

基于姿态角辅助非线性滤波算法的机动目标跟踪

张 凯,单甘霖,吉 兵,陈 海

(机械工程学院光学与电子工程系,河北石家庄 050003)

摘 要: 基于扩展卡尔曼滤波思想,本文提出了一种融合姿态角信息的非线性滤波算法.通过分析目标二维和三维运动特征与姿态角的关系,以姿态角和速度模值为控制项,建立状态方程和量测方程,对目标的位置状态进行估计,实现了姿态角信息和位置信息的有效融合.姿态角在不同随机噪声条件下的仿真实验结果验证了算法的准确性和实时性.

关键词: 目标跟踪; 姿态角; 扩展卡尔曼滤波; 非线性滤波

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 08-1670-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.08.028

Maneuvering Targets Tracking Based on Pose-Aided Nonlinear Filter Algorithm

ZHANG Kai, SHAN Gan-lin, JI Bing, CHEN Hai

(Department of Optical and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

Abstract: Based on the thought of Extended Kalman Filter (EKF), the nonlinear filter fusing pose information was proposed by the analysis of relationship between pose and motion characteristic in 2D and 3D, with pose and velocity modulus as its control, the position of target was estimated through state and measurement equations, pose information and position information are fused effectively. The simulation results, which under the condition that pose with different noise, validate the accuracy and real time of the algorithm.

Key words: target tracking; pose; extended Kalman filter; nonlinear filtering

1 引言

在目标运动趋势的判断上,姿态角能够很好的预测目标的运动状态.因此,姿态角的计算^[1~6]及如何有效的利用姿态角信息来提高目标跟踪精度得到了关注^[7~12].

文献[7]将姿态角作为状态量,与 X 和 Y 轴的位置及速度向量一起参与滤波,建立了运动模型,实现了二维平面内姿态角辅助目标跟踪,而对三维空间中运动模型没有进一步研究.文献[8]利用姿态角辅助交互式粒子滤波(Interacting Multiple Model Particle Filter Algorithm, IMMPPF)的模型调整过程,通过姿态角与当前运动模式的模糊关联来辨识机动模式,进而把辨识结果与 IMMPPF 算法的后验粒子权值相融合,提高算法的模型分辨能力,这种算法对传统方法的部分参数进行改进,对跟踪效果的改进不明显.文献[9]建立包含位置、速度、加速度、姿态角和角速度等 15 个变量的 15 个动态方程和 9 个量测方程.从仿真来看,刚体模型的精度明显高于质点模型,但刚体模型的滤波精度受姿态角误差的影响比

较严重.

针对上述方法存在的问题,对目标运动模式与姿态角关系进行了分析,结合 EKF 思想,建立了姿态角辅助的非线性滤波(Pose-Aided Nonlinear Filter, PANF)算法的二维、三维模型.由于充分利用了姿态角信息对目标跟踪的指导作用,算法模型能够更加真实的反映目标的机动特性,仿真实验结果验证了算法的有效性.

2 二维滤波器

2.1 二维运动分析

目标在二维坐标系内的运动与偏航角 ψ 有着密切的联系,如图 1 所示.

图中 A 、 B 为相邻时刻目标中轴线与运动轨迹的切点, S 为机动时在 A 点的曲率中心, CD 为平行于 X 轴的线段.根据定义, $\angle EAD$ 为 A 时刻的偏航角. \widehat{AB} 对应夹角为偏航角的变化 $\Delta\psi$, $\angle BSA = \Delta\psi$. $\angle EAB$ 为 EA 与 AB 的夹角,根据几何关系得 $\angle EAB = \Delta\psi/2$. 得:

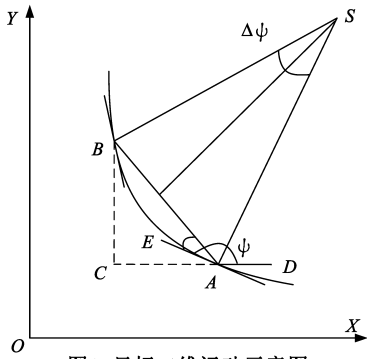


图1 目标二维运动示意图

$$\angle BAD = \angle EAD - \angle EAB = \psi - \Delta\psi/2 \quad (1)$$

AB 的长度为:
$$AB = \frac{2\sin(\frac{\Delta\psi}{2})}{\Delta\psi} \widehat{AB} \quad (2)$$

