

# 末敏子弹图像序列中机场跑道线目标的跟踪及处理算法研究

范培蕾 张晓今 杨涛 寇保华

(国防科技大学航天与材料工程学院, 长沙 410073)

**摘要** 为了准确地跟踪机场跑道(以下简称跑道)线目标,提出了一种在末敏子弹稳态下落过程中,利用 Hough 变换将机场跑道线性目标转化为对点目标进行跟踪的方法。此方法在考虑各个参数解耦的情况下,先对 Hough 平面内的直线参数利用 Kalman 滤波方法进行状态估计与预测;然后在确定子弹与跑道目标的相对位置关系时,需考虑到弹上探测器旋转运动的影响,再结合当前帧图像的数据信息对预测方程进行修正处理;最后在小扰动情况下,根据伞-弹系统动力学分析理论建立了对探测系原点与地面交点至跑道中心线的距离  $D(t)$  进行处理的方法,并得到了弹下点(子弹晃动中心)至跑道中心线的距离  $D_0$  的曲线,进而确定了子弹相对于跑道目标的位置关系。分析结果表明,此方法实时性强,不仅降低了参与运算的数据量,而且试验结果误差较小,可以满足目标总体设计要求。

**关键词** 目标跟踪 机场跑道 Hough 变换 Kalman 滤波 小扰动

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)01-0075-05

## Research on a Tracking Method and Data Processing for the Runway in Image Sequences of Terminal-sensitive Projectiles

FAN Pei-lei, ZHANG Xiao-jin, YANG Tao, KOU Bao-hua

(College of Aerospace and Material Engineering, NUDT, Changsha 410073)

**Abstract** A new method of some linear objects tracking such as the runway being changed to tracking of the feature point is presented based on Hough transform during the stable-falling of the submunition. Given all the case of each parameter's decoupling, the parameters of the line in Hough space have been estimated and predicted with the methods of Kalman filtering. In order to establish the relative position between the runway and submunition, some modificative processing in equation for predicting the state of objects' contrail are conducted combining some data information of the current image when considering the influence of the detector's spinning with submunition. In the instance of small perturbation, a new processing data is established based on the theory of parachute munition's dynamic analysis in order to obtain the curve of  $D_0$  which would ascertain the relative position of submunition and runway. All processing data shows that this method has high efficiency and good stability, and reduces the quantity of calculation to some extent. Experiment results show the error of estimation is small and it can meet the general object requirement.

**Keywords** object tracking the runway, Hough transform, Kalman filtering, small perturbation

## 1 引言

反机场红外末敏子弹是一种在弹道末端对目标敏感的智能型灵巧弹药,它能自主搜寻、识别和攻击机场跑道(以下简称跑道)。在子弹(末敏子弹,以

下简称子弹)稳态旋转下落的过程中,先采用与弹体捷联的红外探测器对机场环境进行图像采集,并运用图像处理的有关算法,对机场跑道线目标进行识别及跟踪处理;然后给出子弹“攻击点”的坐标位置。弹下点(子弹晃动中心)至跑道中心线的距离  $D_0$  的变化规律以及子弹的高度信息  $H$ (图 1),并实时

基金项目: 武器装备预研基金项目(51400010304KG0178)

收稿日期: 2006-03-27; 改回日期: 2006-09-05

第一作者简介: 范培蕾(1979~),女。国防科技大学航天与材料工程学院航空宇航科学与技术专业博士研究生。研究方向为红外图像信息处理技术与飞行器总体设计。E-mail: dangdang\_fan@126.com

地反馈给弹上的控制计算机;最后形成控制指令,通过修正子弹的飞行轨迹来实现精确打击敌方机场跑道的目的。通常获取目标的相对运动参数不可能仅通过几幅独立的图像来确定,必须依靠目标的序列图像来实现,即只有通过序列图像的处理,才能获得目标与子弹的相对运动轨迹。

