

文章编号 1004-924X(2001)04-0353-07

电子稳像技术概述

赵红颖, 金宏, 熊经武

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要:随着电视摄像系统在各领域中的广泛应用,对图像信息的稳定性要求也在不断提高。而图像的不稳定主要是由摄像机载体的运动导致的,因此运动载体上的电视摄像系统需安装稳像系统。电子稳像是新一代的稳像方法,它利用数字信号处理等技术实现实时、高精度地稳定动态图像。本文介绍了电子稳像技术的原理、实现方法、主要算法以及评定其优劣的方法。

关键词:电子稳像;稳像算法;运动模型

中图分类号:TN942.2 **文献标识码:**A

1 引言

电视摄像系统已广泛应用在舰船的光电设备、无人机的侦察系统以及侦察车的监视系统等领域中。而电视摄像系统的工作效果要受到其载体不同时刻的姿态变化或振动的影响。反映到监视器上,就是获得的图像信息不稳定、模糊。而这种不稳定的图像对于观察者会产生疲劳感,从而导致误判和漏判;对于目标自动识别系统会导致漏警和虚警。所以,在运动的载体中,摄像系统的稳像是一个十分重要的问题,特别是在长焦距、高分辨力的监视跟踪系统中则更加突出。

通常采用的稳像方法有三种,即主动稳像,被动稳像和电子稳像。主动稳像是安装陀螺稳定平台稳定摄像系统,陀螺稳定平台主要是衰减低频振动。被动稳像是采用减振装置来隔离载体的振动,抑制高频振动对摄像机的影响。主动稳像和被动稳像可配合使用实现宽范围的稳像。但是,由于高精度的陀螺稳定平台不仅结构复杂,体积大、价格昂贵、功耗大,而且在有的场合,例如:弹载、轻载飞机、外星球探测中,因体积的限制而无法使用。所以,提出一种新型的稳定方法——电子稳像技术来实现电视图像的稳定。

电子稳像技术(Electronic Image Stabilizing Technology)是综合电子、计算机、数字信号处理等技术为一体的新一代实现图像序列稳定的技术。

电子稳像技术由于它本身具有的稳定精度高,实时性强,轻便等特性,使其具有广阔的发展前景,同时,电子稳像高精度的实现对于研制更长焦距、更高分辨力的摄像机系统具有重要意义。

2 电子稳像国内外发展现状

2.1 国内电子稳像现状

国内电子稳像技术的研究起步较晚,稳像方法多是利用陀螺传感器和伺服系统构成陀螺稳定平台实现稳像。虽然此方法可达到一定的稳定精度,但是由于伺服系统体积大,造价高、消耗功率大等缺点,在某些场合下满足不了进一步发展的需要。到目前为止,国内尚未见到对电子稳像技术较详细的研究报道。^[1-3]

1999年中国科学院长春光机所开始对电子稳像技术的原理和应用范围进行研究,并对船载摄像系统获取的图像序列进行初步地稳定,取得了一定的效果。

2.2 国外电子稳像现状和发展趋势

国外在电子稳像技术方面的研究已有近20年的历史,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,代替了原系统中价格昂贵的稳定平台,并取得了较好的稳定效果。步入90年代以后,随着图像处理技术和计算机技术的迅猛发展,以美国和加拿大为首的西方国家率

先采用稳定算法和图像重组的方法实现图像的稳定,进一步使电子稳像系统向小型化、实时性、高精度的方向发展。这些成果主要应用在侦察车的侦察系统、目标跟踪系统、无人驾驶越野车中的导航系统等方面。其中,加拿大 DREV (Defense Research Establishment Vilecartier) 研究机构根据国防要求,研制成功安装在侦察车 10m 高的桅杆上的实时监视系统中的稳像装置,其图像处理、稳像速度达到 30 帧/s,满足实时性要求,系统的稳像精度达到 1 个像元,如图 1 所示。^[3]

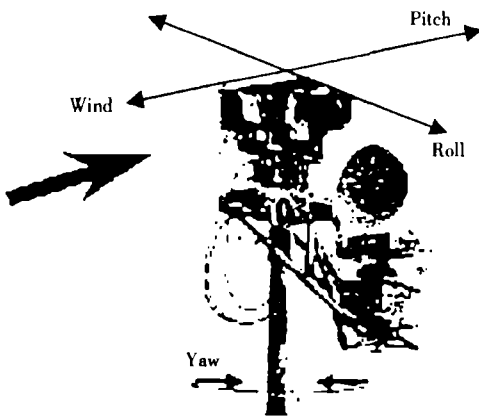


Fig. 1 Camera displacement due to wind

而由美国军事研究实验室 (Army Research Laboratory) 研制的应用在无人驾驶越野车上的稳像系统,其稳像精度已优于 1 个像元。另外,稳像技术还可以用来拼接图像从而获得一幅全景图像。

