

电子稳像技术综述

王志民 徐晓刚

(海军大连舰艇学院装备系统与自动化系, 大连 116018)

摘要 利用电子稳像技术实现抖动视频序列稳定是现代稳像技术的发展方向之一。首先简要介绍了电子稳像的基本原理和系统结构; 然后从各模块功能出发, 对电子稳像的运动估计、运动校正和图像补偿等关键技术的研究进展进行了综述, 并给出了稳像性能评估的常用方法; 最后总结和分析了电子稳像技术的应用现状以及未来的发展趋势。研究结果显示, 电子稳像技术的研究已经逐渐进入工程应用的新阶段, 具有良好的应用前景和市场需求。

关键词 电子稳像 运动估计 运动校正 图像补偿 性能评估

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8961(2010)03-470-11

A Survey on Electronic Image Stabilization

WANG Zhimin, XU Xiaogang

(Department of Equipment System & Automation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018)

Abstract Electronic image stabilization (EIS) technique has been widely utilized for removing the unwanted motion fluctuations from video sequence. It is one of the primary development directions of the future image stabilization technique. This paper firstly introduces the basic principles of EIS and its architecture. After giving an overview of the state-of-the-art of key techniques including motion estimation, motion correction and image compensation in EIS, we list a number of general means to assess the performance of video stabilization process. Finally, the status about the application of EIS is summarized and its development trend is analyzed. Survey results show that EIS technique possesses promising application prospect and great market demand, as research on EIS technique has turned into engineering application.

Keywords electronic image stabilization (EIS), motion estimation, motion correction, image compensation, performance assessment

0 引言

稳像技术广泛应用于机器人远程遥控系统、无人车辆导航系统、视频侦察系统、导弹电视制导系统以及车载火控系统、观瞄系统等, 是电视精确制导、目标检测与跟踪的关键预处理技术, 是移动成像系统不可缺少的一种重要视频增强技术。稳像技术的发展经历了机械稳像、光学稳像和电子稳像三大

阶段。电子稳像技术的研究始于 20 世纪 80 年代中期。电子稳像是集电子学、计算机、图像识别等技术于一体, 直接确定图像序列帧间映射关系并进行补偿的新一代序列图像稳定技术, 旨在消除视频序列中的随机运动。与传统的机械和光学稳像系统相比, 电子稳像系统具有易于操作, 稳像精度高, 灵活性强, 体积小、重量轻、能耗低以及高智能化的实时处理等优点。利用电子稳像技术实现视频图像序列稳定是现代稳像技术的发展方向之一。此外, 随着

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目 (20082176); 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放基金项目 (A0906)

收稿日期: 2008-09-22 **改回日期:** 2008-12-29

简介: 王志民 (1983—), 男, 海军大连舰艇学院信号与信息处理专业硕士研究生。主要研究方向为电子稳像、图像处理。E-mail

zhimin_wang@126.com

计算机技术和大规模集成电路技术的迅猛发展, 图像处理设备的价格持续下降, 商用摄像机、监视器的嵌入式电子稳像系统也成为目前电子稳像技术的研究热点之一, 并伴随着巨大的市场需求。

1 电子稳像基本原理及系统结构

1.1 基本原理

电子稳像最基本的技术是像移补偿技术^[1], 其基本原理如下:

如图 1 所示, 摄像机连续两帧成像焦平面 (第 K 和 $K+1$ 帧), 每一格代表一个像素。摄像机成像过程中, 由于摄像机位置或参数发生变化, 导致曝光时间内相机与目标存在相对运动, 目标在焦平面上所成的像不是静止的, 而是运动变化的, 此即像移。从监视器上来看, 像移使目标成像相互混叠, 导致监视器图像抖动、模糊退化及分辨率下降, 大大降低了视频图像质量。

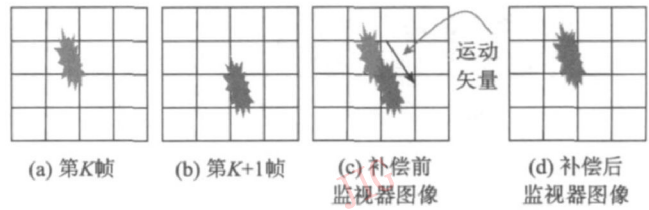


图 1 摄像机成像焦平面

Fig. 1 Camera imager

对于面阵摄像机, 它每一帧的图像信息是按行输出的, 每行又是按照像元所排列的序号顺序输出的。因此, 为了获得平稳、清晰的视频图像, 首先检测出参考帧图像与当前帧图像之间的运动矢量, 对运动矢量进行滤波、校正, 转换为监视器图像的运动矢量, 然后通过对 CCD 图像传感器的行、列序号重组, 沿运动矢量反方向补偿第 $K+1$ 帧图像, 使监视器图像与第 K 帧图像近似相同或重合。

1.2 系统结构及各模块功能

电子稳像系统结构框图如图 2 所示, 主要由三大模块组成: 运动估计、运动校正和图像补偿等。

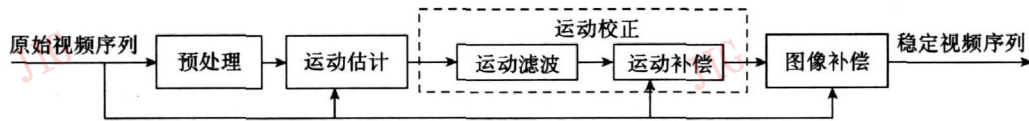


图 2 电子稳像系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of EIS system

运动估计模块 在视频序列中, 帧与帧之间总是存在差异, 引起这种差异的原因很多。由摄像机位置或参数的变化引起的整个图像的变化, 即由摄像机引起的场景背景的视在运动, 称之为全局运动; 由场景中物体运动引起的局部图像变化, 称为局部运动。电子稳像的运动估计是指全局运动的估计。

运动校正模块 摄像机的运动可分解为两部分: 意向运动分量和随机运动分量。运动校正模块中, 运动滤波的主要作用就是把估算出的全局运动中的意向运动分量和随机抖动分量区分开来, 计算补偿分量, 并通过运动补偿, 采用补偿分量对各帧图像进行矫正变换 (warping)。

图像补偿模块 运动矫正阶段对视频各帧图像进行矫正变换后, 视频帧的某些区域将变成“无定义”区域, 从而造成视频帧的视觉退化, 我们称“无定义”区域为补偿区域。图像补偿阶段就是要对补偿区域进行重构, 再现全帧视觉效果。

