

利用 Fourier-Mellin 变换的遥感图像自动配准

林 卉^{1,2} 梁 亮² 杜培军¹ 孙华生³

(1 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州市三环南路, 221116)

(2 徐州师范大学测绘学院, 徐州市上海路 101 号, 221116)

(3 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 阜新市中华路 47 号, 123000)

摘 要:提出了一种利用 Fourier-Mellin 变换的遥感图像配准方法。首先,进行 Fourier 变换求取频谱能量值并进行高通滤波,将滤波后的能量转换成对数极坐标,通过计算互功率谱,运用相位相关技术得到比例系数和旋转角,两幅图像按照得到的参数进行旋转缩放变换得到变换图像;然后,进行相位相关运算得到平移量,作平移变换;最终叠加显示,可以得到配准图像。实验结果表明,该算法具有很好的有效性和可靠性。

关键词: Fourier-Mellin 变换;对数极坐标变换;高通滤波;互功率谱;相位相关

中图法分类号: P237.3

在遥感数据处理中,影像配准是变化检测、影像镶嵌和影像融合的基本预处理步骤,配准精度对后续处理的影响很大。遥感影像的自动配准是当今的一个难题。影像配准的方法大致分为两类:基于区域的方法和基于特征的方法。大多数基于区域的方法采用互相关技术来实现;基于特征的方法在影像间提取特征,再根据特征间的相似度进行匹配^[1]。文献[2]提出了基于 Fourier-Mellin 变换的图像配准方法,这种变换由于旋转的频谱混叠和旋转变换中的插值误差而产生错误,而且它是建立在无限连续图像模型基础之上的,因此,当其应用于有限离散图像时,不能取得理想的相关峰值^[3]。本文提出了一种改进的基于 Fourier-Mellin 变换的方法,对图像幅度谱进行对数极变换,在变换空间应用相位相关法求出被配准图像的旋转角度和尺度缩放因子,并通过计算经过规整的两幅图像的互功率谱的 Fourier 反变换所对应的峰值位置来求出它们的相对平移。该方法通过加窗和滤波来提高峰值、减少频谱混叠、增加鲁棒性,兼具 Fourier 变换相位相关技术和对数极变换的优势,降低了计算复杂度,提高了配准效率。

1 Fourier-Mellin 变换原理

1.1 Fourier 变换位移理论

设影像 $f_2(x, y)$ 为影像 $f_1(x, y)$ 在 x 和 y 方向分别平移后 (x_0, y_0) 的影像,即

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (1)$$

若 f_1 和 f_2 对应的 Fourier 变换分别为 $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$,则它们之间的对应关系为:

$$F_2(u, v) = F_1(u, v) e^{-j(ax_0 + by_0)} \quad (2)$$

则 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的互功率谱为:

$$\frac{F_1(u, v) F_2^*}{|F_1(u, v) F_2^*|} = e^{-j(ax_0 + by_0)} \quad (3)$$

式中, F_2^* 为 F_2 的复共轭。由上式可见,互功率谱的相位等于图像间的相位差。通过对式(3)进行逆变换,在 (x, y) 空间可得到 $(x - x_0, y - y_0)$ 的脉冲函数,在 (x_0, y_0) 的位置形成一个脉冲峰值,即为平移量。该技术又称为 Fourier 相位相关^[4]。

1.2 对数极坐标变换原理

一般而言,位图图像中的任意一点(像素)可以用直角坐标 (x, y) 来表示。同样,这个像素也可以由极坐标 (r, θ) 来表示。对数极坐标变换的

过程就是将基于直角坐标系的像素 (x, y) 经过极坐标映射 (r, θ) 之后再由直角坐标 (x', y') 表示出来的过程。那么,对于任意一点 (x, y) 变换定义为:

$$\begin{aligned} \lg r &= \lg \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \\ \theta &= \arctan\left(\frac{y-y_0}{x-x_0}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, (x_0, y_0) 为图像变换中心点; $(\lg r, \theta)$ 分别对应极坐标的极径和极角。

