

文章编号:1004-9037(2014)06-1041-05

# 基于 Kalman 预测的空中加油锥套跟踪方法

周晓达<sup>1</sup> 孙旭东<sup>1</sup> 邴洋海<sup>2</sup> 杨博文<sup>3</sup>

(1. 中航工业沈阳飞机设计研究所, 沈阳, 110035;

2. 中国人民解放军驻沈阳飞机工业(集团)有限公司军事代表室, 沈阳, 110034;

3. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

**摘要:**利用加油锥套的位置和尺寸信息建立 Kalman 滤波方程, 结合加油对接过程中锥套的运动特点设置模型参数, 并引入目标遮挡系数实现参数的自适应调整, 对锥套的运动进行状态估计, 再通过改进的霍夫梯度法采集观测值对估计值进行修正。实验结果表明, 本文研究的算法在工作范围内能够实现对于锥套的稳定跟踪, 特别是当锥套发生部分遮挡时具有较好的持续跟踪能力, 对背景变化具有较好的适应性。

**关键词:** Kalman 预测; 运动锥套跟踪; 自适应调整; 状态估计; 软式空中加油

中图分类号: TP391

文献标志码: A

## Tracking of Aerial Refueling Drogue Based on Kalman Prediction

Zhou Xiaoda<sup>1</sup>, Sun Xudong<sup>1</sup>, Bing Yanghai<sup>2</sup>, Yang Bowen<sup>3</sup>

(1. AVIC Shenyang Aircraft Design Institute, Shenyang, 110035, China;

2. PLA Military Representative Office in Shenyang Aircraft Industries (Group) Co. Ltd., Shenyang, 110034, China;

3. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** The information of drogue containing position and size are used to establish Kalman filter equations. The model parameters are set considering drogue's motion features in refueling process and the object occlusion coefficient is introduced to complete the parameters' adaptive adjustment. The next-time states of moving drogue are estimated by the model and the estimation is corrected by observation. The experimental results show that the algorithm can track the drogue stably in work distances. When non-target moving objects appear in the images or the drogue is obscured, the algorithm still has the ability of continuous tracking.

**Key words:** Kalman prediction; moving drogue tracking; adaptive adjustment; state estimation; soft aerial refueling

## 引 言

空中加油技术已经成为现代空中军事力量的重要支撑, 特别是随着无人机的研制与应用, 自主空中加油技术将显示出巨大的优越性<sup>[1]</sup>。针对软式空中加油, 稳定跟踪加油锥套, 可靠获取锥套和受油探头的相对位置关系, 是实现软式自主空中加油的关键<sup>[2]</sup>。

在空中加油过程中, 受油机、加油机以及锥套三者同时处于运动状态, 因此对锥套的跟踪可以视

为动态背景下的运动目标跟踪问题<sup>[3]</sup>。国内外对于基于状态(参数)估计的目标跟踪方法展开了大量研究, 主要有粒子滤波法和卡尔曼滤波法两种。其中, Sugandi 等人用 Bhattacharya 距离衡量目标模型的颜色分布, 构造粒子滤波器解决室外环境下存在遮挡、杂波等情况时的目标跟踪问题<sup>[4]</sup>; 章飞等人提出的基于交互式多模型联合概率数据的粒子滤波算法, 提高了杂波环境跟踪的有效性, 但当目标发生遮挡时难以持续跟踪<sup>[5]</sup>; Elise 等人利用局部线性高斯模型求解粒子权重系数来更新积分式, 对于存在遮挡和复杂背景有良好的跟踪效果, 但积

分式将带来较大的计算量<sup>[6]</sup>。另一方面,在卡尔曼滤波器的应用上,文献[7]采用质心加权卡尔曼滤波器对目标的质心和大小进行跟踪;文献[8]通过引入颜色直方图和梯度直方图进行目标参数的辨识,对发生遮挡的锥套具有状态预测能力。

卡尔曼滤波器原理简单、计算量小,在实时性上优于粒子滤波器。考虑到跟踪过程中锥套的成像尺寸不断发生变化,本文将对锥套的运动模型展开研究,对目标状态进行预测与估计,并引入目标遮挡系数,实现模型参数的自适应调整。