2 电子稳像关键技术概述

2.1 运动估计技术研究

运动估计由运动模型选取和模型参数估计两部分组成。在运动估计的初始阶段, 首先要根据系统应用环境、模型的性质、适用范围和参数的敏感性等因素正确选取摄像机运动模型。一般说来, 运动模型使用的参数越多, 运动估计越准确, 但计算复杂性也越大。不同的运动模型可用于 2 维线性变换的不同复杂度的描述, 可以用不同个数参数的矩阵表达, 可用于不同场景条件下的稳像处理。单应性运动模型具备描述复杂运动模式的充分灵活性, 但模型参数估算的复杂度高, 难于实时处理。仿射模型描述了场景中摄像机的纯旋转运动、摇摄、小幅度平移运动以及小幅度深度变化或缩放效应。大多数室内、外场景的拍摄满足仿射模型。

现有的电子稳像运动估计技术大致可分为以下

几类: 基于图像块的方法、基于模板匹配的方法、基于图像二值位平面信息的方法、基于空间像素灰度信息的方法、基于图像特征的方法以及基于变换域的方法等。

2.1.1 基于图像块的方法

块匹配平移运动估计方法。块匹配的方法是电子稳像中常用的平移运动估计方法^[2-4]。其基本思想是将当前帧划分为若干子图像, 对于每个子图像, 在参考帧的搜索窗内寻找最佳匹配块; 为寻找最佳匹配块, 首先要确定匹配准则, 然后根据不同的搜索模式搜索子图像块的运动矢量, 最后根据不同的运动决策策略检测全局运动矢量。Umori等人提出了采用中值滤波对子图像的局部运动矢量和前一帧的全局运动矢量进行滤波处理, 由此检测当前帧的全局运动矢量^[2]。Choi采用 K 均值聚类将局部运动矢量场分类为前景运动和背景运动, 并对背景局部运动矢量取模值提取中间值作为帧间全局运动矢量^[5]。采用最小均方差或最小绝对差匹配准则的全搜索块匹配法被认为是检测平移运动的最优算法^[6]。到目前为止, 国内外发展了很多块运动估计的快速算法^[7]。块运动估计方法一般基于以下假设: 当前块与预测块的块失真度随着搜索块偏离最佳匹配点单调增加。而实际上并不完全符合这个假定, 因而搜索结果可能陷入局部最优。

基于图像块代表点匹配的平移运动估计方法。Ken等人基于该方法给出了电子稳像系统的硬件设计与实现: 输入图像经带通滤波后, 将图像场分成 4 个区域, 每个区域分别选取 30 个代表点, 通过代表点匹配检测各区域的运动矢量, 在运动矢量决策处理模块剔除不适用运动矢量, 并通过整合处理模块检测整场运动矢量, 以此控制图像场存储器读出位置, 达到抵消图像抖动的目的^[8]。Hsu等人基于代表点匹配算法^[9], 采用倒三角方法, 结合背景估计策略, 给出了在图像特征缺失、较大低对比度区域以及大面积前景运动目标存在等复杂条件下的可靠全局运动估计方法。其所提出的反馈环内积分器补偿运动估计法可减轻稳态延迟。近来, Hsu等人又对其算法进行了细巧的改进, 探索电子稳像技术在智能运输系统中的应用, 提出了一种鲁棒的车内稳像技术^[10]。代表点匹配算法简单、计算量小, 但由于代表点是确定的, 未必是图像上有明显特征的点, 对图像的变化不敏感, 对旋转晃动和慢速晃动还不能补偿。

基于改进代表点匹配的平移、旋转运动估计方法。钟平提出了一种改进的代表点匹配算法。通过合理的区域划分, 保证在区域内各点运动的一致性, 利用代表点匹配算法确定各区域内的运动矢量, 剔除不可靠局部运动矢量, 并把有效局部运动矢量值代入变换模型可得关于旋转、平移和变焦等信息的线性方程组, 求解得全局运动矢量^[11]。利用该方法的特点是速度快, 并能实现帧间平移和旋转运动补偿。代表点匹配在前景运动目标存在时较敏感。

2.1.2 基于模板匹配的方法

Kurazume等人基于模板匹配方法和陀螺传感器技术开发出了一套用于步行机器人导航系统的电子稳像子系统^[12]。该子系统首先选取感兴趣区域作为初始模板; 由陀螺传感器获取摄像机位移量, 并与前一次估算的平移矢量相加得到模板匹配搜索区域的初始位置, 搜索匹配点; 最后通过相关计算获取平移矢量, 通过对 CCD 传感器序号重组获取稳定图像。Okuda等人提出了一种基于分级分布式模板匹配的仿射运动估计方法^[13]。算法分初始化运动估计和最优运动估计两个阶段实现。初始化运动估计阶段: 首先在当前帧提取感兴趣区域即信息量较大的子图像作为局部模板, 采用分级分布式模板匹配和抛物线拟合方法估计亚像素级精度的局部运动矢量; 最优运动估计阶段: 成组分割局部运动矢量, 剔除不适用运动矢量, 根据代价函数最小化确定最优全局运动矢量。算法具有在图像受阴影、光晕、遮挡和噪声等干扰下检测运动矢量的能力。但算法针对性较强, 对于较复杂的场景如不平坦区域和前景目标存在的情况下算法较难适用。

2.1.3 基于图像二值位平面信息的方法

基于图像二值位平面信息的方法是根据不同的位平面分解技术将图像转换为表示图像不同局部细节信息的二值位平面, 选取适当的二值位平面进行匹配, 采用二进制布尔运算求解相关函数最小值并以此来确定图像的运动矢量。

基于位平面匹配的平移运动估计方法。Ko等人提出了一种基于位平面匹配技术的电子稳像算法^[6]。该算法利用视频图像 1 比特位平面进行运动估计, 通过二进制函数实现图像块的快速匹配, 在保证精度的条件下大大降低了计算复杂度。然而, 位平面分解有一个明显缺陷: 像素点灰度值的微小变化有可能对位平面的复杂程度产生较明显的影响, 增加了误匹配发生的概率^[14]; 此外, 算法在不同图

像序列和信噪比的情况下, 其位平面选取策略并不能总是保证得到一个最优解^[15]。

基于灰度编码位平面匹配的平移运动估计方法。Ko等人提出了一种基于灰度编码位平面分解技术的快速电子稳像算法^[14]。在不增加计算复杂度的情况下, 通过灰度编码大大降低了误匹配发生的概率。该算法要解决的一个难题就是: 如何自适应选择一个适当的位平面进行运动矢量的估计。罗军等人提出一种基于菱形搜索的局部求精快速灰阶编码位平面匹配和中值滤波运动校正技术的电子稳像算法^[16], 在保证精度前提下, 大大降低了计算复杂度; 算法需要进一步研究的是: 比特平面选取策略以兼顾全局信息和细节信息、匹配测度、多比特平面匹配等问题。

