

# 一种特征匹配的高精度电子稳像方法<sup>\*</sup>

龚卫国, 王小立, 李正浩

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 针对车载侦察系统视频稳像精度要求较高的情况, 提出一种基于边缘图像配准的高精度电子稳像方法。该方法采用相位一致性作为不变度量来同时检测图像的角点和边缘特征; 利用匹配点对引导边缘匹配, 并筛选适量分布均匀的匹配点对求取初始全局进行运动估计; 改进粒子滤波以对边缘图像进行配准来获得精确全局运动参数, 进一步提高了稳像精度。实验结果表明, 所提出方法的平移配准误差 ( $\Delta x = +0.210$ ,  $\Delta y = -0.013$ ) 远小于一个像素, 满足了车载侦察系统对电子稳像技术的实时性及高精度要求。

**关键词:** 电子稳像; 图像配准; 全局运动估计; 粒子滤波

**中图分类号:** TP394.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2010)07-2751-03

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.07.099

## High-accuracy electronic image stabilization method using feature matching

GONG Wei-guo, WANG Xiao-li, LI Zheng-hao

(Key Laboratory for Optoelectronic Technology & System of Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In order to satisfy the high image stabilization precision requirement of reconnaissance system on vehicle, this paper presented a high-accuracy electronic image stabilization method based on edge image registration. The proposed method used phase congruency as invariant to detect corner and edge feature from the frame. Then utilized matched points to guide edge matching, and selected a proper number of well distributed corresponding points to get initial global motion estimation. Finally, to obtain accurate global motion parameters, applied improved particle filter to edge image registration to further improve the image stabilization precision. Experimental results show the translation registration errors of the method ( $\Delta x = +0.210$ ,  $\Delta y = -0.013$ ) are far less than one pixel, thus the proposed method can satisfy the demand of real-time and high precision for electronic image stabilization technique in reconnaissance system on vehicle.

**Key words:** electronic image stabilization; image registration; global motion estimation; particle filter

## 0 引言

车载视频侦察系统一般工作在恶劣的野外环境中。车体的剧烈震动以及在使用高监视“桅杆”时受风吹影响, 都会导致视频图像序列极不稳定。这不仅使得观察者容易疲劳, 也极大地影响了目标观测的效果, 因此必须对图像序列加以稳定。

电子稳像(electronic image stabilization, EIS)技术于 20 世纪 80 年代提出, 是通过序列图像进行运动估计和运动补偿, 从而去除图像中由于摄像平台运动而导致的诸如抖动、旋转等非正常偏移的技术。稳像技术主要包括运动估计和运动补偿两部分, 其核心集中在运动估计。运动估计是估计出视频序列的帧间偏移量, 为运动补偿提供可靠参数。其典型算法有代表点匹配法<sup>[1]</sup>、灰度投影算法<sup>[2]</sup>、位平面匹配法<sup>[3]</sup>、光流场法<sup>[4]</sup>、频域估计法<sup>[5]</sup>和特征量跟踪算法<sup>[6,7]</sup>等。车载视频侦察系统对电子稳像精度要求较高, 为此, 本文提出了一种利用图像配准来获取运动估计参数的方法。首先, 采用相位一致性作为不变度量来检测图像的角点和边缘, 通过已匹配的角点筛选图像边缘并引导边缘进行匹配; 然后按照一定准则选取足够数量的

匹配点对, 用最小二乘法求取初始模型参数; 最后以模型参数(把初始模型参数作为均值进行高斯非均匀采样)为粒子, 以边缘点代入变换模型进行逆变换后与参考图像对应各段边缘的 Hausdorff 距离为粒子权重, 改进粒子滤波对边缘图像进行快速配准得到高精度全局运动参数。与求取模型参数的 Levenberg-Marquard 算法相比, 它依赖于各段边缘的 Hausdorff 距离而非点的精确匹配, 具有更高的鲁棒性, 克服了可能会收敛到局部最小值的问题。为了验证算法的性能, 本文给出了实际拍摄视频稳像和量化实验结果。

