基于 OWRR-PF 的机载图像中导弹跟踪方法

郑 红 隋强强 孙玉泉

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191) (北京航空航天大学 数学与系统科学学院, 北京 100191)

摘 要: 针对利用图像信息实现飞行器的导弹预警跟踪中导弹运动 2D 建模、运动模型非线性和目标干扰非高斯等问题,研究了比例导引下导弹在三维空间中的运动在成像面上的运动模式,建立了比例制导导弹的 2D 投影运动状态模型. 由于模型中速度和加速度等主要物理量的非线性,并考虑导弹运动过程中受到的风向、风力、气旋和气流等随机干扰的非高斯性,采用粒子滤波方法实现导弹跟踪;并针对粒子滤波在跟踪过程中存在的粒子退化问题,提出有序权值残差重采样粒子滤波(OWRR-PF, Ordered Weight Residual Resampling Particle Filter)方法,该方法缓解了粒子退化问题,提高了跟踪的准确度. 利用所建立的导弹运动模型进行连续视频试验,与标准粒子滤波相比跟踪精度提高了 70% 左右,与残差重采样粒子滤波方法相比跟踪精度提高了 15% 左右.

关 键 词: 导弹跟踪; 粒子滤波; 残差重采样; 有序权值

中图分类号: TP 206 + 1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)04-0453-06

Method of missile tracking in images based on ordered weight residual resampling particle filter

Zheng Hong Sui Qiangqiang

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Sun Yuquan

(School of Mathematics and Systems Science, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: There were many problems existing in the missile alarm and tracking for aircrafts, such as 2D missile motion modeling, the nonlinearity of the motion model and the non-Gaussian of the interference. The motion pattern of the proportional navigated missile from the 3D space to the camera imaging plane was studied and the motion model of the 2D projection of the proportional navigated missile was established. Since the velocity and acceleration in the model was non-linear, and the random interference (e.g., wind direction, wind power, cyclone, air flow) encountered by missiles was also non-linear, the particle filter was used to track missiles. As for the particle degeneration problem in the tracking procedure, the ordered weight residual resampling particle filter (OWRR-PF) method was presented to release the particle degeneration problem and improve the tracking accuracy. Experimental results demonstrate that the tracking accuracy by using OWRR-PF method was improved by 70% than the standard particle filter, and 15% than the residual resampling particle filter.

Key words: missile tracking; particle filter; residual resampling; ordered weight

导弹目标跟踪在国家安全中占据重要地位, 因而引起国内外研究者的广泛关注[1]. 导弹预警

收稿日期: 2010-12-17; **网络出版时间**: 2012-04-20 09:19

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120420.0919.018.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60543006); 重点实验室基金资助项目(914C150105100C1502)

作者简介: 郑 红(1961 -)女,河北邯郸人,教授, julyanna@vip.sina.com.

包括导弹探测及跟踪两个阶段. 导弹探测主要是发现导弹,由于一般导弹体积小、运动速度快,需要及早发现才能起到预警作用,所以目标早期的图像信息呈现出点源特征;又由于点源目标的空间特征有限,使得一般图像处理算法难以施展,因此,其运动规律在机载成像设备上的投影模型就成为导弹探测的重要识别模式. 目前导弹探测算法主要是运动探测算法,一般假设导弹在短时间内为匀速直线运动,尚未见基于目标真实运动规律的导弹探测与跟踪模型. 本文建立了基于飞行器成像的导弹运动二维投影模型.

导弹跟踪一般按照其运动规律及干扰模式进行预测跟踪,导弹的导引规律主要有纯追踪法、平行接近法、比例导引法和三点法,最常用的是比例导引法[2]. 经典的点源目标跟踪方法主要有:背景建模、光流法、卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波和无味卡尔曼滤波等[3]. 扩展卡尔曼滤波及无味卡尔曼滤波将非线性系统线性化后利用基本卡尔曼滤波进行处理,能够达到处理非线性系统的目的,但是在滤波误差及预测误差比较大时,由于线性化忽略了高阶项影响导致滤波不稳定甚至发散,所以在强非线性条件下这两种方法并不能达到很好的跟踪效果. 由于本文建立的导弹运动二维投影模型具有明显的非线性非高斯特性,其系统状态/量测模型非线性,模型/量测噪声不服从高斯分布. 对于非线性、非高斯系统的状态估计问题,目前的研究热点是基于序贯蒙特卡罗方法和 SIS 的粒子滤波方法[4]. 标准粒子滤波算法选择易于实现的先验概率密度作为重要密度函数,容易出现粒子退化现象. 对粒子退化问题主要有两种解决方案:①选取好的重要性密度函数. 文献[5]用 EKF 方法生成重要密度函数, 称为扩展卡尔曼粒子滤波器(EKPF),文献[6]使用 UKF 方法产生 PF 的重要性分布, 称为 Unscented 粒子滤波器(UPF)[7];②粒子重采样. 目前的重采样方法有:多项式重采样[8],残差重采样[9],分层重采样,系统重采样[10],其它重采样算法都是在这 4 种方法的基础上改进得到的. 这些重采样方法在一定程度上减缓了粒子退化程度,但是由于粒子权重的无序性导致重采样过程容易丢弃权重大的粒子.