基于子图像 1 位变换位平面匹配的平移运动估计方法。Yeni等人采用低复杂度的子图像 1 位变换位平面匹配技术估计运动参数^[17]。算法首先对视频帧进行多带通滤波后与原始帧结合提取位平面, 再利用简单的布尔函数和异或操作进行位平面匹配。完成一个像素的匹配只需 1 次异或操作, 而传统的位平面匹配法需 8 次异或操作, 相比之下极大降低了复杂度和计算量。同时在子图像尺寸足够大的情况下保证了算法的精度。Uthan和 Erturk等人对算法进行了改进, 提出了一种基于单一子图像约束性 1 位变换位平面匹配的低复杂度数字稳像技术^[18], 提高了算法的精确性和计算速度。

2.1.4 基于空间像素灰度信息的方法

基于空间像素灰度信息的运动估计算法中, 像素递归法和光流法由于计算量大, 实时性很差, 对噪声非常敏感, 且所使用的模型也是病态的, 因此在电子稳像系统的实际应用中并不多见^[19]。

基于灰度投影的平移运动估计方法。Ratakonda提出了基于灰度投影算法的数字视频稳像技术^[20]。算法通过对两帧图像的 2 维灰度投影曲线作相关运算, 来得到两帧图像间的运动矢量; 采用 2 因子插值法得到半像素的位移矢量检测精度。由于灰度投影算法利用了图像的整体灰度信息, 且只对两个 1 维向量作相关运算, 故对图像的整体灰度变化、像面曝光度及噪声均较不敏感, 运动矢量估计精度高、运算量较小, 适合实时运动矢量检测, 适用于探测 CCD 高速及低照度的成像环境。钟平等人分析了影响算法精度的主要因素, 提出了快速而有效的图像序列预处理方法^[21], 以增强算法的鲁棒性并提高其估计

精度。针对传统灰度投影算法采用全局搜索运动矢量运算量较大的缺点, 李博等人提出一种电子稳像的灰度投影 3 点局域自适应搜索算法^[22]: 在搜索宽度内均匀选取 3 点, 计算比较其相关值, 判断相关曲线梯度变化方向, 相应调整搜索参数, 获得帧间运动矢量。该算法显著降低了灰度投影算法的运算量, 减少了运算时间。

2.1.5 基于变换域的方法

变换域的方法是将图像从空间域映射到变换域(如频率域、Fourier-Mellin 域等), 通过研究图像在变换域的幅值和相位特性进行运动估计。

基于相位相关的平移运动估计方法。Erturk和 Dennis提出了一种基于相位相关法的数字视频稳像算法^[23]。算法根据傅里叶变换平移理论来检测平移运动矢量。之后, Erturk提出了基于子图像相位相关法的稳像算法^[24], 在一定程度上克服了场景中存在前景目标对算法精度的影响, 减少了计算量, 且便于并行计算, 可实现实时处理。Kwon等人提出了一种基于边缘子图像相位相关的运动估计算法^[25]。算法基本思想: 截取连接拍摄画面边缘的四块矩形子图像, 各子图像平移后差分, 使用阈值消除图像噪声并提取边缘, 获取各子图像的边缘图像并转化为方形子块, 然后采用相位相关法计算参考帧与当前帧对应子图像间的局部运动矢量, 剔除含前景运动目标的子图像对应的局部运动矢量, 最后根据剔除后的局部运动矢量估算出全局运动矢量。该算法克服了前景运动目标对运动估计的不利影响。另外采用边缘匹配的方法可以显著提高算法的处理速度, 但如何选取合适的边缘检测参数, 将图像轮廓特征清晰的表现出来仍是本算法所面临的难点。采用相同的子图像选取策略, Kwon等人提出了一种新颖的基于二值边缘变换子图像相位相关的微光照图像平移运动检测技术^[26], 进一步降低了计算复杂度, 并提高了抗噪性能。

基于扩展的相位相关法的平移-旋转运动估计方法。Kwon等人提出了一种基于相位相关和选择性滤波器的运动估计技术^[27]。算法基本思想: 首先在图像四边缘处选取 8 块子图像, 采用边缘子图像相位相关法^[25]估计局部运动矢量, 并剔除不可用运动矢量, 计算各矢量的方向及模值, 用选择性滤波器确定运动模型; 最后根据不同的运动模型选择不同的方法确定全局运动矢量。该算法针对性较强, 对于不同的运动模型采用不同的参数估计方法, 在降

低计算复杂度的同时又能消除可能引入的多维运动扰动,适用于平移运动为主、含一定的旋转扰动的视频稳像算法中。但选择性滤波器易受噪声影响,难于保证算法的有效性和稳健性。

基于对数极坐标变换技术以及相位相关技术的相似运动估计方法。Ertürk 提出了一种 Fourier Mellin 域相位相关的相似运动估计方法^[28]。算法首先对两帧图像进行 Fourier Mellin 变换,将图像间的旋转和缩放运动分别转换为 Fourier Mellin 域中沿极角和极径方向的平移运动,再基于相位相关法估算旋转和缩放参数,并对当前帧图像进行反变换矫正后,利用相位相关法求解图像间的平移参数。算法能够估计大的旋转和位移运动,以及一定的缩放运动。但算法实现过程中用到多次 Fourier 变换和反变换,计算量较大,难于实时处理;另外,由于估算的旋转角度的分辨率有限,影响了算法的精确性。Dios 等人对算法进行了改进^[29]。算法采用 Cooley Tukey 快速 Fourier 变换,减小了计算量,通过采用不同尺度的振幅谱图像及其极坐标空间图像,一定程度上提高了算法的精确性和鲁棒性;但旋转角度分辨率不足的问题仍然存在。邢惠等人采用对数极坐标变换和相位相关技术检测图像帧间旋转、缩放和平移运动^[30]。该方法以图像中心作为旋转中心,而在实际应用中,旋转中心一般不会刚好位于图像的中心,用此法不能对全部旋转进行补偿。

2.1.6 基于图像特征的方法

基于特征跟踪的运动估计方法。Morimoto 等人提出了基于 2 维特征的多分辨率相似运动估计算法^[31]。首先构造金字塔图像;然后,将参考帧阈值化图像分解成 N 个垂直子图像 (N 对应要跟踪的特征数),每个子图像由上自下进行搜索,选取最顶层特征作为该子图像的跟踪特征;再利用多分辨率匹配技术,采用最小差值平方和匹配准则在当前帧实现特征匹配;通过计算特征点集相对于质心位置的距离变化率来估算缩放因子;再将 N 个匹配点对代入相似运动方程,使用最小二乘法求解得到平移和旋转参数。Censi 等人提出基于 2D 角点特征跟踪实现稳像处理^[32]。算法首先在起始帧提取亚像素级精度 2D 特征角点,在后续帧中利用 Kalman 滤波实现特征窗的跟踪,同时利用 X84 规则剔除虚假跟踪的角点;最后采用鲁棒跟踪的对应点估计单应矩阵。提取稳定的特征、剔除前景和遮挡区域中的不

