

两阶段旋转、平移亚像素数字稳像算法

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, 北京 100072)

摘要 提出一种稳健的两阶段层次匹配稳像算法, 在频域结合相位相关和谱对消技术对抖动图像序列间的平移和旋转矢量获得亚像素估计精度。算法第一阶段首先在对数极坐标表示下, 利用相位相关法得到图像帧间的旋转角度和整数像素平移参数; 算法第二阶段运用谱对消技术确定亚像素平移参数。在建立参数运动模型的基础上, 通过自适应均值滤波确定各帧修正矢量。实验结果表明, 该方法具有亚像素级的稳像精度。

关键词 数字稳像; 相位相关; 谱对消; 亚像素

中图分类号 TP317.4 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200828s2.0024

Double Phases Rotated and Translated Sub-Pixel Digital Image Stabilization Algorithm

Du Dengchong Jiang Xiaoyu Yao Jun

(Department of Control and Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract A robust double phases hierarchical image stabilization algorithm is presented which can combine the phase correlation with spectrum cancellation at the range of frequency to achieve high accuracy of sub-pixel for translation and rotation vector between jitter videos. In the first phase, in log-polar representation, the rotation angle and integral translated parameter can be made using phase correlation; in the second phase, the spectrum cancellation is used to determine sub-pixel translated parameters. Then, average value filtering is employed to facilitate smooth operation in terms of constant velocity motion models. Experimental results show that the algorithm can achieve sub-pixel translation estimation accuracy.

Key words digital image stabilization; phase-correlation; spectrum cancellation; sub-pixel

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^[1,2]。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

基金项目: 军队十一五预研项目(404010204)资助课题。

作者简介: 杜登崇(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事电子稳像、图像处理等方面的研究工作。E-mail: ddc1000@126.com

导师简介: 蒋晓瑜(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理、模式识别、图像融合、电子稳像、智能化信息技术等方面的研究工作。E-mail: xiaoyu.j@263.net

摄像机的主动运动,看起来平滑、稳定^[3]。

常用的运动估计方法有:基于像素灰度信息的运动矢量估计方法、基于块运动的运动矢量估计方法、基于灰度编码的位平面匹配技术、基于图像特征匹配方法以及频域互相关方法。基于块运动的运动矢量估计方法是一种常用的运动估计方法,基于最小均方差匹配准则的全搜索帧匹配方法是检测平移运动的最优算法,该算法由于计算量大、效率低,很难做到实时检测。基于像素灰度信息的运动矢量估计方法包括光流法、灰度投影算法等。其中光流的计算存在较大的噪声和误差,而且要求图像序列有较大的帧率,数据处理量大,实时性较差。灰度投影算法适合于平移运动的估计,要求图像的灰度变化应较丰富。当图像序列不仅存在平移运动,同时包含旋转缩放等变换时,会影响算法的精度。基于灰度编码的位平面匹配技术是一种快速运动估计方法,但与均方差准则的全搜索帧匹配相比,精度降低^[4]。

本文提出了一种新的基于谱对消和相位相关技术的电子稳像算法,该算法特别适合于存在着低频噪声的图像,如不同光照条件下的图像,其突出优点是通过对相位相关获得的估计是全局的,不会陷入局部最优解。运动模型采用二维 similarity 模型^[5]:

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

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

式中 $p_1, (x_1, y_1), (x_0, y_0), p_0$ 分别为当前帧和参考帧对应的坐标, $T, (\Delta x, \Delta y)$ 为二维平移量, σ 为变焦系数,描述缩放, R_e 为正交的旋转矩阵, 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 两阶段运动矢量估计

3.1 算法第一阶段粗略确定旋转、平移

3.1.1 相位相关法

假设 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 为两个图像信号,它们满足关系(即 $f_2(x, y)$ 是由 $f_1(x, y)$ 经过简单的平移得到^[6,7])

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

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 $e^{-j2\pi(ux_0 + vy_0)}$ 的傅里叶反变换为一个二维脉冲函数 $\delta(x - x_0, y - y_0)$, 相位相关方法就是求取(4)式的傅里叶反变换,然后找到峰值位置来确定平移参数 x_0 和 y_0 。

3.1.2 对数极坐标系中旋转和缩放系数的确定

$f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 为两个图像信号, $f_2(x, y)$ 是 $f_1(x, y)$ 经过平移、旋转和尺度缩放后得到的图像,它们的关系为

$$\begin{aligned} f_1(x, y) = f_2(sx \cos \theta_0 + sy \sin \theta_0 - x_0, \\ -sx \sin \theta_0 + sy \cos \theta_0 - y_0), \end{aligned} \quad (5)$$