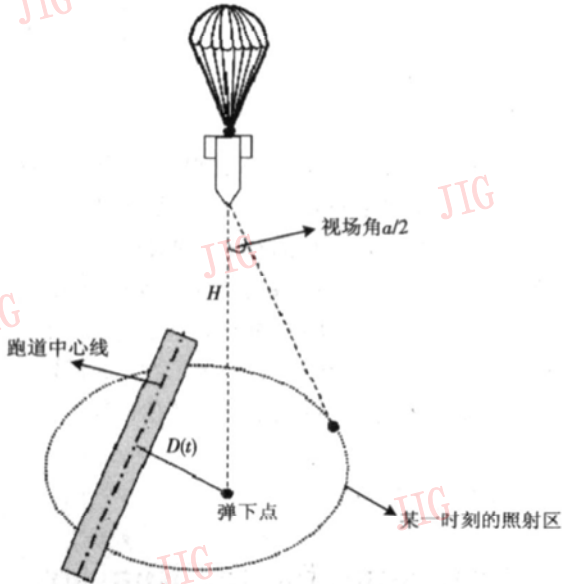


图 1 跑道位置示意图

Fig 1 Sketch of the runway's position

## 2 基于 Hough 变换的直线跟踪原理

Hough 变换是图像处理过程中识别几何形状的基本方法之一,其主要优点是检测几何形状时较少受到几何形状中断点的干扰,且不需要预先组合和连接边缘点。

在标准参数化方式下,平面直角坐标系中的直线  $l$  表达为

$$\rho = x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \quad (1)$$

其中,  $\rho$  为直线  $l$  相对于原点的距离,  $\theta$  为  $\rho$  与  $x$  轴的夹角。对于平面坐标系中任一点  $(x_i, y_i)$ , 可采用极坐标  $(\rho, \theta)$  作为变换平面, 其变换方程为

$$\rho = x_i \cos(\theta) + y_i \sin(\theta) \quad (2)$$

这表明原图像平面中的一点  $(x_i, y_i)$  对应于 Hough 平面中的一条正弦曲线, 其初始角和幅值随  $x_i$  和  $y_i$  的值而改变, 而直线  $l$  上不同的点被变换成一组相交于点  $P(\rho_0, \theta_0)$  的正弦曲线 (图 2)。因此若能确定 Hough 平面中的点  $P$ , 则就可实现直线检测<sup>[1]</sup>。

用 Hough 变换中点线的对偶性质, 可将跑道线目标的跟踪转化为点目标的跟踪问题, 并可利用点目标

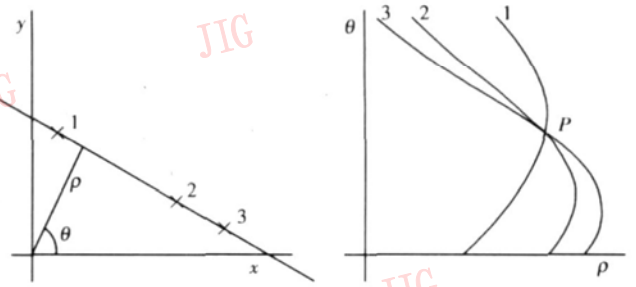


图 2 Hough 变换示意图

Fig 2 Sketch of Hough transform

的跟踪方法与预测估计来实现对线目标的实时跟踪。跟踪时, 首先从图像序列中提取跑道直线, 同时得到边缘直线的参数, 继而把图像平面中对直线的跟踪转化为 Hough 平面中对点  $(\rho, \theta)$  的跟踪; 然后以点  $(\rho, \theta)$  作为特征点, 在 Hough 平面的特征窗口内跟踪特征点。

在 Hough 平面的  $\rho$ - $\theta$  矩形特征窗口内搜索匹配点, 实际上是在图像平面中以原点为中心的扇形范围内搜索匹配垂足。如图 3 所示, 图像平面的直线  $l$  和 Hough 平面的点  $P$  表示与前一帧图像对应,  $\hat{l}$  和  $\hat{P}$  与后一帧图像对应。由于 Hough 平面中的矩形窗口映射到图像平面上是一个以原点为中心的扇形, 因此寻找  $P$  和  $\hat{P}$  的匹配就是寻找垂足点的匹配<sup>[2,3]</sup>。

