

文章编号: 0253-2239(2007)02-0238-5

# 低曝光量下投影算法的稳健性研究\*

陈跃庭 徐之海 李 奇 冯华君

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要:** 研究了在低曝光量情况下灰度投影算法的稳健性,为提出的稳定成像系统的设计与实现提供可行性论证。通过合成视频实验探讨、实际视频实验论证相结合的研究方法,探讨曝光量不足对灰度投影算法性能的影响。实验结果表明,灰度投影算法在欠曝 5 档和存在一定随机噪声的情况下,仍能保持良好的运动矢量估计性能,从而说明了投影算法在一定的曝光量范围内仍能准确地得到运动矢量估计,是一种运算量小、实时性好且稳健性较强的电子稳像算法。投影算法在低曝光量情况下良好的稳像稳健特性,使其能在低亮度及高实时性要求等环境下应用于航拍、卫星遥感等稳定成像或高清晰成像场合。

**关键词:** 图像处理; 电子稳像; 稳健性; 曝光不足; 投影算法

中图分类号: TN991.73 文献标识码: A

## Robustness of Projection Algorithm for Under-Exposed Images

Chen Yueting Xu Zhihai Li Qi Feng Huajun

(State Key Lab of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract:** A stabilization imaging system is proposed, and the feasibility of design and realization is verified by studying the robustness of gray scale projection algorithm for under-exposed images. The effect of under-exposure on the performance of gray scale projection algorithm is studied by synthetic and real video experiments. The results show that, even with  $1/2^5$  exposure time and certain random noise, a favorable estimation performance of motion vector is also achieved. The projection algorithm is proved to be a fast and robust digital image stabilization technique even for under-exposed images. The projection algorithm can be used in aerial photography and spatial remote sensors to obtain stable and high resolution images, thanks to its small computational burden and robustness for under-exposed images.

**Key words:** image processing; digital image stabilization; robustness; under-exposure; projection algorithm

## 1 引 言

空间遥感相机对地成像过程中,由于卫星平台的颤振,使得在曝光时间内相机与地面目标存在相对运动,在像面上产生像移,造成图像质量一定程度的退化,对比度和分辨力均降低。随着遥感、侦察相机的分辨力指标越来越高,平台的颤振对相机成像质量的影响逐渐成为制约实现高分辨力指标的瓶颈因素,因此需要对像移进行稳像补偿,提高空间相机的整体性能。

结合电子稳像算法<sup>[1]</sup>和微机械稳像方法<sup>[2]</sup>,我

们提出了一种面阵空间相机的稳像补偿方法,即采用高速面阵 CCD 相机(1000 帧/秒)高速获取运动图像,通过灰度投影算法<sup>[1]</sup>得到高精度的光轴偏移量,再采用微位移平台驱动焦面跟踪光轴的偏移来对光轴的偏移进行有效的补偿。然而,用于探测运动图像的高速 CCD 的曝光时间只有 1 ms,所获得的图像由于曝光时间不足而欠曝光,因此需要对低曝光量下灰度投影算法的稳健性进行研究,探讨低曝光量图像相关运算的有效性与可靠性。

类似的研究<sup>[3]</sup>提出通过高速互补性金属氧化物

\* 浙江省教育厅科研项目(G20050445)和浙江大学现代光学仪器国家重点实验室开放课题(LMOI-0401)资助项目。

作者简介: 陈跃庭(1981-),男,浙江省平湖市人,博士研究生,主要从事电子稳像技术、计算机视觉等的研究。

E-mail: kyori1981@163.com

导师简介: 徐之海(1964-),男,杭州人,博士生导师,主要从事图像获取与处理方法方面的研究。

E-mail: xuzh@zju.edu.cn

收稿日期: 2006-03-02; 收到修改稿日期: 2006-08-07

半导体(CMOS)图像传感器,利用过采样及高速帧间处理技术来求得正常帧速率下图像序列的光流场,得到的结果比直接基于 30 帧/秒的图像序列帧间处理求得的光流场结果更精确。同样,在高速摄像等应用中,过采样图像序列是欠曝光的,像面灰度值低,且带有一定的噪声影响,需要对此情况下图像相关算法的稳健性作研究和论证。