式中 θ_0, s 和 (x_0, y_0) 分别为旋转角度、缩放因子和相对平移量。对(5)式进行傅里叶变换,得到

$$\begin{aligned} F_1(u, v) = e^{-j2\pi(ux_0 + vy_0)} \frac{1}{s^2} F_2 \times \\ \left[\frac{1}{s}(u \cos \theta_0 + v \sin \theta_0), \frac{1}{s}(-u \sin \theta_0 + v \cos \theta_0) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

设 M_1 和 M_2 为 $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$ 的频谱幅度,有 $M_1(u, v) = M_2 \times$

$$\left[\frac{1}{s}(u \cos \theta_0 + v \sin \theta_0), \frac{1}{s}(-u \sin \theta_0 + v \cos \theta_0) \right], \quad (7)$$

将(7)式中的 (u, v) 坐标变换为极坐标 (ρ, θ) , 它们之间的关系为

$$u = \rho \cos \theta, \quad v = \rho \sin \theta, \quad (8)$$

从(7)式中可得到

$$M_1(\rho, \theta) = \frac{1}{s^2} M_2 \left(\frac{\rho}{|s|}, \theta - \theta_0 \right), \quad (9)$$

频谱幅度是极角 θ 的周期函数,图像也是实函数,即

$$M(\rho, \theta + n\pi) = M(\rho, \theta), \quad (10)$$

其中 $n = L, \dots, -2, -1, 0, +1, +2, \dots, L$, 因此可以只用幅度谱的上半平面 $(0 \leq \theta \leq \pi)$ 来进行后续计算。

将(10)式转化到 Log-Polar 坐标下进行计算得出

$$M_1(\lg \rho, \theta) = M_2(\lg \rho - \lg s, \theta - \theta_0), \quad (11)$$

从(11)式可以看出,通过上述变换,(11)式变换为与(2)式相同的形式,这样就可以在对数-极空间应用相位相关法,按照(4)式求得 $\theta_0, \log s$, 进而也可得到缩放因子 s 。

本文算法中,将当前帧图像 $f_2(x, y)$ 与参考帧图像 $f_1(x, y)$ 相比较,利用(5)~(11)式得出配准参数旋转角度 θ_0 和 s ,然后根据已知的 θ_0 和 s 对图像进行规整,再将规整后的图像(设为 $f'_2(x, y)$)与 $f_1(x, y)$ 再次应用相位相关法,通过(2)~(4)式在图像空间算出 $f'_2(x, y)$ 和 $f_1(x, y)$ 之间的整数像素平移量 x_0 和 y_0 。

3.2 算法第二阶段谱对消亚像素平移参数估计

利用第一阶段得到的旋转参数和平移参数对当

前帧图像 $f_2(x, y)$ 反向旋转和平移,得到图像 $f'_2(x, y)$ 。假定 $f'_2(x, y)$ 在空域相对于参考帧 $f_1(x, y)$ 的亚像素位移量为 $(\Delta x_{sp}, \Delta y_{sp})$,则两幅图像的频域连续谱关系为

$$F_2^c(W_x, W_y) = F_1^c(W_x, W_y) e^{j(\Delta x_{sp} W_x + \Delta y_{sp} W_y)}, \quad (12)$$

上标 c 代表连续谱。将图像分别在 x 方向和 y 方向作 2 次下采样,根据混迭关系,下采样图像谱与连续谱关系为

$$F_i(W_x, W_y) = \frac{1}{4} \left[F_i^c\left(\frac{W_x}{2}, \frac{W_y}{2}\right) + F_i^c\left(\frac{W_x}{2} + \pi, \frac{W_y}{2}\right) + F_i^c\left(\frac{W_x}{2}, \frac{W_y}{2} + \pi\right) + F_i^c\left(\frac{W_x}{2} + \pi, \frac{W_y}{2} + \pi\right) \right], \quad (13)$$

根据(12), (13)式, $f'_2(x, y)$ 下采样和 $f_1(x, y)$ 的谱关系为

$$F_2(W_x, W_y) = \frac{1}{4} F_1^c\left(\frac{W_x}{2}, \frac{W_y}{2}\right) e^{j\left(\frac{\Delta x_{sp} W_x}{2} + \frac{\Delta y_{sp} W_y}{2}\right)} + \frac{1}{4} F_1^c\left(\frac{W_x}{2} + \pi, \frac{W_y}{2}\right) e^{j\left[\Delta x_{sp} \left(\frac{W_x}{2} + \pi\right) + \Delta y_{sp} \frac{W_y}{2}\right]} + \frac{1}{4} F_1^c\left(\frac{W_x}{2}, \frac{W_y}{2} + \pi\right) e^{j\left[\Delta x_{sp} \frac{W_x}{2} + \Delta y_{sp} \left(\frac{W_y}{2} + \pi\right)\right]} + \frac{1}{4} F_1^c\left(\frac{W_x}{2} + \pi, \frac{W_y}{2} + \pi\right) e^{j\left[\Delta x_{sp} \left(\frac{W_x}{2} + \pi\right) + \Delta y_{sp} \left(\frac{W_y}{2} + \pi\right)\right]}, \quad (14)$$