因此,本文提出有序权值残差重采样粒子滤波方法,改进了粒子退化程度,提高了跟踪精度.

1 机载成像信息的导弹运动模型

本文研究的目标是飞行器飞行过程中,导弹以飞行器为目标实施攻击时,飞行器机载成像设备所获取的图像与自身飞行姿态解耦之后,所获得的导弹三维运动轨迹在飞行器成像设备上的二维投影图像中的轨迹.

假设以飞行器当前位置为中心,竖直向下为视场中心,视场半角为 θ,焦距为 R,则导弹的像成在半径为 $r = R\tan\theta$ 的圆上,如图 1 所示.

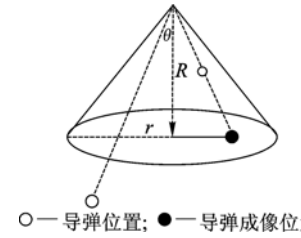


图 1 导弹成像位置示意图

假设导弹根据比例制导方式追击飞机,比例导引系数为 3,在三维空间 $Oxyz$ 中,某一时刻飞机位于点 $M = (M_x \quad M_y \quad M_z)$,飞行方向角为 $\alpha = (\alpha_x \quad \alpha_y \quad \alpha_z)$,飞机作直线运动,导弹位于点 $N = (N_x \quad N_y \quad N_z)$,飞行方向角为 $\beta = (\beta_x \quad \beta_y \quad \beta_z)$. 导弹与飞机在三维空间随着时间飞行的运动轨迹如图 2 所示. 飞机发现导弹时:飞行器初始参数 $M = (25 \quad 5 \quad 10)$,$\alpha = (159° \quad 0° \quad 12°)$;导弹初始参数 $N = (0 \quad 0 \quad 0)$,$\beta = (24° \quad 79° \quad 68°)$.

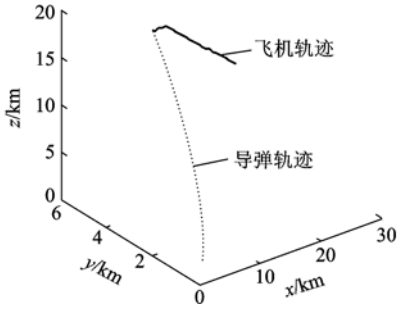


图 2 飞机与导弹在三维空间的运动轨迹

从飞机上看到的导弹在机载成像二维平面上的运动轨迹如图 3 所示,R 为 2 km.

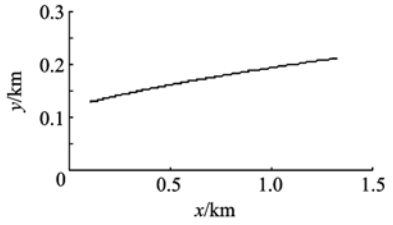


图 3 导弹在飞行器成像二维平面上的运动轨迹

根据导弹在二维平面上坐标位置的仿真数据,将导弹映射到分辨率为 320 × 240 的图像上,得到目标的位移曲线如图 4 所示,速度曲线如图 5 所示.

