

文章编号 1004-924X(2009)05-1105-06

使用粒子滤波器实现电子稳像

姚 军¹, 蒋晓瑜¹, 杜登崇¹, 汪 熙¹, 纪红霞²

(1. 装甲兵工程学院 控制工程系 北京 100072; 2. 中国人民解放军 61135 部队 北京 102211)

摘要:提出用粒子滤波器来实现视频序列的稳像,解决了视频序列的帧间不稳定问题。提出的稳像算法从视频图像中提取角点特征,建立当前帧与参考帧之间的映射关系,然后根据仿射变换模型求取最小二乘解来获得帧间的全局运动参数,最后利用粒子滤波平滑运动参数,实现帧间的实时运动补偿。对包含 80 帧场景的视频序列进行了实验,稳像后视频序列的平均峰值信噪比比稳像前提高了 24.88,同时稳像精度 <1 pixel,处理时间 <30 ms。实验结果表明,本文算法能有效地改善图像质量,在去除高频抖动的同时能较好地保留摄像机的主动运动,稳像效果良好。

关键词:粒子滤波;角点检测;全局运动估计;电子稳像

中图分类号:TN941.1 **文献标识码:**A

Digital image stabilization based on particle filter

YAO Jun¹, JIANG Xiao-yu¹, DU Deng-chong¹, WANG Xi¹, JI Hong-xia²

(1. *Department of Control Engineering, the Academic of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;*

2. *Unit of 61135, the Chinese People's Liberation Army, Beijing 102211, China*)

Abstract: A digital image stabilization algorithm based on a particle filter is present to remove the interframe vibration of video images. Firstly, the corners of video images are extracted using Harris operators, then the mapping relationship between the current frame and the reference frame is established and global motion vectors are obtained by computing least-square solution based on an affine transformation model. Finally, the particle filtering is used to smooth motion vectors to realize the motion compensation of video frames. Experiments are undertaken for a video sequence with 80 frames, it could be found that the average Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) of the image sequence after image stabilization is 24.88 higher than that of the original video sequence while providing the image stabilization accuracy and the processing time low than 1 pixel and 30 ms respectively. These results show the proposed stabilization algorithm improves image quality effectively, and it can not only alleviate the vibration but also can preserve the initiative motion of the camera.

Key words: particle filter; corner detection; global motion estimation; digital image stabilization

1 引言

电子稳像是应用计算机数字图像处理和电子技术的方法来直接对随机运动或抖动的摄像机所获取的动态图像序列进行修改、重排,确定图像序列的帧间偏移并进行补偿,以使动态图像在监视器上能平稳显示的一种视频稳定技术^[1]。电子稳像具有稳定精度高、体积小、重量轻、功耗低以及能实时处理等特点,在国外已应用于摄影、航空侦察、跟踪和监视等各种任务中^[2-5]。电子稳像的关键技术包括图像序列帧间的运动估计和运动补偿。运动估计是通过算法估算出图像序列运动偏移量的过程。运动补偿是利用数字图像处理的方法使图像上的像素按被检测出的运动偏移反方向做相应移动,实现图像的行、列序列重组,从而实现图像序列稳定,使监视器上输出清晰图像的过程。如果运动估计阶段能够准确地估计出帧间运动矢量,并在运动补偿阶段获得适当修正,去掉不希望的随机抖动,保留摄像机的主动运动矢量,稳像的结果将是令人满意的平稳图像。本文采用 Harris 角点检测算法获得参考图像和当前图像中的角点,然后根据仿射模型建立一组方程,利用多个角点坐标作为输入,通过求解矛盾方程组获得最小二乘解,从而得到运动估计矢量,最后采用粒子滤波器对运动估计矢量做低通滤波,得到运动补偿矢量,通过对原始视频序列进行运动补偿,实现实时稳像。

