

# 基于单象限 Fourier-Mellin 域相位相关的快速稳像算法

王志民 徐晓刚

(海军大连舰艇学院装备系统与自动化系, 大连 116018)

**摘要** 针对电子稳像实时性和鲁棒性的要求, 提出了一种快速的单象限 Fourier-Mellin 域相位相关的近似运动估计算法, 即首先根据 Fourier 变换振幅谱的对称性和空间域图像块匹配的思想, 提出了一种新颖的单象限 Fourier-Mellin 变换方法, 即在频率域中采用单象限振幅谱进行对数极坐标变换; 然后结合相位相关技术估算帧间运动参数。与基于标准 Fourier-Mellin 变换的算法相比, 在保证精度的前提下, 新算法可大幅度降低算法的计算复杂度。实验结果表明, 该新算法的运行速度比标准算法提高了约 75%, 且精度略有提高。

**关键词** 电子稳像 单象限 Fourier-Mellin 变换 相位相关 近似运动

中图法分类号: TN941.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)09-1790-06

## Fast Electronic Image Stabilization Based on Phase Correlation in Single-quadrant Fourier-Mellin Domain

WANG Zhi-min, XU Xiao-gang

(Department of Equipment System & Automatization, Dalian Naval Academy, Dalian 116018)

**Abstract** To realize fast and robust electronic image stabilization, an algorithm using phase correlation in single-quadrant Fourier-Mellin domain to estimate similarity motion parameters is presented. First, according to the property of origin symmetry of the Fourier magnitude spectrum and the idea of image block matching in spatial domain, a novel method of single-quadrant Fourier-Mellin transformation (SQFMT) is proposed, which applies log-polar transformation in frequency domain to map the single-quadrant magnitude spectra from Cartesian coordinate space to log-polar one. The similarity transformation parameters are estimated using SQFMT combined with phase correlation method. In contrast to the approach based on the standard Fourier-Mellin transformation (FMT), our algorithm yields an effective solution in computational performance, and achieving consistent accuracy. The experimental results show that our algorithm can achieve a reduction of 75% run time on average, with a small accuracy increases compared with standard method.

**Keywords** electronic image stabilization, SQFMT, phase correlation, similarity motion

## 1 引言

电子稳像技术是一种重要的视频增强技术, 它是通过数字图像处理和电子技术的方法来直接确定图像序列的帧间变换关系, 并进行补偿, 进而实现视

频序列的稳定。典型的电子稳像过程主要包括运动估计、运动平滑和图像变换 3 个基本环节。其中全局运动估计是稳像至关重要的环节, 算法必须满足运算速度快、精度较高及鲁棒性好等要求。全局运动估计算法大致可分为空间域法和频域法两类。

空间域法包括基本的块匹配法<sup>[1]</sup>、代表点<sup>[2-3]</sup>

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(20062191); 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放基金项目(A0906)

收稿日期: 2008-03-17; 改回日期: 2008-06-12

第一作者简介: 王志民(1983 ~ ), 男, 海军大连舰艇学院硕士研究生。主要研究方向为电子稳像、图像处理。E-mail: zhiminn\_wang@

块匹配算法、位平面<sup>[4]</sup>和灰度编码位平面<sup>[5]</sup>匹配法,以及基于像素灰度信息的灰度投影算法<sup>[6]</sup>,但这些算法仅适用于2维平移运动估计。另外还有特征跟踪法<sup>[7-8]</sup>,该方法不仅符合人类的视觉特性,且对在不同场景中的应用有更好的适应性,同时其不仅能有效地实现帧间平移运动的补偿,而且对于旋转和缩放运动估计,效果也较理想;然而,提取稳定的特征、剔除前景和遮挡区域中的不可靠特征,以及对新特征和隐没特征进行处理,都存在较大的难度。

频域相位相关算法<sup>[9-11]</sup>应用广泛,是一种基于 Fourier 变换平移特性的高效运动估计技术。该方法不仅对光照亮度变化不敏感,而且对噪声有较高的容忍度,可用于估计大的平移运动,且获得的相关曲面峰尖突出、信噪比高,具有一定的鲁棒性和较高的估算精度<sup>[12]</sup>。其主要缺点是不能计算图像帧间的旋转和缩放运动。

