

基于相位相关的电子稳像算法研究

杜登崇, 蒋晓瑜, 姚 军

(中国人民解放军装甲兵工程学院控制工程系光电工程室, 北京 100072)

摘要:提出了一种新的基于相位相关的电子稳像算法:首先在参考图像帧中心处截取一个小图像区域,然后在待稳定图像帧中寻找一个同样大小的区域,使得在对数极坐标表示下,这两个小区域图像的互功率谱经傅里叶反变换后是一个二维脉冲信号。所要寻找的小区域中心点在待稳定图像帧中的位置即为所要估计的平移参数,二维脉冲信号中脉冲的位置与缩放因子和旋转角度有关,由此而得到图像帧间的旋转、尺度变换以及平移运动参数。实验说明了此方法的有效性,能够满足一般要求。

关键词:相位相关;电子稳像;傅里叶变换;对数极坐标表示

中图分类号:TP751.1 **文献标识码:**A

Electronic Image Stabilization Algorithm Based on Phase Correlation

DU Deng-chong, JIANG Xiao-yu, YAO Jun

(Dep. of Control And Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: A novel method for electronic image stabilization based on phase-correlation is proposed. Firstly, a central patch is cropped on the reference image, then the same size patch is found on the stabilized image, which makes the inverse Fourier transform for the cross power spectrum of the two patches in log-polar representation be a 2D impulse. The coordinate of the selected patch centre on the stabilized image corresponds to the translated parameter exactly. And the impulse location can determine the scaled and rotated factors, so as to obtain translation, rotation and scale parameters. Experimental results show that this method is efficient, and satisfy the general demand.

Key words: phase-correlation; electronic image stabilization; fourier transform; log-polar representation

1 引言

摄像机在移动过程中所拍摄的图像序列,不仅包含了摄像机的主动运动,同时也引入了一些不希望的运动(如移动平台的振动),通常是不规则的随机运动。由于这种随机运动的存在,会因为视觉暂留而造成观察图像序列模糊和抖动,不便于观察,同时也给有用信息的提取和应用带来困难。图像稳定就是从输入的视频图像序列中去除因为摄像机的随机运动而引入的图像扰动,使图像序列稳定的处理过程。稳像技术的发展,经历了从机械到光学再到目前的电子稳像等阶段。电子稳像技术采用高速数字图像信号处理技术,直接确定视频图像序列帧间

运动矢量,分离图像序列的平稳运动和抖动参量,对抖动分量进行补偿,使输出视频序列看起来平滑、稳定。与传统的光学稳像、机械稳像方法相比,电子稳像具有易于操作,更精确、更灵活、体积小以及价格低,能耗小、高智能化等特点。

2 电子稳像原理及其数学模型

电子稳像有两个基本问题,一个是图像序列帧间运动估计;另一个是运动补偿。运动估计是找出

作者简介:杜登崇(1980-),男,2002年毕业于装甲兵工程学院,现在中国人民解放军装甲兵工程学院控制工程系攻读博士研究生。E-mail:ddc1000@126.com

收稿日期:2008-07-25

相邻帧图像之间的偏移值,包括平移、旋转、缩放等运动参数。运动补偿即是对已估计出的全局运动矢量进行运动滤波,区分平稳运动分量以及抖动分量,确定补偿参数。根据已恢复运动参数对原始图像进行几何变换消除抖动,使变换后的图像序列仅保留摄像机的主动运动,看起来平滑、稳定。