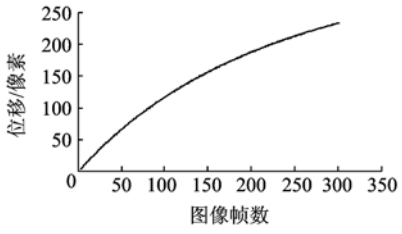


图 4　目标的位移曲线

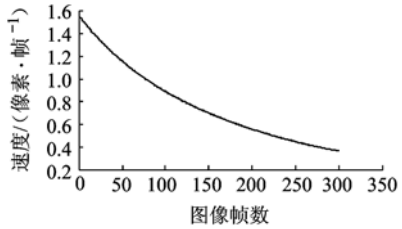


图 5　目标的速度曲线

通过得到的二维平面上的导弹位置坐标分析导弹的运动位移及速度,可以看出在二维平面内的运动为曲线运动,不但速度大小发生变化,而且速度方向也发生变化. 由于图像帧间的时间比较小,所以可以利用当前帧和前一帧图像中目标的位移差作为下一帧的目标速度大小,当前帧和前一帧图像中目标的速度方向与水平方向的夹角变化率作为下一帧的目标速度方向变化大小. 当前帧与前一帧图像的位移差即是当前帧的目标位置坐标与前一帧的目标位置坐标间的距离:

$$\sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2} \tag{1}$$

式中,x_k和 y_k分别为目标在 k 时刻水平方向和垂直方向上的坐标值. 当前帧和前一帧图像中目标的速度方向与水平方向的夹角变化率,即是当前帧的目标速度方向和水平方向的夹角与前一帧的目标速度方向和水平方向的夹角之差:

$$\arctan\frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} - \arctan\frac{y_{k-1} - x_{k-2}}{x_{k-1} - x_{k-2}} \tag{2}$$

因此,下一帧图像中目标速度方向与水平方向的夹角即是当前帧的夹角与夹角变化率之和:

$$2\arctan\frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} - \arctan\frac{y_{k-1} - x_{k-2}}{x_{k-1} - x_{k-2}} \tag{3}$$

根据式(1)~式(3),利用运动学规律得到下一帧图像中导弹在水平方向及垂直方向上的位置关系为

$$x_{k+1} = x_k + \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2} \cdot \cos\left(2\arctan\frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} - \arctan\frac{y_{k-1} - x_{k-2}}{x_{k-1} - x_{k-2}}\right) \tag{4}$$

$$y_{k+1} = y_k + \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2} \cdot \sin\left(2\arctan\frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} - \arctan\frac{y_{k-1} - x_{k-2}}{x_{k-1} - x_{k-2}}\right) \tag{5}$$

根据导弹在水平方向及垂直方向的位置关系式(4)和式(5),建立了运动小目标的系统模型如下:

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{S}_{k+1} &= f(\boldsymbol{S}_k) + \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix}\boldsymbol{W}_k \\ \boldsymbol{Z}_k &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\boldsymbol{S}_k + \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix}\boldsymbol{V}_k \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

式中,$\boldsymbol{S}_k = (x_k \quad y_k)^{\mathrm{T}}$为系统的状态向量;$\boldsymbol{Z}_k = (x_k \quad y_k)^{\mathrm{T}}$为系统的观测向量;$T$ 为系统的帧间采样周期;$\boldsymbol{W}_k$为系统噪声;$\boldsymbol{V}_k$为系统的量测噪声;$f(\cdot)$满足式(4)和式(5)中的函数关系,可以看出 $\boldsymbol{S}_{k+1}$与 $\boldsymbol{S}_k$之间很明显为非线性关系. $\boldsymbol{W}_k$ 及 $\boldsymbol{V}_k$中含有运动过程中受空气阻力、气流等引起的非高斯噪声.

2　有序权值残差重采样粒子滤波

2.1　标准粒子滤波方法及粒子退化问题

粒子滤波以蒙特卡洛随机理论为基础,通过由若干粒子的加权得到目标的状态估计. 这种滤波方法不受线性化误差和高斯噪声的约束,适用于非线性非高斯的模型. 该方法对系统噪声没有任何限制,通过预测和更新来自于系统概率密度函数的采样集来近似非线性系统的随机贝叶斯估计. 其基本思想是:依据系统状态向量的经验条件分布在状态空间产生一组随机样本集合;根据量测不断调整粒子的权重和位置,通过调整后的粒子信息修正最初的经验条件分布.