Erturk 提出了一种基于 Fourier-Mellin 变换(FMT)的用于估计图像序列旋转-缩放-平移参数的电子稳像方法<sup>[13]</sup>。该算法能够估计大的旋转和位移运动,以及一定程度的缩放运动。但由于该算法的实现过程需用到多次 Fourier 变换和反变换,计算量较大,因此难于实时处理;另外,由于估算的旋转角度分辨率有限,从而影响了算法的精确性。Martinez-de Dios 等人采用 Cooley Tukey 提出的快速 Fourier 变换(FFT)算法<sup>[14]</sup>,减小了计算量。它是通过采用不同尺度的振幅谱图像及其极坐标空间图像进行变换,可在一定程度上提高算法的精确性和鲁棒性。但该算法并没有从本质上解决旋转角度分辨率大的问题,其在减小计算量的同时,也增加了复杂性。针对电子稳像的实时性和鲁棒性要求,本文提出了一种单象限 Fourier-Mellin 域相位相关的近似运动估计算法(SQFMT),并首先根据 Fourier 变换振幅谱的对称性和空间域图像块匹配的思想,提出了新颖的单象限 Fourier-Mellin 变换方法,即在频域中实现单象限 Fourier 幅度谱从笛卡尔坐标空间到对数极坐标空间的映射,并结合相位相关技术估算帧间近似运动参数。与基于标准 Fourier-Mellin 变换的算法相比,本文算法在保证精度的前提下,可大幅度降低计算复杂度和减少运算量。实验结果表明,本文算法可用于帧率为 15fps 的抖动视频的实时稳像处理。

## 2 Fourier-Mellin 域相位相关

Fourier-Mellin 域相位相关算法是一种基于 Fourier-Mellin 变换旋转-缩放不变性和 Fourier 变换位移理论的运动估计算法。对于满足近似变换的两帧图像,该算法先通过 Fourier-Mellin 变换将图像间的旋转和缩放分别转换为 Fourier-Mellin 域中的极角和极径的位移,然后利用估算出的旋转和比例参数对当前帧图像进行反向矫正后,即可利用相位相关算法求解图像间的平移参数。

### 2.1 Fourier-Mellin 变换

给定相邻两帧图像  $f_{\text{ref}}(x, y)$  和  $f_{\text{cur}}(x, y)$ , 假设图像的帧间变换满足以下近似变换关系:

$$f_{\text{cur}}(x, y) = f_{\text{ref}}(s \cdot (x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0) - \Delta x, s \cdot (-x \sin \theta_0 + y \cos \theta_0) - \Delta y) \quad (1)$$

式中,  $(\Delta x, \Delta y)^T$  为平移量,  $\theta_0$  为帧间旋转角度;  $s$  为缩放因子, 下标 cur 表示当前, ref 表示参考。

等式两边经 Fourier 变换并取模值后, 图像幅度谱之间的变换关系仅与图像间的旋转角度和缩放因子有关, 而与平移无关, 称之为 Fourier 变换的旋转-缩放不变性。若将两帧图像的幅度谱分别从笛卡尔坐标空间映射到对数极坐标空间, 则可得以下 Fourier-Mellin 变换式:

$$I_{\text{cur}}(\rho, \theta) = \frac{1}{s} I_{\text{ref}}(\rho - \rho_0, \theta - \theta_0) \quad (2)$$

式中,  $\rho_0 = \ln s$ ,  $(\rho, \theta)$  为幅度谱图像在对数极坐标空间的坐标。由式(2)可知, 图像的旋转变换被映射到极角轴上的平移, 缩放变换被映射到极径上的平移。如果在 Fourier-Mellin 域中应用相位相关算法求解  $\rho_0$  和  $\theta_0$ , 那么便可求得缩放因子  $s = e^{\rho_0}$  和旋转角度  $\theta_0$ 。

### 2.2 相位相关

设  $f_{\text{cur}}(x, y)$  为  $f_{\text{ref}}(x, y)$  平移  $(\Delta x, \Delta y)$  后得到的图像。根据 2 维 Fourier 变换的平移性质可得  $f_{\text{ref}}(x, y)$ ,  $f_{\text{cur}}(x, y)$  的互功率谱为

$$\frac{F_{\text{ref}}(u, v) F_{\text{cur}}^*(u, v)}{|F_{\text{ref}}(u, v) F_{\text{cur}}^*(u, v)|} = e^{j(u\Delta x + v\Delta y)} \quad (3)$$