点 B 相对点 A 的坐标变化量为:

$$\begin{aligned} \Delta X &= AC = AB \cos(\angle BAD) \\ &= \frac{2\sin(\Delta\psi/2)}{\Delta\psi} \widehat{AB} \cos(\psi - \Delta\psi/2) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta Y &= CB = AB \sin(\angle BAD) \\ &= \frac{2\sin(\Delta\psi/2)}{\Delta\psi} \widehat{AB} \sin(\psi - \Delta\psi/2) \end{aligned} \quad (4)$$

\widehat{AB} 的长度可用点 A 时刻速度的模值表示:

$$\widehat{AB} = V_A \quad (5)$$

通过上述分析可看出,目标下一时刻位置可由当前时刻位置、姿态角中的偏航角及速度的模值共同决定.可利用三者对目标下一时刻状态进行有效的预测和估计.

2.2 二维滤波模型

在上述分析基础上,建立二维滤波模型.状态方程和量测方程分别为:

$$\mathbf{X}(k+1) = f(\mathbf{X}(k), V(k), \mathbf{u}(k)) + \mathbf{v}(k) \quad (6)$$

$$\mathbf{Z}(k+1) = h(\mathbf{X}(k+1), \Delta V(k+1), \mathbf{u}(k+1)) + \mathbf{w}(k+1) \quad (7)$$

其中, $\mathbf{u}(k) = [\psi(k) \ \dot{\psi}(k)]^T$ 为姿态角控制向量, $\mathbf{X}(k) = [x(k) \ y(k)]^T$ 为状态向量, $V(k)$ 为速度的模值, $\mathbf{v}(k)$ 和 $\mathbf{w}(k+1)$ 分别为过程噪声和量测噪声,均为零均值高斯白噪声,协方差为 $\mathbf{Q}(k)$ 和 $\mathbf{R}(k)$.

(1)根据式(3)~(5)得状态一步预测

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}(k+1|k) &= E[\mathbf{X}(k+1)|\mathbf{Z}^k] \\ &= E[f(\mathbf{X}(k), V(k), \mathbf{u}(k)) + \mathbf{v}(k)|\mathbf{Z}^k] \\ &= f(\hat{\mathbf{X}}(k|k), \hat{V}(k|k), \mathbf{u}(k)) \\ &= \mathbf{F}(k)\hat{\mathbf{X}}(k|k) + \begin{bmatrix} \frac{2\sin(\dot{\psi}(k)/2)}{\dot{\psi}(k)} \hat{V}(k|k) \cos\left(\psi(k) - \frac{\dot{\psi}(k)}{2}\right) \\ \frac{2\sin(\dot{\psi}(k)/2)}{\dot{\psi}(k)} \hat{V}(k|k) \sin\left(\psi(k) - \frac{\dot{\psi}(k)}{2}\right) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $\mathbf{F}(k)$ 为二阶单位矩阵, \mathbf{Z}^k 为 k 时刻的累计量测集合.

(2)协方差一步预测

$$\mathbf{P}(K+1|k) = \mathbf{F}(k)\mathbf{P}(k|k)\mathbf{F}^T(k) + \mathbf{Q}(k) \quad (9)$$

(3)速度一步预测

$$\hat{V}(k+1|k) = \hat{V}(k|k) + \sum_{i=1}^m K_{ii}(k)(\hat{L}(k+1|k) - \hat{L}(k|k)) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \hat{L}(k+1|k) &= \\ &= \sqrt{(\hat{x}(k+1|k) - \hat{x}(k|k))^2 + (\hat{y}(k+1|k) - \hat{y}(k|k))^2} \end{aligned}$$

表示 $\hat{\mathbf{X}}(k+1|k)$ 与 $\hat{\mathbf{X}}(k|k)$ 之间的距离, $\hat{L}(k|k)$ 表示 $\hat{\mathbf{X}}(k|k)$ 与 $\hat{\mathbf{X}}(k-1|k-1)$ 之间的距离, $K_{ii}(k)$ 为 k 时刻增益矩阵 $\mathbf{K}(k)$ 对角线的第 i 个元素.