可靠特征,以及对新特征和隐没特征的处理,仍是特征匹配的难点。

基于旋转不变特征圆形块匹配的相似运动估计方法。近来, Xu 等人提出了一种新颖的基于旋转不变特征圆形块匹配的相似运动估计方法^[33]。算法基本思想: 1) 提取旋转不变特征。采用具有旋转不变特性的 Gaussian-Laplacian 算子对灰度图像 I 处理得到梯度图像 G , 其二值化图像为 B , 然后从 I, G, B 图像中提取 4 个旋转不变特征并用特征向量来表示。2) 圆形块匹配。对于当前帧中指定的圆形块,通过基于特征矢量的运动搜索获得其圆心的局部运动矢量。3) 全局运动参数估计。用迭代最小二乘法求解使用局部运动矢量和运动模型建立的线性参数系统获得全局相似运动参数;最后用运动迭代使运动参数更加精确。该算法能处理更大范围的平移、旋转及缩放运动,而且估计的运动参数更加精确。但算法不适于前景运动物体太大以及亮度有突变的情况。前者会影响背景运动参数的提取,后者会影响圆形块运动搜索的准确性;此外,该算法的复杂度较高,目前还达不到实时稳像的要求^[34]。Yuan 等人提出了一种新颖的基于对数极坐标变换和圆形块匹配估计相邻帧较大的全局运动的方法^[35]。算法采用相似运动模型,分为两个阶段实现: 初始运动估计和最佳运动估计。初始运动估计: 首先对输入相邻帧图像用 5×5 Gaussian 核算子卷积平滑,再用 Laplacian 核算子卷积得到梯度图像,然后从各自梯度图像的圆形块区域中提取两个旋转不变特征,基于相邻两帧的旋转不变特征矢量进行圆形块匹配,使用快速运动搜索得到相邻帧对应原点位移,再采用多分辨率对数极空间互相关算法估计相似运动参数。最佳运动估计: 采用基于梯度的非线性最小二乘最优化技术实现亚像素精度估计。该算法估算得到旋转、缩放和平移参数均具有较高的精度,但算法复杂度较高,实时性较差。

2.1.7 主要方法的比较

表 1 给出了几种主要运动估计方法的定性比较。从表中可以看出,目前电子稳像的运动估计方法大多针对平移运动,而实际应用环境往往较为复杂,平移运动模型不能完整地描述摄像机的运动特征。基于具有更强的运动场景描述能力的多自由度运动模型的全局运动估计方法的研究尚不成熟,还存在很多值得深入、细致研究的问题。

表 1 几种主要运动估计方法的定性比较

Tab. 1 The qualitative comparisons of several motion estimation methods

方法	运动模型	场景适用情况	速度和精度	局限性
块匹配	平移	适用于存在小幅度运动的场景; 适合估计多种运动同时存在的场合	易于硬件实现, 但计算量大, 效率低, 很难做到实时检测; 估计精度取决于块的大小、搜索策略及匹配准则	块匹配法对块的大小选择非常敏感, 选择不合适的块有可能严重影响结果; 且存在局部最优效应等
灰度投影	平移	适用于图像信息丰富的场景	算法简单, 易于实现, 采用三点局域自适应搜索算法可实现实时稳像; 可达像素级估计精度	灰度信息单一的场景中处理效果较差
基于二值位平面信息的 方法	平移	位平面信息明显如建筑、室内等场景	位平面提取技术、二进制布尔运算利于快速实现; 精度受限于选取的位平面	误匹配发生的概率较高, 抗噪声能力较差
相位相关	平移	对场景光照变化不敏感; 对噪声、遮挡等干扰有明显抑制作用, 对存在较大平移运动的场景也有更好的性能	FFT在高效硬件和软件的实现上取得的重大突破, 使得算法计算效率大大提高; 可达到亚像素级估计精度	“边界效应”或场景中多动目标使得相位相关函数曲面出现两个甚至多个尖峰, 影响检测效果
Fourier Mellin 域相位相关	相似	对噪声有较高的容忍程度, 检测结果与照度无关, 可处理较大的平移旋转运动及一定尺度变化的室内、外场景	用到多次 Fourier 变换和反变换, 计算代价较大; 旋转角度分辨率不足, 精度不高	映射误差对算法鲁棒性影响较大, 变换坐标的分辨率较难实现自适应选取
基于圆形块 匹配的方法	相似	对平移、旋转和缩放运动的处理能力分别为大于 30 像素、大于 30°及 0.85 ~ 1.14	复杂度较高, 达不到实时处理的要求; 对平移、旋转及缩放运动的参数估计精度较高	不适用于前景运动物体太大以及亮度有突变的情况
特征跟踪	相似、仿射 及单应性	要求场景全局特征明显, 不同的特征采用不同的特征提取算法, 如场景中包含明显的形状特征时, 适宜采用角点检测等	不同特征提取算法及跟踪算法具有不同的运算速度, 总体上计算速度一般; 运动参数的估计精度在很大程度上依赖于特征提取的精度	当特征不十分明显, 或特征过于集中于局部区域时, 特征误匹配率高; 丧失过多的灰度信息, 因而对噪声比较敏感

2.2 运动校正技术研究

运动校正的主要任务就是通过运动滤波消除或减轻摄像机抖动引起的视频序列随机运动, 计算补偿分量, 对序列图像进行矫正变换。目前用于电子稳像的运动滤波算法主要有: 基于低通滤波的方法、基于 B 样条的运动滤波法、基于 Kalman 滤波的方法以及基于多轨迹映射的运动滤波法等。

基于低通滤波器实现平移运动滤波。把视频图像序列的运动轨迹用信号来描述, 将随机运动看做是信号的高频噪声, 并使用低通滤波去噪, 从而达到运动轨迹平滑滤波的目的。文献 [6] 使用中值滤波, 通过计算滤波器宽度内数帧运动轨迹的中值实现简单的运动平滑。文献 [23] 使用离散傅里叶变换和高斯低通滤波对摄像机的平移参数去噪。文献 [36] 使用时序加权和对摄像机的平移运动轨迹进行过滤。这些算法实现的运动滤波效果与低通滤波器带宽密切相关, 为了增强滤波的平滑效果, 往往需要增加滤波器带宽, 即增加了帧的延迟数, 从而降低

了电子稳像算法的整体实时性。

基于 B 样条的平移运动滤波方法。孟龙等人采用 B 样条设计数字滤波器来进行运动滤波^[37]。算法采用二次 B 样条曲线对运动轨迹进行拟合, 拟合后的曲线就是多个匀加速运动串联的结果, 而且整条曲线的速度是连续的。采用该算法不需要预知抖动的模式就能够确保运动轨迹的平滑。算法在进行插值处理时需要进行相关时间的延迟, 相关时间一般取为 1~2 s, 使控制点间距离在 7~15 帧, 系统计算量较大, 难以达到实时性的要求。而且处理结果会出现缓慢的波动, 影响稳像效果。