已知动态系统的状态先验条件概率 $p(x_0)$,利用$\{x^i_{0:k}, w^i_k\}_{i=1}^{N_s}$描述 k 时刻目标状态 x_k的后验概率分布 $p(x_{0:k}|z_{1:k})$,$\{x^i_{0:k}, i=0,1,\cdots,N_s\}$是对应权值为$\{w^i_k, i=0,1,\cdots,N_s\}$的粒子集,其中,$x_{0:k}=\{x_j, j=0,1,\cdots,k\}$是 0 到 k 时刻的状态集. 权值被归一化为 $\sum_i w^i_k = 1$,则 k 时刻目标状态的后验概率分布可离散地加权为

$$p(x_{0:k} \mid z_{1:k}) \approx \sum_{i=1}^{N_s} w^i_k \delta(x_{0:k} - x^i_{0:k}) \tag{7}$$

粒子集$\{x^i_{0:k}\}_{i=1}^{N_s}$可由重要密度函数 $q(x_{0:k} \mid z_{1:k})$得到,则可得到重要性权值更新公式为

$$w^i_k \propto \frac{p(z_k \mid x^i_k)p(x^i_k \mid x^i_{k-1})p(x^i_{0:k-1} \mid z_{1:k-1})}{q(x^i_k \mid x^i_{0:k-1}, z_{1:k})q(x^i_{0:k-1} \mid z_{1:k-1})} = w^i_{k-1}\frac{p(z_k \mid x^i_k)p(x^i_k \mid x^i_{k-1})}{q(x^i_k \mid x^i_{0:k-1}, z_{1:k})} \tag{8}$$

如果系统符合一阶马尔科夫过程,这种情况下 $q(x_k|x_{0:k-1},z_{1:k})=q(x_k|x_{k-1},z_k)$,则修正后的权值为

$$w_k^i \propto w_{k-1}^i \frac{p(z_k|x_k^i)p(x_k^i|x_{k-1}^i)}{q(x_k^i|x_{k-1}^i,z_k)} \tag{9}$$

标准粒子滤波算法选择先验概率密度作为重要密度函数,这时候可将重要性权值化简为

$$w_k^i \propto w_{k-1}^i p(z_k|x_k^i) \tag{10}$$

将权值 w_K^k 归一化,得到后验概率密度为

$$p(x_k|x_{1:k}) \approx \sum_{i=1}^{N_s} w_k^i \delta(x_k - x_k^i) \tag{11}$$

当 $N_s \to \infty$ 时,由大数定理即可保证上式逼近真实后验概率 $p(x_k|z_{1:k})$.

重要性权值度量了相应输入序列的质量,较小的权值意味着采样值不是来自后验分布的主要部分,对预测的贡献不大,称为无效粒子. 重要性函数接近后验概率分布(重要性函数的方差接近为零),是用重要性函数代替后验概率分布作为采样函数的理想情况. 但是,标准粒子滤波选择先验概率密度作为重要密度函数,由于没有考虑当前的量测值,从重要概率密度中取样得到的样本与真实后验概率密度采样得到的样本有较大偏差,所以经过几步递归后出现粒子的权重集中到少数粒子上,导致大量计算工作浪费在权值小的无效粒子上,这就是粒子滤波的退化问题.

2.2 有序权值残差重采样算法

重采样技术是为了解决粒子滤波的重要性权值可能有很大偏差的问题而引入的减少无效样本、增加有效样本的方法,这种方法能够舍弃重要性权值小的无效样本,并且复制重要性权值较大的样本. 该方法的基本思想是对后验概率密度 $p(x_k|z_{1:k}) \approx \sum_{i=1}^{N_s} w_k^i \delta(x_k - x_k^i)$ 重新采样 N_s 次,产生新的粒子集 $\{x_k^{i*}\}_{i=1}^{N_s}$,使 $p(x_k^{i*} = x_k^j) = w_k^j$. 粒子滤波过程中是否进行重采样,根据粒子退化程度进行决定. 粒子退化程度由粒子权重的方差衡量,方差越大退化程度越大,方差越小退化程度越小. 为计算方便,通常情况下利用粒子权值的平方和的倒数 $N_{\text{eff}} = 1 \Big/ \sum_{i=1}^{N_s} (w_k^i)^2$ 衡量粒子退化程度,N_{eff} 越小退化程度越大. N_{eff} 与设定的阈值 N 比较,当 $N_{\text{eff}} < N$ 时,则进行重采样,这样不需要每个时刻都进行重采样,能够自适应的根据样本情况决定是否进行重采样,可以在一定程度上降低算法复杂度. N 选取的一般原则是保证重采样过程中粒子不被大量丢弃.