(4)量测预测

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{Z}}(k+1|k) &= E[\mathbf{Z}(k+1)|\mathbf{Z}^k] \\ &= E[h(\mathbf{X}(k+1), \Delta V(k+1), \mathbf{u}(k)) + \mathbf{w}(k)|\mathbf{Z}^k] \\ &= h(\hat{\mathbf{X}}(k+1|k), \Delta \hat{V}(k+1|k), \mathbf{u}(k)) \\ &= \mathbf{H}(k+1)\hat{\mathbf{X}}(k+1|k) + \begin{bmatrix} \frac{2\sin(\dot{\psi}(k)/2)}{\dot{\psi}(k)} \Delta \hat{V}(k+1|k) \cos\left(\psi(k) - \frac{\dot{\psi}(k)}{2}\right) \\ \frac{2\sin(\dot{\psi}(k)/2)}{\dot{\psi}(k)} \Delta \hat{V}(k+1|k) \sin\left(\psi(k) - \frac{\dot{\psi}(k)}{2}\right) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

$\Delta \hat{V}(k+1|k) = \hat{V}(k+1|k) - \hat{V}(k|k)$, $\mathbf{H}(k+1)$ 为二阶单位矩阵.

(5)量测预测协方差

$$\mathbf{S}(k+1) = \mathbf{H}(k+1)\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1) + \mathbf{R}(k+1) \quad (12)$$

(6)状态更新方程

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1|k+1) = \hat{\mathbf{X}}(k+1|k) + \mathbf{K}(k+1)\mathbf{n}(k+1) \quad (13)$$

且有:

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1)\mathbf{S}^{-1}(k+1) \quad (14)$$

$$\mathbf{n}(k+1) = \mathbf{Z}(k+1) - \hat{\mathbf{Z}}(k+1|k) \quad (15)$$

(7)协方差更新方程

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k+1|k+1) &= \mathbf{P}(k+1|k) - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{S}(k+1)\mathbf{K}^T(k+1) \end{aligned} \quad (16)$$

(8)速度模值更新

$$\begin{aligned} \hat{V}(k+1|k+1) &= \\ &= \hat{V}(k+1|k) + \sum_{i=1}^m K_{ii}(k+1)(\hat{L}(k+1|k+1) - \hat{L}(k+1|k)) \end{aligned} \quad (17)$$

3 三维滤波器

3.1 三维运动的分析

在飞行过程中,可通过偏航角来表示横滚角^[13].因

此,目标在三维坐标系中的运动可利用俯仰角 θ 和偏航角 ψ 来描述,如图 2 所示.

图中, B_1C_1 垂直于平面 OXY , A_1C_1 平行于平面 OXY . 根据定义可得, $\angle C_1A_1E_1 = \theta$, $\widehat{A_1B_1}$

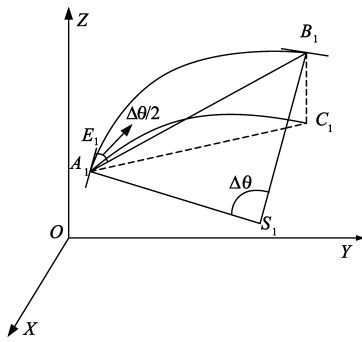


图2 目标三维运动纵坐标方向示意图

对应的 $\angle A_1S_1B_1 = \Delta\theta$, $\angle E_1A_1B_1 = \Delta\theta/2$, 得:

$$\angle C_1A_1B_1 = \angle C_1A_1E_1 - \angle B_1A_1E_1 = \theta - \Delta\theta/2 \quad (18)$$