本文模拟高速 CCD 获取的低曝光量图像序列的处理流程,利用合成视频与实际视频相结合的方法,来探讨灰度投影算法在低曝光量情况下的稳健性,以研究灰度投影算法在高速、低曝光量情况下的稳像应用。

## 2 理论分析与灰度投影算法

### 2.1 理论分析

成像系统的像面上得到的曝光量合成值可以表示为<sup>[4]</sup>

$$E = c_1 \cdot B \cdot G \cdot t / F^2, \quad (1)$$

由  $E = I^2$ , 得到

$$I = \sqrt{c_1 \cdot B \cdot G \cdot t} / F, \quad (2)$$

其中  $c_1$  为常量,  $B$  为景物亮度,  $G$  为电路增益,  $t$  为曝光时间,  $F$  为镜头光圈数,  $I$  为光强, 经采样、量化将  $I$  转换为数字图像灰度值  $f(x, y)$ ,  $(x, y)$  表示二维数字图像的像素点坐标。

图像灰度值  $f(x, y)$  近似于光强值  $I$ , 并根据 (2) 式知道, 图像灰度值  $f(x, y)$  与外界景物亮度、电路增益、曝光时间的乘积的平方根成正比, 与镜头光圈数成反比。当曝光时间缩短, 其他值固定时, 将获得欠曝图像, 图像灰度值降低。在欠曝情况下, 可以通过减小镜头  $F$  数(增加光通量)或增大电路增益来增加曝光量; 当镜头  $F$  数取最小时, 只能通过增大电路增益来增加曝光量, 但同时也会带来更多的电路噪声, 图像中出现更明显的随机脉冲噪声, 影响图像质量和图像相关算法的准确性。

在 CCD 噪声模型中<sup>[5]</sup>, 成像相关的噪声及 CCD 的光电子噪声、暗电流噪声和热电子噪声等满足泊松分布, 读出噪声满足高斯随机分布。当曝光不足, 增大电路增益时, CCD 热电子噪声及读出噪声随之增大, 将更大地影响在欠曝光情况下获取的低灰度值图像的质量, 影响稳像算法的有效性与精度。

### 2.2 灰度投影算法

灰度投影算法<sup>[1,6]</sup>通过对两帧图像的二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。由于灰度投影算法利用了图像的整体灰度信息, 且只对两个一维向量作相关运算, 故对图像的整体灰度变化及随机噪声较不敏感, 运动矢量估计精度高, 运算量较小, 适于实时应用。

二维灰度投影算法的行、列投影可以表示为

$$\begin{aligned} G_k(i) &= \sum_j G_k(i, j), \\ G_k(j) &= \sum_i G_k(i, j), \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $G_k(i)$  是第  $k$  帧图像第  $i$  行的灰度投影值,  $G_k(j)$  是第  $k$  帧图像第  $j$  列的灰度投影值,  $G_k(i, j)$  是第  $k$  帧图像上  $(i, j)$  处的灰度值。对两帧图像的行、列投影曲线分别作相关运算, 即可得到图像在行、列方向上的运动位移矢量。

相关函数采用绝对误差和(SAD)公式, 没有乘法运算, 公式运算量小。如行灰度投影曲线的相关计算公式表示为

$$\begin{aligned} D(\omega) &= \sum_{i=0}^{N_R-1} |G_k(i+\omega) - G_r(i+m)|, \quad (4) \\ 0 &\leq \omega < 2m+1 \end{aligned}$$

其中  $G_k(i)$  和  $G_r(i)$  分别为第  $k$  帧图像和参考帧图像第  $i$  行的灰度投影值,  $N_R$  为匹配块的行数,  $m$  为匹配块在搜索区域中的搜索宽度, 搜索范围为  $[-m, +m]$ ,  $\omega$  为偏移量, 当相关值  $D(\omega)$  取最小时, 即得到第  $k$  帧图像相对于参考帧图像在行方向上的位移矢量为

$$d_y = m - \omega_{\min}, \quad (5)$$

同理可得, 列方向上的位移矢量为

$$d_x = n - \omega_{\min}. \quad (6)$$

## 3 实验结果

### 3.1 合成视频

这里的合成视频是指根据给定的运动参量经运算由参考图像生成的模拟相机抖动时得到的一组图像序列。采用合成视频进行实验的好处是, 待处理的当前帧相对于参考帧的偏移量已知, 因此可以通过比较实验中得到的偏移量与生成合成视频时采用的已知偏移量, 来评价算法的有效性。为此, 我们定义了一种偏移量间的根均方误差( $E_{V-RMSE}$ )方法来评价稳像算法位移矢量估计的有效性:

$$E_{V-RMSE} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N (x_n - \hat{x}_n)^2 + (y_n - \hat{y}_n)^2}, \quad (7)$$