2 Harris 角点检测

Harris 角点检测算法主要考虑像素邻域点的灰度变化,将与邻点亮度对比足够大的点定义为角点。与其它角点检测方法比,该算法具有较强的鲁棒性,并且检测质量高,易于工程实现。本文算法采用如下模板,分别将其命名为 T_1 、 T_2 和 T_3 。其中 T_1 是水平模板, T_2 是垂直模板, T_3 是均值模板。采用均值模板可以增强算法的抗噪能力。

$$T_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_2 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

算法的具体步骤如下:

- (1) 分别对原图像 $f(x, y)$ 使用水平模板 T_1 和垂直模板 T_2 进行卷积运算,获得水平和垂直方向的差分图像 D_x 和 D_y ;
- (2) 分别从差分图像 D_x 和 D_y 中取出对应的差分结果 I_x 与 I_y , 构建自相关矩阵 $Cov = \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}$, 对称矩阵中的 I_x^2 、 $I_x I_y$ 与 I_y^2 分别作为 24 bit 位图像素的 RGB 颜色值, 构建图像 $CovImg$;
- (3) $CovImg$ 与均值模板 T_3 进行卷积获得均值图像;
- (4) 由均值图像通过公式(1)计算得到特征图像 Dst ;
- (5) 对特征图像 Dst 进行阈值化, 获得图像角点。
- (6) 根据相邻两帧图像中角点相对位置变化很小的规律, 对误匹配的角点进行过滤, 获得两帧具有相同角点数量的匹配结果。

$$PixDst = \sqrt{\frac{|PixAv[0] + PixAv[2]|}{2}} - \sqrt{\left(\frac{PixAv[0] - PixAv[2]}{2}\right)^2 + (PixAv[1])^2}. \quad (1)$$

以下图 1 与图 2 就是相邻两帧图像的角点提取结果, 图中的白点是放大的角点。



图 1 第一帧图像的角点

Fig. 1 Corners in the first frame

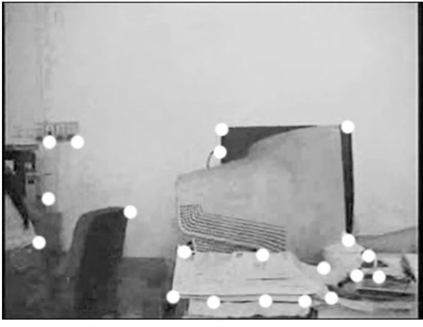


图2 第二帧图像的角度点

Fig. 2 Corners in the second frame

3 运动矢量估计

获得视频序列相邻两帧图像对应的角点坐标位置后,根据仿射模型公式(2),通过匹配角点坐标,建立参考帧与当前帧的映射关系。

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 $(x_j, y_j), (x_i, y_i)$ 分别是当前帧和参考帧对应的角点坐标, (b_1, b_2) 是二维平移量, k 是变焦系数,描述缩放, $\begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ 是正交的旋转矩阵, θ 描述图像的旋转变换。变焦系数 k 通过计算角点所对应的重心位置距离的变化率来获得^[6]。在求得变焦系数 k 后,方程只有3个未知量,而每一对匹配角点能够建立2个方程,所以只要2对角点就能求出参数 $(a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2)$ 。为加强算法的稳定性,这里采用 $N(N \geq 2)$ 对角点代入公式(2)中,求解矛盾方程的最小二乘解,从而获得运动估计矢量。

4 基于粒子滤波的运动补偿

在获得运动估计矢量后,采用粒子滤波器进行低通滤波,获得运动补偿矢量,实现实时稳像^[7]。粒子滤波器作为滤波工具具有很好的平滑性、收敛性和鲁棒性,能逼近状态的最优估计,且适用于任意非线性非高斯的动态系统^[8]。图3是粒子滤波的流程图:

粒子滤波的具体实现步骤如下:



