

基于 FPGA 实现的自适应卡尔曼滤波器的设计

江和平,李 彪,沈振康

(国防科技大学 ATR 实验室,湖南 长沙 410073)

摘要:在视频图像获取过程中,由于噪声对图像序列的降质,需要设计实时噪声滤波器。讨论了视频图像的卡尔曼滤波问题及自适应卡尔曼滤波算法,并讨论了自适应卡尔曼滤波算法的简化,以利于硬件实现自适应卡尔曼滤波器,并进行了简化算法仿真,完成基于 FPGA 实现的实时自适应卡尔曼滤波器的设计。

关键词:自适应卡尔曼滤波; FPGA; 视频图像

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)01-0089-04

Design of adaptive Kalman filter based on FPGA implementation

JIANG He-ping, LI Biao, SHEN Zhen-kang

(ATR Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the degradation of image sequence due to noise, the temporal noise filter is designed during video image acquisition process. The problem of the Kalman filtering and the algorithm of the adaptive Kalman filtering are studied. And the predigestion of the adaptive Kalman filtering in the interest of hardware implementation is discussed, the predigestion arithmetic is imitated. The design of the adaptive temporal Kalman filter based on FPGA implementation has been achieved.

Key words: Adaptive Kalman filter; FPGA; Video image

0 引言

在视频图像获取过程中,由于噪声对图像序列的降质,需要设计实时噪声滤波器。线性最优噪声滤波器的设计是基于这样的假设:图像序列和噪声是平稳的,它们的统计特性是已知的。如果信号是平稳的,图像序列和噪声的统计特性能够被估计。然而,在实际中,图像序列和噪声是不平稳的,这样的假设是不成立的,只能利用自适应算法来设计噪声滤波器。广义自适应 3D 时空滤波器是很复杂的,不可能实时实现。一种比较有效的方法是用自适应空间滤

波器独立地处理每一帧图像并用自适应实时算法在时域中对每个像素进行滤波。一些已知存在的自适应空间滤波器能够很容易实时实现,然而,自适应实时滤波器要求更多的硬件资源。在时域内,由于高频部分的滤除,使用一种简单的低通滤波器会导致吉布斯效应。当图像序列中有一致性的运动像素时,在时间上的自适应不仅要求对噪声的统计特性进行估计而且还要控制稳定滤波的均值。

参考文献[1]对广泛意义的自适应滤波进行了讨论,参考文献[2]阐述了视频图像的自适应时空滤波的一些相关算法。在设计最优化滤波器时,传统方法

收稿日期:2004-01-20; 修订日期:004-07-31

作者简介:江和平(1965-),男,湖南衡阳人,博士生,主要从事图像处理、自动目标识别及跟踪等方面的研究。

是用最小均方误差 (MSE), 如维纳滤波器用于平稳信号, 递归型卡尔曼滤波器^[3]用于时变统计信号。在这种情况下, 由于实时处理要求和在实时滤波中没有非线性相位限制的条件下, 递归型滤波器是一个可行的解决方案, 因此, 设计一种根据图像序列中的噪声统计特性和运动检测的变化自动调整自身参数的卡尔曼滤波器是非常有意义的。文中讨论了一种简单而有效的图像序列的自适应卡尔曼滤波器的设计。

1 自适应时序滤波

1.1 像素级卡尔曼滤波算法

为了对视频图像进行滤波, 最主要的是找到接收图像并能实时实现传输的算法。如果信号和噪声是平稳的, 维纳递归滤波器和广义离散循环卡尔曼滤波器都有同样稳定的解, 在时变统计特性情况下, 卡尔曼滤波器有合适的应用。实际上, 不仅信号和噪声是非平稳的, 它们的统计特性是未知的, 而且基于动态参数调整的自适应滤波器是对未知参数进行估计的最优滤波器, 并且能对信号和噪声的统计数据进行实时的、动态的估计。