其中  $(x_n, y_n)$  为生成合成视频时使用的相对于参考帧的偏移量,  $(\hat{x}_n, \hat{y}_n)$  为实验中求得的各帧相对于

参考帧的实际偏移量。

实验中采用的合成视频为从真实场景图片生成的满足正弦运动规律的图像序列,并加上适当的电路噪声。场景图片由曝光时间 0.02 s,光圈  $F$  数为 5.6 时拍摄得到的真实视频中的某一帧获得。合成视频中每一帧的横向、纵向偏移量及旋转角分别由(8)式给出:

$$\begin{cases} d_x = 16\sin(2\pi kT), \\ d_y = 12\sin(2\pi kT), \\ \theta = 0, \end{cases} \quad (8)$$

其中  $k$  是帧序号,  $T$  是帧间隔。实验中取帧速率为 30 帧/秒,帧数为 51 帧,取  $T=1/50$ ,求得的行、列位移量四舍五入取整,得到在 1 个像素精度上的合成视频。根据(2)式,假设景物亮度、电路增益、镜头光圈数均不变,则调节曝光时间为先前的  $1/2$  时,像素灰度值为原来的  $1/\sqrt{2}$ ,根据(9)式,生成多个测试视频组成一个测试视频组:

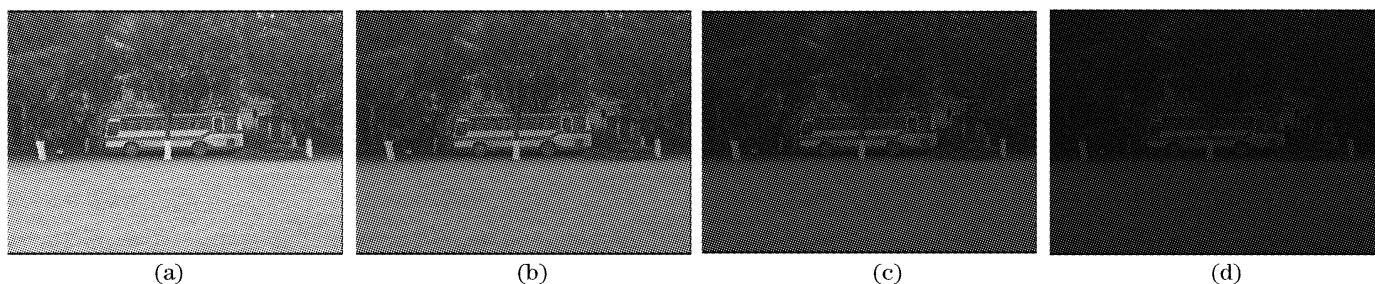


图 1 (a), (b), (c), (d) 分别为第 0, 1, 3, 5 号视频图像的参考帧

Fig. 1 (a), (b), (c), (d) show respectively the reference frames of video image No. 0, 1, 3, 5

由图 1 可见,灰度值下降带来的视觉影响是明显的,到第 5 个视频时,肉眼已基本无法分辨图像内容,此时对应为曝光时间降 5 档。

以视频第一帧作为参考帧,采用灰度投影算法对上述 17 个视频分别做稳像处理,得到 17 组位移矢量,根据式(7)计算得到  $E_{V-RMSE}$  关于视频图像序号的曲线如图 2。

从图 2 可以得到如下结论:在无噪声情况下,投影算法在低曝光量下表现出很好的稳健性,曝光时间降 14 档,而在性能上无明显损失;当存在电路噪声,图像灰度值降为原来的  $1/8$ (第 6 个视频)时,算法性能开始下降,此时对应曝光时间降低了 5 档,当图像灰度值降为原来的  $1/16$ (第 8 个视频)以上时,由于被摄景物在图像中的可见信息进一步减少,噪声对灰度投影算法的性能产生极大的影响,导致算法变得非常不可靠,出现大量的错误估计。可见,在曝光时间降 5 档的情况下,灰度投影算法的性能不受明显的影响,表现出低曝光量下较强的稳健性,因

$$f_k = f_0/2^{k/2}, \quad (9)$$

其中  $f_0$  为初始的场景图像灰度值,  $f_k$  为生成第  $k$  个测试视频时要求的图像灰度值,视频组中的视频图像灰度值以  $1/\sqrt{2}$  规律递减,相当于曝光时间下降一档。