式中,  $F_{\text{cur}}^*(u, v)$  为  $F_{\text{cur}}(u, v)$  的复共轭,  $F_{\text{ref}}(u, v)$  和  $F_{\text{cur}}(u, v)$  分别对应于  $f_{\text{ref}}(x, y)$  和  $f_{\text{cur}}(x, y)$  的 Fourier 变换。  $e^{j(u\Delta x + v\Delta y)}$  的 Fourier 反变换为 2 维脉冲信号  $\delta(x - \Delta x, y - \Delta y)$ , 脉冲信号的峰值位置即为两幅图像间的相对平移向量  $(\Delta x, \Delta y)$ 。

### 2.3 Fourier-Mellin 域相位相关算法的不足

在 Fourier-Mellin 域相位相关算法的实现过程中用到多次 Fourier 变换和反变换,为保证一定的检测精度,变换图像的尺度需较大,尽管 FFT 在高效硬件<sup>[15]</sup>和软件<sup>[16]</sup>的实现上取得了重大突破,但整幅图像和全域 Fourier 幅度谱极坐标在变换后,再计算 FFT 的代价都较大,仍不能满足频域全局运动估计算法的实时应用,难于实现实时稳像处理;另外,由于估算的旋转角度的分辨率有限,从而影响了算法的精确性。

Fourier-Mellin 变换过程中,幅度谱(内切圆)由笛卡儿坐标空间到对数极坐标空间的映射关系如图 1 所示。假设映射前的幅度谱图像  $F(u, v)$  的尺度为  $\tilde{M} \times \tilde{N}$ ;映射后图像  $I(\rho, \theta)$  的尺度为  $M \times N$ ,若将  $\rho$  轴和  $\theta$  轴的分辨率记作  $\delta_\rho \times \delta_\theta$ ,则有  $\delta_\rho = N/\ln(\min(\tilde{M}/2, \tilde{N}/2))$ ,  $\delta_\theta = M/360^\circ$ 。

现以  $\tilde{M} \times \tilde{N} = 256 \times 256$  和  $M \times N = 256 \times 128$  为例,则有  $\delta_\rho = 128/\ln(128) = 26.4$ ,  $\delta_\theta = 256/360^\circ = 0.71$ ,相对应的最小可检测精度分别为:极径采样间隔  $\Delta\rho = \delta_\rho^{-1} = 0.04$ ,旋转角度采样间隔  $\Delta\theta = \delta_\theta^{-1} = 1.41^\circ$ 。

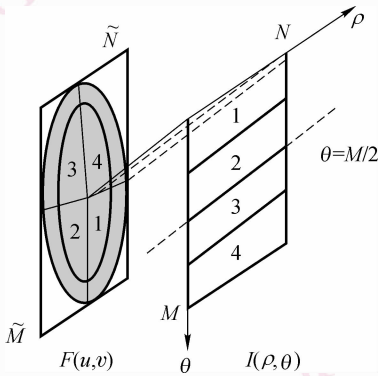


图 1 幅度谱的空间映射关系

Fig. 1 Spatial mapping of magnitude spectra in FMT

一般而言,极径  $\rho$  的分辨率能够满足算法对缩放比例估算精度的需求,且其采样间隔不宜太小,因为在坐标变换过程中采用了对数运算,故使得变换后图像的能量过度集中于幅度谱的低频分量,而对数极坐标变换过程中又引入了插值误差,该误差大小取决于采样间隔大小及选取的插值方法。对于极角  $\theta$  而言,若其采样间隔越小(即  $M$  增大),则极角轴分辨率越高,旋转角度的估计精度也越高,但会降低计算速度<sup>[17]</sup>。可见,该算法的精度及计算速度主

要受到幅度谱图像由笛卡儿坐标到极坐标的映射误差的影响。

基于以上分析,本文提出了一种基于单象限 Fourier-Mellin 域相位相关的运动估计算法。

## 3 本文算法

### 3.1 单象限 Fourier-Mellin 变换

由 2 维 Fourier 变换的性质可知,2 维实函数的幅度谱关于原点对称<sup>[18]</sup>,其可表示为

$$|F(u, v)| = |F(-u, -v)| \quad (4)$$

如图 1 所示,对于参考帧图像  $f_{\text{ref}}(x, y)$ ,其幅度谱的第 1 和第 3、第 2 和第 4 象限分别关于原点对称,该性质在极坐标空间中表现为

$$I_{\text{ref}}(\rho, \theta) = I_{\text{rdef}}(\rho, \theta) + I_{\text{rdef}}(\rho, \theta - M/2) \quad (5)$$