Z 轴上变化量及在 OXY 平面上投影 A_1C_1 为:

$$\begin{aligned} \Delta Z &= B_1C_1 = A_1B_1 \sin(\angle C_1A_1B_1) \\ &= \frac{2\sin(\Delta\theta/2)}{\Delta\theta} \widehat{A_1B_1} \sin\left(\theta - \frac{\Delta\theta}{2}\right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_T(k+1|k) = E[\mathbf{X}_T(k+1) | \mathbf{Z}_T^k]$$

$$\begin{aligned} &= E[f_T(\mathbf{X}_T(k), V_T(k), \mathbf{u}_T(k)) + \mathbf{v}_T(k) | \mathbf{Z}_T^k] \\ &= f_T(\hat{\mathbf{X}}_T(k|k), \hat{V}_T(k|k), u_T(k)) \end{aligned}$$

$$= \mathbf{F}_T(k) \hat{\mathbf{X}}_T(k|k) + \begin{bmatrix} \frac{4\sin(\dot{\theta}(k)/2)\sin(\dot{\psi}(k)/2)}{\dot{\theta}(k)\dot{\psi}(k)} \hat{V}_T(k|k) \cos\left(\theta(k) - \frac{\dot{\theta}(k)}{2}\right) \cos\left(\psi(k) - \frac{\dot{\psi}(k)}{2}\right) \\ \frac{4\sin(\dot{\theta}(k)/2)\sin(\dot{\psi}(k)/2)}{\dot{\theta}(k)\dot{\psi}(k)} \hat{V}_T(k|k) \cos\left(\theta(k) - \frac{\dot{\theta}(k)}{2}\right) \sin\left(\psi(k) - \frac{\dot{\psi}(k)}{2}\right) \\ \frac{2\sin(\dot{\theta}(k)/2)}{\dot{\theta}(k)} \hat{V}_T(k|k) \sin\left(\theta(k) - \frac{\dot{\theta}(k)}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\hat{\mathbf{Z}}_T(k+1|k) = E[\mathbf{Z}_T(k+1) | \mathbf{Z}^k]$$

$$= E[h_T(\mathbf{X}_T(k+1), \Delta V_T(k+1), \mathbf{u}_T(k)) + \mathbf{w}_T(k) | \mathbf{Z}_T^k]$$

$$= \mathbf{H}_T(k+1) \hat{\mathbf{X}}_T(k+1|k) + \begin{bmatrix} \frac{4\sin(\dot{\theta}(k)/2)\sin(\dot{\psi}(k)/2)}{\dot{\theta}(k)\dot{\psi}(k)} \Delta \hat{V}_T(k|k) \cos\left(\theta(k) - \frac{\dot{\theta}(k)}{2}\right) \cos\left(\psi(k) - \frac{\dot{\psi}(k)}{2}\right) \\ \frac{4\sin(\dot{\theta}(k)/2)\sin(\dot{\psi}(k)/2)}{\dot{\theta}(k)\dot{\psi}(k)} \Delta \hat{V}_T(k|k) \cos\left(\theta(k) - \frac{\dot{\theta}(k)}{2}\right) \sin\left(\psi(k) - \frac{\dot{\psi}(k)}{2}\right) \\ \frac{2\sin(\dot{\theta}(k)/2)}{\dot{\theta}(k)} \Delta \hat{V}_T(k|k) \sin\left(\theta(k) - \frac{\dot{\theta}(k)}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (25)$$

4 实验结果与分析

4.1 二维滤波器

假设目标初始位置为 [2000m 26722m], 速度模值初始值为 400m/s, 偏航角初始值为 -180° , 仿真时间为 200s, 采样间隔为 1s, 目标在 20~80s 内以 $3^\circ/\text{s}$ 的右转弯, 120~180s 以 $-3^\circ/\text{s}$ 左转弯, 其他时间匀速直线运动, 运动轨迹如图 3 所示. 姿态角估计算法采用文献 [14] 中的基于降维动态模型库的十字搜索算法, 算法对偏航角和俯仰角估计最大误差为 1.1° , 周期耗时为

$$\begin{aligned} A_1C_1 &= A_1B_1 \cos(\angle C_1A_1B_1) \\ &= \frac{2\sin(\Delta\theta/2)}{\Delta\theta} \widehat{A_1B_1} \cos\left(\theta - \frac{\Delta\theta}{2}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

