

doi: 10.7690/bgzdh.2013.05.011

视景仿真环境下基于卡尔曼滤波的运动目标航迹预测方法

张萍萍¹, 孙永侃², 李雪飞¹

(1. 海军大连舰艇学院博士队, 辽宁 大连 116018; 2. 海军大连舰艇学院科研部, 辽宁 大连 116018)

摘要: 在视景仿真环境下, 需要对运动目标的航迹进行预测。为满足运动目标状态的高更新频率的需求, 采用卡尔曼滤波对目标航迹进行校正和预测。建立运动目标的线性状态方程和观测方程, 给出最小均方误差意义下的最优预测结果, 采用建立的卡尔曼滤波模型, 对收到的原始目标运动数据进行航迹预测, 预测拟合后的运动轨迹在东向、北向和高度 3 个方向上均实现了与原始数据的精准拟合。仿真结果表明: 该方法能满足视景仿真环境下运动目标的航迹预测的精度需求, 为水面舰艇作战指挥提供直观可靠的决策依据。

关键词: 视景仿真; 航迹预测; 卡尔曼滤波; 状态方程; 观测方程; 均方误差

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Method of Trajectory Prediction of Moving Target in Scene Simulation System Based on Kalman Filter

Zhang Pingping¹, Sun Yongkan², Li Xuefei¹

(1. Brigade of PHD, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

2. Department of Scientific Research, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: In the scene simulation system, trajectory prediction of moving target is needed. In order to meet the requirements of the high update frequency of moving target state, the Kalman filter is used on the trajectory correction and prediction. Linear state equation and observation equation of motive target are established, optimal prediction results with minimum mean square error is given. With the Kalman filtering model established in this paper, move target's trajectory is predicted from the original target trajectory, the predicted and fitted trajectory in the east, north and height direction is fitted accurately with the original target trajectory. The simulation result shows that this method meets the precision requirements of moving target's trajectory prediction in the scene simulation system, and it provides visual and reliable basis for surface warship operation command.

Key words: scene simulation; trajectory prediction; Kalman filter; state equation; observation equation; mean square error

0 引言

为满足水面舰艇作战指挥的需要, 在水面舰艇作战仿真系统运行过程中, 需对运动目标进行实时的航迹显示。在仿真过程中, 目标的运动状态信息一般以秒级的速率发布, 而仿真环境要求以 1/30 s 或更短的时间间隔更新仿真目标的运动状态; 因此需要自动生成发布时间间隔内的目标航迹。为保证视景中目标航迹的精度, 视景仿真子系统需要根据接收的目标状态信息和目标当前状态信息对目标未来的运动状态进行预测。

卡尔曼滤波是一种线性最优滤波算法, 适用于线性高斯系统。卡尔曼滤波与预测的准则是均方误差最小。根据状态向量和观测向量在时间上存在的不同对应关系, 状态估计问题可分为预测、滤波和平滑。假设 $\hat{X}_{k,j}$ 表示根据 j 时刻和 j 时刻以前的测量值对 k 时刻的状态 x_k 做出的估计, 则按照 k 和 j 的

不同对应关系, 状态估计可划分为: 1) 当 $k=j$ 时的估计过程称为滤波, 即依据过去直到现在的观测值来估计现在的状态; 2) 当 $k>j$ 时的估计过程称为预测, 即依据过去直到现在的观测值来预测未来的状态; 3) 当 $k<j$ 时的估计过程称为平滑, 即依据过去到现在的观测值来估计过去的历史状态^[1]。卡尔曼滤波在机动目标跟踪方面有许多优势, 已被成功应用于飞行器的导航、导弹制导、火力控制等方面。由于笔者所要解决的运动目标航迹预测问题可转化为卡尔曼滤波中的预测问题, 故笔者采用卡尔曼滤波对目标航迹进行校正和预测, 以保证运动航迹预测的精度。

1 目标运动模型的建立

假设目标做匀加速运动, 在 t 时刻目标的空间位置为 $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, 则该目标的运动可由式 (1) 来描述:

收稿日期: 2012-11-19; 修回日期: 2012-12-14

作者简介: 张萍萍 (1975—), 女, 辽宁人, 博士, 工程师, 从事军事运筹学、军事指挥控制与仿真研究。

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) = 0 \\ \ddot{y}(t) = 0 \\ \ddot{z}(t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\ddot{x}(t)$, $\ddot{y}(t)$, $\ddot{z}(t)$ 表示对时间求三阶导数。

$$\text{又可知目标的加速度为: } \begin{cases} a_x(t) = \ddot{x}(t) \\ a_y(t) = \ddot{y}(t) \\ a_z(t) = \ddot{z}(t) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{速度为: } \begin{cases} v_x(t) = \dot{x}(t) \\ v_y(t) = \dot{y}(t) \\ v_z(t) = \dot{z}(t) \end{cases} \quad (3)$$

那么, 记目标的运动状态为 $X(t)$, 则

$$X(t) = [x(t), y(t), z(t), v_x(t), v_y(t), v_z(t), a_x(t), a_y(t), a_z(t)]^T \quad (4)$$