残差重采样以多项式重采样算法为基础,在(0,1)区间内按照均匀分布进行采样,得到独立同分布的采样值集合,所得集合与粒子权重取整后的残差粒子进行比较,确定下一步的重采样过程. 这种方法因均匀分布顺序的随机性以及粒子权重大小的无序性,会导致在某些情况下丢失权重大的粒子. 基于这种情况,本文提出有序权值残差重采样方法. 将有序权值残差重采样方法运用到粒子滤波,便形成有序权值残差重采样粒子滤波(OWRR-PF, Ordered Weight Residual Resampling Particle Filter)方法,该方法对粒子权值进行排序以避免丢失权重较大的粒子. 算法归纳如下:

1) 在(0,1)区间内按照均匀分布采样得到 n 个独立同分布的采样值集合 $\{U^i\}_{1\leqslant i\leqslant n}$;

2) 对权值 $w^i(i=1,2,\cdots,n)$ 按照从小到大的顺序排序,当 $w^i = w^{i-1}$ 时,权值顺序保持不变,得到有序的权值序列:$w^{i*}(i=1,2,\cdots,n)$,使得 $w^{i*} \geqslant w^{(i-1)*}$;

3) 计算 $R\sum_{i=1}^{n} \lfloor nw^{i*} \rfloor$,得到残差粒子权值序列 $\bar{w}^{i*} = \dfrac{nw^{i*} - \lfloor nw^{i*} \rfloor}{n-R}, i=1,2,\cdots,n$, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整操作;

4) 利用多项式重采样算法对得到的权值序列 $\bar{w}^{i*}$ 进行重采样,得到对应粒子被复制数目的集合 $\{\bar{N}^i\}_{1\leqslant i\leqslant n}$;

5) 计算 $N^i = \lfloor nw^i \rfloor + \bar{N}^i$,$N^i$ 表示重采样前的第 i 个粒子在重采样后被复制的数目.

3 仿真实验及结果分析

3.1 实验设计

为了验证本文所提出的 OWRR-PF 算法,在 Matlab7.9 上采用一组导弹运动的红外视频进行跟踪验证,图像分辨率为 320×240;目标尺寸约为 2×2~5×5(像素),运动规律符合本文建立的运动模型. 将图像视频拆分成一组图像,首先确定导弹在第 1 帧中的位置,然后利用本文建立的导弹运动模型,结合所提出的 OWRR-PF 方法及标准粒子滤波方法、残差重采样粒子滤波方法分别进行预测跟踪,绘制 3 种跟踪方法在水平及垂直方向的跟踪误差曲线以及位移误差曲线. 粒子滤波的粒子数选为 200,每种方法实验 100 帧图像.

3.2　实验结果及分析

标准粒子滤波、残差重采样粒子滤波,以及 OWRR-PF 3 种方法在水平方向上位置的跟踪误差曲线如图 6 所示,在垂直方向上位置的跟踪误差曲线如图 7 所示,导弹位移误差曲线如图 8 所示. 图中横坐标为跟踪目标的图像数,图像数的单位为帧;纵坐标为估计误差,估计误差单位为像素.