在合成视频的每一帧中加入零均值高斯白噪声,服从泊松-高斯分布模型<sup>[5]</sup>。实验中采用的噪声参量估计方法为:将摄像机镜头以涂墨的厚黑皮布蒙上,在近乎完全黑暗的视场下,手动调节电路增益分别至 12 dB 与 18 dB,拍摄得到电路噪声视频。利用矩估计方法<sup>[5,7]</sup>得到均值和方差作为高斯噪声的参量。将各视频帧中估计得到的均值和方差参量数列分别取平均,得到高斯噪声模型的均值和方差分别为 0.0638 和 0.0001 及 0.08 和 0.0002。本实验中采用均值 0.08 和方差 0.0002 的高斯噪声模型,将噪声随机叠加到合成视频的每一帧图像中。

合成视频序列组(共 17 个视频)中部分视频的参考帧显示如图 1。

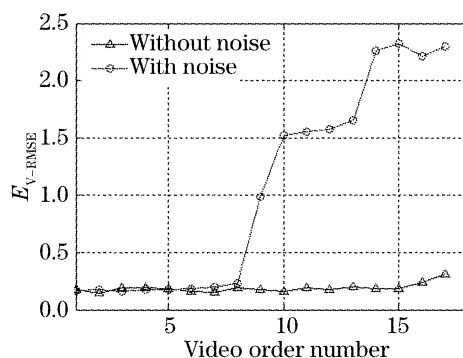


图 2 叠加与未叠加噪声两种情况下  $E_{V-RMSE}$  关于合成视频图像序号的曲线

Fig. 2  $E_{V-RMSE}$  of synthetic video image sequences with and without noise

此利用低曝光量、高帧速率的 CCD 相机采集图像序列并作相关运算获取图像帧间运动矢量是可行的。在实际情况下,当景物亮度降低或曝光时间减少时,会通过减小光圈数以增加光通量或增大电路增益等方式来增加曝光量,因此灰度投影算法在实际应用中也应具有较强的稳健性。

另一组由不同场景生成的合成视频的  $E_{V-RMSE}$  曲线如图 3 所示,也说明了上述结论。

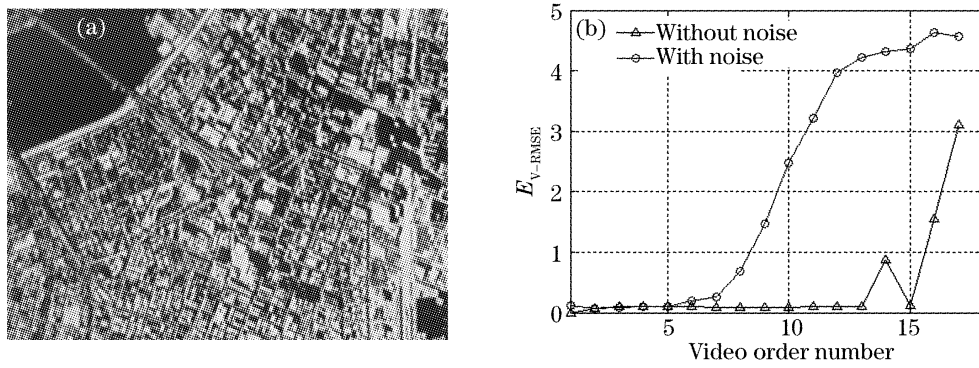


图 3 另一组叠加与未叠加噪声两种情况下  $E_{V-RMSE}$  关于合成视频图像序号的曲线

Fig. 3  $E_{V-RMSE}$  of synthetic video image sequences for #2 with and without noise

### 3.2 真实视频

真实视频由 Panasonic NV-MX300EN/A 摄录影机获得,该摄录影机光圈数可调节范围为  $F16$  至  $F1.7$ ,在光圈数最小情况下( $F1.7$ ),电路增益可调范围为  $0\sim 18$  dB。通过视频卡,采集所摄取的视频到计算机中进行处理。视频图像为 8 位灰度图像,分辨力为  $320\times 240$ 。