本文提出了一种方法,采用相位相关及对数极坐标映射技术检测图像序列帧间全局运动,将其与图像的仿射变换相结合应用于稳像系统,不仅能有效地实现帧间平移运动的补偿,而且其旋转运动也能得到补偿。运动模型采用二维 similarity 模型:

$$p_1 = \sigma R_e p_0 + T$$

即:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \sigma \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $p_1, (x_1, y_1), (x_0, y_0), p_0$ 分别是当前帧和参考帧对应的坐标; $T, (\Delta x, \Delta y)$ 是二维平移量; σ 是变焦系数,描述缩放; R_e 是正交的旋转矩阵; θ 描述图像的旋转变换。即:

$$R_e = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

对检测出的 $\Delta x, \Delta y, \sigma, \theta$ 在摄像机的主动运动为匀速运动的假设下,用自适应均值滤波公式对全局运动矢量进行运动滤波,获取修正矢量,完成运动补偿。

3 基于相位相关的运动参数估计

3.1 相位相关法估计平移参数

相位相关技术是一种非线性、基于傅氏功率谱的频域相关技术,经常被用来检测两幅图像之间的平移。它对噪声有较高的容忍度,检测结果与照度无关,是一种强鲁棒性的图像匹配方法。另外只要图像内容有三分之一是相似的,就可找出最佳匹配位置。

假设 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 为两个图像信号,它们满足式(1)的关系(即 $f_2(x, y)$ 是由 $f_1(x, y)$ 经过简单的平移得到)。

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (2)$$

根据傅里叶变换的性质可得:

$$F_2(u, v) = F_1(u, v) e^{-j2\pi(ux_0 + vy_0)} \quad (3)$$

式中, $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$ 分别为 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的傅里叶变换。它们的互功率谱为:

$$\frac{F_1^*(u, v) F_2(u, v)}{|F_1^*(u, v) F_2(u, v)|} = e^{-j2\pi(ux_0 + vy_0)} \quad (4)$$

式中, $F_1^*(u, v)$ 为 $F_1(u, v)$ 的复共轭, $e^{-j2\pi(ux_0 + vy_0)}$ 的傅里叶反变换为一个二维脉冲函数 $\delta(x - x_0, y - y_0)$, 即:

$$p(x, y) = F^{-1}(e^{-j2\pi(ux_0 + vy_0)}) = \delta(x - x_0, y - y_0) \quad (5)$$

相位相关方法就是求取式(4)的傅里叶反变换,然后找到峰值位置来确定平移参数 x_0 和 y_0 。

3.2 相位相关法估计缩放尺度和旋转角度

$f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 为两个图像信号, $f_2(x, y)$ 是由 $f_1(x, y)$ 以 σ 为参数进行缩放后再逆时针旋转 θ_0 得到的图像,即它们满足:

$$f_2(x, y) = f_1[\sigma^{-1}(x \cos\theta_0 + y \sin\theta_0), \sigma^{-1}(-x \sin\theta_0 + y \cos\theta_0)] \quad (6)$$

令 $f_{1\rho}(\rho, \theta)$ 和 $f_{2\rho}(\rho, \theta)$ 分别为 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的极坐标形式,得到:

$$f_{2\rho}(\rho, \theta) = f_{1\rho}(\rho/\theta, \theta - \theta_0) \quad (7)$$

若对 $f_{1\rho}(\rho, \theta)$ 和 $f_{2\rho}(\rho, \theta)$ 沿 ρ 方向取对数,即:

$$\begin{aligned} f_{1\rho l}(\lambda, \theta) &= f_{1\rho l}(\log\rho, \theta) \\ f_{2\rho l}(\lambda, \theta) &= f_{2\rho l}(\log\rho, \theta) \end{aligned} \quad (8)$$

则:

$$f_{2\rho l}(\lambda, \theta) = f_{1\rho l}(\lambda - \lambda_0, \theta - \theta_0) \quad (9)$$

式中, $\lambda_0 = \log\sigma$ (因为 $\lambda = \log\rho$, 所以 $\lambda - \lambda_0 = \log(\rho/\sigma) = \lambda - \log\sigma$)。从式(9)可以看出 $f_{1\rho l}(\lambda, \theta)$ 与 $f_{2\rho l}(\lambda, \theta)$ 之间满足一种简单的平移关系,利用上述相位相关方法同样可获得 λ_0 和旋转角度 θ_0 , 因此可以进一步获得缩放尺度 $\sigma = e^{\lambda_0}$ 。