基于 Kalman 滤波的平移运动滤波方法。文献 [24 26 38-39] 采用 Kalman 滤波及其改进算法实现平移运动滤波处理。算法将摄像机的随机运动分量看成噪声加以去除, 只保留摄像机的正常扫描等意向运动分量, 从而达到运动轨迹平滑的目的。基于 Kalman 滤波的运动滤波算法不需要对视频序列进行帧的延迟, 从而避免了稳像视觉效果上的延

迟效应,并可以实现稳像的实时处理,但平滑效果一般。张帆等人提出了一种基于固定滞后平滑滤波的平移运动滤波技术^[40]。固定滞后平滑滤波算法是一种最优平滑滤波方法,是在 Kalman 滤波的基础上得到的。算法通过滞后 N 帧图像所获得的更多图像帧位置信息,提高 Kalman 滤波的估计精度。与传统的 Kalman 滤波算法和其他平移运动滤波算法相比,此算法所需的延迟帧数较少,算法计算速度较快,实时性好,滤波的平滑效果明显,滤波精度较高。

基于 Kalman 滤波实现仿射运动滤波。Litvin 等人提出了基于 Kalman 滤波技术的视频稳像算法^[41]。算法通过对摄像机意向运动统计特性的分析,把意向运动分量描述为物理意义上的状态矢量空间模型的随机过程函数,而随机运动分量则被认为是随机噪声过程,据此构造用于描述动力学意向运动分量和随机运动分量的物理状态矢量空间模型,使用 Kalman 滤波器估计意向运动分量的最优值;最后通过选择不同的滤波器可实现算法性能与系统存储需求的平衡。算法在解决多参数运动滤波实时、精确的平滑滤波问题上做出了突出贡献。当然, Kalman 滤波的效果与系统的噪声参数设置有关,对摄像机的意向运动特性、随机运动的频率和幅度等变化较敏感,因此需要根据不同的应用环境人工装订滤波参数,鲁棒性有待提高。

基于约束条件下的 Kalman 滤波实现平移-旋转运动滤波。Tico 等人提出了一种引入旋转和平移约束关系的 Kalman 运动滤波算法^[42],算法建立了旋转运动和平移运动各自矫正范围之间的相互制约关系,较大程度地避免了帧信息的丢失,但仅适用于忽略缩放因子的相似运动的平滑滤波处理,通用性较差。

基于多轨迹映射的仿射运动滤波算法。吴思等人提出了一种基于多轨迹映射的仿射运动平滑滤波算法^[43]。首先,将估计出的帧间仿射运动参数映射成多条运动轨迹;再使用 Bezier 曲线拟合和改进的三次 B 样条拟合平滑这些轨迹曲线,既保证了平滑后轨迹曲线的 C2 连续,同时也避免了过度平滑的出现。与现有的算法相比,由于只需要简单地对改进三次 B 样条拟合中的截断波长进行设置,该算法大大减少了需要用户调节的稳定化参数,同时稳像处理后的视频具有最佳的视觉质量。

2.3 图像补偿技术研究

图像补偿用于电子稳像的后期完善,提供完整

的全帧视觉效果。目前,很多文献未就补偿区域进行合理的处理,仅采用单一灰度值或颜色值进行填充。目前电子稳像处理中图像补偿的方法一般有:1)插值放大;2)拼接;3)基于运动复原的方法。

插值放大的方法先切除所有视频帧边缘的空白区域,保留视频帧中不含空白区域的固定尺寸矩形区域,再对矩形区域放大到视频帧的原始尺寸。对于较大的图像帧变换,需要切除大的边缘区域,进行较大比例的放大,将造成图像信息丢失、分辨率下降,限制了图像帧的可矫正变换范围。插值放大的方法一般用于采用了平移模型的稳像算法的图像补偿处理。

Hunsen 等人采用拼接技术将后续各帧图像拼接到选定的参考帧并显示拼接结果即全景图^[44]。该方法实际上并没有解决图像稳定的问题,在摄像机载体的运动距离比较大且景深变化较大的时候拼接效果很差;另外,在运动距离较大时后续帧与参考帧可能因为重叠区域不足而无法进行补偿。对于运动补偿后出现的补偿区域, Litvin 等人采用改进的图像拼接技术进行填充^[41],即基于相邻几帧准确对齐后图像内容的近似性,使用相邻几帧的像素值来填充空白区域,区别于文献 [32, 44-45]——满足固定场景的条件下对稳定的所有视频帧进行拼接构造,该方法补偿效果较好,具有较好的视觉品质,但由于需要对相邻几帧进行对齐,算法复杂,计算量较大,且易受噪声影响,可能产生严重的伪影现象。以上所述的图像补偿方法均基于如下假设:邻近帧中与补偿区域相应的背景区域不含前景运动目标。

Matsushita 等人提出了一种新颖的基于运动复原的图像补偿技术^[46]。静态背景图像区域先通过相邻几帧图像数据对齐来补偿,再通过局部运动拓展(不同于传统图像修复技术中所采用的颜色或灰度信息)实现运动复原,以增强静态和动态图像区域的时空一致性,拓展的运动矢量场用来填充包括有非平坦及动态场景区域(含前景运动目标的图像区域)的补偿区域。该方法实现了满帧稳像的出色视觉效果,解决了不平坦场景和视频帧边缘存在运动目标的图像补偿问题。由于运动复原需要先计算光流场,计算量较大,需要进一步探索在实时稳像技术中的应用。

图像补偿是电子稳像领域中一个很有挑战性的问题。由于运动校正造成的补偿区域位于图像的边缘区域,使得视频背景图像甚至前景运动目标出现

信息丢失。传统的图像拼接技术用于图像补偿后得到的视频帧是静态的图像, 因而失去了视频的局部运动特性。而传统的图像修复或视频修复技术也不能简单而直接地用于修复补偿区域, 因为位于边缘的补偿区域的周边信息极其单一, 仅根据周边信息将图像扩展到补偿区域难于保证图像信息的一致性和连续性, 修复后的帧图像便会出现伪影现象, 影响视频的视觉质量。将视频中的背景与运动前景分割开, 然后利用视频的时空连贯性并根据局部运动特性进行图像补偿是该领域的主要研究方向之一。

2.4 电子稳像系统性能评估方法

视频稳像处理的最终目的是要满足人眼的视觉舒适度需求, 合理的视频品质评估应遵循人眼的视觉特性。因此, 最直接的稳像性能评估方法应该是观察者对同一视频序列, 根据稳像前后视觉效果的对比如稳定视频的品质好坏进行评判、打分, 可同时由几个或更多的观察者对几组视频进行评分。观察者人数越多, 视频组越多, 越能准确地评估稳像算法的性能。这是一种主观评价的方法, 耗费成本高, 具有较强的主观性。