图3 粒子滤波流程图

Fig. 3 Flow chart of particle filter algorithm

(1) 根据精度和速度要求确定粒子的数量,并给每个粒子赋初始状态。这里假定选取粒子数量为 N , 每个粒子赋予权值 $\frac{1}{N}$, 且每个粒子都具有3个参数 $T^i = (\theta^i, \Delta X^i, \Delta Y^i), i = 1, \dots, N$ 。粒子的初始值设置如下:

$$\begin{cases} \theta^i = \theta^{\text{init}} + b_1 \xi \\ \Delta X^i = \Delta X^{\text{init}} + b_2 \xi \\ \Delta Y^i = \Delta Y^{\text{init}} + b_3 \xi \end{cases} \quad i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

其中 b_1, b_2, b_3 为常数, ξ 为 $[-1, 1]$ 内的随机数。

(2) 确定状态转移方程,对每个粒子进行状态预测。这里假设摄像机有扫描运动,所以取二阶状态方程: $ZT_t = AZT_{t-1} + BZT_{t-2} + C\omega_{t-1}$ 。对粒子 N^i 有:

$$\begin{cases} \theta_t^i = A_1 \theta_{t-1}^i + B_1 \theta_{t-2}^i + C_1 \omega_{t-1} \\ \Delta X_t^i = A_2 \Delta X_{t-1}^i + B_2 \Delta X_{t-2}^i + C_2 \omega_{t-1} \\ \Delta Y_t^i = A_3 \Delta Y_{t-1}^i + B_3 \Delta Y_{t-2}^i + C_3 \omega_{t-1} \end{cases} \quad i = 1, \dots, N, \quad (4)$$

其中 $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3$ 为常数, ω_{t-1} 为 $[-1, 1]$ 内的随机数。

(3) 系统观测过程。对各个粒子传播后进行观测,观察每个粒子所代表的可能状态和真实状态之间的相似程度,接近真实状态的粒子赋予较大的权值,反之权值较小。这里采用绝对差值函数作为衡量工具,定义如下:

$$ABDF = \sqrt{(\Delta X - \Delta X')^2 + (\Delta Y - \Delta Y')^2} + Cf |\theta - \theta'|, \quad (5)$$

其中 $\Delta X, \Delta Y, \theta$ 是当前预测值, $\Delta X', \Delta Y', \theta'$ 是利用角点匹配解超定方程所获得的估计值。 Cf 是一个与视频图像尺寸有关的系数,假设视频图像的长和宽分别为 $\text{imglength}, \text{imgwidth}$, Cf 定义为:

$$Cf = 0.25 \times \sqrt{(\text{imglength})^2 + (\text{imgwidth})^2}. \quad (6)$$

根据公式(5)和(6)定义观测概率密度函数为:

$$p(z_k | x_k^i) = \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} ABDF^i \right\} \quad i = 1, \dots, N, \quad (7)$$

其中 σ 为常数。粒子的权值递推公式定义如下:

$$\omega_k^i = \omega_{k-1}^i p(z_k | x_k^i). \quad (8)$$

(4) 后验概率计算, 获得运动估计矢量的滤波结果。运动补偿过程中所期望的运动补偿参数 $(\theta_k^{\text{opt}}, \Delta X_k^{\text{opt}}, \Delta Y_k^{\text{opt}})$ 可以由各粒子的加权和来表示, 即:

$$\theta_k^{\text{opt}} = \sum_{i=1}^N \omega_k^i \theta_k^i, \Delta X_k^{\text{opt}} = \sum_{i=1}^N \omega_k^i \Delta X_k^i, \\ \Delta Y_k^{\text{opt}} = \sum_{i=1}^N \omega_k^i \Delta Y_k^i.$$

(5) 粒子重采样过程, 即在出现某些粒子权值太小时, 从权值大的粒子上衍生出一些粒子来代替它们。具体过程就是: 定义一个阈值, 当某些粒子的权值达到某个下限后就执行该过程, 而该粒子的“后代”粒子的权值重新设置为 $\frac{1}{N}$ 。重采样过程与前面其它过程无关。

