking in a cluttered environment with probabilistic data association[J]. Automatic,1975,11(5):451-460.
- [9] Yan Jia, Wu Minyuan, Chen Shuzhen, et al. Camouflaged target tracking based on mean shift[J]. Engineering,2009,36(2):11-15.