## 1 图像运动模型

理论上, 当载体的运动反映到视频图像上时, 连续两帧间发生的全局运动可以分解为整体的平移、绕某个定点的旋转以及一定的比例缩放。实际应用中, 由于拍摄场景离相机较远, 可以不考虑比例缩放影响。因此, 第  $k$  帧图像的像素点  $(x, y)$  与对应的第  $k+1$  帧像素点  $(x', y')$  之间的关系近似如下:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_k & -\sin \theta_k \\ \sin \theta_k & \cos \theta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx_k \\ Ty_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

**收稿日期:** 2009-11-18; **修回日期:** 2010-01-11      **基金项目:** 国家“863”计划资助项目(2007AA01Z423); 国防“十一五”基础研究基金资助项目(C10020060355); 国防基础研究基金资助项目(CS-OC2)

**作者简介:** 龚卫国(1957-), 男, 重庆人, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为图像处理、模式识别及机器视觉、智能化信息技术及系统(wggong@cqu.edu.cn); 王小立(1983-), 男, 湖北枣阳人, 硕士, 主要研究方向为电子稳像、图像处理等; 李正浩(1980-), 男, 山东济南人, 博士, 主要研究方向为图像处理、目标追踪、增强现实等。

其中:参数  $\theta_k$  是绕光轴的旋转角度;  $T_{x_k}$ 、 $T_{y_k}$  是在  $x$  轴、 $y$  轴上的平移量。以上三个参数  $X_k = [T_{x_k} \ T_{y_k} \ \theta_k]^T$  即为要求的全局运动矢量。

## 2 角点引导的匹配算法

### 2.1 特征量的提取与选择策略

本文采用一种利用相位一致性信息提取角点和边缘的算法<sup>[8]</sup>。相位一致性是一种频域检测的方法,它假设图像中傅里叶级数分量和最大的点为特征点,而非基于亮度梯度。Kovesi 给出了改进的相位一致性定义,其中考虑了频率扩展和噪声补偿,如下:

$$PC_2(x) = \frac{\sum_{o,n} W_o(x) [A_{no}(x) \Delta\Phi_{no}(x) - T_o]}{\sum_{o,n} A_{no}(x) + \varepsilon} \quad (2)$$

其中: $o$  表示方向的索引; $n$  表示滤波器的尺度; $W_o(x)$  为频率扩展的权重函数,通过扩展信号频率范围提高相位一致的显著性; $T_o$  为噪声估计;取值符号  $[ ]$  表示值为正时等于本身,否则取 0; $A_{no}(x)$  和  $\Delta\Phi_{no}(x)$  分别表示处在方向  $o$ 、尺度  $n$  上的幅值与相位偏离函数。

对图像的所有点进行相位一致性变换,选取不同成分可以分别得到包含角点和边缘信息的相位一致性变换图像。对两个相位一致性图像进行非极大值抑制,分别得到角点与边缘。式(2)表明相位一致性是一个无量纲的量,它的值从 1 降到 0,表示从显著特征降到无特征。利用此性质,可设定特征阈值对特征和非特征进行鉴别,从而实现自动特征检测。

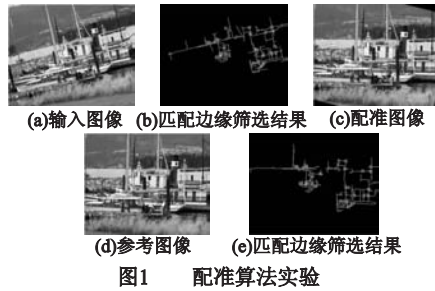
相位一致算法与空域检测算法相比的主要优点如下:a)对图像局部亮度和对比度不敏感;b)对线性物体产生单线响应,而非类似于大多数空域检测算子产生双线响应;c)抗噪能力强,有更稳定的特征定位精度。同时,此算子提取的角点集合是其边缘点集的严格子集且分布均匀,另外,通过设置不同参数可以确保边缘段上有足够数目的角点。因此,更有利于结合角点与边缘信息进行特征匹配。

