

快速高精度 Fourier-Mellin 变换图像配准方法

袁恒, 柏财勋, 许逸轩, 刘杰, 李建欣*

南京理工大学工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 提出一种快速高精度 Fourier-Mellin 变换图像配准方法, 可提高高光谱成像过程中光谱复原的速度与精度。该方法运用两次局部上采样相位相关法, 一次在对数极坐标域中估计旋转和缩放参数, 另一次在笛卡尔坐标系中估计平移参数。引入梯度预处理过程, 使算法更加稳健。介绍了 Fourier-Mellin 变换的原理, 该变换可实现旋转和缩放参数的解耦合。在传统相位相关法的基础上介绍了局部上采样相位相关法。证明了梯度预处理过程的必要性。仿真结果表明, 所提方法可以实现高精度的图像配准。

关键词 光谱学; 亚像素图像配准; Fourier-Mellin 变换; 高光谱成像; 光谱复原

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.083001

Fast and High Precision Image Registration Algorithm Based on Fourier-Mellin Transform

Yuan Heng, Bai Caixun, Xu Yixuan, Liu Jie, Li Jianxin*

*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China*

Abstract A fast and high precision imaging registration method is presented, which can be used to improve the speed and accuracy of spectral recovery in a hyperspectral imaging process. In this method, two local upsampling phase correlation methods are adopted. One is to estimate the rotation and scaling parameters in a log-polar space, and the other is to estimate the translation parameters in a Cartesian space. A gradient preprocessing process is introduced to make the method more robust. The principle of Fourier-Mellin transform is introduced and this transform can decouple the rotation and scaling parameters. Based on the traditional phase correlation method, the local upsampling phase correlation method is introduced. The necessity of the gradient preprocessing process is verified. The simulation results show that the proposed method can be used to achieve high precision image registration.

Key words spectroscopy; subpixel image registration; Fourier-Mellin transform; hyperspectral imaging; spectral recovery

OCIS codes 300.6170; 100.4145; 300.6190

1 引言

时空联合调制型干涉成像光谱仪通过系统整体推扫来获取目标场景的空间信息和光谱信息, 在整体推扫过程中系统采集到的干涉图像序列具有干涉条纹位置不变的特点, 目标像会跟随推扫过程产生偏移^[1-2]。光谱复原时需要准确地提取同一空间物点在不同图像中的干涉光强信号, 故需高精度的图

像配准。通常情况下, 干涉图像序列具有近千张图像, 大量的图像配准对配准算法的运算效率要求较高, 因此需要一种快速、高精度的图像配准方法。

高精度图像配准采用的方法主要有: 基于插值的方法、解最优化问题法和扩展的相位相关法^[3]。基于插值的方法可分为相似性函数内插法^[4]和图像灰度内插法^[5], 内插方法的优点是精度高, 缺点是计算量大, 且依赖内插算法质量。解最优化问题法主

收稿日期: 2018-10-31; 修回日期: 2018-11-09; 录用日期: 2018-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(61475072)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX18_0399)

* E-mail: ljx@vip.163.com

要分为梯度法^[6]和互信息法^[7-8],都需要先定义衡量两幅图像相似程度的目标函数,再求取最优解,这种方法精度很高,但是搜索量非常大,不易找到全局最优解。扩展的相位相关法^[9]利用傅里叶(Fourier)变换的特性来确定图像的平移、旋转和缩放变换,虽然只能应用于刚体变换的情况,但是具有配准精度高且计算量小的优势,本文所提出的配准方法也属于这一种类型。

本文介绍了时空联合调制型干涉成像光谱仪的系统结构和工作原理,介绍了 Fourier-Mellin 变换,将图像的旋转和缩放变换转化为平移变换。接着介绍了一种局部上采样相位相关法来实现高精度的图像平移配准的技术,在提高精度的同时有效地减少了内存需求和运算量,同时结合梯度预处理过程,增加了算法的稳健性。最后通过 Lena 仿真实验验证了算法的精度,并将该方法应用于实际采集的干涉图像序列的配准过程中,得到了较好的实验结果。

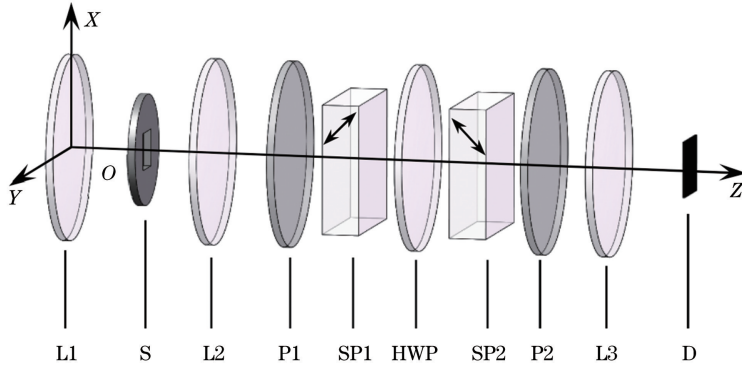


图1 大视场偏振干涉型成像光谱仪结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of the wide field-of-view polarization interference imaging spectrometer