设 $f_1(x, y)$ 与 $f_2(x, y)$ 在空间域存在尺度因子为 k 的缩放变换和旋转角度为 θ_0 的旋转变换,即有:

$$\begin{aligned} \lg r &= \lg k \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} = \\ &\lg \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} + \lg k \end{aligned} \quad (5)$$

即图像沿距离轴移动了 $\lg k$ 。当目标绕变换中心旋转过 θ_0 角度时,其映射图像就沿角度轴平移 θ_0 个单位。由此可见,经对数极坐标变换后,可以把难以匹配的尺度及旋转变化映射为坐标轴方向的平移变化。

1.3 Fourier-Mellin 变换

同时考虑到平移、旋转和缩放因子经过对数极坐标变换,则:

$$\begin{aligned} f_2(x, y) &= f_1(k(x\cos\theta_0 + y\sin\theta_0) - x_0, \\ &k(-x\sin\theta_0 + y\cos\theta_0) - y_0) \end{aligned} \quad (6)$$

f_1 和 f_2 对应的 Fourier 变换 $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$ 取模后功率谱满足:

$$\begin{aligned} |F_2(u, v)| &= k^{-2} |F_1(k^{-1}(u\cos\theta_0 + v\sin\theta_0), \\ &k^{-1}(-u\sin\theta_0 + v\cos\theta_0))| \end{aligned} \quad (7)$$

由上式可以看出,频谱幅度仅与旋转和缩放因子有关,与平移量无关。为了将旋转和尺度转化成平移形式,对式(4)作对数极坐标变换,则有:

$$|F_2(r, \theta)| = |F_1(\lg r - \lg k, \theta - \theta_0)| \quad (8)$$

式(8)将缩放与旋转问题转换为对数极坐标系的平移问题,被称为 Fourier-Mellin 变换^[5]。可以看出,通过上述变换,式(8)变换为与式(2)相同的形式。这样,就可以在对数极空间应用 Fourier 变换位移理论,在求出旋转角度和比例因子后,对图像进行变换后再通过一次 Fourier 反变换求出平移量^[6]。

2 Fourier-Mellin 变换的图像配准算法步骤

由上面的相关原理可以看出,要得到配准好

的图像,首先,通过 Fourier 变换求得平移参数;接着,利用笛卡尔坐标到对数极坐标的转换求出比例因子和旋转角度;按此值对欲配准图像变换后,再利用互能量谱与反变换计算求出平移量;最后,进行相应的 Fourier-Mellin 变换,就可得到配准好的图像。本文的图像自动配准具体步骤如下所示。

1) 预处理,原始图像对中心裁剪出相同大小的图像区域并转换为灰度图像,记为 A、B。

2) 对 A、B 进行 Fourier 变换,将变换后的图像频谱中心从矩阵的原点移到矩阵的中心,求能量值 MA、MB。

3) 对 MA、MB 进行高通滤波,减小噪声的干扰和伪像的出现,本文采用文献[7]提出的高通滤波器函数,具体操作过程中 ξ, η 步长取图像长宽的倒数。

4) 将滤波后的能量转换成对数极坐标形式,并再次作 FFT 变换,求各自能量的频谱幅度,计算互功率谱,反 Fourier 变换得到比例系数和旋转角。

5) 将待配准的图像按照上述步骤得到的参数进行旋转、缩放变换得变换图,记为 R。对 R、A 进行高通滤波以减少背景噪声和在变换过程中产生的频率混叠的干扰,然后进行相位相关运算,得到平移量,作平移变换得最终匹配图。

3 仿真实验与结果分析

本文原始图像采用某海岸城市 Quickbird 遥感影像(300 像素×300 像素),按照 Fourier-Mellin 变换的图像自动配准步骤可以得到结果图像(见图 1)。