综观国内外电子稳像技术的研究,其发展趋势为:

1) 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,载体的运动几乎与焦距成比例地影响图像的稳定。电子稳像是直接对图像进行处理,稳像的精度是图像的屏幕精度,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。

2) 稳定精度从一个像元提高到 1/2、1/4 个像元或更高精度。

3) 采用高速的硬件设备增强图像处理功能

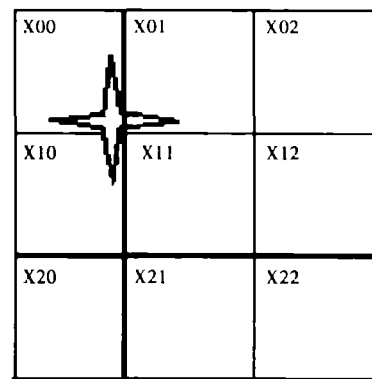
采用高分辨率的 CCD 摄像机在解决分辨力的同时也使图像信息量增大,所以采用高速、大存储量的硬件设备才能保证图像的实时稳定。

3 电子稳像技术的基本方法

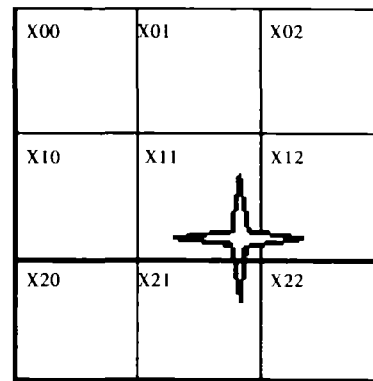
电子稳像不同于图像恢复,图像恢复是针对每一帧模糊的图像,而电子稳像稳定的一个图像序列,图像序列的不稳定是由于帧与帧间图像变化在监视器上反映出的不稳定,图像序列中的每一帧图像是清晰的。基于这种分析,电子稳像的原理及基本方法如下:

3.1 电子稳像的基本原理

电子稳像技术中最基本的技术是像移补偿技术,其原理如图 2 所示。



(a)



(b)

Fig. 2 Camera imager

图 2 是摄像机成像靶面的示意图,每一格代表一个像素。图 2(a)是第一帧图像,此时物体在 00、01、11、10 像素上成像。图 2(b)是相邻的第二帧图像,成像时,因摄像机安装在运动的载体上,载体运动使摄像机产生矢量为 V 的振动,同一物体则在 11、12、21、22 像素点上成像,从监视器上

看,由于振动的影 响,00、01、10、11、12、21、22 像素点上都有物体的像,使图像变得模糊。而对于面阵摄像机,它每一帧的图像信息是按行输出的,每行又是按像元所排的列序号顺序输出的。所以像移补偿技术就是:首先求出摄像机的角位移量并转换成监视器上图像的运动矢量,然后通过对 CCD 图像传感器的行、列序号重组,使其在监视器上的图像沿运动矢量反方向位移量移动,只有第二帧输出的图像与第一帧图像相同,二帧图像重合才可获得清晰的图像。由电子稳像补偿技术原理可知,电子稳像只能稳定成像面内的图像。所以,为了防止被摄景物脱离摄像机靶面,对于采用电子稳像技术的摄像机靶面需要在横向和纵向上分别留出 15% 作为补偿区域,这个区域在载体稳定时可以不使用。

3.2 电子稳像的基本方法

电子稳像前提条件是先获得图像的全局运动矢量,根据获取图像运动矢量方法的不同,电子稳像的基本方法有两种:

方法一,利用传感器检测摄像机的运动矢量 V 再转化为图像的运动量。即在摄像机上设置两个角速率传感器用以检测上下、左右方向上的角速率,通过放大、滤波去除对图像质量影响不大的高频成份,再经过 A/D 转换存入计算机中作为控制依据。然后采用像移补偿技术补偿图像运动,实现图像稳定。此方法易于实现,但其检测精度要依赖于具有高精度的速率陀螺来准确地敏感摄像机的振动。

