

基于 H_{∞} 滤波器的红外小目标运动预测和跟踪方法

凌建国^{1,2}, 刘尔琦², 杨杰¹, 杨磊¹

(1. 上海交通大学 图像处理与模式识别研究所, 上海 200030;

2. 中国航天科工集团公司二院, 北京 100854)

摘要:根据 H_{∞} 滤波理论, 提出了基于 H_{∞} 滤波预测技术的红外图像小目标运动预测和跟踪方法, 为了降低模型阶数以加快图像处理速度, 滤波过程被分解在水平和垂直两个方向上分别进行, 即将滤波器分解为 x 、 y 方向上两个子滤波器. H_{∞} 滤波器是一种基于最优化最坏情况下的滤波技术, 它对噪声源的要求不高, 能较好地应用在复杂场景下的目标运动预测与跟踪. 实验证实了在噪声源不能确定或是未知的情况下, 它比 Kalman 滤波器对红外小目标的运动预测更加准确并具有更好抗扰动性.

关键词: 红外图像; 目标预测; H_{∞} 滤波; Kalman 滤波

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

APPROACH OF INFRARED SMALL TARGET MOTION PREDICTION AND TRACKING BASED ON H_{∞} FILTER

LING Jian-Guo^{1,2}, LIU Er-Qi², YANG Jie¹, YANG Lei¹

(1. Inst. of Image Processing and Pattern Recognition, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Inst. of the Second Academy, CASIC, Beijing 100854, China)

Abstract: According to the theory of H_{∞} filter, an approach of small target motion prediction and tracking in infrared images was presented based on H_{∞} filter technology. In order to reduce the rank of the model for speeding up the velocity of image process, the filter process was analysed along horizontal orientation and vertical orientation, that is, the filter was decomposed into two filters along x and y orientation. H_{∞} filter is a filter technology based on the optimization of worst condition which doesn't require too much about the noise sources and it can be applied to target motion prediction and tracking in complex and clutter background. The experiments demonstrate that H_{∞} filter is more exact for IR small target motion prediction and resistible to the disturbance than Kalman filter in the system which has the uncertain or unknown noise sources.

Key words: infrared images; target prediction; H_{∞} filter; Kalman filter

引言

红外成像制导是现代导弹制导技术的发展趋势之一, 目标图像的自动识别与跟踪算法是该项技术中的关键环节, 欧美各国已经把自动识别技术(ATR)作为目标检测、识别等军事研究计划的重要组成部分^[1,4]. 为了实现目标的鲁棒跟踪, 需解决的主要课题有两个: 一个是如何实现误差系统的稳定性, 即预测跟踪位置与目标的实际位置的误差要尽可能小; 另一个是抑制干扰, 即尽可能减小干扰信号对目标跟踪的影响. 如果能够得到目标动态的精确的数学模型, 并且噪声源和干扰信号是可预知或是

可测的话, 那么解决这两个课题并不困难. 但是对于红外成像制导系统来讲, 很难得到精确的数学模型. 尤其是对武器系统很难在战场上得到实时的目标运动模型以及噪声源和干扰的模型.

Kalman 滤波器对状态滤波估计具有线性、无偏和最小均方误差等特性. 但是其要求动态模型的噪声源是零均值的白噪声, 而且模型的噪声方差对状态估计的精度有着直接的影响. 若噪声的选取偏大, 将过分增大 Kalman 增益而使既往数据的作用加权衰减过快, 致使其未充分利用; 反之, 若噪声选得偏小, 则既往数据衰减过慢, 易出现噪声饱和现象, 模型噪声影响将积累^[2]. 实际上, 噪声的选取由经验

收稿日期: 2004-12-10, 修回日期: 2005-08-10

基金项目: 航天支撑基金(200403018)

作者简介: 凌建国(1976-), 男, 浙江兰溪人, 博士研究生, 主要从事红外图像处理的研究.

Received date: 2004-12-10, revised date: 2005-08-10

或是仿真实验选定,但是这样选取具有较大的偶然性,易造成 Kalman 滤波器的精度下降,严重时滤波器会发散.相比较而言,近年来在鲁棒控制领域中发展起来的 H_∞ 滤波器,可以在噪声源和干扰信号未知的情况下进行状态的估计,噪声源可以是有界条件下的任何噪声^[3].