## 1 空中加油锥套跟踪模型

定义二维图像像素坐标系  $O-xy$  如图 1 所示,目标的运动可以分解为水平  $x$  和垂直  $y$  两个方向相互独立的运动。

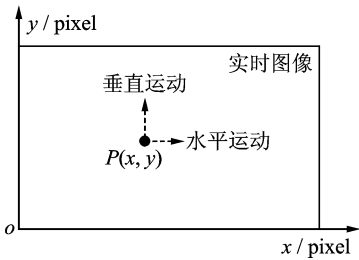


图 1 二维图像像素坐标示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 2D image pixel coordinates

在空中加油过程中,受油机与锥套的接近速度和加速度保持在较小范围,因此用匀速直线运动来描述目标的运动状态,用白噪声来表示加速度量<sup>[9]</sup>。设视频图像序列连续两帧的时间间隔为  $\Delta T$ ,文中选取锥套的中心坐标、半径、坐标变化率和半径变化率作为系统的状态变量,则系统的状态方程为

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \Gamma_{k,k-1} \mathbf{W}_{k-1} \quad (1)$$

其中

$$\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \Delta T \cdot \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \Gamma_{k,k-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \Delta T \cdot \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

式中:  $\mathbf{X}_k = [x_k, y_k, r_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{r}_k]^T$ ,  $\Phi_{k,k-1}$  为系统的状态转移矩阵,  $\mathbf{W}_{k-1} = [\omega_x, \omega_y, \omega_r]^T$  为系统的过程噪声,其误差方差阵为  $\mathbf{Q}_{k-1}$ 。

在锥套的跟踪过程中,  $k$  时刻可以观测的变量是锥套的中心坐标  $(x, y)$  和半径  $r$ ,  $\mathbf{Z}_k = (x_k, y_k, r_k)^T$ , 系统的观测方程可以表示为

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{H}_k = [\mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 3}]$  为系统的观测矩阵,  $\mathbf{V}_k$  为系统的观测噪声,其误差方差阵为  $\mathbf{R}_k$ 。

## 2 Kalman 滤波器设置

### 2.1 滤波初值选取

在空中加油实施过程中,加油机和受油机在某个距离间隔上开始进入平飞接近的过程,此时随着两机距离的不断减小,锥套的成像尺寸不断变大,并在实时视频图像中呈现二维运动状态。在目标搜索阶段,利用文献[10]所提出的圆形目标检测方法,对图像进行全局搜索,若搜索到的圆形目标,且半径大小满足阈值范围:10~30 像素,则判断圆形目标捕获成功。

当首次成功捕获锥套目标时,将得到第一组目标数据,包括锥套中心的图像坐标  $(x_0, y_0)$  和锥套尺寸  $r_0$ , 把  $(x_0, y_0, r_0, 0, 0, 0)$  作为 Kalman 预测的滤波初值  $\hat{\mathbf{X}}_0$ 。根据文献[11]对加油试飞数据的分析,本文取

$$\mathbf{P}_0 = \text{diag} \left( \frac{50^2}{3^2}, \frac{20^2}{3^2}, \frac{5^2}{3^2}, \frac{50^2}{3^2}, \frac{20^2}{3^2}, \frac{5^2}{3^2} \right) \quad (3)$$

### 2.2 目标遮挡时参数的自适应调整

由于目标和摄像机同时处于运动中,容易受背景物的干扰而发生遮挡现象,因此本文在设置参数时,需要对目标遇到遮挡的情况进行考虑。当目标发生遮挡,观测值的精度将受遮挡程度的影响,如果目标被遮挡面积较大,那么观测值的可信度降低,滤波增益  $K_k$  将减小。文中定义  $t$  时刻目标区域像素  $N_t$  和  $t-1$  时刻的目标区域像素  $N_{t-1}$  的比值  $\gamma_t$  为目标遮挡系数,由于摄像头是从 25 m 外逐渐接近锥套的,  $N_t$  会由初始值逐渐增大,且锥套目标初始捕获区域像素不为零,则  $\gamma_t$  可表示为

$$\gamma_t = \begin{cases} \left| \frac{N_t}{N_{t-1}} - 1 \right| & \left| \frac{N_t}{N_{t-1}} - 1 \right| \leq 1 \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

当  $\gamma_t = 1$ , 即目标被完全遮挡。再设置一个阈值  $\beta$ , 当  $\gamma_t < \beta$  时,  $\mathbf{R}_k$  设置为  $\gamma_t \mathbf{I}_{3 \times 3}$ ,  $\mathbf{Q}_k$  被设置为  $(1 - \gamma_t) \mathbf{I}_{6 \times 6}$ ; 反之则  $\mathbf{R}_k$  设置为  $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ ,  $\mathbf{Q}_k$  被设置为 0。当目标区域被遮挡面积超过前一帧有效检测区域一半时,表明当前帧图像处理效果较差,因此只采用状态方程预测估计值作为当前帧状态信息,不考虑量测信息。本文阈值  $\beta$  取 0.5。