式中,  $I_{\text{ref}}(\rho, \theta)$  表示  $f_{\text{ref}}(x, y)$  经 Fourier-Mellin 变换后得到的图像,则  $I_{\text{rdef}}(\rho, \theta)$  定义为

$$I_{\text{rdef}}(\rho, \theta) = \begin{cases} I_{\text{ref}}(\rho, \theta) & 0 \leq \theta < M/2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式(5)两边经 Fourier 变换后,得到的  $I_{\text{ref}}(\rho, \theta)$  和  $I_{\text{rdef}}(\rho, \theta)$  的 Fourier 幅度谱的关系表达式如下:

$$FI_{\text{ref}}(u, v) = 2FI_{\text{rdef}}(u, v) \quad (7)$$

对于当前帧图像  $f_{\text{cur}}(x, y)$ ,同样可以得到

$$FI_{\text{cur}}(u, v) = 2FI_{\text{cdef}}(u, v) \quad (8)$$

结合式(2),将式(7)和式(8)代入式(3)可得

$$\frac{FI_{\text{ref}}(u, v)FI_{\text{cur}}^*(u, v)}{|FI_{\text{ref}}(u, v)FI_{\text{cur}}^*(u, v)|} = \frac{FI_{\text{rdef}}(u, v)FI_{\text{cdef}}^*(u, v)}{|FI_{\text{rdef}}(u, v)FI_{\text{cdef}}^*(u, v)|} = e^{j(u\rho_0 + v\theta_0)} \quad (9)$$

由式(9)可知,由于利用幅度谱的整体频率信息与对称局部频率信息(第 1 和第 2 象限)进行相位相关计算时,能够得到一致性相位相关曲面的相关值分布规律,因此,仅利用幅度谱的第 1 和第 2 象限同样可估算帧间的缩放和旋转运动参数。

为进一步提高运算速度,本文将空间域图像局部块匹配的思想应用在频域中,提出了一种新颖的单象限 Fourier-Mellin 变换的方法,即在频域中实现单象限(取第 1 象限)的 Fourier 幅度谱从笛卡儿坐标空间到对数极坐标空间的映射。单象限 Fourier-Mellin 变换的实现过程如图 2 所示。



图2 单象限 Fourier-Mellin 变换

Fig. 2 Single-quadrant Fourier-Mellin transformation

### 3.2 单象限 Fourier-Mellin 域相位相关算法实现

本文采用单象限 Fourier-Mellin 变换方法和相位相关技术,提出了一种新颖的运动估计算法,即单象限 Fourier-Mellin 域相位相关算法,该算法的实现步骤如下:

- (1)对参考帧与当前帧图像进行下采样,以减小计算复杂度,下采样因子取为4;
- (2)采样后的图像分别进行单象限 Fourier-Mellin 变换;
- (3)采用相位相关法计算旋转角度和缩放因子;
- (4)利用估算出的旋转角度和缩放因子对当前帧图像进行反向矫正;
- (5)参考帧和矫正后的当前帧图像中,选取对应的模板,以避免在平移估计过程中,因引入反向矫正而出现的空白区域;
- (6)采用亚像素相位相关法估算帧间平移参数。

### 3.3 算法计算量分析

完成一次缩放和旋转参数估计,需计算两帧图像的各两次 FFT 和反 FFT,以及一次对数极坐标计算。计算时,以一次乘法/加法运算作为一个运算单位,假设进行 FFT 计算的图像大小为  $M \times N$ ,则一次 FFT 或一次反 FFT 的计算量为  $MN \text{lb}(MN)$ 。采用标准的算法,计算量为  $4 \left( \tilde{M} \tilde{N} \text{lb} \left( \frac{\tilde{M} \tilde{N}}{2} \right) + MN \text{lb}(MN) \right)$ 。