1 离散 H_∞ 滤波器

对于线性时变离散系统,其状态方程和观测方程为^[3]:

$$\begin{cases} X_{k+1} = A_k X_k + B_k W_k \\ Y_k = C_k X_k + M_k \end{cases}, \quad (1)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

式(1)中, $X_k \in R^n$ 是状态矢量, $W_k \in R^m$ 过程噪声, $Y_k \in R^p$ 是测量矢量, $M_k \in R^p$ 是测量噪声, A_k, B_k, C_k 为相应的状态转移矩阵、噪声矩阵和测量矩阵.对于时不变系统而言, A_k, B_k, C_k 为常系数矩阵.以下以时不变系统为例,说明离散 H_∞ 滤波器的设计.对于离散 H_∞ 滤波器,其滤波器的设计准则是基于最优坏情况下的设计,即是在最差的情况下争取最好的滤波结果.此过程可以用式(2)来表示:

$$\min_{\hat{x}} \max_{w, m} J, \quad (2)$$

其中 J 是某个度量函数.因此可以这样描述 H_∞ 滤波器:在最坏情况的噪声 w, m 下,我们要找到最优的状态估计 \hat{x} 来最小化度量函数 J ,所以有时也称 H_∞ 滤波器为最小最大化滤波器.

根据文献^[5]给定的目标函数 J ,可以得到 H_∞ 滤波器的滤波方程^[5]为

$$\begin{cases} Q_0 = E(X_0 X_0^T) \\ Q_k(I - C^T C \Sigma_k) = (I - Q_k G_k^T G_k) \Sigma_k \\ Q_{k+1} = A \Sigma_k A^T + B B^T \\ K_k^* = A \Sigma_k C^T \\ \hat{X}_k = A \hat{X}_{k-1} + K_k^* (Y_k - C X_{k-1}) \end{cases}. \quad (3)$$

对应的 H_∞ 滤波器预测方程为:

$$\hat{X}_{k+1|k} = A \hat{X}_k, \quad (4)$$

其中, $Q_k, \Sigma_k, k = 0, 1, \dots, N-1$ 是为解滤波器方程引入的中间矩阵, A, B, C 是状态方程和测量方程中相应的系数矩阵. $G_k, k = 0, 1, \dots, N-1$ 是一个加权矩阵,可以根据先验知识选择,它可以调节输入噪声各分量对系统的影响程度. $K_k^*, k = 0, 1, \dots, N-1$ 是最优增益矩阵. $\hat{X}_k, k = 0, 1, \dots, N-1$ 是状态滤波值. $\hat{X}_{k+1|k}, k = 0, 1, \dots, N-1$ 是状态预测值.

2 H_∞ 滤波器运动预测的实现

2.1 滤波器实现流程

H_∞ 滤波运动预测的第一帧处理比较特殊,首先设定滤波器的初值 \hat{X}_0 (一般同初始观测值取值一致),则可以根据给定的权重矩阵计算得到 Q_0, Σ_0 ,进而得到 Q_1 ,并假设第 2 帧中目标的预测值为滤波器的初值.从第 2 帧开始,则依次进入循环过程,其实现的结构框图如图(1):在第 k 帧,首先计算 Σ_k ;再计算 K_k^* ,而后由 k 时刻的观测值 Y_k (各帧图像处理所得的目标观测位置),得到滤波值 \hat{X}_k ,由此便可以由预测方程计算得到 $k+1$ 时刻目标的预测值 $\hat{X}_{k+1|k}$,并进一步计算 Q_{k+1} 为下一帧的计算做准备.如此便可以根据实时的图像处理结果得到的目标的观测值来预测下一帧目标出现位置.