3.3 相位相关法同时估计缩放、旋转和平移参数

基于 3.1 和 3.2, 本文提出一种新的基于相位相关的电子稳像算法,可同时估计出待稳定帧相对于参考帧的缩放、旋转和平移参数,具体步骤为:

(1) 在参考图像帧 $f_1(x, y)$ 中心处截取一个小的区域 $I_1(x, y)$;

(2) 计算 $I_1(x, y)$ 的对数极坐标变换 $I_{1\rho l}(x, y)$, 并计算 $I_{1\rho l}(x, y)$ 的傅里叶变换 $A(u, v)$;

(3) 对于在待稳定图像帧 $f_2(x, y)$ 中任何可能的位置 (x, y) , 以 (x, y) 为中心截取一个与 $I_1(x, y)$ 大小相同的小区域 $I_2(x, y)$;

(4) 计算 $I_2(x, y)$ 的对数极坐标变换 $I_{2\rho l}(x, y)$, 并计算 $I_{2\rho l}(x, y)$ 的傅里叶变换 $B(u, v)$;

(5) 根据式(3)计算 $A(u, v)$ 和 $B(u, v)$ 的互功率谱,再对互功率谱作傅里叶反变换,判断是否产生一个二维脉冲信号,若不是则匹配不成功;若是,则记产生脉冲时的 (x, y) 为 (x_0, y_0) 和这个二维脉冲信

号中脉冲处的位置(λ_0, θ_0);

(6) 得到估计参数: 平移参数为(x_0, y_0), 缩放尺度为 $\sigma = e^{\lambda_0}$, 旋转角度为 θ_0 。

关于本文算法的几点说明:

(1) 本文直角坐标的原点均取在图像的中心点处。

(2) 本文判断是否是一个二维脉冲信号是根据它是否满足两个条件:

①它的最大值超过一个阈值(0.1);

②除峰值临近的少数几个(本文实验设为8)值外,其他值均接近0。

(3) 由于图像中可能存在移动目标,为了提高全局运动估计的精度以及减少计算量,采用多个 64×64 像素的子图像块分别进行局部的平移运动估计,如图1所示(6个子块情况)。对多个子图像对分别进行相位相关计算,当局部运动矢量的函数峰值小于最大峰值的一半时,认为这个匹配不可靠,抛弃。采用其中两个最高峰值的局部运动矢量的 δ 均值作为全局运动矢量。这样的处理不仅减小了计算量,也便于并行计算,实现实时稳像。

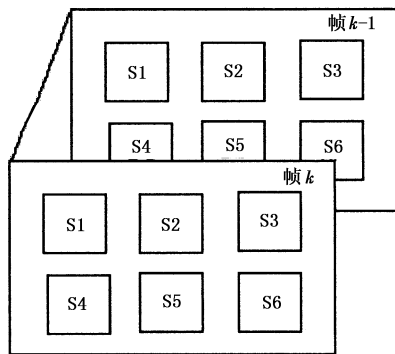


图1 子图像选取示意图

4 自适应均值滤波法及运动补偿

电子稳像的目的在于消除或减轻摄像机载体晃动所造成的图像序列帧间的随机运动,从而使图像序列清晰稳定。而对于序列图像中存在的有意运动,如摄像机的正常扫描运动,则一定要保留。由于抖动相对于摄像机的主动运动来说是高频的随机运动,采用低通滤波的思想对前文算法求出的旋转和平移参数进行平滑,获取理想的修正矢量。通过对多个序列的初步仿真知尺度缩放因子 σ 基本上保持不变,可以忽略其影响,只对 θ, x_0, y_0 进行滤波。