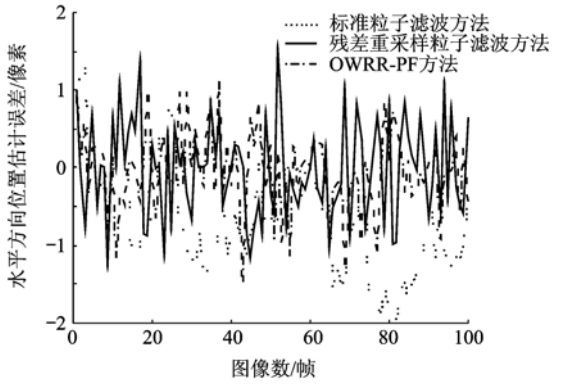


图 6　水平方向位置的跟踪误差曲线

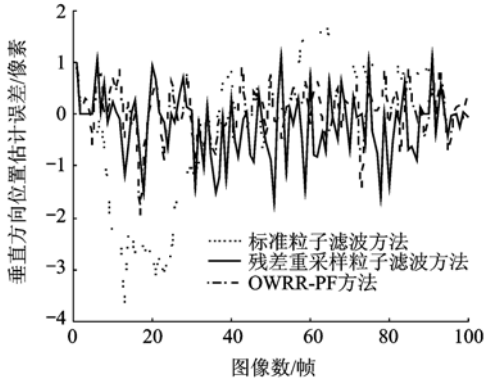


图 7　垂直方向位置的跟踪误差曲线

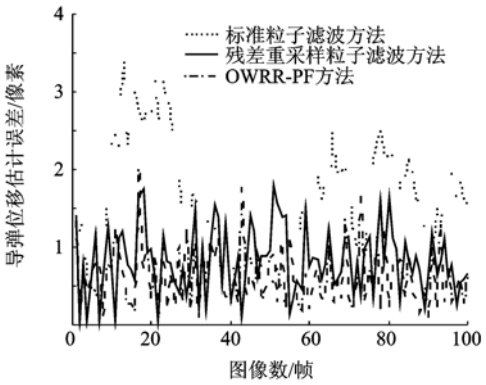


图 8　导弹位移值的估计误差曲线

从图 6、图 7 和图 8 可知:残差重采样粒子滤波及本文提出的 OWRR-PF 方法在跟踪误差上比标准粒子滤波有明显的提高,本文 OWRR-PF 方法比残差重采样粒子滤波方法也有较大的提高.

对标准粒子滤波、残差重采样粒子滤波以及 OWRR-PF 3 种方法的跟踪误差做统计分析得到误差的概率曲线如图 9 所示.

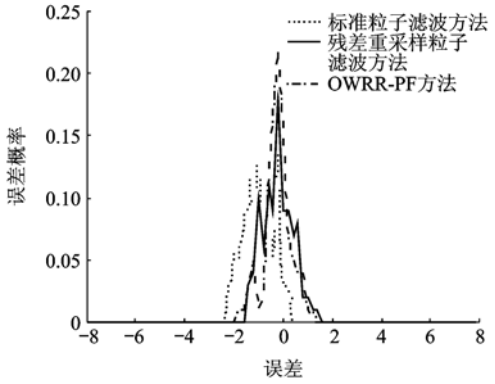


图 9　误差概率曲线

从图 9 可以看出,标准粒子滤波大的误差主要分布在 -2 ~4 之间;残差重采样粒子滤波及本文 OWRR-PF 方法的误差则主要分布在 -2 ~2 之间,并且主要集中在 0 附近;OWRR-PF 方法在误差 0 附近的概率要比残差重采样粒子滤波大 36% 左右. 从结果可以看出,OWRR-PF 方法的跟踪误差更小,具有较大的优势.

3 种粒子滤波方法在水平方向及垂直方向的均方位置误差(RMSE,Root Mean Square Error)均值比较结果如表 1 所示,方差比较结果如表 2 所示.

表 1　3 种粒子滤波的 RMSE 均值比较

方法	水平方向	垂直方向
标准粒子滤波	2.201 50	1.610 60
残差重采样粒子滤波	0.648 86	0.644 15
本文 OWRR-PF 方法	0.540 19	0.564 25

表 2　3 种粒子滤波的 RMSE 方差比较

方法	水平方向	垂直方向
标准粒子滤波	1.321 40	0.945 75
残差重采样粒子滤波	0.003 33	0.002 93
本文 OWRR-PF 方法	0.001 83	0.001 65

从表 1 和表 2 中的结果可以看出,残差重采样粒子滤波及本文 OWRR-PF 方法的均方误差比标准粒子滤波方法有明显改善,跟踪精度提高 70% 左右;本文 OWRR-PF 方法与残差重采样方法相比,跟踪精度提高 15% 左右.

4　结　论

本文研究了基于飞行器图像信息的导弹跟踪问题,根据比例制导导弹的运动规律及飞行器的运动规律,建立了导弹在二维成像面上投影的运动状态模型;并利用粒子滤波方法根据导弹在 2D 成像面上的运动模型对其进行预测跟踪. 针对粒子滤波存在的粒子退化问题及残差重采样粒子滤

波方法的弱点提出 OWRR-PF 方法. 该方法在采样过程中调整了粒子权重的顺序,避免了重采样过程中丢弃大权值粒子,减轻了粒子退化程度. 仿真实验验证了所提方法的优越性,与标准粒子滤波相比跟踪精度有明显的提高,与残差重采样相比也有较大的提高.