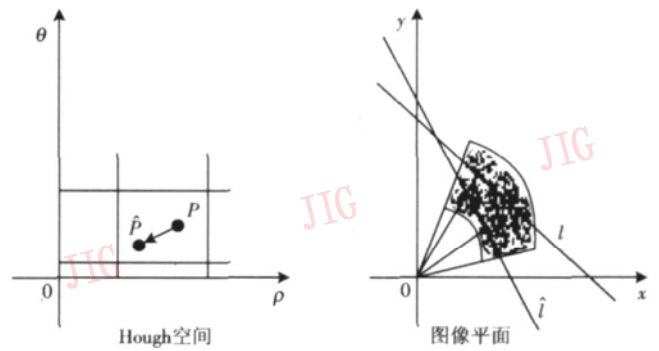


图 3 直线跟踪法的几何解释

Fig 3 The geometric meaning of line's tracking

## 3 红外图像中跑道线目标转化为点目标的运动跟踪方法

下面通过试验图像来研究在解耦的情况下用 Kalman 滤波的方法实现对跑道目标的实时跟踪, 并对目标与子弹的相对运动状态进行估计预测的方法。图 4 是在某次试验过程中采集的几帧连续跑道红外图像。由于弹体的滚转以及与弹体固连的探测系统的行扫描机制, 不仅使成像探测器获取的机场跑道图像发生弯曲畸变, 而且导致采集的图像发生

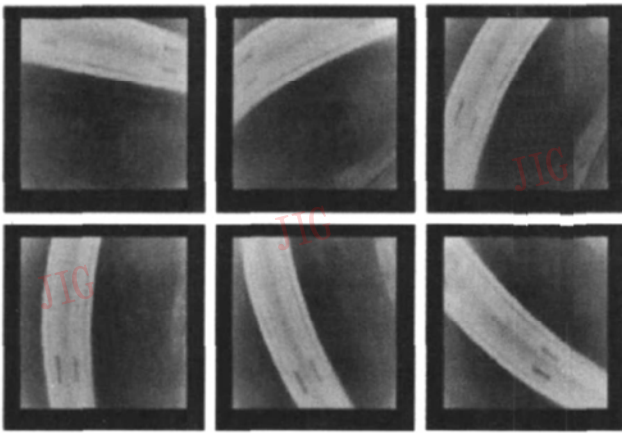


图 4 外场试验机场跑道红外序列图像

Fig 4 Infrared image sequences of the runway

失真现象。在进行跑道目标参数提取之前, 首先对序列图像中机场跑道线目标发生的弯曲畸变进行矫正复原处理, 具体复原过程参考文献 [4]。

红外探测器在下落过程中随子弹一起旋转, 而跑道目标在大地坐标系中则是静止不动的。若以探测器作为参考坐标 (探测坐标系), 则红外图像中跑道目标是运动的, 此时可利用上述方法对跑道目标进行实时跟踪。为了在红外序列图像中对线目标进行跟踪, 需要先将跑道目标的线目标特征转化为点特征, 再利用对点目标的实时跟踪来实现对跑道线目标相对运动轨迹的预测与估计。

一般坐标为  $x$  做相对匀加速运动的目标可由下面的方程来描述:

$$\frac{d^3x(t)}{dt^3} = 0 \quad (3)$$

记相对速度  $v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$ , 相对加速度  $a(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$ ,

定义状态向量  $X(t)$  为

$$X(t) = [x(t) \quad v(t) \quad a(t)]^T \quad (4)$$

若对上式积分, 并将方程离散化 ( $T$  为采样时间), 则容易列出状态方程

$$\begin{cases} x(n) = x(n-1) + T \times v(n-1) + 0.5 \times a(n-1) \times T^2 \\ v(n) = v(n-1) + T \times a(n-1) \\ a(n) = a(n-1) \end{cases}$$

$$X(n) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} X(n-1) \quad (5)$$

即

$$X(n) = HX(n-1) \quad (6)$$

其中,  $H = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $x(t)$ 、 $v(t)$ 、 $a(t)$  表示  $t$  时刻