在平行于 OXY 平面上, C_1 相对于 A_1 的坐标变化量为:

$$\begin{aligned} \Delta X &= \frac{2\sin(\Delta\psi/2)}{\Delta\psi} A_1C_1 \cos\left(\psi - \frac{\Delta\psi}{2}\right) \\ &= \frac{4\sin(\Delta\psi/2)\sin(\Delta\theta/2)}{\Delta\psi\Delta\theta} \widehat{A_1B_1} \cos\left(\psi - \frac{\Delta\psi}{2}\right) \cos\left(\theta - \frac{\Delta\theta}{2}\right) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \Delta Y &= \frac{2\sin(\Delta\psi/2)}{\Delta\psi} A_1C_1 \sin\left(\psi - \frac{\Delta\psi}{2}\right) \\ &= \frac{4\sin(\Delta\psi/2)\sin(\Delta\theta/2)}{\Delta\psi\Delta\theta} \widehat{A_1B_1} \sin\left(\psi - \frac{\Delta\psi}{2}\right) \cos\left(\theta - \frac{\Delta\theta}{2}\right) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\widehat{A_1B_1} = V_{A1} \quad (23)$$

3.2 三维滤波模型

三维滤波模型与二维滤波模型相似, 主要区别在状态一步预测和量测预测, 形式如下:

0.9s, 满足采样间隔的需求. 经典 IMMKF 采取匀速、匀速右转弯、匀速左转弯 3 个子模型, 初始概率为 [0.6 0.2 0.2]. IMMPF 算法采用三个子模型, 粒子数为 100 个.

从图 3 可以看出, 本文算法和经典 IMMKF 算法以及 IMMPF 算法都能够有效实现二维机动目标跟踪. 从图 4 可以看出, 经典 IMMKF 比量测值更加接近真实值, 而本文算法与 IMMPF 算法跟踪效果接近, 都比经典 IMMKF 算法跟踪效果好. 图 5 将跟踪误差进行了比较.

为验证算法稳定性, 通过 100 次蒙特卡洛运算, 采

用均方根误差对 X、Y 轴的估计精度进行对比.文献[1]采用角平分线方向向量法对飞机目标三维姿态角进行测量,角度误差基本在 1°以内,文献[2]利用广义点反馈迭代的最小二乘方法和模拟影像与真实影像匹配的目标姿态角跟踪方案,姿态角测量更加精确,误差在 0.4°以内,但算法实时性不理想.为验证本文算法对姿态角抗噪能力,对获取的姿态角加以不同幅度的随机噪声,通过 100 次蒙特卡洛运算,对估计精度进行对比.

从图 6 可看出,本文算法具有良好的抗噪声能力.从表 1 可以看出,本文算法在不同噪声条件下的估计精度与图 6 一致.从计算量上看本文算法模型简单,提高

机动目标跟踪算法的实时性.IMMPF 算法在跟踪精度要好,但耗时相比较长.

表 1 二维均方误差和周期平均消耗对比

算法	均方根误差(m)		周期平均耗时(ms)
	X	Y	
经典 IMMKF	78.5	63.8	0.46
IMMPF	32.1	30.5	204.6
PANF	37.2	38.1	0.03
1 幅值随机噪声	44.9	39.6	0.04
2 幅值随机噪声	48.1	45.4	0.03
3 幅值随机噪声	56.8	52.1	0.04
4 幅值随机噪声	67.1	62.9	0.03

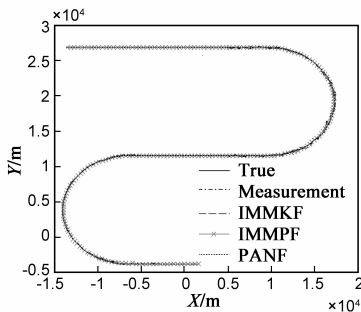
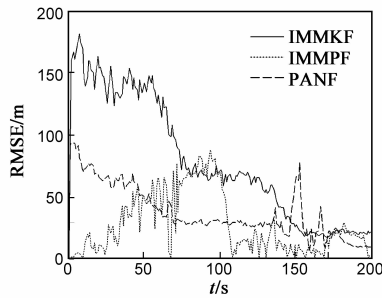
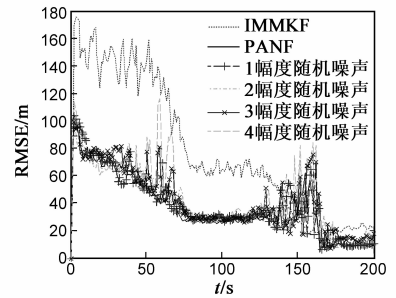