### 2.2 角点引导的边缘匹配及特征筛选

当角点与边缘特征被提取后,去掉边缘上含有特征点数低于三个的边缘段。由于视频帧间偏移较小,角点采用灰度相关约束进行初始匹配;然后,边缘的匹配采用基于角点匹配的方法。如果图 1(b)中的某段边缘,其上角点的匹配点有三个以上在图 1(e)中的某段边缘上,且匹配点在对应边缘上的数目远大于不在边缘上的数目,则认为这两段边缘是匹配的。相差数目越大,边缘匹配越好。同时,如果匹配的边缘数目超过  $N$  (文中  $N=8$ ),则只选择其中  $N$  段分布均匀并且匹配较好的边缘。

当边缘段实现匹配以后,边缘可以作为特征点匹配的约束条件进一步去除角点的误匹配。具体说,对于匹配点不在对应边缘上的点,则认为它们是伪匹配点而剔除;同时去除一点对应多个初始匹配点的情况。由于特征点是位于图像边缘上的,特别是当边缘近似于直线时,会给式(1)的最小二乘解带来不良影响,所以要对保留的匹配点进行筛选。筛选策略具体包括:把图像分成  $M \times N$  的网格(本文中  $M=8, N=6$ ),每个网格里只取一个特征点,如果网格中有多个特征点,则取灰度相关判定度量中最好的特征点;如果网格中不含特征点,则视为无效网格。通过上述步骤求得的匹配点  $(x, y)$  和  $(x', y')$  分别代入式(1)中用最小二乘法求得初始全局运动矢量,表示为  $\Delta X_k =$

$$[\Delta T_{x_k} \ \Delta T_{y_k} \ \Delta\theta_k]^T。$$



## 3 基于粒子滤波思想的边缘图像配准

由于边缘约束和特征筛选并不能完全剔除伪匹配点对,同时运动模型是一个非线性方程,最小二乘解的结果往往精度不够。为此,本文把粒子滤波<sup>[9]</sup>思想引入到边缘图像配准当中来求取更高精度的运动矢量。理论上,当粒子的数目为无穷多时,配准精度达到最优。通过设置不同的粒子数,在配准精度和时间上达到折中。

将模型参数表示为状态矢量  $X_k = [T_{x_k} \ T_{y_k} \ \theta_k]^T$ ,  $Z$  表示观测值。粒子滤波的核心思想是选取一组称为粒子的随机样本  $\{X_k^i, i=0, 1, \dots, N\}$ ,通过对样本进行观测,获得观测值集合  $Z$ ,在这里每一个粒子均代表一个假设全局运动矢量。依据观测值计算样本的权值  $\{w_k^i, i=0, 1, \dots, N\}$ ,并利用这组带有权值的随机样本来近似估算样本的后验分布  $P(X_{0:k} | Z_{1:k})$ 。其中,  $N$  是粒子数,  $k$  是帧数。然后根据一定的估计准则(如最大后验估计)求得系统状态的估计值  $\hat{X}$ 。在实际中由于后验分布可能是多变量、非标准概率分布,通常需通过重要性函数  $q(X)$  采样来逼近,这些粒子可视为来自后验分布的抽样点。本文中粒子的选取方法如下:

$$X_k^i = \hat{X}_{k-1} + n_k^i \quad (3)$$

$$n_k^i \sim N_G(\Delta X_k, \Sigma) \quad (4)$$

其中:  $\hat{X}_{k-1}$  是前一帧的状态估计,在这里加入前一帧的状态估计是为了使求得的所有状态估计参数都是针对于参考帧的,可以直接进行运动补偿;  $N_G(\Delta X_k, \Sigma)$  是期望为  $\Delta X_k$ 、方差为  $\Sigma$  的高斯分布函数,  $\Delta X_k$  是利用点匹配获取的初始全局运动矢量。

粒子的权重代表了每个粒子与真实状态的逼近程度。首先,利用每个粒子所代表的模型参数对当前帧选取的图像边缘点进行逆变换;然后对于逆变换所得到的各段边缘,计算它们与各自对应的参考图像各段边缘的改进 Hausdorff 距离<sup>[10]</sup>  $\{d_j^i, j=1, \dots, q\}$ 、边缘权重因子  $\{\alpha_j^i, j=1, \dots, q\}$  和  $M_i = \sum_j \alpha_j^i d_j^i$ 。其中,  $q$  是选取的边缘段数,  $i$  代表第  $i$  个粒子。边缘权重因子代表各段边缘不同的匹配程度对  $M_i$  的贡献不同,用对应边缘段上匹配点数与全部选取边缘上的总匹配点数之比表示。