假设参考帧 $f_1(x, y)$ 在下采样后移动 $(\delta_x/2, \delta_y/2)$, 则位移后图像的傅里叶变换为

$$\hat{F}_1(W_x, W_y) = \frac{1}{4} \left[F_1^c\left(\frac{W_x}{2}, \frac{W_y}{2}\right) + F_1^c\left(\frac{W_x}{2} + \pi, \frac{W_y}{2}\right) + F_1^c\left(\frac{W_x}{2}, \frac{W_y}{2} + \pi\right) + F_1^c\left(\frac{W_x}{2} + \pi, \frac{W_y}{2} + \pi\right) \right] e^{j\left(\frac{\delta_x W_x}{2} + \frac{\delta_y W_y}{2}\right)}, \quad (15)$$

(14)式减去(15)式,得到差分谱为

$$F_2(W_x, W_y) - \hat{F}_1(W_x, W_y) = \frac{1}{4} F_1^c\left(\frac{W_x}{2}, \frac{W_y}{2}\right) \left[e^{j\left(\frac{\Delta x_{sp} W_x}{2} + \frac{\Delta y_{sp} W_y}{2}\right)} - e^{j\left(\frac{\delta_x W_x}{2} + \frac{\delta_y W_y}{2}\right)} \right] + \frac{1}{4} F_1^c\left(\frac{W_x}{2} + \pi, \frac{W_y}{2}\right) \left\{ e^{j\left[\Delta x_{sp} \left(\frac{W_x}{2} + \pi\right) + \frac{\Delta y_{sp} W_y}{2}\right]} - e^{j\left(\frac{\delta_x W_x}{2} + \frac{\delta_y W_y}{2}\right)} \right\} + \frac{1}{4} F_1^c\left(\frac{W_x}{2}, \frac{W_y}{2} + \pi\right) \left\{ e^{j\left[\frac{\Delta x_{sp} W_x}{2} + \Delta y_{sp} \left(\frac{W_y}{2} + \pi\right)\right]} - e^{j\left(\frac{\delta_x W_x}{2} + \frac{\delta_y W_y}{2}\right)} \right\} + \frac{1}{4} F_1^c\left(\frac{W_x}{2} + \pi, \frac{W_y}{2} + \pi\right) \left\{ e^{j\left[\Delta x_{sp} \left(\frac{W_x}{2} + \pi\right) + \Delta y_{sp} \left(\frac{W_y}{2} + \pi\right)\right]} - e^{j\left(\frac{\delta_x W_x}{2} + \frac{\delta_y W_y}{2}\right)} \right\}. \quad (16)$$

如果 $\delta_x = \Delta x_{sp}, \delta_y = \Delta y_{sp}$, 则差谱低频部分完全消除。因此可以选定某个误差函数作为差谱低频分量完全消除的判定函数。本文算法选择频谱低通区域内的谱值误差函数为判定函数

$$E = \sum_{W_x} \sum_{W_y} \| F_2(W_x, W_y) - \hat{F}_1(W_x, W_y) \|^2, \quad (17)$$

这里 $(W_x, W_y) \in$ 频谱低通区域。当 E 值达到最小值时, $f_1(x, y)$ 的下采样图像的位移量满足 $\delta_x = \Delta x_{sp}, \delta_y = \Delta y_{sp}$ 。

4 自适应均值滤波法及运动补偿

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。之后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^[8]。本文采用低通均值滤波的思想对上节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可知尺度缩放因子 s 基本上保持不变为 1,可以忽略其影响,只对旋转角度和平移参数进行滤波。

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^[9,10],则第 i 帧图像的变换参数可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta X_i &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_{i-[n-(n+1/2)]} - X_i, \\ \Delta Y_i &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Y_{i-[n-(n+1/2)]} - Y_i, \\ \Delta \Theta_i &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Theta_{i-[n-(n+1/2)]} - \Theta_i, \end{aligned} \quad (18)$$

式中 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 N 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,会出现欠稳现象。

确定各帧图像的补偿参数后,代入其模型(1)式,就可以根据一个点的坐标求其仿射变换后的坐标。本文通过对当前图像进行反向旋转和反向平移来达到补偿的目的。

5 实验结果分析

选 100 帧分辨率为 $352 \text{ pixel} \times 288 \text{ pixel}$ 的连续图像,在计算机上利用 Matlab 软件编程进行仿真。图 1 为稳定前的图像序列,(a)~(c)分别取自实际拍摄的图像序列中的第 30,40,50 帧图像,由于摄像机的运动导致每一帧图像不重合,使图像产生很大的晃动。图 1(b)相对于图 1(a)旋转了 1.8° ,向右平移了 2 pixel,向下平移了 1 pixel。经亚像素调整后的结果为:向右平移了 2.25 pixel,向下平移了 1.50 pixel。图 1(c)相对图 1(a)旋转了 2.3° ,向右平移了 7 pixel,向上平移了 5 pixel。经亚像素调整后的结果:向左平移了 7.25 pixel,向上平移了 4.75 pixel。图 2 为稳定图像后的图像序列,图 2 中边框处的黑色空白部分为校正后的补偿区。比较图 1 和图 2 可以看出,算法很好地去除了旋转和平移波动,取得了理想的稳定效果且达到了亚像素精度。