$x(k)$ 表示第 k 帧像素灰度值, 无噪声像素值用 $s(k)$ 表示, 假设 $s(k)$ 是一阶 AR 模型, 是非常真实和简单的模型, 通常用来表示视频信号的实时像素传输模型, 其信号处理数学模型方程为:

$$s(k+1)=as(k)+w(k) \quad (1)$$

式中 a 是依据信号统计特性的常量; $w(k)$ 是处理噪声(假设是白噪声, 有独立的零均值、方差为 σ_w^2 的高斯随机过程)。

信号测量过程的数学模型为:

$$x(k)=s(k)+v(k) \quad (2)$$

式中 $v(k)$ 是独立零均值、方差为 σ_v^2 的高斯加性白噪声。

由噪声和信号的二阶统计特性所确定的平稳随机过程的假设是含糊的。在实际中, 这个假设也是不成立的, 但是对于局部统计, 这个假设适用于近似情况。递推卡尔曼滤波器是基于如下定义:

- (1) $y(k)$ 是滤波器的输出, 也是信号 $s(k)$ 的估计;
- (2) 估计误差方差被定义为:

$$\sigma^2(k)=E\{[y(k)-s(k)]^2\} \quad (3)$$

它的初始值是未知的。

(3) $K(k)$ 是卡尔曼滤波器的增益。广泛意义上的卡尔曼滤波算法为:

$$\begin{aligned} & \text{初始化 } y(-1)=0 \quad \sigma^2(-1)=\sigma_v^2 \quad k=0 \\ & \text{循环} \end{aligned}$$

$$K(k)=\frac{a^2\sigma^2(k-1)+\sigma_w^2}{a^2\sigma^2(k-1)+\sigma_w^2+\sigma_v^2} \quad (4)$$

$$y(k)=K(k)x(k)+a[1-K(k)]y(k-1) \quad (5)$$

$$\sigma^2(k)=a^2[1-K(k)]\sigma^2(k-1)+\sigma_w^2 \quad (6)$$

$k=k+1$ 返回循环。结束循环。

实际上, 在上述算法中, 参数 σ_v^2 、 σ_w^2 和 a 是未知的, 利用当前信息, 该算法可以靠合适的参数估计进行自适应调整, 而参数估计是基于最小均方误差 (MMSE) 准则函数的最优估计。

1.2 自适应卡尔曼滤波算法

(1) 对于参数 $a=E\{x(k)x(k-1)\}/E\{x^2(k)\}$, 用下式来估计:

$$\hat{a}=\frac{x(k)x(k-1)}{\frac{1}{2}(x^2(k)+x^2(k-1))} \quad (7)$$

为了稳定起见, a 建议用信号的先验知识来确定, 并保持恒定。

(2) 参数 σ_v^2 、 σ_w^2 为:

$$\sigma_v^2=E\{[x(k)-\hat{a}y(k-1)]^2\} \quad (8)$$

$$\sigma_w^2=E\{[y(k)-\hat{a}y(k-1)]^2\} \quad (9)$$

为了便于计算, 用下式进行估计:

$$\hat{\sigma}_v^2=[x(k)-\hat{a}y(k-1)]^2 \quad (10)$$

$$\hat{\sigma}_w^2=[y(k)-\hat{a}y(k-1)]^2=K^2\hat{\sigma}_v^2 \quad (11)$$

自适应算法最大的优点是卡尔曼增益 $K(k)$ 可以

开始一个比较大的值,然后,当时序信号平稳时,卡尔曼增益逐渐下降。这是一个期望的特性,随着时间的增加,能滤除更多的噪声。然而,当有一个运动的突变时,噪声、处理变量和参数 $\hat{\sigma}_v^2$ 、 $\hat{\sigma}_w^2$ 的估计量也随着信号滤波的减少而提高,这样,虽然减少了噪声滤波,但能以最小的滞后较好地跟随运动。