采用本文提出的算法,在保持相同检测精度的同时,  $I(\rho, \theta)$  的尺度由原来的  $M \times N$  减小为  $M/4 \times N$ ,进行下采样后  $F(u, v)$  的尺度由  $\tilde{M} \times \tilde{N}$  变为  $\tilde{M}/2 \times \tilde{N}/2$ ,则算法的计算量降为

$$4 \left( \frac{\tilde{M} \tilde{N}}{2} \text{lb} \left( \frac{\tilde{M} \tilde{N}}{2} \right) + \frac{M}{4} N \text{lb} \left( \frac{M}{4} N \right) \right) = \left( \tilde{M} \tilde{N} \text{lb} \right.$$

$$\left. \left( \tilde{M} \tilde{N} \right) + MN \text{lb}(MN) \right) - 2 \left( \tilde{M} \tilde{N} + MN \right)。$$

由此可见,本文算法中的对数极坐标变换的计算量明显小于标准算法,在这里忽略不考虑。

## 4 实验分析

为评价本文算法的性能,首先将其与标准 Fourier-Mellin 域相位相关算法进行两帧图像运动估计的比较实验,并将本文算法应用于抖动视频的稳像处理。本实验在 P42.4 主频、DDR512M 内存、Windows 操作系统环境下进行,使用 Matlab7.0 实现算法仿真测试。

实验时,首先采用本文算法和标准算法对一组人工图像(两帧)进行仿真稳像处理实验。图3(a)为  $256 \times 256$  大小的灰度图像,可将其作为参考帧图像;图3(b)为图3(a)经近似变换(已知参数的旋转、缩放和平移,见表1)后的图像,作为当前帧。图3(c)和图3(d)分别为采用标准算法和本文算法估算出运动参数,再经运动补偿后的帧间差分二值图像(阈值取20)。表1给出了仿真实验结果。本文采用峰值信噪比(PSNR)作为评价运动估计算法和稳像处理结果准确度的品质因子<sup>[19]</sup>。实验结果表明,本文算法在保证(或有一定程度的提高)算法精确性的前提下,大幅度提高了算法的计算速度,运动时间由标准算法的516ms降低至125ms。



(a) Lena 灰度图像 (b) 近似变换后的图像 (c) 标准算法的帧间差分二值图 (d) 本文算法的帧间差分二值图

图3 帧间图像实验比较

Fig. 3 Comparison of experiment on interframe images

表1 帧间运动估计实验结果对照表

Tab. 1 Comparison of experimental result from interframe motion estimation

算法	缩放因子	旋转角度(°)	垂直分量(pixels)	水平分量(pixels)	评价因子	
					PSNR 值(dB)	运行时间(ms)
SQFMT	1.387	6.328	-7.21	-5.52	34.19	125
FMT	1.387	7.03	-7.31	-5.60	31.46	516
实际值	1.38	6.5	-7.2	-5.5	12.83	—

在本文的视频稳像实验中,选取了室内的、室外的、真实的和人工合成的多组视频序列。3 组抖动视频序列的实验结果及分析分别如图 4、图 5 和图 6 所示。表 2 给出了各视频序列分别采用 SQFMT 和 FMT 算法的平均运算速度和 PSNR 均值的实验对照。由图 4、图 5、图 6 和表 2 的仿真结果可以看出,本文算法在保证相同精确性(由实验可知,有一定的提高)的同时,算法的运算速度约为标准算法的四分之一,在帧率为 15 fps 左右的抖动视频的实时稳像处理中具有明显的优势。

仔细观察图 4(c)、图 5(c) 和图 6(c) 可见,用 FMT 算法稳像处理后图像的 PSNR 值存在明显的低值波谷,这是由于旋转角度分辨率不足,使得映射误差增大,算法不能准确估算运动参数,从而造成算法的鲁棒性下降的缘故;而采用本文算法则以上现象可得到明显改善,可见本文算法鲁棒性较好。实验中还发现,当极角和极径的采样间隔比例关系满足  $\Delta\rho \cdot \Delta\theta \in (0.023 \sim 0.046)$  时,则基本可实现旋转-缩放分辨率和极坐标映射误差影响相互制约的平衡关系,此时算法具有更强的鲁棒性。