方法二,利用稳定算法实现电子稳像。

图像拾取后,根据要求提取场或帧图像,当物体静止或匀速运动时,帧处理优于场处理,这是因为奇场和偶场运动相同,可以共用一个运动矢量,帧处理时只需传送一个运动矢量,但当物体是非匀速运动时,场处理则优于帧处理。选取图像后与参考图像利用稳像算法获取图像运动矢量,参考图像可以是存储器中的固定的图像,也可能是图像缓存中的相邻帧图像。此稳像方法的关键是利用稳像算法计算图像运动量,此方法已用在加拿大 DREV 研制的监视车 10m 桅杆上电视摄像系统中。

此方法的优点是:速度快,实时性强,精度高,而且是直接获取监视器上的图像运动矢量,所以它实际能达到的绝对稳定精度,长焦距摄像机要

高于短焦距摄像机,因此在稳像系统中较多地采用该方法获取图像运动矢量。

4 稳像算法

由于稳像算法直接处理图像,可简化设备,提高稳像精度,近几年来美国、加拿大、韩国、日本等国对稳像算法展开了深入的研究,提出了多种方法,但总的来说,已有的分析方法主要分为两类:基于特征量的方法和基于光流的方法。基于光流的方法利用了灰度的变化信息,需要从图像序列的灰度变化中计算速度场,根据文献报道,由于实际景物中的速度场不一定总是与图像中的直观速度场有唯一对应关系且偏导数计算加重噪声水平,使得光流法得到的结果在使用中常常不稳定,因此提取对灰度不敏感的有效特征量计算图像运动矢量的方法应用的较多。目前,主要的稳定算法有:代表点匹配法 RPM (Representative point matching)、投影算法 PA (Projection algorithm)、特征量跟踪算法 FTA (Features tracking algorithm)、位平面匹配法 BPM (Bit plane matching) 等。每一种方法有其特定的适用范围,具体分析如下:

4.1 代表点匹配法 (RPM)

代表点匹配法已应用在小 型摄像系统中。代表点是图像上最简单的特征量,通常是将图像分成四个区域,每个区域分别选取 30 个代表点,每个点有一个确定的搜索区域。建立先前帧与当前帧图像代表点之间关系式,最后以搜索区域内选定的代表点为相对参考点作一个相同位移值,相应的有一个绝对差值,对所有代表点坐标的绝对差值求和,获得一个相关函数关系式如下:

$$\rho(i, j) = \sum_k [| I_{t-1}(X_k, Y_k) - I_t(X_{k+i}, Y_{k+j}) |] \quad (1)$$

式中 I_{t-1}, I_t 表示第 k 个代表点在先前帧和当前帧图像中的像素数据。每个区域内对应 (i, j) 会有一个最小差值和,那么这个位移量可作为该区域的图像运动矢量,通常四区域的位移矢量是不相等的,如果被摄景物是静止的,可以将四区域的位移值平均作为整幅图像的运动矢量。此方法的优点是算法简单、计算量小。但是由于代表点是确

定的,并非是图像上有明显特征的点,因此对图像的变化不敏感,对旋转晃动和慢速晃动尚不能补偿。此方法的检测精确度在信噪比为 30dB 时能达到 ± 0.5 像素差值。

4.2 投影算法(PRA)

美国 ARL(Army Research Laboratory)采用此方法在 Demo 1 号自控目标跟踪系统中实现图像的实时稳定。

此算法是基于标准的帧与帧间的互相关运算。具体步骤如下:

4.2.1 图像映射

对每一帧输入的图像要将初始的二维图像信息映射成两个独立的一维波形。下式是以列投影计算为例说明图像映射的方法。

$$\begin{aligned} Col_k(j) &= \sum Cur_k(i, j) \\ ColTot_k &= [\sum Col_k(j)] / NC \\ ColProj_k(j) &= Col_k(j) - ColTot_k \end{aligned} \quad (2)$$

其中式 $Col_k(j)$ 为第 k 帧图像第 j 列的灰度值; $Cur_k(i, j)$ 是第 k 帧图像上 (i, j) 位置处的像素的值; NC 是列数; $ColProj_k(j)$ 是第 k 帧图像第 j 列修正后的投影值。

4.2.2 投影滤波

通过对投影值进行滤波可提高校正精度,这是因为图像移动量大时,边缘信息在每一幅图像上是唯一的,因此边缘信息在互相关计算时对互相关的峰值产生不利的影响。为了解决这个问题要将边界处的投影值去除,方法是通过余弦滤波器进行滤波,此滤波方法可保留中间区域的幅值,降低边界信息的幅值。