整套系统搭载在推扫平台上,整体推扫后获得一系列干涉图像,其干涉光强信息提取过程如图2所示,图中 n 表示图像的序号。在一次整体推扫过程中,同一目标物点有着不同的入射角,最终对应于图像的不同像素位置,通过高精度图像配准过程确定各帧图像之间的位移量,从而提取出目标物点完整的干涉光强信息。最后根据 Fourier 变换光谱基本方程得到该点的复原光谱。基本方程为

$$B(\sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\Delta) \cos(2\pi\sigma\Delta) d\Delta, \quad (1)$$

式中: $B(\sigma)$ 为物点的光谱强度信息; σ 为波长的倒数; Δ 为光程差; $I(\Delta)$ 为干涉光强信息。图像配准过程关系到 $I(\Delta)$ 的采样结果,是光谱复原的关键步骤。

通常情况下,需要图像配准的图片近千张,配准的运算量巨大,故需提出一种快速高精度图像配准

2 成像光谱系统的原理

图1为大视场偏振干涉型成像光谱仪的结构示意图^[10-11]。成像物镜 L1、光阑 S、准直物镜 L2 组成前置光学系统,入射光束经过前置光学系统后变成准直光束。横向剪切分束器包括两片偏振片、两块 Savart 板和一片宽带半波片,其中,偏振片 P1、P2 的透光轴和宽带半波片(HWP)的快轴均与 X 轴成 45° ,第一块 Savart 平板 SP1 的光轴平行于 XOZ 平面,且与 Z 轴成 45° ,第二块 Savart 平板 SP2 的光轴也平行于 XOZ 平面,且与 Z 轴成 135° 。入射光束经过横向剪切分束器后被横向分成两束平行出射的光束,经过成像物镜 L3 后在面阵探测器 D 上叠加发生干涉。此时不同视场角的光束具有不同的光程差,实现了光程差与视场角的关联调制。这种成像光谱仪属于时空联合调制型干涉成像光谱仪,去掉了狭缝的限制,使得成像光谱仪的视场角和光通量得到较大提升^[12]。

方法来完成干涉光强信息的提取。

3 快速高精度配准原理

3.1 Fourier-Mellin 变换

Fourier-Mellin 变换是通过将图像从笛卡尔坐标系变换到对数极坐标系,解耦出两幅图像之间的旋转和缩放关系^[13]。假设参考图像为 $f_1(x, y)$, 配准图像为 $f_2(x, y)$, 两者之间存在旋转、缩放和平移关系。 u, v 分别是 x, y 的空间频率, 旋转角度变化量为 $\Delta\theta$, 缩放倍数为 k , 平移变化量为 $(\Delta x, \Delta y)$, 则两者在空域中的位置关系为

$$f_1(x, y) = f_2[k(x \cos \Delta\theta + y \sin \Delta\theta) - \Delta x, k(-x \sin \Delta\theta + y \cos \Delta\theta) - \Delta y]. \quad (2)$$

对空域图像 f_1 和 f_2 进行 Fourier 变换得到频域图像 F_1 和 F_2 的关系为

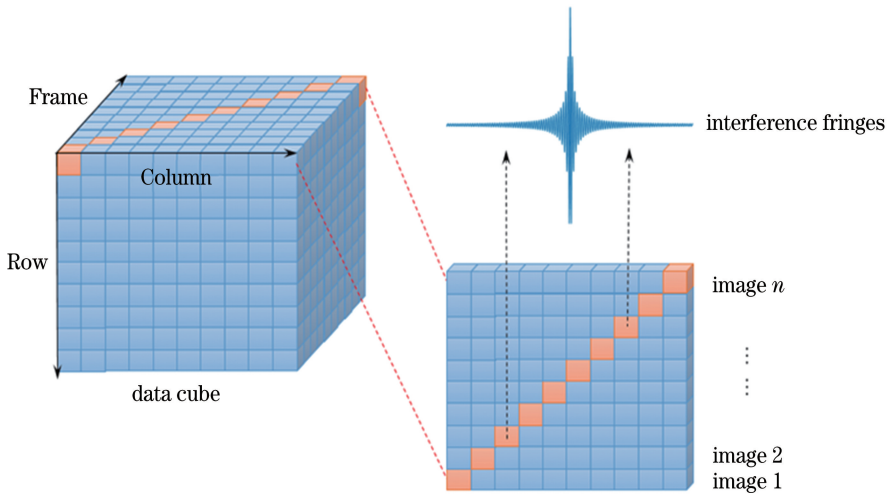


图2 同一物点干涉光强信息的提取示意图

Fig. 2 Schematic of extracting the interference intensity information of the same object point

$$F_1(u, v) = \frac{1}{k^2} \exp[-2\pi j(u\Delta x + v\Delta y)] F_2 \left[\frac{1}{k}(u \cos \Delta\theta + v \sin \Delta\theta), \frac{1}{k}(-u \sin \Delta\theta + v \cos \Delta\theta) \right], \quad (3)$$