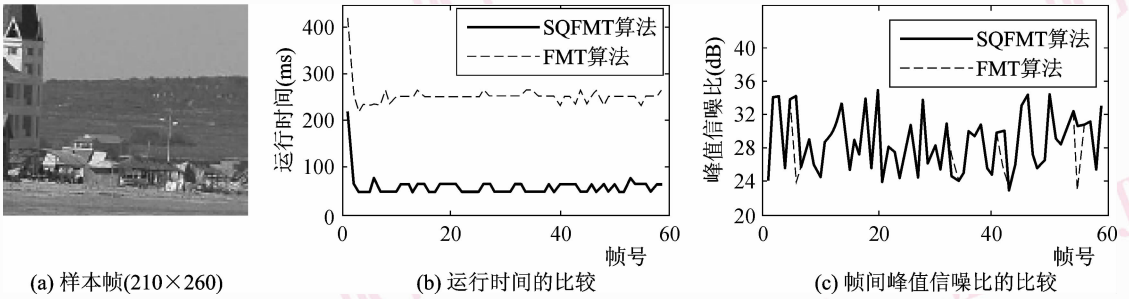


图 4 Perspective 视频序列样本帧及实验结果

Fig. 4 Sample frames and experimental result from perspective sequences

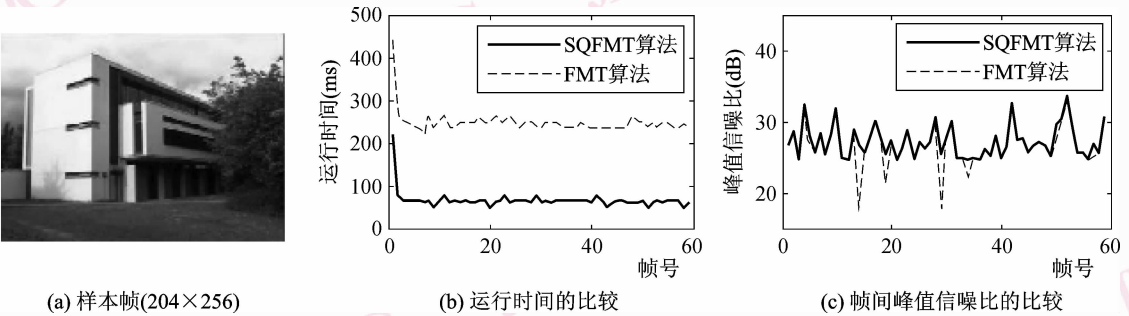


图 5 Building 视频序列样本帧及实验结果

Fig. 5 Sample frames and experimental result from building sequences

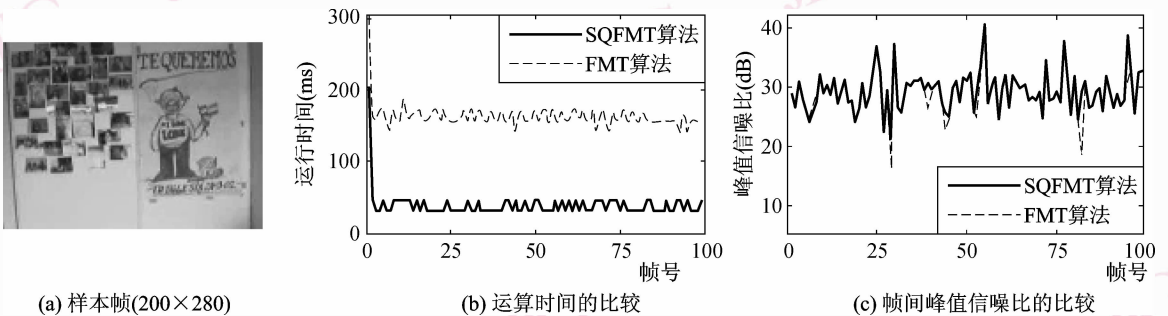


图 6 Room 视频序列样本帧及实验结果

Fig. 6 Sample frames and experimental result from Room sequences

表2 抖动视频序列实验结果对照表

Tab.2 Comparison of experimental result from jitter video sequence stabilization

算法	Perspective(210 × 260)		Building(204 × 256)		Room(200 × 280)	
	平均耗时(ms)	PSNR 均值(dB)	平均耗时(ms)	PSNR 均值(dB)	平均耗时(ms)	PSNR 均值(dB)
SQFMT	58	28.8	60	27.2	39	29.3
FMT	252	28.4	225	26.6	163	29.0