的位置、速度、加速度 (连续量), 而  $x(n)$ 、 $v(n)$ 、 $a(n)$  则表示在  $t = nT$  时的采样值 (离散量)。设  $t = (n-1)T$  时, 加速度增量为  $\Delta a(n-1)$ , 则速度增量为

$$\Delta v = \Delta a(n-1) \times T \quad (7)$$

位移增量为

$$\Delta x = 1.5 \times \Delta a(n-1) \times T^2 \quad (8)$$

此时目标的相对运动可用下列状态方程描述:

$$X(n) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times X(n-1) + \begin{bmatrix} 3T^2/2 \\ T \\ 1 \end{bmatrix} \times a(n-1) \quad (9)$$

对于观测方程, 由于直接观测结果只能得到当前采样时刻目标的位置坐标, 而对于目标的速度和加速度并不能直接观测得到, 但这可以通过上一时刻的运动状态和当前的位置坐标得出, 因此经过分析, 目标的状态修正方程如下:

$$X(n) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1/2 \\ -1 & -1 & 1/2 \end{bmatrix} \times X(n-1) + \begin{bmatrix} x(n) \\ v(n) \\ a(n) \end{bmatrix} \quad (10)$$

而类似跑道的线目标在 Hough 平面内一般可表示为式 (1), 因此在图像序列中可以  $\rho$  和  $\theta$  作为观测量, 并通过  $\rho$  和  $\theta$  的跟踪来实现对跑道线目标的跟踪<sup>[4]</sup>, 并需将探测坐标系的原点标定于图像的中心位置, 以保证  $\rho$  是探测坐标系原点到图像中跑道中心线的像素数 (地面上对应为子弹纵轴与地面的交点至跑道中心线的距离  $D(t)$ )。定义每相邻两帧图像的时间间隔为一个采样时间单位 ( $T = 1$ ), 由于试验中的子弹下落时,  $\rho$  变化不是特别剧烈, 只在较小范围内变化, 为简化状态矢量, 可将  $\rho$  的速度变化量设为零, 因此状态矢量选择为  $X(n) = [\rho(n) \quad v(n)]^T$ , 而式 (9) 轨迹预测方程则变为

$$X(n) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} X(n-1) \quad (11)$$

式 (10) 状态修正方程则变为

$$\hat{X}(n) = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} X(n-1) + \begin{bmatrix} \rho(n) \\ v(n) \end{bmatrix} \quad (12)$$

对状态参数  $\theta$  进行状态估计时, 可以当前帧图像中的  $\theta_0(t)$  作为初始参数值, 而用  $\omega(t)$  表示参数  $\theta$  的变化,  $\omega(t)$  在 Hough 平面内表示点目标在  $\theta$  方

向的运动速度,而在序列图像内则表示目标的相对旋转角速度:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \tag{13}$$

用  $\zeta(t)$ 表示  $\omega(t)$ 的变化率。 $\zeta(t)$ 在 Hough 平面内表示点目标在  $\theta$ 方向上的运动加速度,而在序列图像内则表示目标的相对旋转角加速度,即

$$\zeta(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \tag{14}$$

对  $\theta(t)$ 、 $\omega(t)$ 、 $\zeta(t)$ 进行离散化,并选择状态矢量  $X(n) = [\theta(n) \ \omega(n) \ \zeta(n)]^T$ , 轨迹预测方程变为

$$X(n) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/2 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \times X(n-1) + \begin{bmatrix} 3/2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \times \omega(n) \tag{15}$$