4.2.3 相关计算

将第 k 帧图像投影波形与参考图像的投影波形做互相关计算,参考图像可以是前一帧图像,也可能是存储器中存储的标准图像,相关值曲线中有唯一的峰值即为补偿图像的位移值。

投影算法设计时就只能补偿图像的平移运动,算法的检测精度是通过后续任务来检测的,可通过在行、列峰值处做局部的互相关运算来提高精度。算法的优点是计算速度快、对图像灰度整体变化不敏感。文献中采用此算法的系统稳像精度为 1 个像元。

4.3 特征量跟踪算法(FTA)

FTA 算法是稳像算法中获取图像运动矢量的

重要算法,由于在获取图像运动矢量时采用像素点匹配计算量大,而基于频域的分析方法对图像所含信息的利用程度低,所以 FTA 算法是较常用的算法。主要被利用的特征量有:角点、直边缘、曲边缘等局部特征和型心、表面积、惯量矩的长短轴等全局特征。在具体应用中,采用什么特征量主要看目标具有那些特性。

特征量跟踪时,会面临一个严重问题:在真实场景中,各特征量所处的环境往往很复杂,其中经常有各种干扰,如目标的遮盖、景物的阴影、背景的变化等,这些变化就使得特征量的跟踪变得十分困难。但是,如果事先对要处理的目标的某些信息(如几何结构信息)有所了解的话,将这些知识用于工作中就能使在特定条件下的特征量的跟踪变得比较简单而且可靠。这也是利用特征量进行跟踪的一个主要原因。文献中 Thompson, Lowe 和 Tsai 等人提出了多种根据结构信息的特征量跟踪算法^[4-7]。

利用 FTA 算法获取各特征量的运动矢量是图像的局部运动矢量,稳定图像还要求出图像由摄像机引起的全局运动矢量。全局运动矢量是在局部运动矢量的基础上,利用准确设定的图像运动数学模型来求取的,即将特征量的局部运动矢量带入设定的数学模型中,然后求解方程组得到图像全局运动矢量。以常用的三种数学模型: Translation 模型、Affine 模型和 Similarity 模型为例:

如果图像只有平移量,数学模型应为 Translation:

$$P_1 = P_0 + T \quad (3)$$

P_1, P_0 分别是当前帧和参考帧中特征量对应坐标, T 是二维平移量。如果图像有变焦量时,仍采用 Translation 模型则无法准确求取图像运动量。需采用 Similarity 模型:

$$P_1 = sR_e P_0 + T \quad (4)$$

T 是二维平移量, s 是变焦系数, R_e 是正交的旋转矩阵。而 Affine 的数学模型需要有 6 个参数来表示,模型为:

$$P_1 = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix} P_0 + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} = R_a P_0 + T \quad (5)$$

针对不同的图像应采用相应的数学模型,否则,将导致稳像精度大幅度下降。

4.4 位平面匹配法(BPM)

利用图像的灰度码和图像的位平面实现快速二值匹配来确定图像局部运动矢量,显著地降低了图像处理的计算量,提高了系统的运行速度,从而提高稳像速度。

对一幅用多比特表示其灰度值的图像来说,其中的每个比特可看作表示了一个二值的平面,也称位面,一幅其灰度级用 8 比特表示的图像有 8 个位面,一般用位面 0 代表最低位面。让具有 2^k 级灰度的第 t 帧图像上的 (x, y) 处的像素的灰度级表示为:

$$f^t(x, y) = a_{k-1}2^{k-1} + a_{k-2}2^{k-2} + \dots + a_12^1 + a_02^0 \quad (6)$$

这里, $a_k (0 \leq k \leq k-1)$ 是 1 或 0。第 k 个位图像用 $b_k^i(x, y)$ 表示,这个平面包括所有的第 k 个 (a_k) bits,则 8-bit 图像的 8 个位平面分别表示为 $b_0(x, y), \dots, b_7(x, y)$ 。将每一个像素的第 i 个比特集合起来在一起就得到图像的第 i 个位平面。但是这种分解方法有一个明显的缺陷是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。例如:灰度为 127, 比特数为 (01111111), 128 则为 (10000000), 灰度只差一级而 8 个位平面的比特数却各不相同。因此,为了减小小灰度值变化对位平面的影响采用如下的灰度码位平面分解方法:先将 m bit 灰度码表示为:

$$g_i = \begin{cases} a_i \oplus a_{i+1} & 0 \leq i \leq m-2; \\ a_i & i = m-1; \end{cases} \quad (7)$$