文献 [47] 根据帧间变换保真度 (ITF) 对稳像结果进行客观评估, ITF 是基于峰值信噪比 PSNR 计算的, 它适合于静态背景下视频稳像结果的评价, 是一种常用的客观评价方法。

文献 [48] 给出了视频稳像效果的定量评价方法: 稳像处理后得到的视频称为回答视频。观察回答视频每一帧和正解视频中相应帧的差别, 在正解帧和回答帧的差分图像中没有出现边缘宽度超过 3 像素的对象, 判为回答帧为合格帧 (OK); 有上述边缘对象的帧为不合格帧 (NG)。OK 数 + NG 数 = 「评价视频的帧数」, 求出矫正率: 矫正率 = 「评价视频的合格帧数」/ 「评价视频的帧数」。如果这一视频的矫正率达到 90% 则稳像处理成功。该方法也只适合于评估静态背景下的视频稳像结果。

然而在背景运动即摄像机存在正常扫描等意向运动的情况下, 则应考虑连续帧间变化的差异来衡量稳定的结果。文献 [43] 提出使用 DITF (difference of interframe transformation fidelity) 对运动背景下的视频稳定化结果进行评估, 视频中的摄像机运动越平滑, DITF 的值也就应该越小。DITF 定义如下:

$$DITF(i) = |PSNR(i+1) - PSNR(i)| \quad (1)$$

文献 [49] 结合视觉特性分析, 根据符合人眼视觉特性的抖动截止频率确定期望误差值, 将滤波后

的意向运动分量进一步分解为散度和抖动量, 分别用于描述视觉品质良好的低频运动量和视觉品质差的高频运动量; 稳像前后的抖动量之比定义为抖动衰减系数。系数值越大稳像效果越好, 视频越流畅。

3 电子稳像技术应用和展望

3.1 应用现状

国外, 20 世纪 80 年代中期美国首次将电子稳像技术应用在导弹制导系统中。进入 20 世纪 90 年代, 由美国 ARL 实验室 (Army Research Laboratory) 研制的应用在无人驾驶越野车的稳像装置的稳像精度优于 1 个像素^[1]。加拿大的 DREV 实验室 (Defense Research Establishment Vileartier Laboratory) 利用电子稳像技术将直升机上拍到的视频稳定到 0.5 个像素范围内, 处理速度达 30 帧/秒; 根据国防要求, 该实验室又研制出安装在侦察车 10 m 高的桅杆上的实时监视系统中的稳像装置^[50]。

日本的 Matsushita Electric Industrial Co. Ltd. 开发出了手持可稳像摄像机。日本松下 NV-S1 型摄像机的电子稳像器利用第一张静态画面的位置来校正后续画面的位置, 能克服在水平 2°、垂直 1.4°范围内的抖动。韩国的三星公司研制出了应用于数字图像稳定装置的适应性运动决策系统。英国 Ovation Systems Ltd 公司推出了一款 StableEyes 的视频稳像装置^[51], 可为高倍变焦监控摄像机提供在线或离线稳像处理, 系统延迟仅 80 ms。另外, 在国外一种叫图像稳定滤镜的电子稳像设备也已研制成功, 这种器件是基于著名的 Commonon 合成软件中的运动跟踪算法进行图像稳定的。

国内, 国防科技大学针对单通道防空导弹弹旋耦合等问题, 开发出了点目标相对运动轨迹仿真系统、点目标电子稳像仿真系统和存在背景图像的电子稳像系统 3 个仿真演示系统^[52]。长春光学精密机械与物理研究所探索基于陀螺与数字处理技术相结合的电子稳像技术, 编制了一套应用于车载侦察设备的实时稳像处理软件^[53]。近来, 国内的上海联数信息技术有限公司推出了一款电子稳像器^[54], 使用在前端设备 (如彩色、黑白、红外、热成像等摄像机) 和后端设备 (如 DVR、矩阵切换器、显示器等等) 之间, 为后端设备提供一个清晰的稳定的图像。

3.2 难点

电子稳像技术的研究已经取得了很大的进展,

但仍有进一步研究的潜力,在电子稳像的工程应用中仍需解决以下几个方面的难点:

1) 复杂环境下稳像算法的稳健性。如何消除背景遮挡、光照变化、噪声、前景运动目标以及低复杂度视频内容等复杂环境条件对稳像算法鲁棒性和稳健性的影响是目前稳像算法的研究热点。

2) 稳像处理后视频画面品质。在稳像过程中,由于对图像的人工矫正精度不足,且亚像素精度稳像过程需要进行插值计算,引起图像质量下降,出现伪影、模糊甚至退化等问题。

3) 多参数运动条件下稳像算法的实时性。目前的电子稳像算法大多只能实现基于平移运动模型的实时处理,而实际应用环境往往较为复杂,平移运动模型不能完全地描述摄像机的运动特征。实现多参数运动模型下的实时稳像处理,并留出足够的时间来实现后续的视频实时分析、理解等工程应用,是该领域学者的研究目标之一。

3.3 展望

任何一种单一的方法和应用已经无法满足人们的需求,目前的电子稳像系统对于应用对象和环境针对性较强,不同情况选取不同的方法,主要目的是为了减少计算量。引入其他领域的新技术并扩展电子稳像技术的功能任务将是电子稳像技术的又一研究热点,也是一个具有挑战性的新的研究领域。

1) 超分辨率复原技术在高清晰稳像算法中的应用。摄像机成像过程中往往会受到运动模糊、光学模糊、变形和噪声等诸多因素的影响,尤其是剧烈的随机抖动,造成获取视频质量的下降。高精度光学设备和传感器成本高,分辨率有限,而超分辨率复原技术突破了摄像系统固有分辨率的局限,采用信号处理的方法,试图恢复摄像系统截止频率之外的信息,是提高空间分辨率改善图像质量的有效方法,对于提高稳像算法的性能具有重要的意义。

2) 嵌入式并行稳像系统的开发。随着图像处理任务加重,在完成视频实时稳像处理的同时,可能还要保证后期视频分析如目标跟踪、视频内容理解等算法的性能。嵌入式并行稳像系统的开发不仅能提高图像处理的速度,而且还能降低成本,满足实时的需求,提高性价比。此外,随着移动数字监控技术向着自动化和智能化方向发展,机器人双目智能视觉技术的研究也已受到广泛关注,嵌入式并行稳像系统能够为其提供一种高效的预处理机制。