为了验证本文方法的精确性与适用性^[7],本文又进行了一个实验。在同一景影像上截取 300 像素×300 像素,按指定值变换后的图像作为待配准图像,配准结果如图 2 所示。该算法得出的变换参数与指定值的比较结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,能从此配准算法过程中得到比较精确的变换参数。实验结果表明,本文算法得到的旋转角度和尺度缩放因子与指定值非常接近,精度分别为 3.2% 和 1.4%,平移量在 1 个像素内,效果非常理想。

表 1 参数比较

Tab. 1 Comparison of Parameters

精度指标	$\theta/(^\circ)$	尺度	$\Delta x/\text{像素}$	$\Delta y/\text{像素}$
指定变换参数	20	1.2	0	0
本文方法得到的变换参数	19.343	1.217	-1	-1

图 2 为变换参数配准比较结果,图 2(a)为原始图像,图 2(b)同地区按指定值变换图(平移(0,

0)、放大 1.2 倍、旋转 20°),图 2(c)为配准后的图,图 2(d)为配准后的叠加显示图。

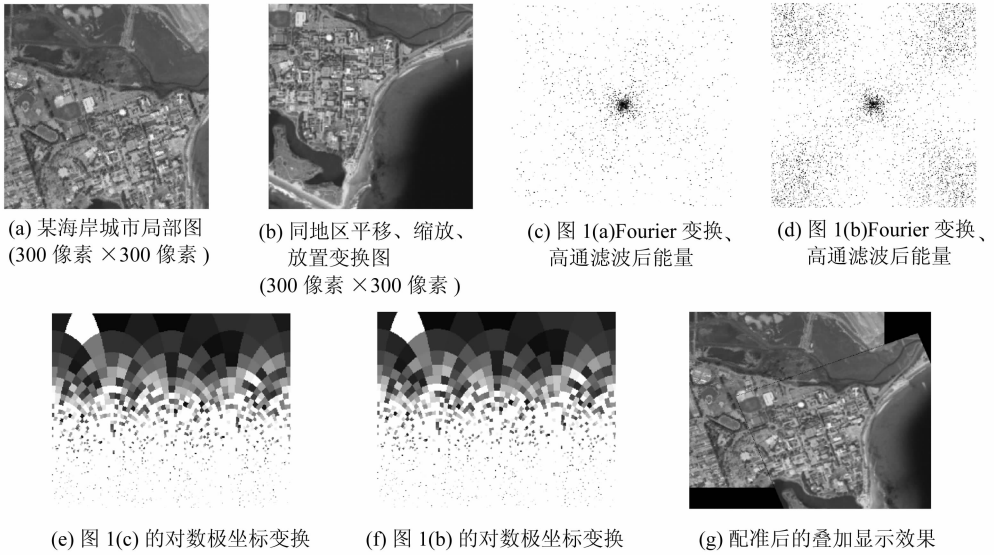


图 1 基于 Fourier-Mellin 变换的自动配准实验

Fig. 1 Experiment of Image Registration Based on Fourier-Mellin Transform

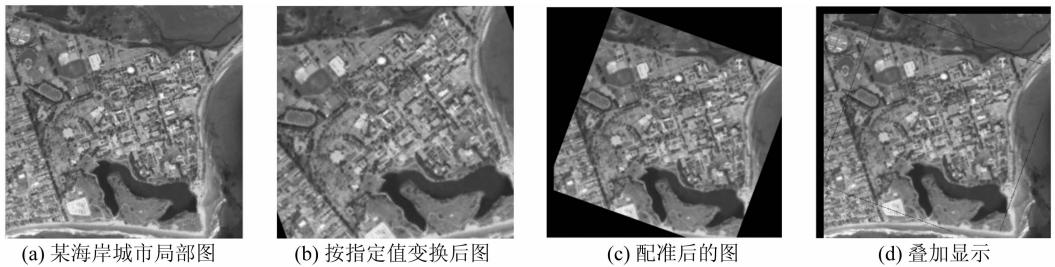


图 2 变换参数配准比较结果

Fig. 2 Results of Transform Parameters Registration Comparison

4 结 语

本文根据空间图像配准实时性和精确性的要求,提出了一种基于 Fourier-Mellin 变换的图像配准方法,给出了图像配准过程。实验结果表明了该方法的有效性和可靠性。此方法能充分利用 Fourier-Mellin 变换对影像的旋转、尺度缩放、亮度变化保持不变性,对视角变化、仿射变换、噪声也能保持一定的稳定性,能从成像条件和场景很复杂的立体遥感影像中提取密集的同名控制点并进行高精度的匹配,从而实现两幅影像的精确配准。Fourier-Mellin 变换法则避免了寻找、匹配控制点的繁琐和误差,且算法成熟易于硬件实现^[8]。

参 考 文 献

[1] 宋振环,唐伶俐,李传荣. 遥感图像配准技术研究最新进展[J]. 科技导报, 2007, 25(12): 53-58

[2] 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): 1 156-1 168

[3] Reddy B S, Chatterji B N. An FFT-Based Technique for Translation, and Scale-Invariant Image Registration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(8): 1 266-1 271

[4] 王瑞瑞,马建文,陈雪. 多传感器影像配准中基于虚拟匹配窗口的 SIFT 算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(2): 163-166

[5] 郭晓新,许志闻,卢奕南,等. 基于 Fourier-Mellin 不变量的图像配准方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 421-424

[6] 王盼,肖斌,马建峰. 基于 Radon 和解析 Fourier-Mellin 变换的尺度与旋转不变目标识别算法[J]. 中国图像图形学报, 2008, 13(11): 2 157-2 162

[7] 李芳芳,肖本林,贾永红,等. SIFT 算法优化及其用于遥感影像自动配准[J]. 武汉大学学报·信息科

学版,2009,34(10):1 245-1 249

- [8] 戚灵,袁杰,都思丹,基于 Fourier-Mellin 变换的指纹匹配算法研究[J]. 计算机仿真,2009,26(3): 231-233

第一作者简介:林卉,副教授,研究方向为遥感影像处理。
E-mail:linhuixznu@126.com

Image Registration Based on Fourier-Mellin Transform