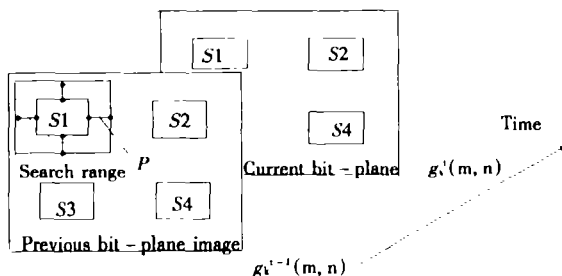


Fig.3 Estimation of local motion vectors from four subimages

其中 \oplus 代表异或操作, a_i 值由 (6) 式给出。经过变换后,相连的灰度码仅仅有一个比特位的不同。这样,灰度级上的变化对整个 k 位平面的影响很小。例如:当灰度级为 127 和 128 时,根据公式 (2) 可得 127、128 的灰度码分别为:11000000 和 01000000,即 127 和 128 相邻的灰度级仅有一位灰度不同。

图 3 所示为相邻帧之间第 k 个位平面内四区域匹配运动矢量估计。令每个搜索区域的大小为 $M \times N$, 搜索窗口是 $(M+2p) \times (N+2p)$, p 是最大搜索位移。则相关测量方法如下:

$$C_j(m, n) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} g_k^i(x, y) \oplus g_k^{i-1}(x+m, y+n), \quad (8)$$

公式 (8) 对于搜索范围内的每一个 (m, n) 计算 $C_j(m, n)$, $C_j(m, n)$ 是当前图像匹配区域和参考图像间的不匹配的比特数。 $C_j(m, n)$ 最小时可获得最佳匹配效果。因此这种算法代替以往的匹配算法,只需利用简单的布尔函数与异或操作,大大地减小计算量。

由于每一个位平面包含的信息量不同,算法中又只用到了一个位平面,所以此算法总共选取一个适当的位平面进行估计是非常重要的。由灰度图像分解的各级灰度码位平面图可知,仅仅是高阶灰度码位平面图像包括实际的重要的数据,而其它灰度码位平面则表示一幅图像复杂的细节和噪声。

5 图像稳定的评价方法

为了进一步发展稳像技术,对电子稳像的效果进行客观的评价是重要的。目前,通常利用电子稳像算法的准确度、算法的位移量变化范围和稳像系统的特性作为评价各种算法的性能指标。

5.1 算法的准确度

如果稳定后的相邻两帧图像间的相对运动全部补偿了,那么这两帧图像上相对应的每一个像素之间的差值应为零。但是,存在偏差。偏差是由于噪声、算法估计误差以及评定时运动模式设置不精确等原因导致的。为了更准确的稳定图像,提出用算法的准确度来评价算法。

算法的准确度是评价补偿了摄像机的振动量

后获得图像的的稳定程度。PSNR(peak signal - to - noise ratio)是评价准确度的品质因子,定义如下:

$$\text{PSNR}(I_1, I_0) = 10\log[255^2/\text{MSE}(I_1, I_0)] \quad (9)$$

其中 MSE(均方差)是两帧图像间每个像素的偏差值。它反映了图像序列变化的快慢和变化量的大小。PSNR 作为评价稳定算法准确度的指标,也可用来衡量两幅图像重合的情况,PSNR 越高,图像稳定效果越好,当两幅图像完全相同时 PSNR 最大。

5.2 确定算法的分辨率

针对不同的稳像系统需要确定算法能够识别的图像运动变化量的最小值,即算法的分辨率。稳像系统确定后,图像的分辨率就确定下来。而不同的算法分辨率不同,有的分辨率是一个像素,有的是 1/2 个像素。那么当相邻两帧图像间的变化量很小时(不到一个像素),连续两帧图像间的 PSNR 值原本很高,但是由于系统采用的稳定算法的分辨率较低(大于一个像素),则可能会出现采用此稳定算法获得的位移量估计误差大于实际的位移变化量,那么补偿后的图像 PSNR 值反而下降,从而导致稳像质量下降。因此,要确定算法的分辨率。方法是:先求出两帧图像未进行运动补偿时的 PSNR 值作为 MB(最小边界值)。这样,当运动变化量很小时(小于 MB 值)不需要补偿图像,随着位移量的增加,稳定后的图像 PSNR 值逐渐增大,最终这个 PSNR 值要增大到与 LBI 值相交,这时相对应的位移量是算法的分辨率。