## 5 结论

针对电子稳像实时性和鲁棒性的要求,本文提出了一种新颖的快速单象限 Fourier-Mellin 域相位相关的近似运动估计算法。大量的计算机仿真实验表明,采用基于单象限 Fourier-Mellin 变换进行计算,不仅可极大地减少稳像算法的运算量,同时可保证或在一定程度上提高运动估计的精度,这就大大提高了算法的整体性能。该算法不仅能够更准确地估计旋转和缩放运动,而且其稳像精度达到了亚像素级,可用于帧率为 15 fps、帧间满足近似变换关系的视频的稳像处理,但对于具有仿射变换的视频序列仍是不适宜的。如何将算法进行扩展,以提高算法的应用范围将是下一步的工作重点。

## 参考文献 (References)

- Uomori K, Morimura A, Ishu H, *et al.* Automatic image stabilizing system by full-digital signal processing [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1990, **36**(3): 510-519.
- Joon K P, Yong C P, Dong W K. An adaptive motion decision system for digital image stabilizer based on edge pattern matching [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronic, 2002, **36**(3): 607-616.
- Hsu S C, Liang S F, Fan K W, *et al.* A robust in-car digital image stabilization technique [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 2007, **37**(2): 234-247.
- Ko Sung-jea, Lee Sung-hee, Lee Kyung-hoon. Digital image stabilizing algorithms based on bit-plane matching [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1998, **44**(3): 617-622.
- Ko S, Lee S, Jeon S, *et al.* Fast digital image stabilizer based on gray-coded bit-plane matching [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1999, **45**(3): 598-603.
- Li Bo, Wang Xiao-tong, Yang Chang-qing, *et al.* Three-point locally adaptive searching in gray scale projection algorithm for electronic image stabilization [J]. Opto-electronic Engineering, 2004, **31**(9): 69-72. [李博,王孝通,杨常青等. 电子稳像的灰度投影三点局域自适应搜索算法[J]. 光电工程, 2004, **31**(9): 69-72.]
- Morimoto C, Chellappa R. Fast electronic digital image stabilization [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Pattern Recognition [C], Vienna, Austria, 1996: 284-288.

- Zhu Juan-juan, Guo Bao-long. Features tracking algorithm for video stabilization [J]. Acta Optica Sinica, 2006, **26**(4): 516-521. [朱娟娟,郭宝龙. 电子稳像的特征点跟踪算法[J]. 光学学报, 2006, **26**(4): 516-521.]
- Erturk S, Dennis T J. Image sequence stabilization based on DFT filtering [J]. IEEE Transactions on Vision Image and Signal Processing, 2000, **147**(2): 95-102.
- Erturk S. Digital image stabilization with sub-Image phase correlation based global motion estimation [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, **49**(4): 1320-1325.
- Kwon O, Shin J, Paik J. Edge based adaptive kalman filtering for real time video stabilization [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Consumer Electronics [C], San Diego, California, USA, 2006: 75-76.
- Argyriou V, Vlachos T. A study of sub-pixel motion estimation using phase correlation [A]. In: Proceedings of British Machine Vision Conference [C], Edinburgh, Scotland, 2006, **I**: 387-392.
- Erturk S. Translation, rotation and scale stabilization of image sequences [J]. Electronic Letters, 2003, **39**(17): 1245-1246.
- Martinez-de Dios J R, Ollero A. A real-time image stabilization system based on Fourier-Mellin transform [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2004, **32**(11): 376-383.
- Despain A M. Very fast Fourier transform algorithms hardware for implementation [J]. IEEE Transactions on Computers, 1997, **28**(5): 452-452.
- Yuan Liang. Software implementation of high performance FFT on PC [J]. Mini-Micro Systems, 2000, **21**(5): 553-556. [原亮. 通用微机环境下高效 FFT 的软件实现研究[J]. 小型微型计算机系统, 2000, **21**(5): 553-556.]
- Xing Hui, Yan Jing-long, Zhang Shu-jiang. Digital image stabilization algorithm based on phase correlation [J]. Opto-Electronic Engineerin, 2007, **34**(3): 37-40. [邢慧,颜景龙,张树江. 基于相位相关的数字稳像算法研究[J]. 光电工程, 2007, **34**(3): 37-40.]
- Gonzalez R C, Woods R E (Ruan Qiu-qi, *et al.* Translate). Digital Image Processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. [R. C. Gonzalez, R. E. Woods 著. (阮秋琦, 宇智等译). 数字图像处理(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.]
- Balakirsky S B, Chellappa R. Performance characterization of image stabilization algorithms [A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing [C], Lausanne, Switzerland, 1996: 413-416.