对一动态视频图像序列,记为 $f_0, f_1, \dots, f_i, \dots, f_N$ 共 N 帧,选定 f_0 为参考图像,其后各帧图像相对参考图像的运动位移均可求出。设 v_i 为第 i 帧图像相对于第 0 帧图像的运动位移,则有:

$$v_i = \sum_{n=1}^i V_n(x, y, \theta) \tag{10}$$

其中, $V_n(x, y, \theta)$ 是第 n 帧图像相对于第 $(n-1)$ 帧图像的运动矢量,可由相位相关算法求得。这样就可分别作出图像序列在 x 轴方向, y 轴方向以及旋转角度 θ 上的运动轨迹曲线,通过对运动轨迹进行均值平滑滤波,既可以降低序列抖动的程度,又可以保留序列图像中存在的有意运动。

采用平均滤波的方法对运动矢量进行处理,用滤波前后对应帧的参数差作为图像序列中当前图像的补偿参数。则第 i 帧图像的变换参数可以表示为:

$$\begin{aligned} \Delta X_i &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_{i-[n-(n+1/2)]} - X_i \\ \Delta Y_i &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Y_{i-[n-(n+1/2)]} - Y_i \\ \Delta \Theta_i &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Theta_{i-[n-(n+1/2)]} - \Theta_i \end{aligned} \tag{11}$$

其中, N 为均值滤波法的窗口大小,一般取奇数。当抖动频率较大时,应采用值较小的均值滤波法来降低抖动频率,如果采用 N 值较大的均值滤波,虽然可以使抖动频率更低,但会出现过稳现象;当抖动频率较小时,应采用 N 值较大的均值滤波法,否则达不到降低抖动频率的效果,出现欠稳现象。

确定各帧图像的补偿参数后,代入其二维 similarity 变换模型(1),对图像进行变换,即可得到稳定的图像视频序列。

5 实验结果分析

选 100 帧其分辨率为 352×288 像素的连续图像,在 PC 机上利用 VC++ 软件编程的方法进行稳像实验。图 2 是使用摄像机拍摄的视频序列中的三个样本,图 3 是使用本文算法完全补偿稳像后的结果。比较图 2、图 3 可以看出,相位相关稳像算法很好的去除了旋转和平移波动,取得了理想的稳定效果。

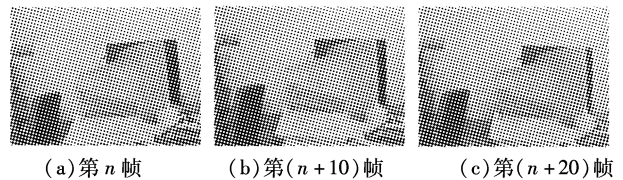


图2 原始视频序列

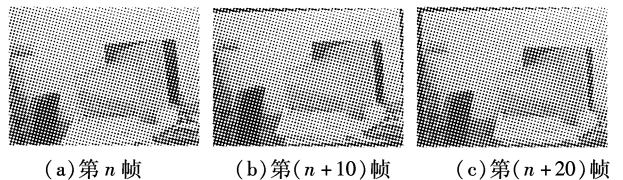


图3 稳像后的结果

6 结论

本文首先分析相位相关技术能够稳健地处理只存在平移情况下的电子稳像问题;然后讨论同时存在旋转和缩放的电子稳像,先将图像由直角坐标表示转换为对数极坐标表示,然后再利用相位相关技术得到缩放和旋转参数进而提出一种能够解决同时存在缩放、旋转和平移变换问题的电子稳像新算法。算法经实验证明,经过旋转和平移补偿后的视频与原始视频相比有明显的改善,稳像效果是令人满意的。在稳像算法的全局运动估计部分,采用了取图像子块求平均策略,在克服局部运动对全局运动参数影响的同时,减少了计算量。运动滤波部分基于自适应均值滤波技术,数据存储量小。采用运算能力强大的专用硬件(如DM642)可以实现实时稳像,在视频侦察系统、无人机等领域有很好的应用前景。

参考文献:

[1] C Morimoto, R Chellappa. Fast electronic digital image

stabilization for off-road navigation [J]. Real-Time Imaging, 1996, (2): 285 - 296.