取频域图像 F_1 和 F_2 的幅度谱 M_1 和 M_2 , 可得

$$M_1(u, v) = \frac{1}{k^2} M_2 \left[\frac{1}{k}(u \cos \Delta\theta + v \sin \Delta\theta), \frac{1}{k}(-u \sin \Delta\theta + v \cos \Delta\theta) \right]. \quad (4)$$

对(4)式进行极坐标变换, 即

$$\begin{cases} u = \rho \cos \theta \\ v = \rho \sin \theta \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{k}(u \cos \Delta\theta + v \sin \Delta\theta) = \frac{\rho}{k} \cos(\theta - \Delta\theta) \\ \frac{1}{k}(-u \sin \Delta\theta + v \cos \Delta\theta) = \frac{\rho}{k} \sin(\theta - \Delta\theta) \end{cases}, \quad (6)$$

式中: ρ 为极坐标系下的长度; θ 为极坐标系下的角度; $\Delta\theta$ 为图像间的旋转角度。将(6)式代入(4)式中可得

$$M_1(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta) = \frac{1}{k^2} M_2 \left[\frac{\rho}{k} \cos(\theta - \Delta\theta), \frac{\rho}{k} \sin(\theta - \Delta\theta) \right], \quad (7)$$

(7)式可简化为

$$M_1(\theta, \rho) = \frac{1}{k^2} M_2 \left(\theta - \Delta\theta, \frac{\rho}{k} \right), \quad (8)$$

对变量 $\frac{\rho}{k}$ 进行对数变换, 即

$$\lg \frac{\rho}{k} = \lg \rho - \lg k, \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式可得

$$M_1(\theta, \lg \rho) = \frac{1}{k^2} M_2(\theta - \Delta\theta, \lg \rho - \lg k). \quad (10)$$

由(10)式可知, 在对数极坐标系下, 参考图像和

配准图像在频域之间存在一定的平移关系, 平移因子分别为缩放系数的对数和旋转角度, 求解出平移因子即可获得图像间的缩放系数和旋转角度。利用相位相关法可以求出两幅图像之间的缩放系数和旋转角度。对(10)式两端进行 Fourier 变换可得

$$M'_1(\xi, \eta) = \frac{1}{k^2} \exp[-2\pi j(\xi\Delta\theta + \eta \lg k)] M'_2(\xi, \eta), \quad (11)$$

式中: ξ 是 θ 的空间频率; η 是 $\lg \rho$ 的空间频率; j 为虚数。利用(11)式进行变换可得

$$\frac{M'_1(\xi, \eta) M'_2{}^*(\xi, \eta)}{|M'_1(\xi, \eta) M'_2{}^*(\xi, \eta)|} = \exp[-2\pi j(\xi\Delta\theta + \eta \lg k)], \quad (12)$$

式中: $M'_2{}^*$ 表示 M'_2 的共轭复数。对(12)式进行逆 Fourier 变换, 可以得到一个脉冲响应函数, 在 $(\Delta\theta, \lg k)$ 的位置处形成一个脉冲峰值, 找出脉冲峰值的位置即可求出旋转角度和缩放系数。求得旋转角度 $\Delta\theta$ 和缩放系数 k 后, 对配准图像进行旋转和缩放逆变换, 得到只存在平移量 $(\Delta x, \Delta y)$ 的过渡图像 $f_3(x, y)$ 。参考图像 $f_1(x, y)$ 和过渡图像 $f_3(x, y)$ 之间满足以下关系:

$$f_1(x, y) = f_3(x - \Delta x, y - \Delta y). \quad (13)$$

3.2 局部上采样相位相关法

相位相关法是用于匹配图像平移变换的典型方

法,其依据是 Fourier 变换的特性。假设 $f_1(x, y)$ 是参考图像, $f_2(x, y)$ 是待配准图像, (x_0, y_0) 是两幅图像的平移量, 则有

$$f_1(x, y) = f_2(x - x_0, y - y_0), \quad (14)$$

它们之间的 Fourier 变换满足

$$F_1(u, v) = \exp[-2\pi j(ux_0 + vy_0)]F_2(u, v). \quad (15)$$

$F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$ 的互功率谱可表示为

$$C_{\text{cor}}(u, v) = \frac{F_1(u, v)F_2^*(u, v)}{|F_1(u, v)F_2^*(u, v)|} = \exp[-2\pi j(ux_0 + vy_0)]. \quad (16)$$

由(16)式可以看出,互功率谱的相位等价于图像间的相位差。将(16)式进行逆 Fourier 变换,在 (x, y) 空间将形成一个脉冲函数,脉冲峰值位置即为两幅图像间的平移量 (x_0, y_0) 。

传统的 Fourier 域相位相关技术只能估计整像素精度的平移参量,在此基础上提出的亚像素配准方法主要有:补零方法、插值方法、拟合方法等。其中,补零方法以原始图像为中心,对周边进行零插值,最后再运用相位相关法求解,这样会极大地增加计算复杂度和内存占有量,而相位相关谱的插值和

拟合方法都是对相位相关谱的近似估计,故会损失配准的精度。因此这里提出用一种局部上采样相位相关法实现高精度的图像配准技术,该技术仅针对峰值临近区域上采样,既能减少计算次数又可节约内存,提高了配准效率^[14]。