3) 应用在大口径、长焦距的电视摄像系统中。

大口径、长焦距可扩大监测范围,在战场上获得更全面的信息。而焦距越长,摄像平台的随机运动对所获取图像序列稳定性的影响越大。电子稳像是直接对图像进行处理,稳像的精度是图像的像素精度,与焦距关系不大,所以电子稳像是解决长焦距图像失稳的好方法,在机载摄像系统、遥感、稳像仪新技术等应用领域中具有广泛的研究价值。

4) 新的稳像算法的研究。对于高分辨率、复杂背景以及存在运动目标和噪声视频,如何精确检测全局运动、自适应分离摄像机主观运动与随机运动,以及如何消除因图像边缘区域存在前景运动目标而引起的修复后的边缘存在明显的拼痕带(或伪影)的问题还是电子稳像处理技术面临的难点。在解决这些问题时,不仅要充分利用图像序列视频空间的信息量,而且要广泛结合其他领域如神经网络、遗传算法、人工智能等方法。

4 结语

本文对电子稳像的关键技术进行了综述,给出了稳像性能评估的常用方法。通过对电子稳像技术的应用现状的总结以及对其未来的发展趋势的探讨,可以看出,电子稳像技术具有广阔的应用前景和巨大的市场需求,而目前的解决方法尚不成熟,还存在很多值得深入细致研究的问题。

参考文献 (References)

- [1] Zhao Hong ying Jin Hong Xiong Jing wu. Overview of the electronic image stabilization technology [J]. Optics and Precision Engineering 2001, 9(4): 353-359. [赵红颖, 金宏, 熊经武. 电子稳像技术概述 [J]. 光学精密仪器, 2001, 9(4): 353-359.]
- [2] Umori K, Morimura A, Ishii H. Electronic image stabilization system for video cameras and VCRs [J]. Journal of the Society of Motion Picture Television Engineers 1992, 101(2): 66-75.
- [3] Vella F, Castorina A, Mancuso M, et al. Digital image stabilization by adaptive block motion vectors filtering [J]. IEEE Transactions Consumer Electron 2002, 48(3): 796-800.
- [4] Chen Homer Liang Chia-kai Peng Yuchun, et al. Integration of image stabilizer and video codec [J]. IEEE Transactions CSVT, 2007, 17(7): 801-813.
- [5] Choi K S, Lee J S, Kim J W, et al. An efficient digital image stabilizing technique for mobile video communications [EB/OL]. (2002-08-06) [2008-07-10]. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=854608.
- [6] Ko S J, Lee S H, Lee K H. Digital image stabilizing algorithms

- based on bit-plane matching [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics 1998, 44(3): 617-622.
- [7] Yu Jing, Su Kaina. A survey of block-based motion estimation [J]. Journal of Image and Graphics 2007, 12(12): 2031-2041. [禹晶, 苏开娜. 块运动估计的研究进展 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(12): 2031-2041.]
- [8] Kenya U, Atsushi M, Hirofumi I. Automatic image stabilizing system by full digital signal processing [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics 1990, 36(3): 510-519.
- [9] Hsu Sheng-che, Liang Sheng-fu, Lin Chin-teng. A robust digital image stabilization technique based on inverse triangle method and background detection [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics 2005, 51(2): 335-345.
- [10] Hsu S C, Liang S F, Fan K W, et al. A Robust in-car digital image stabilization technique [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics 2007, 37(2): 234-247.
- [11] Ping Zhong. Application of improved representative point match algorithm in electronic image stabilization [J]. Optical Technique 2005, 31(5): 742-745. [钟平. 一种改进的代表点匹配算法在稳像技术中的应用 [J]. 光学技术, 2005, 31(5): 742-745.]
- [12] Kurazume R, Hirose S. Development of image stabilization system for remote operation of walking robots [EB/OL]. (2000-08-02) [2008-07-15]. <http://mdl.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=g&collection=TRD&recid=490517>.
- [13] Okuda H, Hashimoto M, Sumi K, et al. Optimum motion estimation algorithm for fast and robust digital image stabilization [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics 2006, 52(1): 276-280.
- [14] Ko S, Lee S, Jeon S, et al. Fast digital image stabilizer based on gray-coded bit-plane matching [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics 1999, 45: 598-603.
- [15] Zhang Bo, Ren Guanghui, Wu Zhilu, et al. Digital image stabilization based on sub-sampling and bit plane matching [J]. Opto-electronic Engineering 2005, 32(2): 75-79. [张博, 任广辉, 吴芝路, 等. 采用下采样和位平面匹配的局部运动估计 [J]. 光电工程, 2005, 32(2): 75-79.]
- [16] Luo Jun, Song Xin, Shen Zhenkang. An image stabilizing algorithm based on locally refined bit-plane matching based on diamond search [J]. Infrared Technology 2007, 29(1): 51-54. [罗军, 宋新, 沈振康. 基于菱形搜索的局部求精比特平面匹配图像稳定算法 [J]. 红外技术, 2007, 29(1): 51-54.]
- [17] Yen i A A, Ertürk S. Fast digital image stabilization using one bit transform based sub-image motion estimation [J]. IEEE Transactions on Consumer Electron, 2005, 51(3): 917-921.
- [18] U rhan O, Ertürk S. Single sub-image matching based low complexity motion estimation for digital image stabilization using constrained one-bit transform [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics 2006, 52(4): 1275-1279.
- [19] Zhu Zhigang, Xu Guangyou, Yang Yudong, et al. Camera stabilization based on 2.5D motion model estimation and inertial motion filtering [EB/OL]. (2002-05-12) [2008-07-17]. http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6WPR-45BC3TN-C.
- [20] Ratakonda Krishna. Real-time digital video stabilization for multimedia application [EB/OL]. (2002-05-12) [2008-07-19]. <http://scholar.google.cn/scholar?q=Realtime+digital+video+stabilization+for+multimedia+application>.
- [21] Zhong Ping, Yu Qianyang, Wang Mingjia, et al. Method for improving accuracy of projection algorithm for the electronic image stabilization [J]. Journal of Optoelectronics. Laser 2003, 14(2): 182-186. [钟平, 于前洋, 王明佳, 等. 提高用于电子稳像的灰度投影算法精度的方法 [J]. 光电子·激光, 2003, 14(2): 182-186.]
- [22] Li Bo, Wang Xiaotong, Yang Changqing, et al. Three-point locally adaptive searching in gray scale projection algorithm for electronic image stabilization [J]. Opto-electronic Engineering 2004, 31(9): 69-72. [李博, 王孝通, 杨常青, 等. 电子稳像的灰度投影三点局域自适应搜索算法 [J]. 光电工程, 2004, 31(9): 69-72.]
- [23] Ertürk S, Dennis T J. Image sequence stabilization based on DFT filtering [J]. IEEE Proceedings on Vision Image and Signal Processing 2000, 147(2): 95-102.
- [24] Ertürk S. Digital image stabilization with sub-image phase correlation based Global motion estimation [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics 2003, 49(4): 1320-1325.
- [25] Kwon O, Shin J, Pak J. Edge based adaptive kahn filtering for real time video stabilization [EB/OL]. (2006-02-27) [2008-07-28]. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?amumber=1598317.
- [26] Kwon Ohyun, Nam Byungdeok, Pak Joonki. Binary edge based adaptive motion correction for accurate and robust digital image Stabilization [J]. Lecture Notes in Computer Science 2006, 4319(1): 1142-1149.
- [27] Kwon O, Nam B. Motion vector analysis algorithm for selective and robust digital image stabilization [EB/OL]. (2007-4-04-10) [2008-08-10]. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?amumber=4146179.
- [28] Ertürk S. Translation, Rotation and scale stabilization of image sequences [J]. Electronic Letters 2003, 39(17): 1245-1246.
- [29] Dios J R, Martinez-de O llo A. A real-time image stabilization system based on fourier mellin transform [J]. Lecture Notes in Computer Science 2004, 321E: 376-383.
- [30] Xing Hui, Yan Jinglong, Zhang Shujiang. Digital image stabilization algorithm based on phase correlation [J]. Opto-Electronic Engineering 2007, 34(3): 37-41. [邢慧, 颜景龙, 张树江. 基于相位相关的数字稳像算法研究 [J]. 光电工程, 2007, 34(3): 37-41.]
- [31] Morimoto C, Chellappa R. Fast electronic digital image stabilization [EB/OL]. (1996-03-10) [2008-08-11]. <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ICPR.1996.546956>.
- [32] Censi A, Fusiello A, Roberto V. Image stabilization by features