2.2 滤波器的分解

在红外图像中,目标在水平方向和垂直方向的运动是互相独立的^[6].为了降低模型的阶数,避免高维矩阵的运算,把红外图像的处理分为两部分,即在水平方向和垂直方向上分别滤波,以加快图像处理的速度.但是不同于文献^[6],为了提高处理的精确度,我们在水平和垂直方向运动都采用三维模型来处理.水平方向动态模型可写为:

$$\begin{cases} X_{k+1} = A X_k + B W_k \\ Y_k = C X_k + M_k \end{cases}, \quad (5)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

其中 $\hat{X}_k = \begin{pmatrix} \hat{x}(k) \\ \hat{v}(k) \\ \hat{a}(k) \end{pmatrix}$, $Y_k = (x(k))$, 分量 $\hat{x}(k)$, $\hat{v}(k)$ 和 $\hat{a}(k)$ 分别是目标点在 k 时刻的水平方向的位置滤波值、速度滤波值以及加速度滤波值, $x(k)$ 是在 k 时刻目标点位置观测值的 x 坐标.

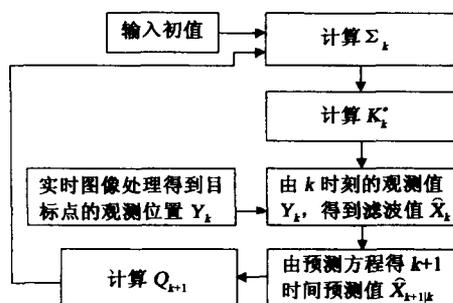


图 1 H_∞ 滤波器实现流程

Fig. 1 Flow diagram of H_∞ filter

$$\begin{cases} A = \begin{pmatrix} 1 & T & 0.5T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0.5T^2 \\ T \\ 1 \end{pmatrix} \\ C = (1 \ 0 \ 0) \end{cases}$$

矩阵分量中的 T 是连续两帧的间隔时间. 由预测方程(4)便可以得到目标在下一帧中的预测位置 x 坐标值. 同理我们也可以建立垂直方向上目标运动的状态模型, 由此便可以得到目标在下一帧中的预测位置 y 坐标值.

3 实验结果与分析

根据目标跟踪的鲁棒性理论, 要使目标跟踪过程更加稳健, 必须处理好外界干扰对跟踪系统的影响, 即解决误差系统的稳定性问题. 下面从一个 181 帧的红外图像跟踪序列实验来比较 Kalman 滤波和 H_∞ 滤波在运动预测和跟踪中表现出来的不同性质.

3.1 误差系统的稳定性

图(2)是红外图像前 43 帧 x 和 y 方向上分别进

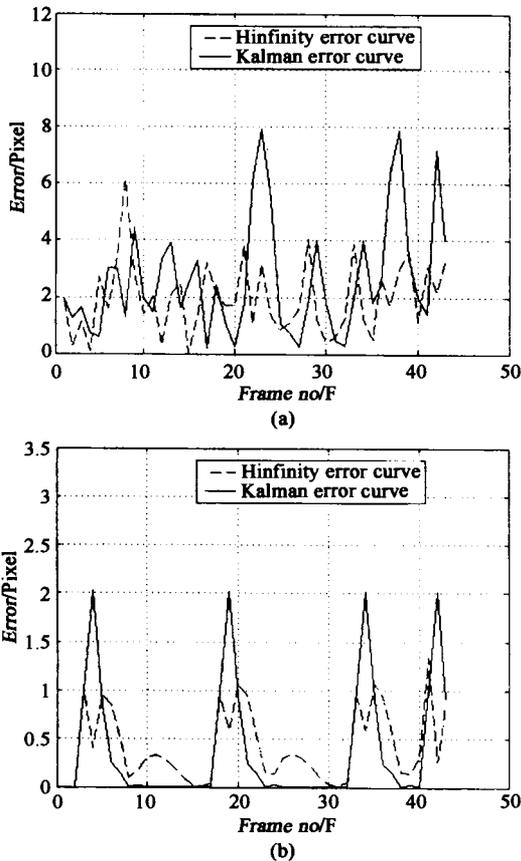


图2 H_∞ 和 Kalman 滤波器预测的误差对比 (a) 沿 x 方向的预测误差对比 (b) 沿 y 方向的预测误差对比
Fig.2 Prediction error contrast of H_∞ filter and Kalman filter (a) prediction error contrast along x orientation (b) prediction error contrast along y orientation