5.3 系统特性

系统特性是帧处理率与每秒最大位移量的乘积值,其中帧处理率是电子稳像系统的一个重要的特性,而它的实现要以牺牲系统部分稳像精度和稳定算法的性能为代价。因此,该项指标是评

价系统综合特性的。

实验结果表明决定图像的的稳定程度的因素有:摄像系统的组成、稳像算法的选取以及运动模型的准确性等。评价算法时需要在同一条件下进行,因为同一算法应用在不同的系统中精度不同,采用数学模型不同时精度也不同。所以美国 Maryland 大学研制了一套专门评价各算法的系统:ARL(Army Research Laboratory) Tracking System,系统运动及目标等量都可以设定,这样就保证了各种算法在相同条件下应用,因此能够统一地、准确地评价各种算法。虽然系统的造价高,但仍是目前最佳的评价方法^[8]。

6 结论

综上所述,由于电子稳像技术是利用稳像算法实现图像序列的稳定,因此具有精度高、速度快、功耗少等优点。随着各摄像系统对图像稳定精度的要求不断地提高,电子稳像技术的应用必将越来越广泛。目前,电子稳像的基本算法已经比较完善,对于有平移运动、简单的旋转运动(单轴旋转)以及图像上有小目标运动物体的图像序列可以做到快速、准确地稳定。电子稳像面临的主要问题是:如何利用图像信息区分摄像机的晃动量和摄像机的正常扫描运动以及如何稳定图像多轴的旋转运动等问题。解决这些问题如果仅仅依赖于图像运动模型的精确程度,将导致运动模型非常复杂,所以在解决这些问题时,必须要充分利用图像序列的信息量。另外,电子稳像虽然具有诸多的优点,但是由它的原理可知,稳定图像的晃动量将以损失部分图像信息为代价,这在一定程度上限制了电子稳像的适用范围。^[9]

参考文献:

- [1] 张定.家用摄像机的电子图像稳定系统[J].电视技术,1993,(7):9-15
- [2] Egosa Yo, Akahori Hiroshi, Morimora Atsushi, Wakami Noboru. An application of fuzzy set theory for an electronic video camera image stabilizer[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1995, 3(4): 351-356.
- [3] 王学良.基于 HRIS 图像数据特征的畸变像元相关校正[J].光学精密工程,1999,7(5):32-42.
- [4] Blostein S D, Huang T S A. Tree search algorithm for target detection in image sequence[A]. Proc. IEEE the Computer Society Conf. of CVRR[C], 1988.
- [5] Koller D, Heinze N, Nagel H H. Algorithmic characterization of vehicle trajectories from image sequences by motion verbs, [A]. Conf. Comput. Vision Patt. Recog. [C]. Lanhaiua, Maui, Hawaii: 1991.
- [6] Koller D, Daniilidis K, Thorhallson T, et al. Model - based object tracking in traffic scenes[A]. Proc. 2nd Europ. Conf. Comput.

- Vision[C], S. Margherita, Ligare, Italy: May 18 - 23, G. Sandini (ed.), Lecture Notes in Computer Science [M]. Springer - Verlag, Berlin, Heidelberg, New York: 1992.
- [7] Koller D, Daniilidis K, Thorhallson T, et al. Model - based object tracking in monocular image sequence of real traffic scenes[J]. Int. J. Comput. Vision, 1993, 10: 257 - 281.
- [8] Stephen, et al. Performance characterization of image stabilization algorithms. (Technical Report Car - Tr - 822), [k]. Army Research Laboratory, University of Maryland, College Park, 1996.
- [9] 沈宠海, 刘晶红, 贾平, 等, 摄像稳定技术[J]. 光学精密工程, 2001, 9(2): 115-120.

Overview of the electronic image stabilization technology

ZHAO Hong-ying, JIN Hong, XIONG Jing-wu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: Along with wide applications of TV camera, the requirement for image stabilization becomes more and more rigid. As the camera carrier's movement causes unstability of images, the camera on the mobile carrier needs an image stabilizer. The electronic image stabilizing technology is a new generation of image stabilizing method, which makes use of the digital signal processing to realize the real-time and high-precision mobile image stabilization. The paper not only introduces the principles and the basic methods of realizing electronic image stabilization, but also gives its main algorithms and the evaluation of algorithms.

Key words: electronic image stabilization; image stabilizing algorithm; motion models

作者简介: 赵红颖(1971-), 女, 吉林省长春市人。1998年毕业于吉林工学院机械系, 获得硕士学位, 1999年考入中国科学院长春光学精密机械与物理研究所攻读博士学位。

E-mail: zhying001@sina.com.