状态修正方程为

$$X(n)^{(n)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1/2 \\ -1 & -1 & 1/2 \end{bmatrix} \times X(n-1) + \begin{bmatrix} x(n) \\ \omega(n) \\ \zeta(n) \end{bmatrix} \tag{16}$$

跟踪步骤如下:

- (1) 设定跟踪距离、角度和旋转角速度的阈值分别为  $\epsilon_p$ 、 $\epsilon_\theta$  和  $\epsilon_\omega$ ;
- (2) 假定在子弹下落过程中初始旋转角加速度  $\zeta_i \neq 0$ 、初始旋转角速度  $\omega_i = 0$  则可对起始帧图像进行修正复原处理 ( $i = 0$ );
- (3) 对起始帧图像进行跑道目标的边缘提取,可得到直线参数  $\rho_i$ 、 $\theta_i$ ;
- (4) 利用式 (11)、(12)、(15)、(16)预测估计并修正后一帧图像的目标直线参数  $\rho$ 和  $\theta$
- (5) 分别在局部区间  $[\rho - \epsilon_p, \rho + \epsilon_p]$ 和  $[\theta - \epsilon_\theta, \theta + \epsilon_\theta]$ 内对后一帧图像进行复原处理 ( $\omega = \omega_i$ ),同时利用 Hough 变换与最小二乘法相结合的方法对跑道边缘进行提取,得到直线参数  $\rho_{i+1}$ 和  $\theta_{i+1}$ ;
- (6) 利用  $\omega_{i+1} = (\theta_{i+1} - \theta_i) / T$  得到当前旋转角速度  $\omega_{i+1}$ ,并判断是否  $|\omega_{i+1} - \omega_i| < \epsilon_\omega$ ,若是,可得子弹稳定下落的旋转角速度  $\omega_2 = \omega_s$  转步骤 (4) ~ (6)进行处理:

此方法是利用对点目标的跟踪理论来预测估计跑道线目标的位置,即对  $\rho$ 、 $\theta$ 进行粗定位,在区间  $[\rho - \epsilon_p, \rho + \epsilon_p]$ 和  $[\theta - \epsilon_\theta, \theta + \epsilon_\theta]$ 内进行跑道边缘处理,并利用 Hough 变换,得到当前帧图像跑道目标的  $\rho$ 和  $\theta$ 这就在一定程度上避免了对整帧图像进

行处理的大计算量,从而缩短了算法执行的时间,提高了处理速度,达到了末敏处理的时间限制。

### 4 试验结果分析处理

为了验证跟踪方法的有效性,利用飞艇作为投放平台在不同风场、不同投弹高度的复杂情况进行高空投放试验。试验时,首先利用探测器采集到的红外图像序列,然后采用上述对跑道线目标进行跟踪的算法仅对稳定下落阶段 8~ 12s 的图像序列进行跟踪处理,即得到了探测系坐标原点与地面交点至跑道中心线的距离  $D(t)$ 的变化曲线(图 5)。