本文中,改进 Hausdorff 距离采用了有向 LTS-HD (least trimmed square Hausdorff distance),其定义为

$$H_{LTS}(B, A) = \frac{1}{H} \sum_{n=1}^H d_A(b)_{(n)} \quad (5)$$

其中:  $H = [f \times N_A]$ ,  $f \in [0, 1]$ ;  $d_A(b)_{(n)}$  表示将点集  $B$  中所有点到点集  $A$  的距离  $d_A(b)$  由小到大排序后的第  $n$  个值;  $N_A$  表示  $A$  中点数,于是  $H_{LTS}(B, A)$  就是等于  $d_A(b)$  序列前  $n$  个值累加和的平均值。LTS-HD 实质是将大的距离值剔除后,再对保留下来的距离求平均值。另外,文中求 LTS-HD 距离的边缘是已匹配的对边缘段,这使得计算量大幅度降低的同时提高了

Hausdorff 距离对遮挡、噪声等影响的鲁棒性。

由于粒子的权重一般表达为一个与其观测值相对应的高斯函数,边缘的相似度定义为

$$P_M^i \propto \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_M} \exp\left[-\frac{M_i^2}{2\sigma^2 M}\right] \quad (6)$$

其中: $\sigma_M$  是一个可调的标准差, $i$  是粒子数。因此,归一化权重为

$$w_k^i = \frac{P_M^i}{\sum_{i=1}^N P_M^i} \quad (7)$$

模型参数的真实状态可近似表示为

$$\hat{X}_k = \sum_i w_k^i X_k^i \quad (8)$$

$\hat{X}_k = [Tx_k \quad Ty_k \quad \theta_k]$  即为最终的全局运动矢量。

### 4 实验结果

该车载视频侦察系统中的视频图像大小为  $640 \times 480$  (单位像素),帧频为 28 fps。

#### 4.1 配准算法的实验结果

为了验证配准算法的精度及在较大幅度抖动情况下的稳像效果,实验中选取图 1(d) 为参考图像,按照  $dx = +15, dy = +15, \theta = +1.0^\circ$  对其进行变换,得到一幅待配准的图像。在粒子数设定为 10 的情况下经过配准获取的配准参数是:  $dx = +15.210, dy = +14.987, \theta = +0.978^\circ$ ; 误差分别为  $\Delta x = +0.210, \Delta y = -0.013, \Delta \theta = -0.022^\circ$ 。其中,平移量的误差都小于一个像素,达到了亚像素水平。同时,实验结果的精度与粒子数有关,但过多的粒子数不但没有实际意义,反而会增加计算量。

#### 4.2 实际拍摄视频稳像效果

图 2 给出了该方法对实际拍摄抖动视频的稳像效果。可以看出,即使存在移动目标干扰的情况下,后续帧在相对于参考帧出现大幅度偏移时,视频仍获得了很好的稳定效果。

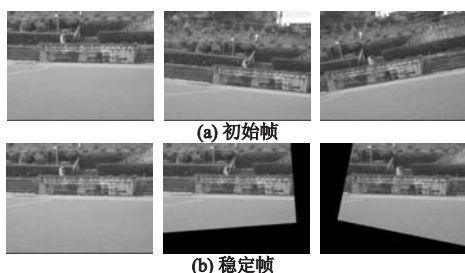


图2 视频稳像结果

根据 Morimoto 等人<sup>[11]</sup> 提出的评价准则,使用峰值信噪比 (PSNR) 来评价稳像算法的性能。PSNR 的定义式(假设对于 256 级灰度图像来说)如下:

$$R_{PSNR}(I_t, I_{t+1}) = 10 \lg \frac{255^2}{E_{MSE}(I_t, I_{t+1})} \quad (9)$$

$$E_{MSE} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (I_t(m, n) - I_{t+1}(m, n))^2 \quad (10)$$