### 2.3 目标观测和特征更新过程

采用式(1,2)建立锥套运动模型,利用当前信

息对下一帧目标进行预测,缩小搜索范围和搜索时间,同时利用新的目标特征更新模型,反复迭代即可实现目标的连续跟踪。其中,目标观测和特征更新过程是 Kalman 滤波器实现的关键。

针对锥套模型的几何特征,文中采用一种改进的霍夫梯度法进行特征更新,进而得到系统的最优观测值。具体算法如下:

(1) 对搜索框中的运动目标,进行高斯滤波,在此基础上利用 Canny 算子获取图像的边缘信息,并利用 Sobel 算子计算非零像素点的梯度值和梯度方向;

(2) 以  $k-1$  时刻圆形目标中心  $C(x_{k-1}, y_{k-1})$  为中心点,  $4r_{k-1}$  为边长构建矩形跟踪框。沿非零像素点梯度的方向和反方向对跟踪框内像素点进行累加,累加值记作  $S_c(x_k, y_k)$ ,对其进行降序排序,并按照下面两个步骤进行选取当前帧圆形目标中心  $C(x_k, y_k)$ ;

① 当且仅当  $S_c(x_k, y_k)$  大于等于八像素邻域  $T(x_k, y_k)$  所有梯度累加值时,即

$$S_c(x_k, y_k) \geq \max\{T(x_k, y_k)\} \quad (5)$$

② 对选取的候选中心  $C(x_k, y_k)$ ,当且仅当与前一帧圆心坐标  $C(x_{k-1}, y_{k-1})$  满足:  $(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2 < \sigma^2$  时,对其进行保留,否则对  $S_c(x_k, y_k)$  取值进行降序选取,本文中阈值  $\sigma$  取 8 个像素。

(3) 最后取候选中心  $C(x_k, y_k)$ ,对搜索框中非零像素点与候选中心进行距离解算,选取被最多非零像素点支持的距离值作为当前帧最合适的半径值  $r_k$ 。

改进的霍夫梯度法较之传统的霍夫梯度法,可有效抑制边缘无效干扰;同时采用两种限制条件对选取的圆形坐标进行筛选,一定程度上提高了霍夫梯度法的鲁棒性。

### 3 锥套 Kalman 预测跟踪算法实现

在跟踪过程中,基于 Kalman 预测的锥套跟踪算法,具体如图 2 所示。

### 4 实验验证与分析

为了验证本文方法对锥套的跟踪性能,通过模拟空中加油的对接运动,利用不锈钢环固定在稳定伞的支撑骨架内侧,使伞骨保持展开状态,并将锥

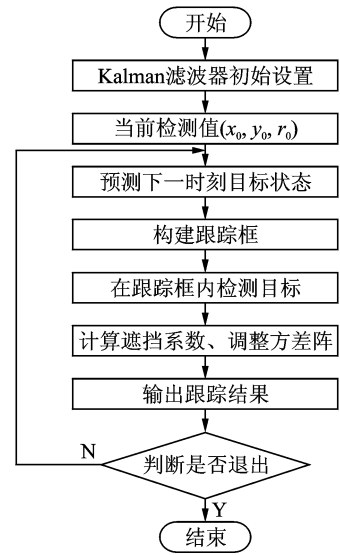


图 2 基于 Kalman 估计的目标跟踪算法流程图

Fig. 2 Target tracking algorithm flowchart based on Kalman prediction

套安装在升降机构上,可通过手轮调节锥套高度。同时,将升降机构放置在四轮平板车上,通过电机驱动小车作前后、左右匀速或者变速运动。通过工业摄像机实时采集锥套运动图像。实验中,设置锥套 Kalman 模型中误差方差阵的初始值分别为

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_k = \text{diag}(2 \times 10^{-5}, 2 \times 10^{-5}, 2 \times 10^{-5}) \\ \mathbf{R}_k = \text{diag}(10^{-3}, 10^{-3}, 10^{-3}) \end{cases} \quad (6)$$