在传统的补零方法中,若要实现 $1/k$ 像素精度的图像配准,需要将原始 $M \times N$ 大小的图像补零,并插值成为 $kM \times kN$ 的图像,再运用快速 Fourier 变换(FFT)求解互相关谱的峰值位置。当 $N \leq M$ 时,这种方法的复杂度为 $O\{kMN[\text{lb}(kM) + \text{lb}(kN)]\}$ ^[15]。

局部上采样相位相关法利用矩阵 Fourier 变换实现对部分区域的 Fourier 变换。对于一维离散信号 $f(x_n)$, Fourier 变换可表示为

$$F(u_k) = \sum_{n=0}^{N_A-1} \exp(-2\pi jx_n u_k) f(x_n), \quad (17)$$

式中: $n=0, 1, 2, \dots, N_A-1$; N_A 是原始矩阵的维数; $k=0, 1, 2, \dots, N_B-1$; N_B 是采样点数; x_n 表示空域信号; u_k 表示频域信号。

一维信号矩阵 Fourier 变换用矩阵可表示为^[16]

$$\begin{bmatrix} F(u_0) \\ \vdots \\ F(u_k) \\ \vdots \\ F(u_{N_B-1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(-2\pi jx_0 u_0) & \cdots & \exp(-2\pi jx_{N_A-1} u_0) \\ \vdots & & \vdots \\ \exp(-2\pi jx_0 u_k) & \cdots & \exp(-2\pi jx_{N_A-1} u_k) \\ \vdots & & \vdots \\ \exp(-2\pi jx_0 u_{N_B-1}) & \cdots & \exp(-2\pi jx_{N_A-1} u_{N_B-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(x_0) \\ \vdots \\ f(x_k) \\ \vdots \\ f(x_{N_A-1}) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

对于输入序列 $\mathbf{X} = (x_0, x_1, \dots, x_{N_A-1})^T$, 则其离散 Fourier 变换的输出序列 $\mathbf{U} = (u_0, u_1, \dots, u_{N_B-1})^T$ 可以表示为

$$F(\mathbf{U}) = \exp(-2\pi j\mathbf{U}\mathbf{X}^T) f(\mathbf{X}), \quad (19)$$

将其推广到二维矩阵 Fourier 变换可得

$$F(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \exp(-2\pi j\mathbf{U}\mathbf{X}^T) f(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \exp(-2\pi j\mathbf{Y}\mathbf{V}^T), \quad (20)$$

式中: $\mathbf{V} = (v_0, v_1, \dots, v_{N_B-1})^T$; $\mathbf{Y} = (y_0, y_1, \dots, y_{M_A-1})^T$, 其中 $M_A \times N_A$ 是原始矩阵的维数。

局部上采样相位相关法示意图如图 3 所示。该方法先利用传统的相位相关法粗定位找到两幅图像的互功率谱的初始峰值位置 $P(x_p, y_p)$, 然后给定上采样区域尺寸 $m (1 \leq m \leq 2)$ 和采样倍率 k 。此时采样步长为 $1/k$, 采样点数 $N_B = m \times k$, i 表示采样点序号, 令 $u_i = x_p - N_B/2 + i$, $v_i = y_p - N_B/2 + i$ 。

然后根据(20)式可以实现峰值邻域上采样,在 (N_B, N_B) 的范围内找到互功率谱的峰值 $(\Delta x, \Delta y)$, 对初始配准结果进行亚像素修正,即

$$(\bar{x}, \bar{y}) = (x_p, y_p) + (\Delta x/k, \Delta y/k). \quad (21)$$

由(21)式可以得到图像亚像素精度偏移量。

此时(20)式中 3 个矩阵的维度分别为 $(mk, M_A), (M_A, N_A), (N_A, mk)$, 当精度因子 $k \leq N_A$ 时,局部上采样矩阵 Fourier 变换的计算复杂度为 $O(N_A M_A k)$ 。

当精度要求高,即 k 较大时,可以利用两步矩阵 Fourier 变换来减少计算量。具体操作是在粗估计峰值位置 (x_p, y_p) 附近局部上采样,先令 $N_B = m \times \sqrt{k}$, 利用矩阵 Fourier 变换进行第一次细估计,再在新的峰值位置附近进行一次局部上采样,获得更高精度的峰值位置,从而获得高精度的平移参数,

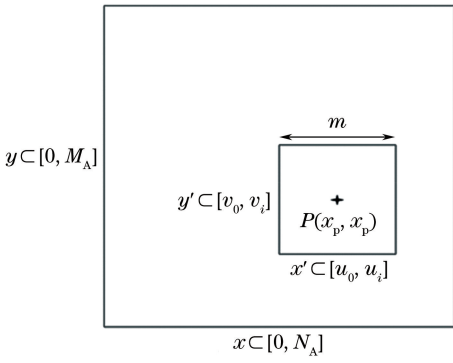


图3 局部上采样相位相关法原理示意图
Fig. 3 Principle diagram of partial upsampling phase correlation method