其中: $I_t$  和  $I_{t+1}$  分别表示  $t$  和  $t+1$  时刻两帧图像,尺寸为  $M \times N$ 。如果是连续两帧,则称为帧间变换保真度 (inter-frame transformation fidelity, ITF); 如果是当前帧与参考帧,则称为全局变换保真度(global transformation fidelity, GTF)。

图 3 给出了原始与稳定序列的帧间保真度(曲线 oPSNR 和 sPSNR) 的比较结果。可以看出,结果序列的帧间保真度有

了很大的提高,与图 2 稳像前后的视频图像的结论是一致的。

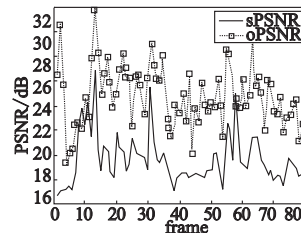


图3 图像序列ITF比较

### 5 结束语

本文针对车载侦察系统对稳像精度要求较高的情况,提出一种利用边缘特征图像进行配准来获取高精度运动估计的方法。该方法首先利用匹配点对的位置关系获取初始全局运动矢量估计,并通过已匹配的角点筛选图像边缘并引导边缘进行匹配,然后改进粒子滤波以对边缘图像进行配准得到高精度全局运动估计参数。文中对配准算法进行了量化分析,在出现较大幅度偏移的情况下,算法仍具有足够的精度。比如,当帧间偏移为  $dx = +15, dy = +15, \theta = +1.0^\circ$  时,配准算法的误差为  $\Delta x = +0.210, \Delta y = -0.013, \Delta \theta = -0.022^\circ$ 。在 P4 2.4 GHz CPU、2 GB 内存的 PC 机上本算法的帧处理时间  $< 35$  ms,达到了实时稳像的要求。实验结果表明,该算法的稳像精度达到了亚像素水平,并且具有较好的鲁棒性和可行性。如果采用运算能力较强的专用硬件以及并行处理器(如 GPU) 等提高速度,在跟踪系统、武器制导系统、无人车辆等领域有很好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] UOMORI K, MORIMURA A, ISHII H, *et al.* Automatic image stabilizing system by full-digital signal processing [J]. *IEEE Trans on Consumer Electronics*, 1990, 36(3): 510-519.
- [2] 孙辉. 快速灰度投影算法及其在电子稳像中的应用[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(3): 412-416.
- [3] KO S J, LEE S H, LEE K H. Fast digital image stabilizer based on gray-coded bit-plane matching [J]. *IEEE Trans on Consumer Electronics*, 1999, 45(3): 598-603.
- [4] CHANG J Y, HU Wen-feng, CHENG Mu-huo, *et al.* Digital image translational and rotational motion stabilization using optical flow technique [J]. *IEEE Trans on Consumer Electronics*, 2002, 48(1): 108-115.
- [5] ERTURK S. Digital image stabilization with sub-image phase correlation based global motion estimation [J]. *IEEE Trans on Consumer Electronics*, 2003, 49(4): 1320-1325.
- [6] HU Rong, SHU Rong-jie, SHEN Ai-fan, *et al.* Video stabilization using scale-invariant features [C]//*Proc of IEEE International Conference on Information Visualization*. 2007: 871-877.
- [7] BATTIATO S, GALLO G, PUGLISIG, *et al.* SIFT features tracking for video stabilization [C]//*Proc of International Conference on Image Analysis and Processing*. 2007: 825-830.
- [8] KOVESI P. Image features from phase congruency [J]. *Journal of Computer Vision Research*, 1991, 1(3): 1-27.
- [9] SANJEEV M, ARULAMPALAM, MASKELL S, *et al.* A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2002, 50(2): 174-188.
- [10] SIM D G, KWON O K, PARK R H. Object matching algorithm using robust Hausdorff distance measures [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 1999, 8(3): 425-429.
- [11] MORIMOTO C, CHELLAPPA R. Evaluation of image stabilization algorithms [C]//*Proc of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1998: 2789-2792.