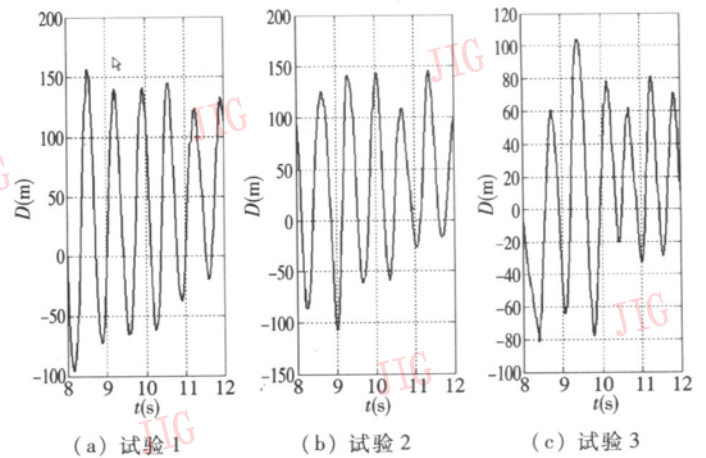


图 5 跟踪曲线  $D(t)$   
Fig. 5 Curves of tracking data  $D(t)$

在伞-弹系统无漂移、子弹无晃动的理想情况下,与弹体固连的探测系原点与地面的交点至跑道中心线的距离是常值。但由于受空中风场和伞-弹系统气动特性的影响,子弹在空中会产生明显的晃动,而伞-弹系统也会受风影响而产生水平漂移,因此  $D(t)$  是一条类似正弦规律变化的振荡曲线(即类似  $D(t) = D_0(t) + K \times \sin(2\pi f t + \theta_0)$  的形式)。该曲线的晃动频率  $f$ 和振幅  $K$  表征了子弹晃动的影响,而晃动中心的变化则表征了伞-弹系统水平漂移的影响。

试验结果表明,在伞-弹系统下落过程中,由于受伞-弹系统的气动特性的影响,使子弹出现类似“锥摆”的晃动现象,所以距离  $D(t)$ 中包含有子弹晃动的影响,为获得弹下点至跑道中心线的实际距离,应在  $D(t)$ 中消除子弹晃动的影响,而空中风场的作用则是子弹产生晃动的主要原因之一。由伞-弹系统动力学分析理论可知,对于运动稳定的伞-弹系统,在小扰动情况下,子弹的晃动角(定义子弹的晃动角为子弹纵轴与垂直方向的夹角)在受干扰后会逐

渐趋于原有的运动状态。在不同突风干扰下, 对于稳定的伞-弹系统, 由于子弹的晃动角近似按指数规律变化, 因此可假设子弹晃动角的变化规律为

$$\theta = \theta_0 \exp(-\alpha t) \quad (17)$$

式中,  $\theta_0$  为初始晃动角;  $\alpha$  为子弹晃动角衰减系数, 它取决于伞-弹系统的气动特性。而  $t$  时刻弹下点至跑道中心线的距离  $D_0(t)$  可表示为

$$D_0(t) = (H_0 - Vt) \times \tan(\theta) + D_0(t_0) + V_w t \quad (18)$$

式中,  $H_0$  为子弹初始高度,  $V$  为伞-弹系统稳定下落速度;  $D_0(t_0)$  为初始投弹时刻的弹下点至跑道中心线的距离。  $V_w$  (下角  $w$  代表  $wind$ ) 为伞-弹系统由于风场所引起的横向漂移速度。

小扰动的情况下, 可近似得到

$$\tan(\theta_0 \exp(-\alpha t)) \approx \theta_0 \exp(-\alpha t) \quad (19)$$

于是, 式 (18) 可表示为

$$D_0(t) = \theta_0 [H_0 \exp(-\alpha t) - Vt \times \exp(-\alpha t)] + D_0(t_0) + V_w t \quad (20)$$

将图像实时处理得到的距离  $D(t)$  作为样本数据, 先利用参数辨识的方法来识别参数  $H_0$ 、 $V$ 、 $D_0(t_0)$ 、 $V_w$ , 再利用式 (20), 就可以确定在突加风作用下, 弹下点至跑道中心线的距离  $D_0(t)$ , 进而即可确定子弹相对跑道目标的位置关系。