这时计算复杂度降低到 $O(N_A M_A \sqrt{k})$ 。

3.3 图像梯度预处理

如果对未经过预处理的图像直接运用相位相关法进行运动估计,会存在峰值范围过宽和伪峰的情况。进行梯度预处理后,不但会使峰值尖锐化,还会使峰值点唯一存在,有利于局部上采样相位相关法的实施。

假设原图像函数以 $f(x, y)$ 表示,图像中某1

个像素点 (x, y) 的梯度 $\mathbf{G}[f(x, y)]$ 为矢量,表示在 (x, y) 点沿 x 方向和 y 方向的灰度变化率,指向灰度变化最大的方向。 $\mathbf{G}[f(x, y)]$ 的幅度可以表示为

$$|\mathbf{G}[f(x, y)]| = \left\{ \left[\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

图像 $f(x, y)$ 的水平方向梯度为 g_x ,垂直方向梯度为 g_y 。在梯度预处理时用 $g_x + jg_y$ 替代原图片灰度作为待配准信息,这种替换既能突出图像的特征,又可以规避一些问题,如图像的低通特性、插值误差、边界效应以及锯齿效应^[17]。

图4(a)是大小为 (512×512) pixel 的参考图像,图4(b)是平移 $(20 \text{ pixel}, 20 \text{ pixel})$ 后的目标图像。图5(a)是两幅图像经过梯度预处理的互相关频谱图,图5(b)是未经过预处理的互相关频谱图,图中 E 表示互相换系数。从图5中可以看出,梯度预处理过程并不会影响峰值的定位。梯度预处理使得峰值尖锐化,而且排除掉了多个伪峰,增强了算法的稳健性。



图4 测试图像。(a)参考图像;(b)平移的配准图像
Fig. 4 Test images. (a) Referenced image; (b) registered image with translation

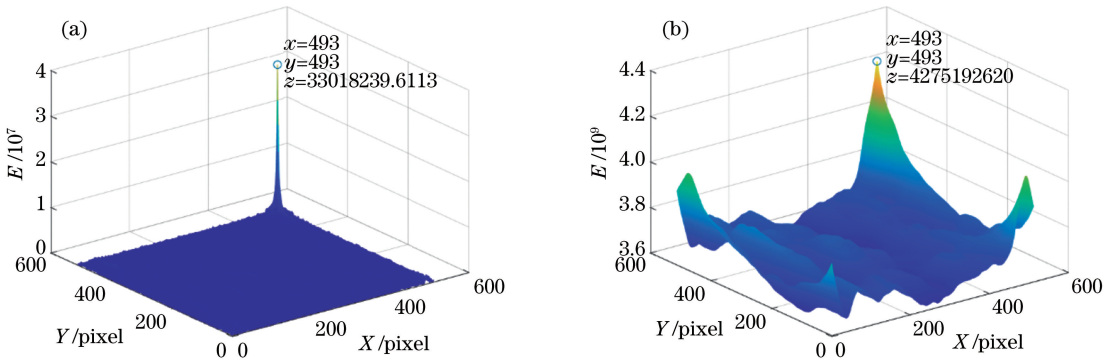


图5 互相关频谱图。(a)梯度预处理;(b)未梯度预处理
Fig. 5 Cross-correlation spectrograms. (a) With gradient pretreatment; (b) without gradient pretreatment

3.4 配准算法过程

根据上述分析,所提配准算法流程图如图6所示,其具体步骤如下:

1) 用梯度预处理方法对参考图像和配准图像进行梯度预处理,得到待配准的信息,分别记为 $f_1(x, y)$ 、 $f_2(x, y)$;

2) 分别对 $f_1(x, y)$ 、 $f_2(x, y)$ 进行 Fourier 变换,各自取幅度谱,得到 $M_1(u, v)$ 、 $M_2(u, v)$,再对幅度谱进行高通滤波,截取图像的细节信息;

3) 将幅度谱从笛卡尔坐标系转化到对数极坐标系,得到 $M_1(\theta, \lg \rho)$ 和 $M_2(\theta, \lg \rho)$;

4) 运用局部上采样相位相关法计算 $M_1(\theta, \lg \rho)$ 和 $M_2(\theta, \lg \rho)$ 之间的相对平移,可以得到旋转角度 $\bar{\theta}$ 和缩放系数 \bar{k} ;

5) 根据 $\bar{\theta}$ 和 \bar{k} 对配准图像进行逆变换,得到只存在平移参数的过渡图像 $f_3(x, y)$;