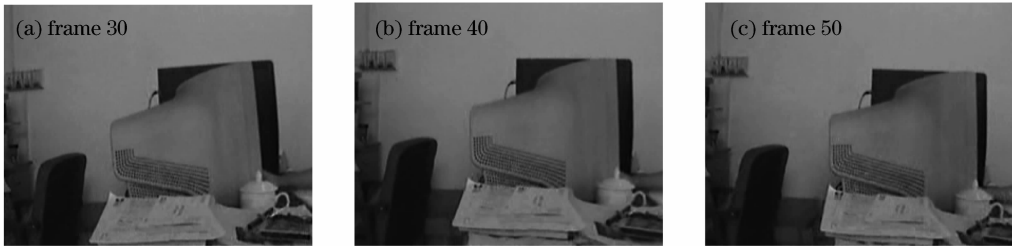


图 1 原始视频序列

Fig. 1 Original video image sequence

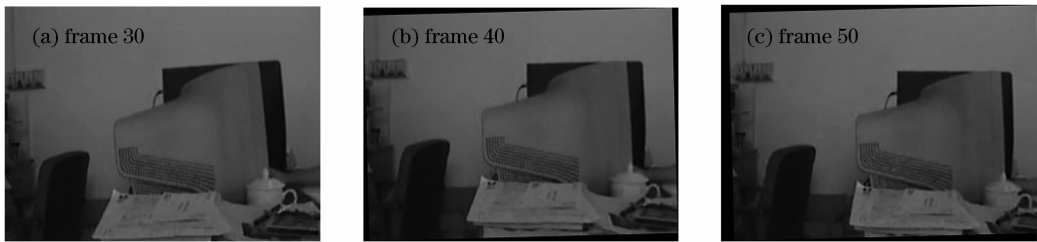


图 2 稳像后的实验结果

Fig. 2 Experimental results of stabilization algorithm

4 结 论

提出一种新颖的两阶段数字稳像算法,能够以亚像素精度稳定抖动图像序列。这种层次稳像方法包含粗稳和精配准两个阶段。粗稳阶段在对数极坐标下,利用相位相关法得到图像帧间的旋转角度和整数像素平移参数;精配准阶段利用谱对消技术实现了亚像素精度的平移参数估计。计算机仿真验证了算法的有效性和稳健性。运动补偿部分基于自适应均值滤波技术,数据存储量小。如采用运算能力

强大的专用硬件可以实现实时稳像,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 S. B. Balakirsky, R. Chellappa. Performance characterization of image stabilization algorithms [J]. *Real-Time Imaging*, 1996, 2 (5):297~313
- 2 Loh Kok Heng, Er Meng Hwa, Hui Siew Kok. High accuracy registration of translated and rotated images using hierarchical method [C]. 2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speed, and Signal Processing, 2000. 2211~2214
- 3 C. Morimoto, R. Chellappa. Fast electronic digital image

- stabilization for off-road navigation [J]. *Real-Time Imaging*, 1996, **5**(2):285~296
- 4 P. Zhong, Q. Yu, G. Jin. Motion estimation and motion compensation based on matching technology of feature point [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(1):73~77
钟 平,于前洋,金 光. 基于特征点匹配技术的运动估计及补偿方法[J]. *光电子 • 激光*, 2004, **15**(1):73~77
- 5 Zhu Juanjuan, Guo Baolong. Electronic image stabilization system based on global feature tracking [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2008, **19**(2):228~233
- 6 A. Verbuch, Y. Keller. FFT based image registration [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2002. 3608~3611
- 7 Q. Chen, M. Dfrise, F. Deconinck. 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
- 8 D. C. V. Pao, H. F. Li, R. Jayakumar. Shapes recognition using the straight line Hough transform: Theory and generalization [J]. *IEEE PAMI*, 1992, **14**(11):1076~1089
- 9 M. K. Gullu, S. Erturk. Membership function adaptive fuzzy filter for image sequence stabilization [J]. *IEEE Transon Consumer Electronics*, 2004, **50**(1):1~7
- 10 Y. Matsushita, E. Ofek, X. Tang *et al.*. Full-frame video stabilization [J]. *IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, **1**:50~57