LIN Hui^{1,2} LIANG Liang² DU Peijun¹ SUN Huasheng³

(1 School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, South Sanhuan Road, Xuzhou 221116, China)

(2 School of Geodesy and Geomatics, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, China)

(3 College of Geomatics, Liaoning Technical University, 47 Zhonghua Road, Fuxin 123000, China)

Abstract: The purpose of image registration is to remove inconsistencies in geometry between the matched registration image and the reference image, including translation, rotation and scaling transform, which is the necessary premise for image contrast, data fusion, transform analysis and target recognition. A new kind of remote sensing image registration, which is called Fourier-Mellin transform method is put forward. Firstly, Fourier transform is performed to get frequency spectrum power for the reference image and the matched image respectively. Next, high-pass filtering is conducted with regard to their energy spectrum. Then, energy after filtering is converted into log-polar coordinate formation. In the case, mutual power spectrum can be computed adopting phase correlation technique to obtain their rotation angle and scale factor correspondingly. Lastly, transform image may be gotten by these parameters. And again, for reference image, high-pass filtering is performed to reduce background noise and frequency aliasing interference in the transformation process. Then, phase correlation calculation may achieve translation value, another transform image can be gotten through translation transform. Finally, registration image may gain by the two images' superposition. The experimental results show that the algorithm is efficiency and reliability.

Key words: Fourier-Mellin transform; log-polar transform; high-pass filtering; mutual power spectrum; phase correlation

About the first author: LIN Hui, associate professor, majors in remote sensing image processing.

E-mail: linhuixznu@126.com