6) 运用局部上采样相位相关法计算 $f_1(x, y)$ 和 $f_3(x, y)$ 之间的相对平移,得到平移量 (\bar{x}, \bar{y}) 。

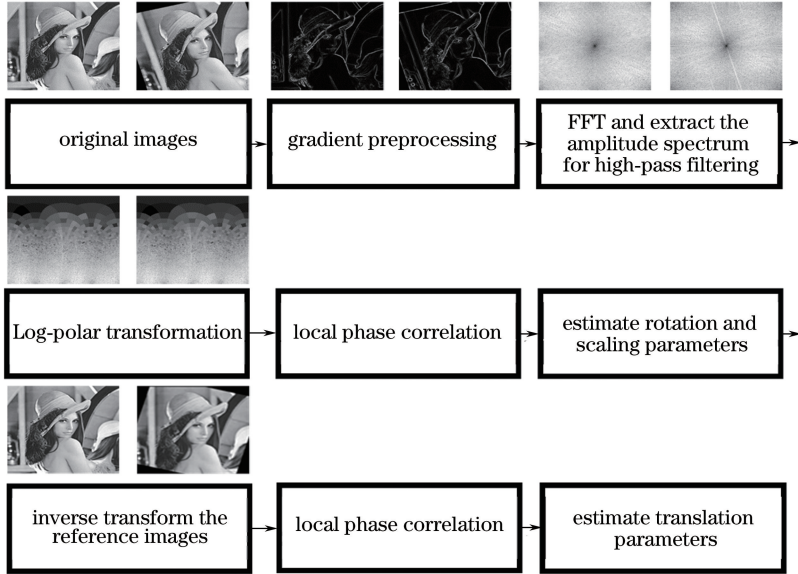


图6 图像配准方法流程图

Fig. 6 Flow chart of image registration method

4 实验结果与分析

4.1 算法性能分析

为了验证所提算法的高精度特性,设计仿真实验。测试图像采用 (512×512) pixel 的 Lena 图像,随机生成旋转角度、缩放系数、X 和 Y 方向平移参量,接着根据(2)式对 Lena 图像进行一定的旋转、缩放和平移变换得到测试图像,然后用原始图像和测试图像进行配准实验,得到配准估计的旋转角度、缩放系数、X 和 Y 方向平移参量,最后比对设定值与配准值之间的差异,以此来评价算法的精度。

进行 100 组仿真实验,缩放比例随机从 0.8~1.2 范围内等概率生成,旋转度数随机从 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 范围内等概率生成,横向和纵向的平移量随机从 $(-30 \sim 30)$ pixel 范围内等概率生成。图 7(a)~(d) 分别表示了旋转参量、缩放参量、X 方向平移参量、Y 方向平移参量的设定值与配准值之间的偏差。

100 组实验中,缩放比例、旋转角度、X 方向平

移参量、Y 方向平移参量的偏差最大值分别为 0.001、 0.005° 、0.1386 pixel、0.0835 pixel,可以看出配准算法精度较高。通过计算得到缩放参量、旋转参量、X 方向平移参量和 Y 方向平移参量的方均根误差值依次为: 0.0021、 0.0030° 、0.0653 pixel、0.0306 pixel,可以看出误差波动范围不大。综上所述,所提配准算法可以实现高精度的图像配准过程。

4.2 算法应用

时空联合调制型干涉成像光谱仪所产生的零光程差位置在视场中是固定的,推扫过程使目标物点对应于不同光程差位置。如图 8 所示,抽取推扫过程中的 3 张图像并进行配准。从原始图像图 8(a)~(c) 中可以看出干涉条纹始终位于图像中间,而场景在像面上不断移动,通过配准原始图像得到配准图像,见图 8(d)~(f),配准后同样的像素位置对应同样的空间物点,而干涉条纹产生了相对移动。此时提取出各帧配准图像同一像素位置的灰度曲线,即可得到目标物点的干涉条纹信息。