以视频的第一帧作为参考帧,采用灰度投影算法进行稳像处理。稳像算法的性能由峰值信噪比 ( $R_{PSN}$ )<sup>[8]</sup> 给出:

$$R_{PSN}(f_1, f_2) = 10 \lg \frac{255 \times 255}{E_{MS}(f_1, f_2)}, \quad (10)$$

均方误差 ( $E_{MS}$ ) 值的计算公式为

$$E_{MS}(f_1, f_2) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f_1(i, j) - f_2(i, j)]. \quad (11)$$

固定摄录影机的曝光时间为  $10^{-3}$  s,调节不同的光圈数(或电路增益),得到一组视频序列,其相应的摄录影机参量列于表 1。

表 1 获取各视频时的摄录影机参量

Table 1 Camcorder parameters for each video image

Video number	Exposure time	$F$	Gain /dB
01	1/50	5.6	—
02	1/1000	5.6	—
03	1/1000	4.0	—
04	1/1000	2.8	—
05	1/1000	1.7	9
06	1/1000	1.7	12

对这六个视频分别做稳像处理,得到  $R_{PSN}$  曲线如图 4 所示。

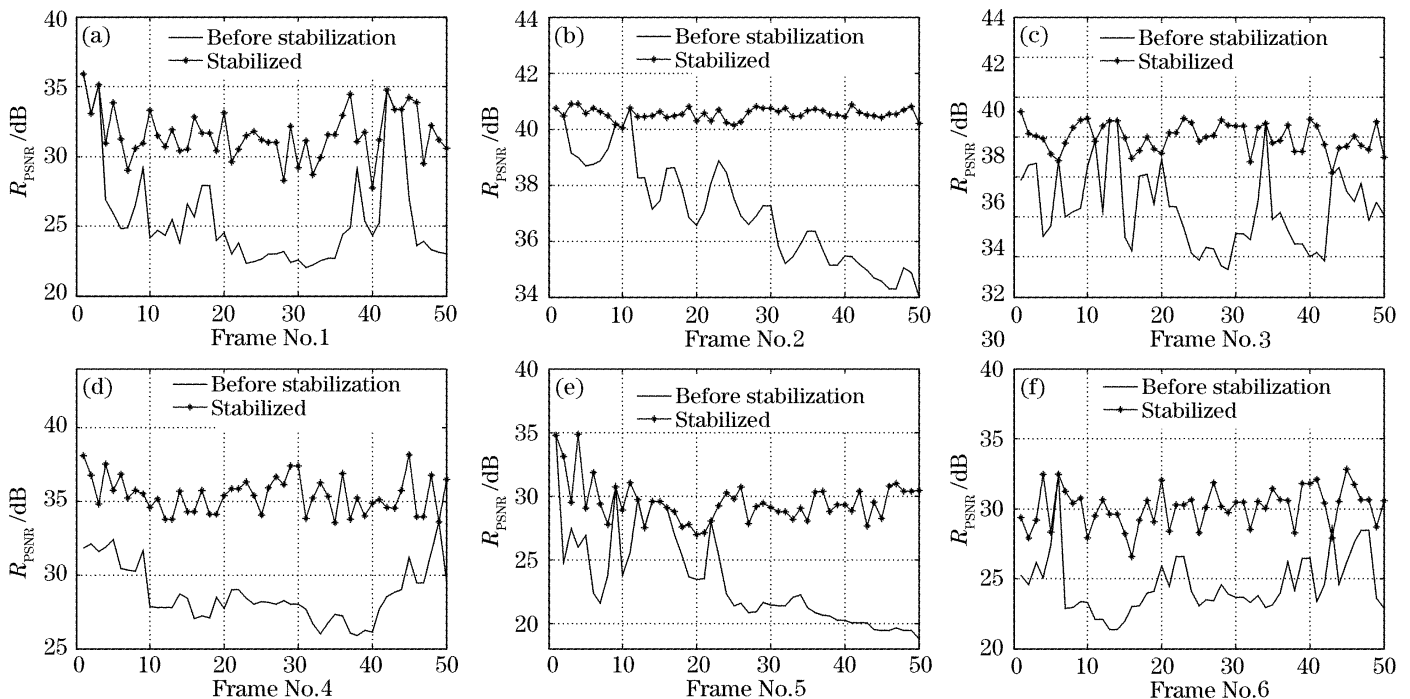


图 4 真实视频组稳像前后的  $R_{PSN}$  曲线

Fig. 4  $R_{PSN}$  before and after stabilization of real image sequences

由图 4 可见,稳像处理后图像序列的  $R_{\text{PSN}}$  值均有较大的提高,说明投影算法在较低的曝光量下具有良好的稳健性。当曝光时间为  $10^{-3}$  s、光圈数为 F5.6 时,由(2)式,等价于曝光时间相对于参考视频降 4 档,此时投影算法仍表现出较好的性能。随着光圈数的减小,曝光总量增加,像面灰度值增加,投影算法保持着较好的性能;并且当光圈数最小时,通过增加电路增益的方式来增加曝光量,但同时也引入了电路噪声,投影算法在存在一定随机噪声的低曝光量情况下仍表现出良好的稳健性。

实验也在 1/2000 s、1/4000 s 及 1/8000 s 曝光时间情况下对实际视频进行了类似的研究,并且得到了相似的结论。基于实际视频的实验结果证明了合成视频实验中提出的投影算法在该 CCD 成像模型中欠曝 5 档情况下仍能保持良好性能的观点;并且两组实验也都说明了投影算法在低曝光量及存在一定随机噪声的情况下,表现出良好的稳健性,且算法简单,易于实时实现,可用于对高速 CCD 采集的低曝光量图像序列作相关运算得到图像运动矢量。

## 4 结 论

文章基于高速面阵 CCD 采集辅助图像、利用灰度投影算法计算图像位移矢量,控制微位移器件驱动主成像焦平面跟踪光轴偏移从而补偿相机颤动稳定成像模型,通过合成视频和实际视频相结合的模拟实验,对低曝光量下灰度投影算法稳健性的研究,发现并证明该算法在低曝光量情况下表现出良好的稳像稳健性,在欠曝 5 档的情况下仍能实现可靠的稳像运算。

借鉴本实验,对于实际的实验系统或装置,可以利用本文的研究方法对系统进行噪声参量估计及欠

曝实验,在当前景物及光亮度情况下给出可靠稳像时成像系统的最高采集频率,从而实现低曝光量下的稳定成像或其他高速视频处理任务。后继工作将对子像素级高精度稳像及文中提到的稳定成像模型的实现作进一步的研究。

## 参 考 文 献

- 1 Zhao Hongying, Jin Hong, Xiong Jingwu. Overview of the electronic image stabilization technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(4): 353~359 (in Chinese)  