在自适应过程中,没有直接的方法来估计运动,一种对运动进行估计的方法是比较两个连续时间采样值,其差值的大小表明存在或不存在运动,这种估计方法能运用基于高斯白噪声假设统计模型来推导。例如,当信号有一个突变时,即 $ay(k-1)$ 和 $x(k)$ 的差,设置一个置信度,得到一个统计方差范围,在这种情况下,一种简单的检测方法能用于估计信号的突变(运动)。假设 σ_v^2 为前面提到的差值的方差,这是一个基于高斯分布噪声。如果 $\gamma = \frac{|x(k)-ay(k-1)|}{\sigma_v} > \Gamma$,表明是一个运动,如果这个检测是正确的,然后,在卡尔曼滤波的增益计算可以被重新假定 $\sigma^2(k) = \sigma_v^2$ 来初始化,在改善噪声滤波过程中,这个新的增益值很明显地减少了滞后的影响。也可以利用其他的修改方法,例如,在一个运动突变以后,可以设置卡尔曼增益等于 1,并重新初始化滤波器的权值,或者设置 $\sigma^2(k) = \sigma_v^2$ 和 $\sigma_w^2 = \sigma_v^2$,并初始化卡尔曼增益 $K(k) = (a^2+1)/(a^2+2)$ 。

综上所述,上述算法改变如下:

初始化 $y(-1)=0$ $\sigma_w^2 = \sigma_v^2$ $\sigma^2 = \sigma_v^2$ $k=0$;

循环

$$K = \frac{\sigma^2 + \sigma_w^2}{\sigma^2 + \sigma_w^2 + \sigma_v^2} \quad (12)$$

$$y(k) = y(k-1) + K[x(k) - y(k-1)] \quad (13)$$

如果 $D = \frac{|x(k) - y(k-1)|}{\sigma_v} > \Gamma$; $\sigma_w^2 = \sigma_v^2$ $\sigma^2 = \sigma_v^2$;

否则 $\sigma_w^2 = K\sigma_v^2$ $\sigma^2 = (1-K)\sigma_v^2 + \sigma_w^2$;

结束 如果 $k=k+1$; 返回循环; 结束。

选取门限值 Γ 是很重要的。在这种情况下,分布 γ^2 显示出有一个自由度的 χ^2 分布特点,根据假设的

统计模型,不同的 Γ 值有不同的置信度(见表 1)。

表 1 运动检测的门限值

Tab.1 Threshold values for motion detection

Confidence level/■	Γ^2	Γ
99.90	10.827	3.29
99	6.635	2.576
98	5.412	2.326
95	3.841	1.96
90	2.706	1.645

选取门限值 $\Gamma=3.29$,对上述算法进行仿真,结果如图 1 所示,(a)为加噪声图,(b)为滤波结果图。

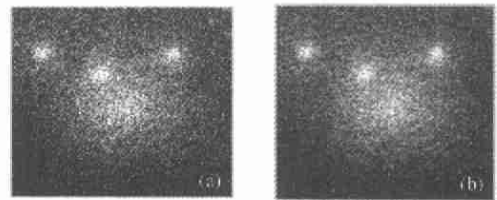


图 1 自适应卡尔曼滤波算法仿真结果

Fig.1 Simulation result of the adaptive Kalman filtering algorithm

仿真结果表明:对图像噪声有明显的抑制,提高了图像的信噪比。

2 FPGA 实现自适应卡尔曼滤波算法

自适应卡尔曼滤波的实现由 Xilinx FPGA 来完成^[4],FPGA 用来存储像素、参数和计算像素、参数,并输出像素,如图 2 所示。

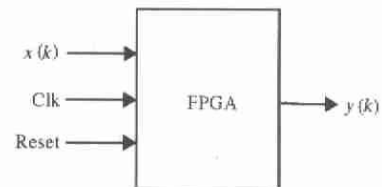


图 2 自适应卡尔曼滤波系统框图

Fig.2 System chart of the adaptive Kalman filtering algorithm

该系统有一个像素输入 $x(k)$ 和时钟输入 Clk 及设置信号 Reset,在 FPGA 内部构建两个模块,一个是滤波模块,一个是卡尔曼增益的计算和滤波参数的修改模块,并且在 FPGA 中建立像素 $y(k-1)$,参数