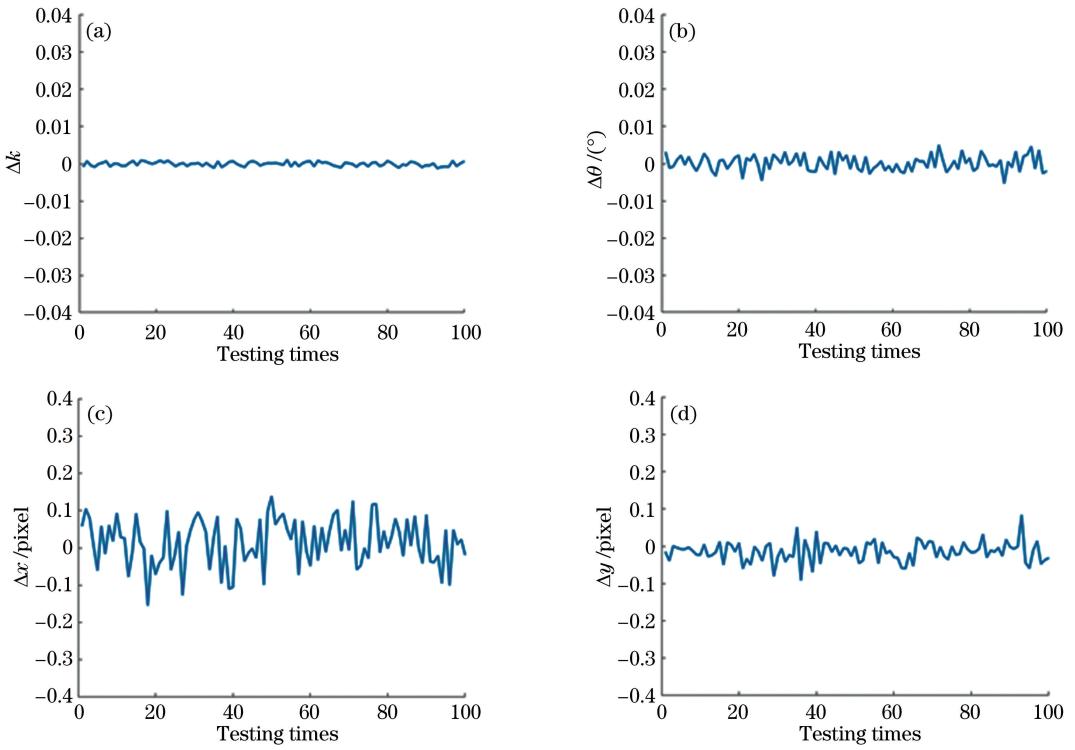


图7 配准结果。(a)缩放比例偏差;(b)旋转角度偏差;(c) X 轴方向平移偏差;(d) Y 轴方向平移偏差

Fig. 7 Registration results. (a) Deviation of scale ratio; (b) deviation of rotation angle; (c) deviation of translation in X-axis direction; (d) deviation of translation in Y-axis direction

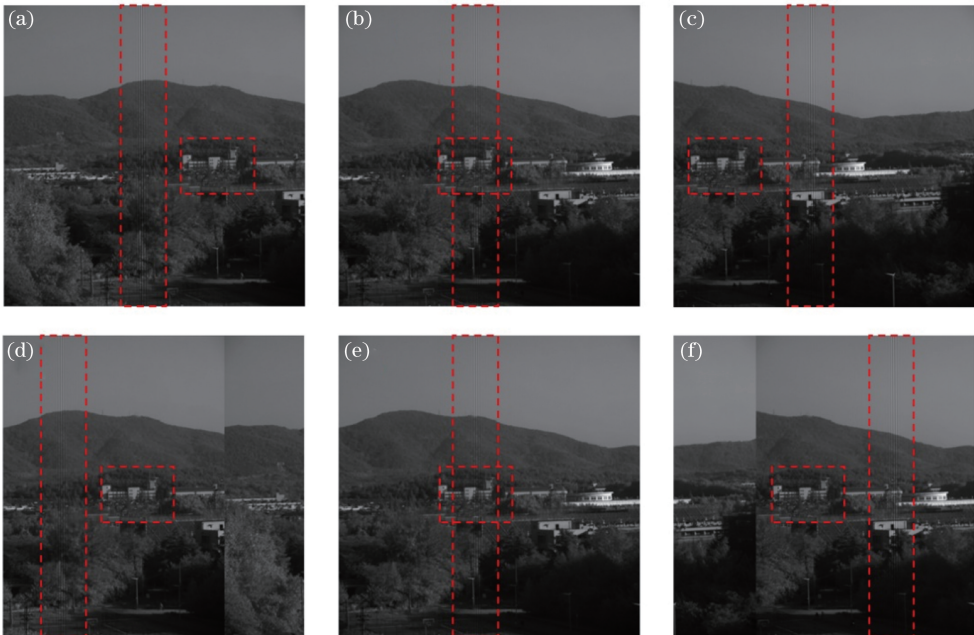


图8 原始图像和配准图像。(a)~(c)原始图像;(d)~(f)配准图像

Fig. 8 Original images and registered images. (a)-(c) Original images; (d)-(f) registered images

得到图像每个点的干涉数据后,对其进行快速 Fourier 变换即可得到复原光谱图像,图 9(a)~(e)分别展示了 462,485,531,633,720 nm 波段处的光谱图

像,图 9(f)是对红绿蓝(RGB)3 个通道的光谱数据进行色彩融合后的结果。实验证实,本算法可以解决时空联合调制型干涉成像光谱仪的光谱复原问题。

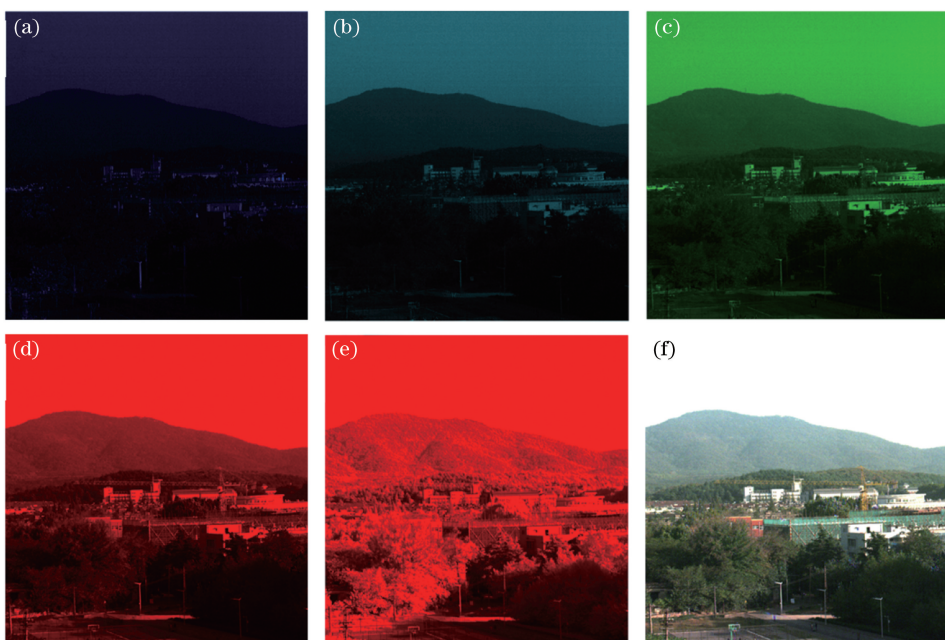


图9 光谱复原结果。(a) 462 nm 波段图像；(b) 485 nm 波段图像；(c) 531 nm 波段图像；(d) 633 nm 波段图像；(e) 720 nm 波段图像；(f) RGB 彩色融合图像