再对目标运动的状态进行离散化处理, 可得以下递推方程, 及描述时间间隔为 Δt 的由 t_{k-1} 到 t_k 时刻运动状态方程为:

$$\begin{cases} x[k] = x[k-1] + v_x[k-1] \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_x[k-1] \cdot \Delta t^2 \\ y[k] = y[k-1] + v_y[k-1] \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_y[k-1] \cdot \Delta t^2 \\ z[k] = z[k-1] + v_z[k-1] \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_z[k-1] \cdot \Delta t^2 \\ v_x[k] = v_x[k-1] + a_x[k-1] \cdot \Delta t \\ v_y[k] = v_y[k-1] + a_y[k-1] \cdot \Delta t \\ v_z[k] = v_z[k-1] + a_z[k-1] \cdot \Delta t \\ a_x[k] = a_x[k-1] \\ a_y[k] = a_y[k-1] \\ a_z[k] = a_z[k-1] \end{cases} \quad (5)$$

在实际测量中, 加速度会受到各种噪声等因素的干扰, 若设第 $k-1$ 个时间间隔加速度的零均值白噪声为 w_{k-1} , 其均方差为 σ_w^2 , 则 w_{k-1} 引起的速度增量为 $w_{k-1} \cdot \Delta t$, 引起的位移增量为 $w_{k-1} \cdot \Delta t^2 / 2$; 因此, 在考虑系统动态噪声(加速度噪声)的恒加速运动可用下面的状态方程来表示:

$$\begin{cases} x[k] = x[k-1] + v_x[k-1] \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_x[k-1] \cdot \Delta t^2 + \frac{1}{2} w_x[k-1] \cdot \Delta t^2 \\ y[k] = y[k-1] + v_y[k-1] \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_y[k-1] \cdot \Delta t^2 + \frac{1}{2} w_y[k-1] \cdot \Delta t^2 \\ z[k] = z[k-1] + v_z[k-1] \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_z[k-1] \cdot \Delta t^2 + \frac{1}{2} w_z[k-1] \cdot \Delta t^2 \\ v_x[k] = v_x[k-1] + a_x[k-1] \cdot \Delta t + w_x[k-1] \cdot \Delta t \\ v_y[k] = v_y[k-1] + a_y[k-1] \cdot \Delta t + w_y[k-1] \cdot \Delta t \\ v_z[k] = v_z[k-1] + a_z[k-1] \cdot \Delta t + w_z[k-1] \cdot \Delta t \\ a_x[k] = a_x[k-1] + w_x[k-1] \\ a_y[k] = a_y[k-1] + w_y[k-1] \\ a_z[k] = a_z[k-1] + w_z[k-1] \end{cases} \quad (6)$$

则

$$X[k] = \Phi[k, k-1] \cdot X[k-1] + \Gamma[k, k-1] \cdot W[k-1] \quad (7)$$

其中

$$X[k] = [x[k], y[k], z[k], v_x[k], v_y[k], v_z[k], a_x[k], a_y[k], a_z[k]]^T \quad (8)$$

$$W_k = [w_x[k], w_y[k], w_z[k]]^T \quad (9)$$

$$\Phi[k, k-1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & \frac{1}{2} \Delta t^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & \frac{1}{2} \Delta t^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\Gamma[k, k-1] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \Delta t^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \Delta t^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

为采用卡尔曼滤波对目标运动状态参数进行修正, 还需建立观测方程。对于三维图像序列, t_k 时刻的观测值为目标的三维图像的观测坐标为

$$Y[k] = [x[k], y[k], z[k]]^T \quad (12)$$

而状态向量为

$$X[k] = [x[k], y[k], z[k], v_x[k], v_y[k], v_z[k], a_x[k], a_y[k], a_z[k]]^T \quad (13)$$

则观测方程可写成:

$$Y[k] = H[k] \cdot X[k] + U[k] \quad (14)$$

其中, 观测矩阵为:

$$H[k] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$U[k]$ 为观测噪声, 因目标的观测值为目标的已知三维位置, 该观测值是准确的, 即不存在噪声, 所以观测误差可认为零, 因此 $U[k] = [0 \ 0 \ 0]^T$, 可忽略不计。

则观测坐标为

$$Y[k] = H[k] \cdot X[k] \quad (16)$$

因为上面所建立的状态方程和观测方程都是线性的，故可以采用标准卡尔曼滤波进行预测，给出最小均方误差意义下的最优预测结果。

2 航迹预测步骤

假设观测时间周期 $\Delta t'$ 为 1 s，即每一秒得到一个观测坐标；假设运动状态更新周期 Δt 为 1/30 s，即每秒显示 30 帧目标的仿真航迹。笔者采用卡尔曼滤波对目标运动进行预测和滤波的步骤为：

1) 给定目标状态即其协方差阵的初始值 $X[0]$ 、 $P[0]$ ，那么 $X[0]$ 可采用前 3 s 的观测量，计算出第 3 s 的速度和加速度，即得到 $v_x[0]$ ， $v_y[0]$ ， $v_z[0]$ ， $a_x[0]$ ， $a_y[0]$ ， $a_z[0]$ ，取 $P[0]=[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$ 。