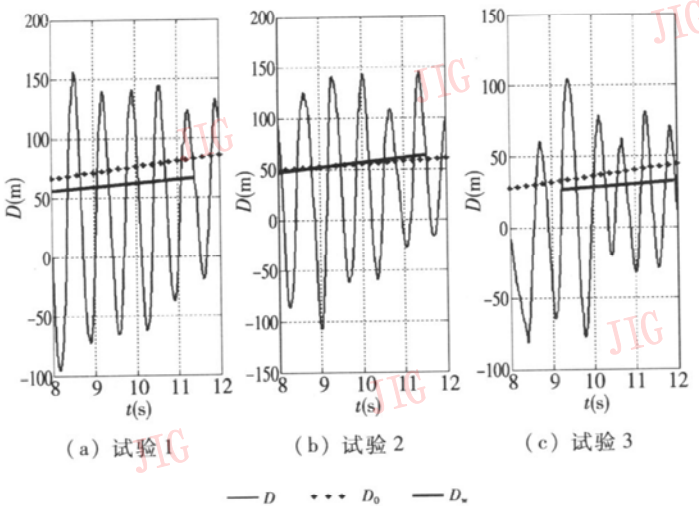


图 6  $D(t)$ 、 $D_0(t)$ 、 $D_w(t)$  比较曲线

Fig. 6 Curves of  $D(t)$ ,  $D_0(t)$  and  $D_w(t)$

(探测系原点与地面交点至跑道中心线距离为  $D(t)$ , 弹下点至跑道中心线距离为  $D_0(t)$ , 外弹道测量距离为  $D_w(t)$ )

由于子弹绕着伞-弹吊挂点晃动, 因此  $D_0(t)$  可以反映弹下点至跑道中心线距离的变化规律。也就是说, 利用  $D_0(t)$  就可确定子弹与跑道目标的相对位置关系 (图 6), 进而可实现对跑道目标的跟踪。分别取 3 次试验  $T = 11s$  时的处理数据进行比较, 其结果见

表 1。从表 1 中可以看出, 弹下点至跑道中心线的距离与外弹道测量距离  $D_w(t)$  相比较, 误差较小, 而距离  $D_0(t)$  的精度则完全满足实时跟踪的要求。

表 1  $D_0$  与外弹道测量距离  $D_w$  比较表

Tab 1 Comparative table of  $D_0$  and  $D_w$

	$D_0$ (m)	$D_w$ (m)	误差 $\Delta D_0$ (m)	相对误差 (%)
试验 1	68.9	66.1	2.8	2.333
试验 2	60.8	59.2	1.6	1.333
试验 3	33.9	31.3	2.6	2.167

## 5 结 论

本文对红外图像中机场跑道目标的跟踪与预测, 由于利用了 Hough 变换方法, 将平面坐标中对线目标的跟踪转化为 Hough 空间中点目标的跟踪, 从而大大减少了计算量, 并提高了程序的可执行性。本文在各个参数解耦的情况下, 对参数空间内的直线参数利用 Kalman 滤波和估计方法进行状态估计时, 考虑到探测器旋转运动的影响, 对目标的轨迹预测方程进行了修正处理, 同时确定了子弹与跑道的相对位置关系, 进而实现了跑道目标的实时跟踪。在小扰动情况下, 本文根据伞-弹系统动力学分析理论建立了对跟踪数据  $D(t)$  进行处理的方法, 首先得到了弹下点至跑道中心线的距离  $D_0(t)$  的变化曲线, 进而确定了子弹相对于跑道目标的位置关系。试验分析结果表明, 此方法不仅可信度较高、实时性强、稳定性好, 而且大大降低了参与运算的图像处理数据量, 分析处理数据与外弹道测量数据相比较的结果表明, 误差较小, 精度满足总体目标设计要求, 对类似机场跑道线目标的跟踪方法的深入研究及分析处理方法具有一定的参考意义。

## 参考文献 (References)

- 1 Roland Chapuis, Romuald Audfree. Accurate road following and reconstruction by computer vision [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(4): 312~316
- 2 Xia Liang-zheng. Digital Images Processing [M]. SouthEast University Press, 1999, 9 [夏良正. 数字图像处理 [M]. 南京: 东南大学出版社, 1999, 9]
- 3 Chen Zhen, Gao Mantun. A new method of lines tracking based Hough transform [J]. Computer Applications, 2003, 23(10): 30~32 [陈震, 高满屯. 基于 Hough 变换的直线跟踪法 [J]. 计算机应用, 2003, 23(10): 30~32]
- 4 Fan Pei-lei. Research on the Infrared Images Processing System about the Airport Runway [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005, 11 [范培蕾. 机场跑道红外图像处理系统研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2005, 11]