σ^2 、 σ_v^2 、 σ_w^2 存储单元,用来在计算过程中对这些参数进行修改。图 3、图 4 为这两个模块的流程框图。

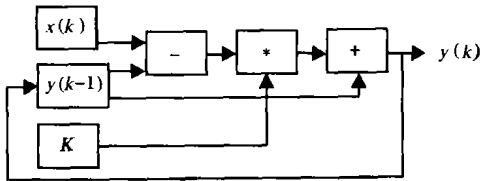


图 3 自适应卡尔曼滤波处理流程框图

Fig.3 Flow chart of the adaptive Kalman filtering algorithm

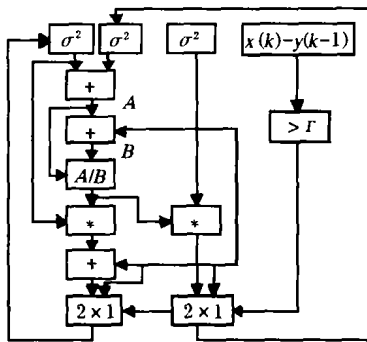


图 4 卡尔曼增益的计算及滤波参数修改流程框图

Fig.4 Flow chart of the calculation for Kalman filtering gain and the parameter modification of Kalman filtering

图 3 中的像素 $y(k)$ 的计算是利用前面计算的卡尔曼增益 K 以及输入的像素 $x(k)$ 来完成的。该并行结构包括减法器、双输入变量乘法器和加法器。每一个系统时钟周期输出像素 $y(k)$ 。完成该计算所需要的硬件资源将近 468 逻辑单元。

图 4 所示卡尔曼增益的计算及滤波参数修改模

块比较复杂,卡尔曼增益 K 需要进行加法和除法计算,还需要定义 σ_v^2 、 Γ 和 D 。利用 $x(k)-y(k-1)$ 的计算结果对二选一选择器进行控制。滤波参数的修改包括加法器、减法器、变量乘法器和常量乘法器,这些参数的更新也是在一个时钟周期内完成的。总的硬件资源近似为 1884 个逻辑单元。

综上所述,总的 FPGA 硬件资源近似为 2352 逻辑单元,可以选用 Xilinx 公司的 XCV50 或 XC2V40 来完成卡尔曼滤波运算。系统能够运行在 66 MHz 时钟,能处理 60 帧/s 1024×1024 的视频图像。

3 结论

本文讨论了视频图像的卡尔曼滤波问题、自适应卡尔曼滤波算法以及自适应卡尔曼滤波算法的简化,进行了算法仿真,完成基于 FPGA 实现的实时自适应卡尔曼滤波器的设计。

参考文献:

- [1] Haykin S. Adaptive Filter Theory.3rd ed[M]. New Jersey:Prentice Hall,1996.
- [2] Braileam J C, Kleihorst R P, Efstratiadis S,et al.Noise reduction filters for dynamic image sequences: a review[J].Proceedings of the IEEE, 1995,83(9):1272-1292.
- [3] 刘福生,罗鹏飞. 统计信号处理[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1999.
- [4] Uwe Meyer-Baese;刘凌,胡永生. 数字信号处理的 FPGA 实现[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

《红外与激光工程》英文摘要编写要求

英文摘要长为 100~200 words,主要内容与中文摘要对应,写作时注意:

1. 英文题目的第一个字不得用 The、An、A。文摘的第一句话切不可与题目重复;
2. 叙述简明,逻辑性强;句子结构严谨,尽量用短句子,避免复合句;
3. 技术术语尽量用工程领域的通用标准;
4. 用过去时态叙述作者工作,用现在时态叙述作者结论;
5. 摘要叙述用第三人称(用被动语态),不得用第一人称作主语;
6. 用事实开头,避免用辅助从句开头;句子的动词尽量靠近主语;
7. 单词拼写采用标准英美拼法,全篇须保持一致;
8. 可用动词的情况尽量避免用动词的名词形式;
9. 删繁从简,尽量简化措辞。如用 at 250°C,不用 at a temperature of 250°C。