图 3 二维运动轨迹及跟踪结果



(a) X轴方向



(a) X轴方向

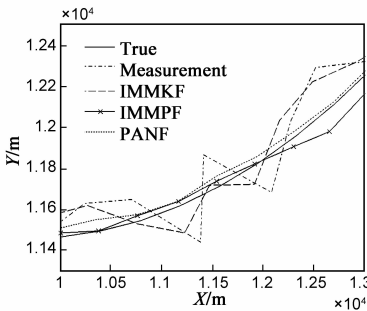
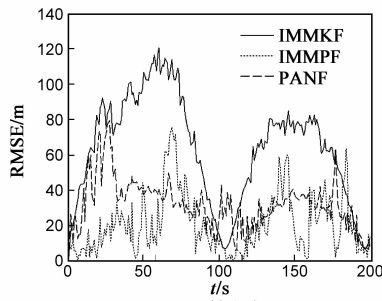
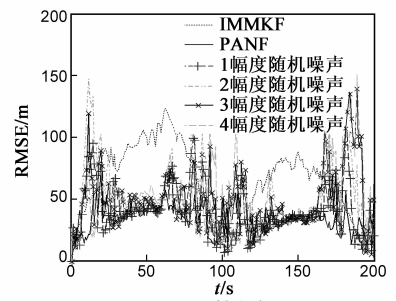


图 4 局部放大图



(b) Y轴方向



(b) Y轴方向

图 5 二维跟踪误差比较

图 6 不同随机噪声下二维跟踪误差比较

4.2 三维滤波器

假设目标初始值为 [2000m 26722m 8000m], 速度模值初始值为 400m/s, 偏航角初始值为 -180°, 俯仰角的初始值为 0°, 仿真时间为 200s, 采样间隔为 1s, 在 20~50s 以的角速度 3°/s 右转弯, 70~100s 以 -3°/s 俯冲, 100~130s 以 3°/s 爬升, 150~180s 以 -3°/s 左转弯, 其他时间匀速直线运动, 运动轨迹如图 7 所示. 姿态角估计算法与二维滤波器中相同. 经典 IMMKF 采取匀速、匀速右转弯、匀速俯冲、匀速爬升、匀速左转弯 5 个子模型, 初始概率为 [0.6 0.1 0.1 0.1 0.1]. IMMPF 算法采用 5 个子模型, 粒子数为 100.

三维滤波器的仿真结果如图 7~10 和表 2, 与二维滤波器结果相似, 这里就不再赘述.

对以上仿真结果进行分析, 在估计精度方面, 本文算法将姿态角信息融入到传统跟踪算法, 实现了位置

信息和姿态角信息的有效融合, 多源信息融合提高了状态估计的精度; 在周期平均耗时方面, 经典 IMMKF 算法分别采用 3 和 5 个子模型, 状态向量分别为四维和六维, 本文算法只采用一个模型, 向量维数分别为二维和三维, 减少了计算量, 进而耗时比较小, IMMPF 算法分别采用 3 和 5 个子模型, 粒子数为 100, 计算量比较大,

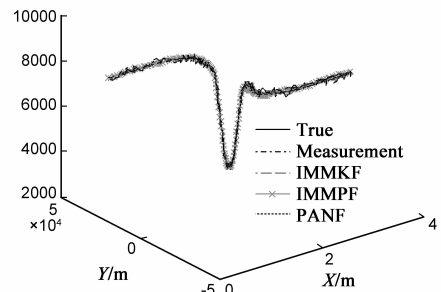


图 7 三维运动轨迹及跟踪结果

因此耗时也显著大于 IMMKF 和本文算法.