Fig. 9 Recovered spectral results. (a) Image in 462 nm; (b) image in 485 nm; (c) image in 531 nm; (d) image in 633 nm; (e) image in 720 nm; (f) RGB color fusion image

5 结 论

针对时空联合调制型干涉成像光谱仪的图像配准问题,提出了一种快速高精度 Fourier-Mellin 变换图像配准方法。首先对图像进行梯度预处理,提取出图像的关键信息,再利用 Fourier-Mellin 变换将图像在笛卡尔坐标系的旋转和缩放关系转化为在对数-极坐标空间的平移关系,接着运用两次局部上采样相位相关法得到高精度的旋转、缩放参数和亚像素的平移参数,最终解决了图像的亚像素配准问题。仿真结果表明算法的平移配准精度优于 0.1 pixel,旋转配准精度优于 0.01° ,缩放配准精度优于 1%。另外所提算法中局部上采样矩阵 Fourier 变换复杂度为 $O(N_A M_A k)$,而全局快速 Fourier 变换方法的复杂度为 $O(N_A M_A k^2 N_A \ln k)$,在计算效率上相对于其他方案有较大提升。

所提算法在精度和速度上优化了时空联合调制型干涉成像光谱仪的光谱复原过程,有利于成像光谱仪器的工程化应用。

参 考 文 献

[1] Bai C X, Li J X, Meng X, *et al.* Spectrum recovery method for hyperspectral imaging based on symmetric wedgy interferometric cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0230004.

柏财勋, 李建欣, 孟鑫, 等. 对称楔形干涉高光谱成像的光谱复原方法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0230004.

[2] Bai C X, Li J X, Meng X, *et al.* Hyperspectral imaging based on symmetric wedgy interferometric cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0811002.

柏财勋, 李建欣, 孟鑫, 等. 基于对称楔形干涉腔的高光谱成像方法 [J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0811002.

[3] Li J, Peng Q M, Fan Z H. A survey of sub-pixel image registration methods[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(11): 2070-2075.

黎俊, 彭启民, 范植华. 亚像素级图像配准算法研究 [J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(11): 2070-2075.

[4] Seitz P. Optical superresolution using solid-state cameras and digital signal processing [J]. *Optical Engineering*, 1988, 27(7): 277535.

[5] Tian Q, Huhns M N. Algorithms for subpixel registration [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1986, 35(2): 220-233.

[6] Chen H. Gradient-based approach for fine registration of panorama images [J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2004, 19(5): 691-697.

[7] Pluim J P W, Maintz J B A, Viergever M A. Mutual-information-based registration of medical

- images: A survey[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, 22(8): 986-1004.
- [8] Maes F, Vandermeulen D, Suetens P. Medical image registration using mutual information [J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(10): 1699-1722.
- [9] Reddy B S, Chatterji B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(8): 1266-1271.
- [10] Zhang C M, Zhao B C, Bin X L. Wide-field-of-view polarization interference imaging spectrometer [J]. Applied Optics, 2004, 43(33): 6090-6094.
- [11] Zhang C M, Bin X L, Zhao B C, *et al.* A static polarization imaging spectrometer based on a Savart polariscope[J]. Optics Communications, 2002, 203(1/2): 21-26.
- [12] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B, *et al.* Analysis and calculation of throughput of the polarization interference imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(2): 192-197.
张淳民, 赵葆常, 相里斌, 等. 偏振干涉成像光谱仪通量的分析与计算 [J]. 光学学报, 2001, 21(2): 192-197.
- [13] Chen Q S, Defrise M, Deconinck F. Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(12): 1156-1168.
- [14] Wang C L, Cheng Y, Zhao C X, *et al.* Robust subpixel image registration technique based on local phase correlation[J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(3): 427-432.
王彩玲, 程勇, 赵春霞, 等. 局部相位相关用于图像亚像素级配准技术研究 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(3): 427-432.
- [15] Guizar-Sicairos M, Thurman S T, Fienup J R. Efficient subpixel image registration algorithms [J]. Optics Letters, 2008, 33(2): 156-158.
- [16] Soummer R, Pueyo L, Sivaramakrishnan A, *et al.* Fast computation of Lyot-style corona graph propagation [J]. Optics Express, 2007, 15(24): 15935-15951.
- [17] Tzimiropoulos G, Argyriou V, Zafeiriou S, *et al.* Robust FFT-based scale-invariant image registration with image gradients [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(10): 1899-1906.