5 滤波器参数设置与实验结果

粒子滤波器的参数设置将直接决定其滤波性能。初始化阶段 $(\theta^{\text{init}}, \Delta X^{\text{init}}, \Delta Y^{\text{init}})$ 的设置, 影响滤波器的跟踪起点, 该值越是接近正确的稳像参数, 滤波器进入稳定跟踪状态的时间就越短, 在没有稳像参数先验信息的情况下, 通常将其设为 0。常数 (b_1, b_2, b_3) 决定初始值的变化范围, 一般取稳像参数的最大幅值。状态转移阶段 $(A_1, A_2, A_3), (B_1, B_2, B_3), (C_1, C_2, C_3)$ 的取值决定于摄像机的运动模型, 本文假设摄像机做匀速运动, 认为稳像参数在相邻帧是接近的, 其变化量是前一对相邻帧的参数变化值与随机噪声的叠加。本文滤波器参数设置如下: 粒子数 N 取为 100, $(\theta^{\text{init}}, \Delta X^{\text{init}}, \Delta Y^{\text{init}})$ 分别为 $(0, 0, 0)$, (b_1, b_2, b_3) 为 $(0, 1, 10, 10)$, (A_1, A_2, A_3) 均为 2, (B_1, B_2, B_3) 均为 -1, (C_1, C_2, C_3) 分别为 $(0.01, 5, 5)$ 。系统观测过程中由于实验图像大小为 $(720, 576)$, 根据公式 (6), Cf 取值为 230。下面是对 80 帧视频场景的运动估计曲线使用粒子滤波器所获得的结果, 曲线上的值对应于当前帧前面所有的帧间运动估计向量的累加和。图 4 为 θ 的量测及滤波曲线, 图 5 为 ΔX 的量测及滤波曲线, 图 6 为 ΔY 的量测及滤波曲线。为验证算法的有效性, 采用峰值信噪比 (PSNR) 来检验视频序列进行补偿后的帧间稳定性, PSNR 定义如下:

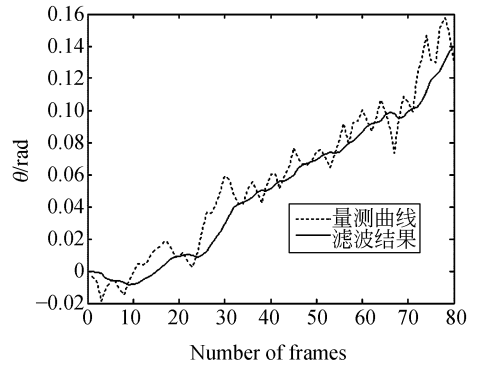


图 4 θ 的量测及滤波结果

Fig. 4 Measured curve and filtered result of θ

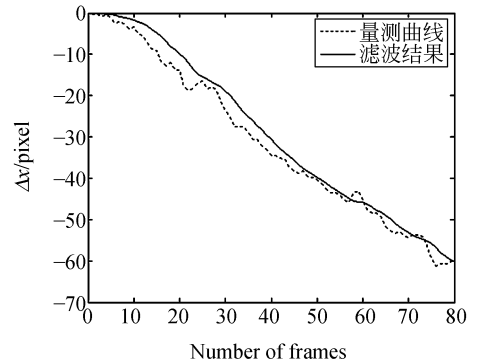


图 5 Δx 的量测及滤波结果

Fig. 5 Measured curve and filtered result of Δx

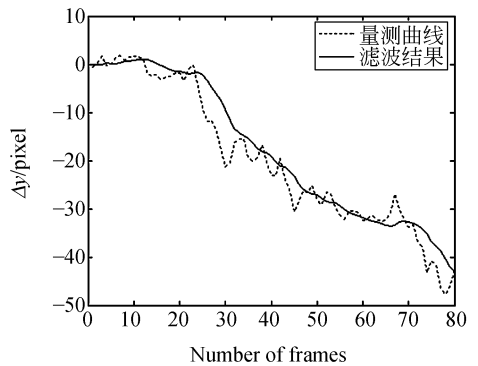


图 6 Δy 的量测及滤波结果

Fig. 6 Measured curve and filtered result of Δy

$$\begin{cases} \text{PSNR}(V_t, V_{t+1}) = 10 \lg \frac{255^2}{\text{MSE}(V_t, V_{t+1})} \\ \text{MSE} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (V_t(i, j) - V_{t+1}(i, j))^2 \end{cases} \quad (9)$$

其中 V_i 和 V_{i+1} 表示视频序列的前后两帧,其尺寸为 $M \times N$ 。由于视频序列存在抖动,所以剪切视频序列中间 680×536 的图像子区域计算 PSNR 值。PSNR 越大,说明稳定后图像序列帧间偏差量越小,稳定效果越好。图 7 是图像序列处理前后的 PSNR 曲线,横坐标是序列的帧数,纵坐标是 PSNR 值,图中下方曲线对应原始序列的 PSNR 值,上方曲线对应于稳定序列的 PSNR 值,可以看出稳像后的 PSNR 值明显大于稳像前。对 80 帧场景稳像前后的 PSNR 值做一个平均运算,得出稳像后 PSNR 的平均值比稳像前大

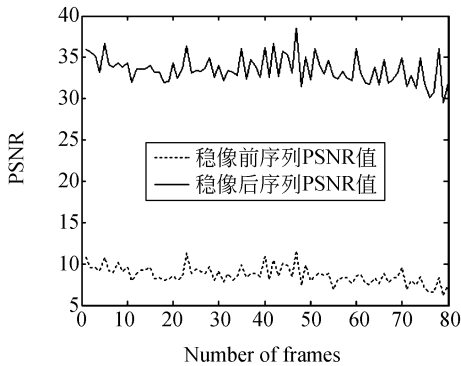


图 7 视频序列的 PSNR 曲线

Fig. 7 PSNR curves for video sequences

24.88。在 PM 1 730 MHz 的计算机上,本文算法的处理时间 < 30 ms,达到了实时稳像的要求,稳像精度 < 1 pixel。

6 结 论

本文利用角点算子的稳定性与粒子滤波器对非线性非高斯动态系统的适应性,获得了既保留了摄像机主动运动又去除了随机抖动的运动补偿矢量,实现了视频序列的实时稳像。实验结果表明,稳像后视频序列的 PSNR 平均值比稳像前提高了 24.88,同时稳像精度 < 1 pixel,并且处理时间 < 30 ms,满足实时稳像的要求。滤波过程中,粒子滤波器的状态转移方程采用二阶模型,这样在一定程度上考虑了相邻帧间的速度变化,有一定的自适应性。但通过建立状态方程的滤波方式在处理非线性非高斯的电子稳像系统时,由于某些参数的人为理想化而不可避免地带来了误差,因此自适应性不强。能否找到一种不依赖于系统状态方程的滤波算法,对于滤波精度的进一步提高将有很大影响。

参考文献:

- [1] 赵红颖,金宏,熊经武. 电子稳像技术概述[J]. 光学精密工程,2001,9(4):353-359.
ZHAO H Y, JIN H, XIONG J W. Overview of the electronic image stabilization technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4): 353-359. (in Chinese)
- [2] MAHEUX J, CRUICKSHANK J, SEVIGNY L. Video rate image stabilization system [J]. *SPIE*, 1998, 34(14): 232-240.
- [3] RATAKONDA K. Real-time digital video stabilization for multi-media applications [J]. *IEEE*, 1998, 4:69-72.
- [4] KINUGASA T, YAMAMOTO N, KOMATSU H, et al.. Electronic image stabilizer for video camera use [J]. *IEEE Trans. on Consumer Electronic*, 1990, 36(8):520-524.
- [5] MORIMOTO C, CHELLAPPA R. Fast electronic digital image stabilization [J]. *IEEE Proceedings 13th International Conf. on Pattern Recognition*, 1996, 3:284-288.
- [6] 钟平. 机载电子稳像技术研究[D]. 中国科学研究生院,2003.
ZHONG P. *Study on electronic image stabilization technology for the image sequence of the aero-borne camera system* [D]. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [7] 陈姝,邹北骥,彭小宁,等. 应用粒子滤波及先验概率模型进行图像分割的新算法[J]. 电子学报,2007,35(8):1533-1537.
CHEN SH, ZOU B J, PENG X N, et al.. A new algorithm for image segmenting by using SMC and prior probability model [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007,35(8):1533-1537. (in Chinese).
- [8] DOUCET A, CORDON N, KRISHNAMURTHY V. Particle filters for state estimation of jump markov linear systems [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001,49:613-624.

作者简介:



姚 军(1979—),男,湖南岳阳人,博士研究生,2002 年于装甲兵工程学院获得学士学位,2005 年于装甲兵工程学院获得硕士学位,现在装甲兵工程学院控制工程系攻读博士,主要从事电子稳像、图像处理、模式识别等方面的研究。E-mail: yaojun10336@sohu.com



纪红霞(1976—),女,山东新泰人,硕士,工程师,2002 年于华南理工大学获得学士学位,2006 年于装甲兵工程学院光学工程获得硕士学位,现为 61135 部队工程师,主要从事电子稳像、图像处理等方面的研究。E-mail: jihongxia76@tom.com



杜登崇(1980—),男,山西孝义人,博士研究生,2002 年于装甲兵工程学院获得学士学位,2005 年于装甲兵工程学院获得硕士学位,现在装甲兵工程学院控制工程系攻读博士,主要从事电子稳像、图像处理等方面的研究。E-mail: ddc1000@126.com



蒋晓瑜蒋晓瑜(1967—),男,湖南郴州人,教授,博士生导师,1989 年于装甲兵工程学院光学工程获得学士学位,1993 年于装甲兵工程学院光学工程获得硕士学位,1997 年于北京理工大学光学工程获得博士学位,2000 年于中国科学院遥感所博士后出站,主要从事图像处理、模式识别、图像融合、电子稳像、智能化信息技术等方面的研究工作。E-mail: xiaoyu.j@263.net



汪 熙(1979—),男,湖南永州人,硕士,讲师,2001 年于桂林电子科技大学获得学士学位,2004 年于装甲兵工程学院获得硕士学位,现为装甲兵工程学院控制工程系光电教研室老师,主要从事电子稳像、图像处理、模式识别等方面的研究。E-mail: lycis@126.com

导师简介:

● 下期预告

氧化锌纳米线的新型硅谐振式加速度计

陈国炜^{1,2},朱 荣²

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室,山西 太原 030051;

2. 清华大学 精密仪器及机械学系 精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京 100084)

本文设计制作了一种新型的基于氧化锌纳米线的谐振式硅加速度计。该加速度计的敏感单元为由氧化锌纳米线横跨金属微电极组成的谐振器。氧化锌纳米线的组装采用介电电泳的方法,利用 FIB 沉积 Pt 将氧化锌纳米线固定在微结构上,确保了结构的可靠性。在加速度的作用下,质量块引起的惯性力通过支撑梁对纳米线施加应力,因此,在谐振条件下,纳米线谐振频率的变化反映了加速度的大小。谐振式加速度计的准数字输出能解决多数 MEMS 器件其输出微弱信号检测难的问题。实验结果表明,加速度计的灵敏度随着纳米线的厚度的减小而急剧增加,选择 500 nm 厚度的纳米线作为理论分析,加速度计的灵敏度可达 2.5 kHz/g 以上。