表2 三维均方误差和周期平均消耗对比

算法	均方根误差(m)			周期平均耗时 (ms)
	X	Y	Z	
经典 IMMKF	133.7	115.6	92.1	0.66
IMMPF	28.5	29.1	27.8	340.5
PANF	22.3	23.8	19.5	0.04
1 幅值随机噪声	25.1	28.4	25.7	0.03
2 幅值随机噪声	32.4	30.1	32.6	0.04
3 幅值随机噪声	39.4	41.0	50.9	0.03
4 幅值随机噪声	71.1	59.6	74.2	0.04

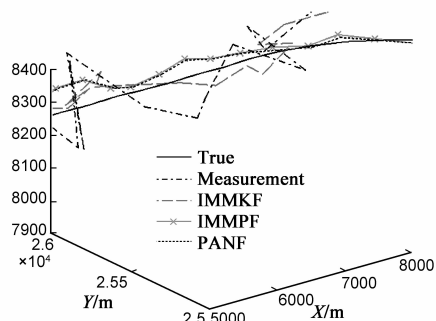


图8 局部放大图

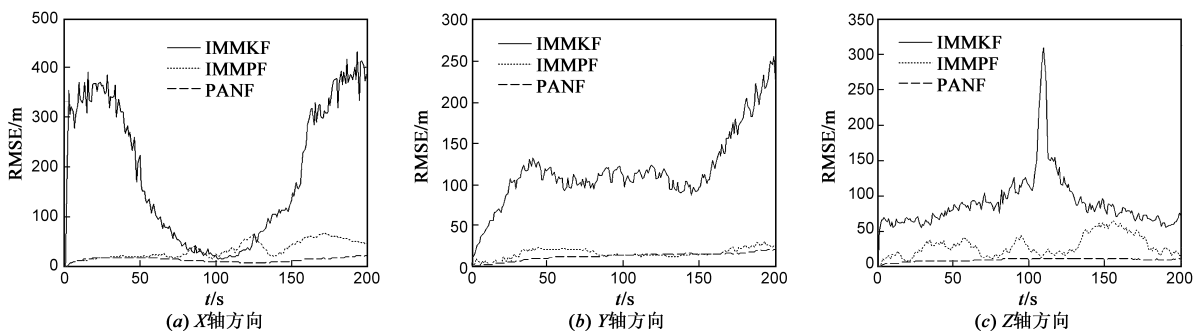


图9 三维运动跟踪误差比较

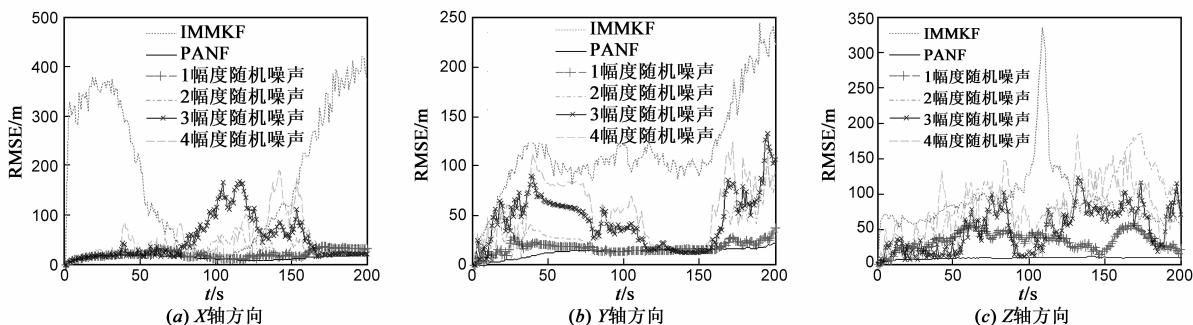


图10 不同随机噪声下三维跟踪误差比较

5 结论

本文依据姿态角信息对目标跟踪的指导作用,结合扩展卡尔曼滤波思想,以姿态角和速度模值为控制项,建立了姿态角辅助的非线性滤波算法的跟踪模型,实现了姿态角信息与位置信息的有效融合.仿真结果表明,模型很好的反映了目标运动机动,算法具有良好的跟踪性能,且具有较好的稳定性和实时性.