选取不同的背景环境,在迎光、侧光以及阴天等 3 种光照条件下,通过实验人员操纵电机驱动四轮平板车匀速运动,逐渐靠近模拟受油探头,以模拟锥套与受油探头的对接运动。实验中,统计实时采集的总图像帧数和目标稳定跟踪帧数,作为评价算法跟踪性能的参考信息,统计结果详见表 1。可以发现,在不同光照环境下,本文方法均能较好地实现对运动目标的稳定跟踪,稳定跟踪的帧数百分比保持在 90% 以上,说明了该方法能够适应不同的光照条件。

表 1 锥套跟踪情况统计结果

Table 1 Drogue tracking statistics results

| 光线条件 | 实验距离     | 采集帧数  | 稳定跟踪帧数 | 跟踪百分比/% |
|------|----------|-------|--------|---------|
| 迎光   | 1 m~10 m | 6 614 | 6 122  | 92.2    |
| 侧光   |          | 6 529 | 6 318  | 96.7    |
| 阴天   |          | 6 640 | 6 262  | 96.7    |

对于采集的锥套运动图像,预先通过人工标记获得真实值。通过记录锥套的 Kalman 跟踪结果,与真实值进行比较,绘制水平方向、垂直方向和内套筒半径的跟踪曲线,如图 3 所示。由图可以看出,真实值曲线和跟踪值曲线的重合程度较好,说明本文研究的 Kalman 跟踪模型,较准确地预测了下一时刻锥套的中心位置坐标和内套筒半径,能够跟随锥套的实际运动,具有较好的跟踪精度。

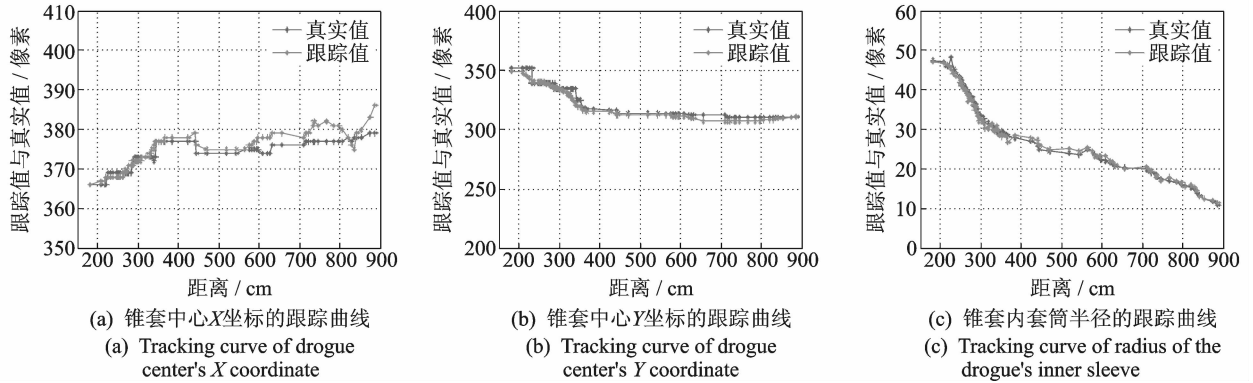


图 3 基于 Kalman 预测的锥套跟踪曲线

Fig. 3 Drogue's tracking curve based on Kalman prediction

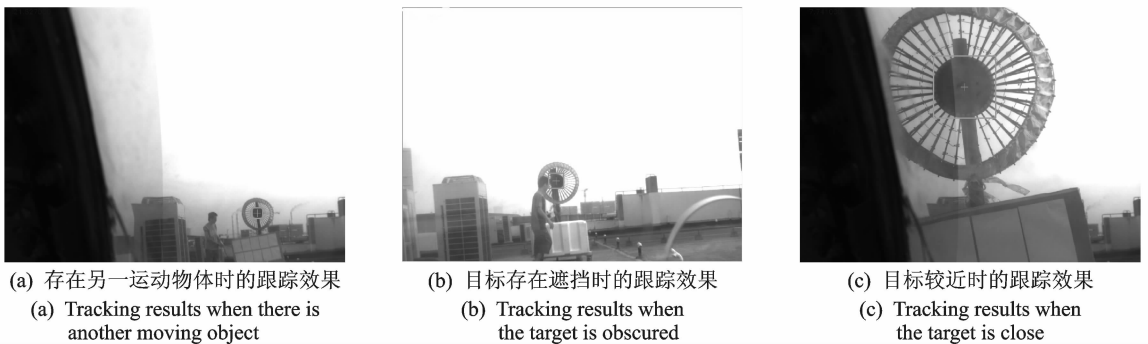


图 4 基于 Kalman 预测的锥套跟踪效果图

Fig. 4 Drogue's tracking results based on Kalman prediction

## 5 结束语

本文对软式空中加油中的锥套跟踪问题展开研究,提出了基于 Kalman 预测的跟踪方法。利用锥套的位置和尺寸信息建立 Kalman 滤波方程,利用改进的霍夫梯度法解算值作为观测值,基于 Kalman 预测进行锥套的跟踪,并引入目标遮挡系数,实现了参数的自适应调整。实验结果表明,本文方法对不同背景、不同距离、视场中是否有非目标的运动物体以及目标发生遮挡等情况,均具备对锥套持续、稳定的跟踪能力。