参考文献(References)

[1] Li Zhengzhou, Qi Lei, Li Wenyan, et al. Track initiation for dim small moving infrared target based on spatial-temporal hypothesis testing[J]. J Infrared Milli Terahz Waves, 2009, 30(5): 513 – 525

[2] 田源,王俊波,任章. 拦截大气层外机动目标的模糊导引规律[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(7):816 – 820
Tian Yuan, Wang Junbo, Ren Zhang. Fuzzy guidance law for interception of extraatmospheric maneuvering targets[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(7): 816 – 820

[3] 程建,周越,蔡念. 基于粒子滤波的红外目标跟踪[J]. 红外与毫米波学报,2006,25(2):113 – 117
Cheng Jian, Zhou Yue, Cai Nian. Infrared object tracking based on particle filters [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(2): 113 – 117

[4] 张磊,李行善,于劲松. 一种基于二元估计与粒子滤波的故障预测算法[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(7):798 – 802
Zhang Lei, Li Xingshan, Yu Jinsong. Fault prognostic algorithm based on dual estimation and particle filter[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(7): 798 – 802

[5] Capp'e O, Godsill S J, Moulines E. An overview of existing methods and recent advances in sequential Monte Carlo [J]. IEEE Proceedings, 2007, 95(2): 899 924

[6] Tudoroiu N, Khorasani K. State estimation of the vinyl acetate reactor using unscented kalman filters (UKF) [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics and Control Applications, 2005, 29(2): 494 – 498

[7] Julier S J, Uhlmann J K. Unscented filtering and nonlinear estimation [J]. Proc IEEE, 2004, 92 (3): 401 – 422

[8] Gordon N J, Salmond D J, Smith A F M. Novel approach to nonlinear/non-gaussian bayesian state estimation [J]. IEE Proceedings F, 1993, 140(2): 107 – 113

[9] Liu J S, Chen R. Sequential monte carlo methods for dynamic systems [J]. Journal of the American Statistical Association, 1998, 443 (93): 1032 – 1044

[10] Doucet A, Godsill S J, Andrieu C. On sequential monte carlo sampling methods for bayesian filtering [J]. Statistics and Computing, 2000, 10(3): 197 – 208

(编 辑:刘登敏)

(上接第 452 页)

[2] Kirk A M, Gargoloff J I, Rediniotis OK, et. al. Numerical and experimental investigation of a serpentine inlet duct [R]. AIAA 2007-842, 2007

[3] Beale D K, Zelenakt M. Development and validation of a freejet technique for inlet-engine compatibility testing[R]. AIAA-92-3921, 1992

[4] Lee K, Lee B, Kang S, et al. Inlet distortion test with gas turbine engine in the altitude engine test facility[R]. AIAA-2010-4337, 2010

[5] 王如根,江勇,飞机进气道/发动机匹配工作流场测试和分析[J],航空计测技术,1998,18(5):11 – 13
Wang Rugen, Jiang Yong. Test and analysis of the flow field on air inlet/engine matching operation[J]. Aviation for Test Technology, 1998, 18(5): 11 – 13(in chinese)

[6] 张发启,江勇,桑增产,等,某型飞机进气道对发动机性能和台架点的影响[J]. 推进技术,2001,22(2):137 – 139
Zhang Faqi, Jiang Yong, Sang Zengchan, et al. Effect of inlet on the engine performance and platform point for aircraft[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(2): 137 – 139(in Chinese)

[7] 江勇,陶增元,张发启,等. 某型飞机进气道与发动机地面匹配实验研究[J]. 航空动力学报,2003,18(4):554 – 557
Jiang Yong, Tao Zengyuan, Zhang Faqi, et al. Matching test of an aircraft inlet and engine on the ground[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(4): 554 – 557(in Chinese)

[8] Sutlif D L, Konno K E, HeiDelberg L J. Duct mode measurements on the TFE731-60 full scale engine[R]. AIAA-2002-2564

[9] Weir D, Bouldin B, Mendoza J. Static and flight aeroacoustic evaluations of a scarf inlet[R]. AIAA-2006-2462, 2006

[10] Danielle K L, Validation of the predicted circumferential and radial mode sound power levels in the inlet and exhaust ducts of a fan ingesting distorted inflow[R]. AIAA-2011-2808, 2011

[11] 李大伟,张云飞,马东立. 背负式 S 形进气道设计及数值分析[J]. 推进技术,2006,27(1):61 – 65
Li Dawei, Zhang Yunfei, Ma Dongli. Design and numerical investigation of dorsal S-shaped inlet[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(1): 61 – 65 (in Chinese)

(编 辑:李 晶)