行 Kalman 滤波和 H_∞ 滤波预测的误差对比曲线. 其中误差为实际位置与预测位置差值的绝对值, 蓝色实线是 Kalman 滤波预测的误差曲线, 红色的虚线是 H_∞ 滤波预测的误差曲线. 图中 Kalman 滤波器的过程噪声模型取的是均值为零, 方差为 5 的白噪声, 实际过程噪声源应是均值为 0, 方差是 0.1. 从图中可以明显看出 Kalman 滤波器在动态方程噪声模型与实际噪声源不一致时, 在图像坐标系上的横向和纵向的预测误差都比 H_∞ 滤波器的预测误差要大, 而且波动性也较为明显. 这是由于 Kalman 滤波器的迭代方程中包含了噪声对状态估计的影响, 所以其预测的精确度对噪声的变化是敏感的. 与之相对的是, H_∞ 滤波器设计作为一种基于最优化最坏情况下设计的滤波器, 它考虑的是噪声源所知甚少时系统预测的优化设计, 因而噪声的变化对预测的结果影响较小.

3.2 抗干扰性

我们在红外图像序列的第 71 帧至 109 帧中的 73、74 和 86、87 帧中人为的加入扰动, 相应的扰动模型如式(6)

$$\begin{cases} Y(k) = W_{img} - Y(k-2) \\ \text{if } (Y(k) < 0 \quad Y(k) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

也就是说是在第 73、74 和 86、87 帧中的目标位置观测值分别是以图像的宽度与实际的观测值之间的差值作为其受干扰后的值. 由于加入了人为的影响, 滤波器的预测值与实际值之间的误差变大.

图(3)为 x 方向的误差对比曲线, 其中蓝色实线是 Kalman 滤波预测的误差曲线, 红色的虚线是 H_∞ 滤波预测的误差曲线. 从图中可以直观地看出 H_∞ 滤波器的误差曲线要比 Kalman 滤波器的误差曲线平稳. 尤其是当干扰出现时, H_∞ 滤波器的误差曲

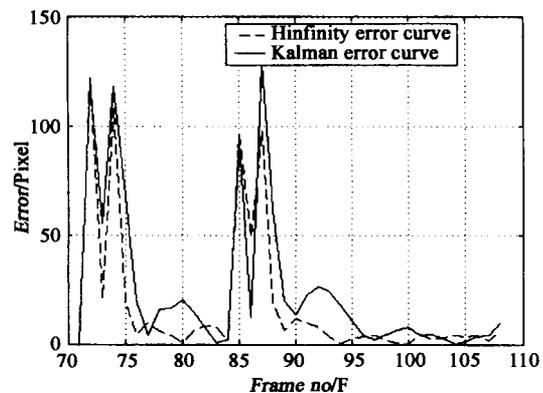


图3 H_∞ 滤波器和 Kalman 滤波器的抗干扰性对比
Fig.3 Performance of disturbance restraint contrast of H_∞ filter and Kalman filter

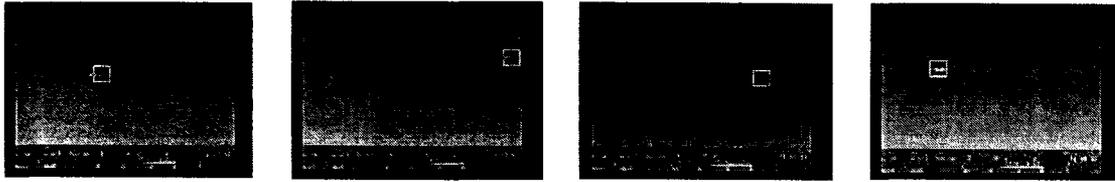


图4 H_{∞} 滤波器预测位置与目标实际位置,从左到右依次是第9,69,109,159帧

Fig.4 Target prediction position performed by H_{∞} filter and real position of the target, from left to right is the 9th, 69th, 109th, 159th frame