参考文献

[1] 王习文, 马军, 陈娟, 等. 飞机三维姿态测量的角平分线方向向量法[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 369 - 376.
Wang Xi-wen, Ma Jun, Chen Juan, et al. Direction vector method of angle bisector lines for measuring aircraft's 3D attitude[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(2): 369 -

376. (in Chinese)
[2] 张祖勋, 苏国中, 张剑清, 等. 基于序列影像的飞机姿态跟踪测量方法研究[J]. 武汉大学学报, 信息科学版, 2004, 29(4): 287 - 292.
Zhang Zu-xun, Su Guo-zhong, Zhang Jian-qing, et al. Airplane pose measurement from image sequences[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(4): 287 - 292. (in Chinese)
[3] 邹益民, 汪渤. 基于单视图像的球体姿态估计[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(8): 1826 - 1828.
Zou Yi-min, Wang Bo. Estimate of ball pose by monocular vision image[J]. Journal of Electronics & Information Technology. 2007, 29(8): 1826 - 1828. (in Chinese)
[4] 王琦, 娇媛媛, 周海银, 等. 适合处理乘性噪声估计卫星姿态的非线性迭代滤波算法[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1417 - 1422.

- Wang Tong-qi, Jiao Yuan-yuan, Zhou Hai-yin, et al. An iterative filter for nonlinear satellite attitude determination system with multiplicative stochastic matrix[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(6): 1417 – 1422. (in Chinese)
- [5] 傅建国, 王孝通, 金良安, 等. 一种基于地球重力场和磁场的姿态估计新算法[J]. *电子学报*, 2005, 33(3): 568 – 570. Fu Jian-guo, Wang Xiao-tong, Jin Liang-an, et al. A new quaternion-based attitude estimation algorithm using the gravitational field and geomagnetic field observation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(3): 568 – 570. (in Chinese)
- [6] 陈智, 张其善, 杨东凯. Galileo 系统在空间飞行器姿态确定中的应用[J]. *电子学报*, 2004, 32(12): 2098 – 2101. Chen Zhi, Zhang Qi-shan, Yang Dong-kai. The application of galileo system on spacecraft attitude determination[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(12): 2098 – 2101. (in Chinese)
- [7] D G Lainiotis, I A Marinitis, S K Katsikas. Adaptive Nonlinear Algorithm for Radar Tracking with Roll Angle Measurement of Maneuvering Targets[A]. *Proceedings of 7th Electrotechnical Conference*[C]. *Mediterranean: IEEE*, 1994. 96 – 100.
- [8] 周云锋, 单甘霖. 一种姿态角辅助的 IMMPPF 算法[J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(7): 1609 – 1613. Zhou Yun-feng, Shan Gan-lin. Pose-angle aided IMMPPF algorithm[J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(7): 1609 – 1613. (in Chinese)
- [9] D K F P Andrisani, D Gleason. A nonlinear tracker using attitude measurements[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 1986, 22(5): 533 – 539.
- [10] 李鹏飞, 黄建军, 黄敬雄, 等. 一种模糊 Kalman 滤波机动目标跟踪的新算法[J]. *数据采集与处理*, 2009, 24(4): 483 – 486. Li Peng-fei, Huang Jian-jun, Huang Jing-xiong, et al. Fuzzy kalman filter for maneuvering target tracking[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2009, 24(4): 483 – 486. (in Chinese)
- [11] A Z Mukesh, S N Merchant, B D Uday. Arbitrary Trajectories Tracking Using Multiple Model Based Particle Filtering in Infrared Image Sequence[A]. *Proceeding of the International Conference on Information Technology: Code and Computing (ITCC04)*[C]. *Washington: IEEE*, 2004. 603 – 607.
- [12] M H Bahari, A Karaz, H Khaloozadeh. High maneuver target tracking based on combined Kalman filter and fuzzy logic[A]. *Information, Decision and Control*[C]. *Adelaide: IEEE*, 2007. 59 – 64.
- [13] 方振平. 飞机飞行动力学[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2005. 42 – 44.
- [14] 吉兵. 基于电视跟踪图像的目标姿态角估计及应用[D]. 石家庄: 光学与电子工程系, 军械工程学院, 2010.

作者简介



张 凯 男, 1987 年生于山东枣庄, 军械工程学院博士研究生. 主要研究方向为目标跟踪与信息融合.

E-mail: wodezhangkai@126.com



单甘霖 男, 1962 年生于江苏如东, 军械工程学院教授. 主要研究方向为目标跟踪与信息融合, 电子系统性能检测与故障诊断等.

吉 兵 男, 1981 年生于湖北, 博士, 军械工程学院讲师, 主要研究方向为制导系统理论与应用.

陈 海 男, 1982 年生于河北, 博士, 主要研究方向为制导系统理论与应用.