2) 令 k 递增，即 $k = k + 1$ ，预测当前 $\hat{X}[k, k - 1]$ ，由于观测更新周期为 $\Delta t' = 1\text{ s}$ ，目标运动状态更新周期 $\Delta t = 1/30\text{ s}$ ，即每秒 30 帧，所以 $\hat{X}[k, k - 1]$ 应采用以下方阵计算。

$$\begin{aligned} \hat{X}[k-1, 0] &= \hat{X}[k-1] \\ \hat{X}[k-1, 1] &= \Phi[k, k-1] \cdot \hat{X}[k-1, 0] \\ \hat{X}[k-1, 2] &= \Phi[k, k-1] \cdot \hat{X}[k-1, 1] \\ &\vdots \\ \hat{X}[k-1, 29] &= \Phi[k, k-1] \cdot \hat{X}[k-1, 28] \\ \hat{X}[k, k-1] &= \hat{X}[k-1, 29] \end{aligned} \tag{17}$$

此递推公式计算出了 2 次观测间隔中插入的 29 个(第 0~28 个)预测航迹的状态。

3) 计算当前状态估计误差协方差阵 $P[k, k - 1]$ ，即

$$P[k, k-1] = \Phi[k, k-1] \cdot P[k-1] \cdot \Phi[k, k-1]^T + \Gamma[k, k-1] \cdot \sigma_w^2 \cdot \Gamma[k, k-1]^T \tag{18}$$

4) 计算滤波增益矩阵 $K[k]$ ，即

$$K[k] = P[k, k-1] \cdot H[k]^T \cdot (H[k] \cdot P[k, k-1] \cdot H[k]^T)^{-1} \tag{19}$$

5) 计算当前状态的最优估计 $\hat{X}[k]$ ，即

$$\hat{X}[k] = \hat{X}[k, k-1] + K[k] \cdot (Y[k] - H[k] \cdot \Phi[k, k-1] \cdot \hat{X}[k-1]) \tag{20}$$

6) 计算当前估计误差协方差阵 $P[k]$ ，即

$$P[k] = (1 - K[k] \cdot H[k]) \cdot P[k, k-1] \tag{21}$$

7) 重复步骤 2)~6)，继续对下一个观测时间段进行预测和滤波。

3 仿真结果与分析

为验证该算法的有效性，对收到的原始目标运

动数据进行航迹预测。为检验各种复杂运动状态下的预测效果，选用一组包含多种运动状态的数据进行预测。这组数据可理解为从第 0 s 开始运动目标以初速度为 0 m/s，加速度为 2 m/s² 运动 5 s，然后俯仰角从 0° 以角速度为 1 (°)/s 抬高至 5°，保持姿态运动 3 s，俯仰角从 5° 以角速度 -1 (°)/s 降为 0°，然后横滚角从 0° 以角速度 5 (°)/s 右倾为 -10°，并右转弯 30° 后调平其姿态，以 1 m/s² 的加速度运动。

仿真结果如图 1 所示，预测拟合处理前的运动轨迹是由时间间隔为 1 s 的点组成的，这将导致视景显示中运动目标的轨迹显示为断续的点迹，这样的显示效果无法达到视景仿真的精度需求。

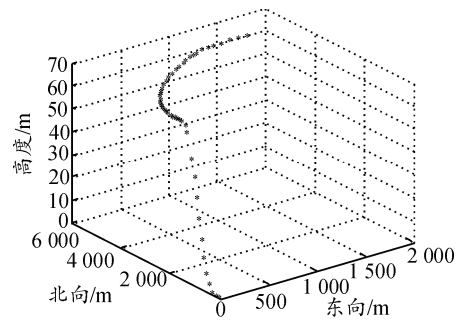


图 1 预测拟合前的航迹

运用笔者提出的算法进行航迹预测后的运动轨迹如图 2~图 5 所示。由图 2 可见，经过预测拟合后的运动轨迹与原始位置数据吻合精准。由图 3~图 5 可见，经过预测拟合后的轨迹在东向、北向和高度 3 个方向上均实现了与原始数据的精准拟合。可见，该算法对运动目标航迹预测的精度较高，满足视景仿真的精度需求。

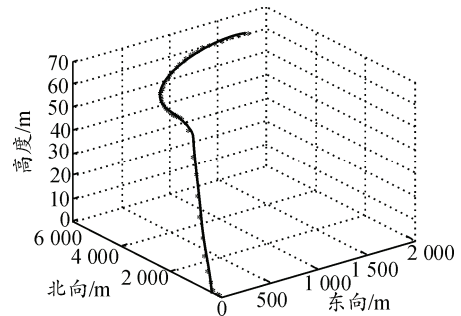


图 2 预测拟合后的航迹

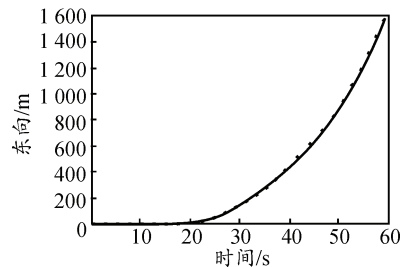


图 3 东向预测拟合航迹