[2] S B Balakirsky, R Chellappa. Performance characterization of image stabilization algorithms [J]. Real-Time Imaging, 1996, 2(5): 297 - 313.

[3] S Erturk. Digital image stabilization with sub-image phase correlation based global motion estimation [J]. IEEE Trans. Consumer Electronics, 2003, 49(4): 1320 - 1325.

[4] A verbuch A, Keller Y. FFT based image registration [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2002: 3608 - 3611.

[5] Chen Q, Dfrise M, Deconinck F. Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-mellin transform for image registration and recognition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(12): 1156 - 1168.

[6] Zhong P, Yu Q Y, Jing. Motion estimation and motion compensation based on matching technology of feature point [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2004, 15(1): 73 - 77. (in Chinese)

(上接第54页)

4.2 毛细钢管封装光纤光栅的应变传感特性

光纤光栅的应变传感特性可能会因为封装材料的应变传递原因而改变。本文通过材料力学多功能实验台对毛细管封装光纤光栅的应变传感特性进行了研究。将与封装所用光纤材料相同的裸光纤光栅用改性丙烯酸酯贴在实验台上,改变应力大小,测得波长与应变关系曲线如图3中的FBG1。将毛细钢管封装光纤光栅用改性丙烯酸酯贴在实验台上,改变应力大小,测得波长与应变关系曲线如图3中的FBG2。

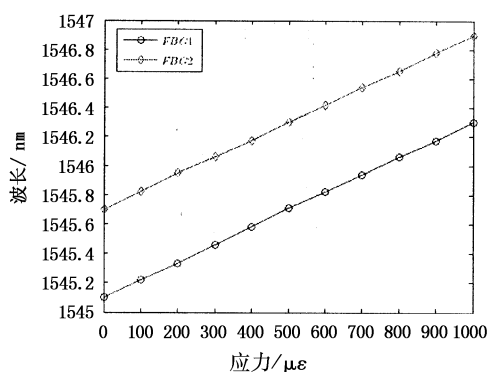


图3 裸光纤光栅及封装后光纤光栅波长与应力变化关系

从应力实验得到的波长与应力变化关系曲线可以看出,毛细钢管封装光纤光栅应变传感的线性度良好,应力灵敏度为 $1.2\text{pm}/\mu\epsilon$,而裸光纤光栅应变

传感的灵敏度为 $1.2\text{pm}/\mu\epsilon$ 。可见毛细钢管封装光纤光栅应变传感灵敏度较裸光纤光栅没有改变。

5 结论

在相同实验条件下,比较裸光纤光栅与毛细钢管封装光纤光栅传感灵敏度,得到结论:文中选择的封装工艺在不改变光纤光栅应变传感灵敏度的同时将其温度灵敏度提高了2.93倍,且重复性良好,为光纤光栅在温度测量领域的应用提供了一个很好的封装方法。

参考文献:

[1] Byoung-ho Lee. Review of the present status of optical fiber sensors [J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9: 57 - 79.

[2] Qin Wei, Liao Y B, Zhang Z P, et al. Optical waveguide sensor; principle and technology [M] Beijing: Science Publishing Company, 1998: 217 - 218. (in Chinese)

[3] 张伟刚,周广,梁龙彬,等. 混合聚合物光纤光栅封装元件的温敏实验 [J]. 光子学报, 2001, 30(8): 1003 - 1005.

[4] 王跃,张伟刚,杨翔鹏,等. 光纤布拉格光栅的半金属管封装及挠度实验研究 [J]. 传感技术学报, 2002, 9(3): 203 - 207.

[5] 赵雪峰,田石柱,周智,等. 刚性封装光纤光栅监测混凝土应变实验研究 [J]. 光电子·激光, 2003, 14(2): 171 - 174.