- tracking[EB/OL]. (1999-09-29) [2008-08-15]. <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ICIP.1999.797671>.
- [33] Xu Lidong Lin Xinggang. Digital image stabilization based on circular block matching [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics 2006, 52(2): 566-574.
- [34] Xu Lidong Lin Xinggang. Global motion estimation for video stabilization [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(1): 92-95. [徐理东, 林行刚. 视频抖动矫正中全局运动参数的估计 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(1): 92-95.]
- [35] Yuan Fei Zhang Hong Jia Ruiming. Digital Image Stabilization Based on Log-Polar Transform [EB/OL]. (2007-09-4) [2008-08-18]. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4297184
- [36] Liang Y M, Tyan H R, Liao H Y, et al. Stabilizing image sequences taken by the camcorder mounted on a moving vehicle [EB/OL]. (2003-09-4) [2008-08-18]. <http://scholar.google.cn/scholar?hl=zh-CN&q=Stabilizing+image+sequences+taken+by+the+camcorder+mounted+on+a+moving+vehicle>
- [37] Meng Long Lin Xinggang Wang Guijin, et al. Motion filter for video stabilizing systems [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(1): 41-43, 56. [孟龙, 林行刚, 王贵锦, 等. 视频抖动矫正系统中的运动滤波 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(1): 41-43, 56.]
- [38] Erturk S. Image sequence stabilisation based on kahn filtering of frame position [J]. Electronics Letters 2001, 37(20): 1217-1219.
- [39] Gilliam K, Yanan E, Erturk S. Image sequence stabilisation using fuzzy adaptive Kahn filtering [J]. Electronics Letters 2003, 39(5): 429-431.
- [40] Zhang Fan Wang Xiaotong Xu Xiaogang et al. Electronic image stabilization algorithm based on fixed-lag smooth filtering [J]. Optoelectronics Letters 2007, 3(4): 0308-0311.
- [41] Litvin Andrew, Konrad Janusz William C. Karl. Probabilistic video stabilization using Kahn filtering and mosaicking [J]. Image and Video Communication and Processing 2003, 5022: 663-674.
- [42] Tico M, Vehvilainen M. Constraint Translational and Rotational Motion Filtering for Video Stabilization [EB/OL]. (2005-5-12) [2008-08-19]. <http://scholar.google.cn/scholar?hl=zh-CN&q=Constraint+Translational+and+Rotational+Motion+Filtering+for+Video+Stabilization>.
- [43] Wu Si. Research on Techniques for Video Motion Information Analysis [D]. Beijing Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Computing Technology), 2005. [吴思. 视频运动信息分析技术研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(计算技术研究所), 2005.]
- [44] Hunsen M, Anandan P, Dana K, et al. Real-time scene stabilization and mosaic construction [EB/OL]. (1994-12-5) [2008-08-22]. <http://scholar.google.cn/scholar?hl=zh-CN&q=Realtime+scene+stabilization+and+mosaic+construction>
- [45] Morimoto C, Chellappa R. Fast 3D Stabilization and mosaic construction [EB/OL]. (1997-6-19) [2008-08-22]. <http://www.computer.org/portal/web/csd1/doi/10.1109/CVPR.1997.609396>.
- [46] Matsushita Y, Ofeek E, Tang X, et al. Full-frame video stabilization with motion inpainting [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 2006, 28(7): 1150-1163.
- [47] Morimoto C, Chellappa R. Evaluation of image stabilization algorithms [EB/OL]. (1998-3-29) [2008-08-24]. <http://scholar.google.cn/scholar?hl=zh-CN&q=Evaluation+of+image+stabilization+algorithms>
- [48] Meng Long. Video Stabilizing for Digital Camera [D]. Beijing Tsinghua University, 2004. [孟龙. 数码相机拍摄视频的稳定处理 [D]. 北京: 清华大学, 2004.]
- [49] Niskanen M, Silven O, Tico M. Video Stabilization Performance Assessment [EB/OL]. (2006-2-9) [2008-08-25]. <http://scholar.google.cn/scholar?hl=zh-CN&q=Video+Stabilization+Performance+Assessment>
- [50] Maheux Jean, Cruickshank James, Seigny Leandre. Video-rate image stabilization system [J]. SPIE, 1998, 3414: 232-238.
- [51] Systems Ltd Ovation. StableEyes real-time image stabilisation for high-zoom surveillance cameras [EB/OL]. <http://www.ovation.co.uk/Video-Stabilization.html>
- [52] Bu Yanlong. Research on Digital Image Stabilization in Infrared Homing Seeker of Single Channel Controlled Air Defense Missile [D]. Changsha National University of Defense Technology, 2004. [卜彦龙. 单通道红外寻的防空导弹电子稳像技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.]
- [53] Zhang Yongxiang. Study on Electronic Image Stabilization Technology for the Image Sequences of the Ship-Borne Camera System Base on the Gyro [D]. Jilin Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics Chinese Academy, 2006. [张永祥. 基于陀螺仪的舰载电子稳像技术研究 [D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2006.]
- [54] 上海佳悦数码科技有限公司. 视频处理产品: 电子稳像器 [EB/OL]. [2008-08-18]. <http://www.jetvision.cn/Product.asp>.