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
- 2 Tong Zilei. Compensation technology for the image motion of CCD camera[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(9): 628~632 (in Chinese)  
童子磊. CCD 相机的像移补偿技术[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(9): 628~632
- 3 S. H. Lim, J. G. Apostolopoulos, A. El Gamal. Optical flow estimation using temporally oversampled video [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**(8): 1074~1087
- 4 Li Qi, Xu Zhihai, Feng Huajun *et al.*. A descriptive method for image stability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 427~430 (in Chinese)  
李奇,徐之海,冯华君等. 一种图像稳定程度的描述方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 427~430
- 5 Zhou Hongchao, Zhu Jubo, Wang Zhengming. Parametric estimation of mixed poisson-gaussian distribution model [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2005, **4**(2): 1~5 (in Chinese)  
周宏潮,朱炬波,王正明. 混合泊松-高斯分布模型的参数估计[J]. *中国空间科学技术*, 2005, **4**(2): 1~5
- 6 Krishna Ratakonda. Real-time digital video stabilization for multimedia applications[C]. *IEEE Proceedings of ISCAS*, 1998, **4**: 69~72
- 7 Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Steven L. Eddins. *Digital Image Processing Using MATLAB* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004, 153~158  
Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Steven L. Eddins. 数字图像处理(MATLAB 版)[M](英文版). 北京:电子工业出版社, 2004. 153~158
- 8 Carlos Morimoto, Rama Chellappa. Evaluation of image stabilization algorithms [C]. *IEEE Proceedings of ICASSP*, 1998, **5**: 2789~2792