同时,在实验中截取了 3 张跟踪效果图,如图 3 所示,线框表示由 Kalman 估计构建的目标跟踪框,十字形指示当前检测到的锥套中心位置。由图 4(a)可以看出,在远景情况下能够准确跟踪锥套目标;由图 4(b)可以看出,本文能够克服部分遮挡的影响,利用遮挡因子调整参数有效地解决目标遮挡时的跟踪问题;由图 4(c)可以看出,当目标相对摄像机距离较近时,本文具有良好的跟踪能力。

## 参考文献:

- [1] 杨朝星, 陆宇平. 基于凯恩方法的硬式空中加油多体动力学分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(5): 605-610.  
Yang Chaoxing, Lu Yuping. Kane method based modeling and analysis on multi-body dynamics of boom refueling system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 45(5): 605-610.
- [2] Martinez C, Richardson T, Thomas P, et al. A vision-based strategy for autonomous aerial refueling tasks[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013,

- 61(8): 876-895.
- [3] Tandale M D, Bowers R, Valasek J. Trajectory tracking controller for vision-based probe and drogue autonomous aerial refueling[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(4): 846-857.
- [4] Sugandi B, Kim H, Tan J K, et al. Tracking of multiple moving objects under outdoor environment using color-based particle filter[C] // *Computer Science and Information Technology (ICCSIT)*, 3rd IEEE International Conference on. [S. l.]: IEEE, 2010: 103-107.
- [5] 章飞, 周杏鹏, 陈小惠. 基于粒子滤波的交互式多模型多机动目标跟踪[J]. *数据采集与处理*, 2011, 26(2): 181-187.
- Zhang Fei, Zhou Xingpeng, Chen Xiaohui. Interacting multiple model tracking algorithm of multiple maneuvering targets based on partical filter[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2011, 26(2): 181-187.
- [6] Elise Arnaud, Etienne Mémin. Partial linear Gaussian models for tracking in image sequences using sequential monte carlo methods[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, 74(1): 75-102.
- [7] Fu Z, Han Y. Centroid weighted Kalman filter for visual object tracking[J]. *Measurement*, 2012, 45(4): 650-655.
- [8] Han Z, Ye Q, Jiao J. Combined feature evaluation for adaptive visual object tracking[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2011, 115(1): 69-80.
- [9] 王旭峰, 董新民, 孔星炜, 等. 视觉辅助的无人机自主空中加油建模与仿真[J]. *飞行力学*, 2013, 31(4): 331-335.
- Wang Xufeng, Dong Xinmin, Kong Xingwei, et al. Visual-aided modeling and simulation of unmanned aerial vehicle autonomous aerial refueling[J]. *Flight Dynamics*, 2013, 31(4): 331-335.
- [10] 张翼, 孙永荣, 王艳, 等. 圆形目标实时检测的改进算法研究[J]. *计算机与数字工程*, 2012, 40(3): 89-92.
- Zhang Yi, Sun Yongrong, Wang Yan, et al. Research on the advanced algorithm of real-time detecting of circle target[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2012, 40(3): 89-92.
- [11] 吕美茜, 程存虎, 张正中, 等. 机载视频测试技术在空中加油试飞中的应用[J]. *测控技术*, 2006, 24(10): 53-56.
- Lü Meixi, Cheng Cunhu, Zhang Zhengzhong, et al. Application of airborne video test technologies during aerial refueling flight test[J]. *Measurement & Control Technology*, 2006, 24(10): 53-56.

**作者简介:**周晓达(1981-),男,工程师,研究方向:飞机信息显示和控制技术, E-mail: 531956321@qq.com; 孙旭东(1969-),男,研究员,研究方向:飞机航空电子总体技术; 邴洋海(1979-),男,工程师,研究方向:电气工程及自动化; 杨博文(1991-),男,硕士研究生,研究方向:嵌入式图像处理。