线在短暂的波动后,比 Kalman 滤波器的预测误差曲线更早地恢复到正常的情况范围之内.图(3)说明了 H_{∞} 滤波器在抗干扰方面比 Kalman 滤波器更加鲁棒,即使受到外界较强的干扰仍能较快地保持误差曲线的平稳性.这是由于 Kalman 滤波器的设计前提是动态方程中的噪声源是零均值的白噪声,并且要求状态方程和观测方程中的噪声源彼此不相关.当干扰出现时,这种原有的假设条件被破坏,Kalman 滤波器的误差矩阵和增益矩阵都将与实际值有较大偏差,这种偏差显然要比只考虑最坏情况最优设计的 H_{∞} 滤波器要大,所以其误差曲线的波动更加明显.并且,Kalman 滤波器的噪声在有干扰时选得会偏小,易出现噪声饱和现象,模型噪声影响将积累,所以在干扰消失后, H_{∞} 滤波器的误差曲线更快地趋于平稳状态.

3.3 H_{∞} 滤波器实际预测图像

图(4)是红外图像序列的第9,69,109和159帧的预测位置与实际目标位置的对比实例.图中方形小矩形框是 H_{∞} 滤波器的预测位置,方框附近的白色小目标就是我们要跟踪的目标.从图像上可以看出,虽然背景有明显的变化,但是滤波器还是能较好地预测目标的位置.

3.4 目标跟踪实现

由 H_{∞} 滤波器进行滤波和预测,以预测位置的一个领域作为匹配搜索的范围,可以实现对红外小目标对象的跟踪.从图(4)中我们也可以看出只要选择合适的跟踪邻域,是能快速地找到目标点的.由于一旦预测位置与实际目标的位置比较接近,目标的相关匹配就较为容易了,具体方法可以参考文献[6,7].

4 结论

H_{∞} 滤波作为一种常用的鲁棒性系统的设计方法,虽然在红外图像目标识别与跟踪领域中应用不

多,但是从本文的实验和仿真能看出它还是具有很好的实用性的,尤其是在图像场景的噪声源和干扰不易确定的情况下,它比 Kalman 滤波器滤波预测更加准确.但是我们也应该看到 H_{∞} 滤波的设计是基于最坏的情况的设计,是一种保守的设计方法,当噪声模型已知时,还是 Kalman 滤波器更加具有通用性和实用性.

REFERENCES

- [1] WANG Hong-Bo, ZHUANG Zhi-Hong, ZHENG Hua-Li, et al. Investigation of target recognition and tracking algorithm for infrared imaging air-to-air missile[J]. *Journal of Detection & Control* (王宏波,庄志洪,郑华利等.红外成像型空空导弹目标识别与跟踪算法研究. *探测与控制学报*), 2003, 25(4): 1—6.
- [2] LIN Hong-Hua. *Data Processing of Dynamic Measurement* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (林洪华. *动态测试数据处理*.北京:北京理工大学出版社), 1995: 905—919.
- [3] SHEN Xue-min, LI Deng. Game theory approach to discrete H_{∞} filter design [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, 45(4): 1092—1095.
- [4] LIU Song-Tao, SHEN Tong-Sheng, ZHOU Xiao-Dong, et al. Study of red time recognition on technique for infrared imaging guiding system ship target [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘松涛,沈同圣,周晓东,等.红外成像型制导系统舰船目标实时识别技术研究. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(1): 43—46.
- [5] Simon D. A game theory approach to constrained minimax state estimation [EB/OL]. Available at <http://academic.csuohio.edu/simond/minimaxconstrained/minimaxe.pdf>.
- [6] QIAN Zhong-Liang, CHEN Wei-Can. The measurement and tracking systems with an adaptive Kalman filter for the aimport of the target in a FLIR image [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, (钱忠良,陈伟灿.红外图像目标瞄准点测量和基于自适应 Kalman 滤波的瞄准点跟踪. *电子测量与仪器学报*), 1994, 8(1): 43—51.
- [7] DENG Zhi-Peng, YANG Jie, QUAN Yong. The robust image registration method by combining feature and spatial-temporal correlation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (邓志鹏,杨杰,全勇.结合特征和时空关联的稳健图像匹配方法. *红外与毫米波学报*) 2003, 22(6): 447—450.