

分层 Fourier-Mellin 变换相位相关的影像匹配 初始视差的自动获取方法

韦春桃^{1,2} 张祖勋³ 张剑清³ 吴平^{2,4}

1 重庆交通大学土木建筑学院,重庆,400074

2 桂林理工大学测绘地理信息学院,广西 桂林,541004

3 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

4 福建省基础地理信息中心,福建 福州,350001

摘要:自动获取初始视差是影像匹配自动化的关键问题。提出了分层 Fourier-Mellin 变换相位相关的影像匹配初始视差的全自动获取方法,无需人工干预和其他辅助信息,能高效、自动地获取影像中心点较精确的初始视差。首先对基准影像与待匹配影像构建金字塔影像,使用 Fourier-Mellin 变换与相位相关法求解金字塔顶层影像上基准影像与待匹配影像间的旋转、缩放与平移参数,然后利用旋转参数和缩放参数矫正待匹配影像的旋转与缩放变形,再利用平移参数计算待匹配影像中心点与基准影像上对应的同名点的视差近似值,最后在金字塔逐层影像上使用相位相关法对该对同名点的视差近似值进行误差校正,从而得到较精确的初始视差值。

关键词:影像匹配;初始视差;相位相关;Fourier-Mellin 变换

中图分类号:P237.3; TP751 **文献标志码:**A

影像匹配是数字摄影测量的核心问题,快速准确地确定立体影像对的初始视差,亦即匹配初值,是影像匹配自动化的难题。准确的初始视差可以缩小匹配搜索范围,减少在纹理重复和纹理贫乏等区域的匹配混淆,提高匹配效率、精度和可靠性,同时为最小二乘等高精度匹配方法提供精确的初始值。

目前在实际工作中常用的确定初始视差方法有:(1)人工选取对应匹配点方法。该方法易受人为主观操作因素和影像分辨率的影响而产生选取误差,且需人工干预,不能实现完全的自动化。(2)影像灰度相关法。该方法通过对立体影像计算在水平方向和垂直方向具有不同偏移量时两张影像的灰度相关系数,将具有最大相关系数时的偏移量作为初始视差^[1-3],存在计算量大,效率低下,在影像信息贫乏、纹理重复区域很难正确确定影像的初始视差,可靠性不高,且不具有旋转不变性等缺点。(3)利用立体影像水平与垂直两方向的重叠度来估计初始视差。由于航空摄影时飞行不平稳,航向和旁向会出现各种偏差和抖动,

从而影响初始视差的估计,准确度较低^[3]。(4)利用 POS 系统提供的像片近似外方位元素来确定初始视差。该方法可靠性较高,但精度受 POS 观测值精度的影响,直接利用 POS 提供的定向参数进行初始视差估计精度较低^[2]。(5)影像特征匹配法,对两张立体影像分别提取特征,然后进行特征匹配和其他信息确定初始视差^[1-3]。特征匹配法确定初始视差依赖于特征提取的准确性,使用范围也有一定的局限。

频率域相位相关和 Fourier-Mellin(FM)变换常被用于影像配准^[4-7]中,主要用于解算两幅待配准影像之间的整体平移、缩放和旋转参数。本文将 Fourier-Mellin 变换和相位相关方法用于金字塔影像中,获取两幅待匹配影像的初始视差,提出了一种分层 Fourier-Mellin 相位相关的影像匹配初始视差的自动获取方法。该方法的特点是不需要任何先验阈值和辅助信息(如相机参数、POS 数据、影像重叠度等),能够自动获取影像匹配较精确的初始视差。实验证明了该方法的有效性。

收稿日期:2013-07-24

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41161073;41431179,41162011);广西自然科学基金重点资助项目(2014GXNSFDA118038)。第一作者:韦春桃,博士,教授,主要从事遥感影像处理与应用研究。E-mail: gxglwct@163.com

1 基于 Fourier-Mellin 变换的相位相关方法

1.1 相位相关法

相位相关^[8,9]是一种非线性的、基于傅里叶功率谱的频域相关技术,其理论依据是傅里叶平移定理,信号在空间域上的平移产生频率域上成比例的相位平移,常用于检测两幅影像之间的平移量。假设两幅影像 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 之间有如下平移关系:

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

若 $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$ 分别为 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的傅里叶变换,根据傅里叶平移定理有:

$$F_2(u, v) = F_1(u, v)e^{-j(\omega x_0 + v y_0)} \quad (2)$$

两影像 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的互功率谱为:

$$\frac{F_1(u, v)F_2^*(u, v)}{|F_1(u, v)F_2^*(u, v)|} = e^{-j(\omega x_0 + v y_0)} \quad (3)$$

式中, $F_2^*(u, v)$ 为 $F_2(u, v)$ 的复共轭; $e^{-j(\omega x_0 + v y_0)}$ 的傅里叶逆变换为一个二维脉冲函数 $\delta(x - x_0, y - y_0)$ 。相位相关法就是求取式(3)的傅里叶逆变换,通过搜索峰值位置来确定平移参数 x_0 和 y_0 。在频率域利用相关技术能够快速找到最佳匹配位置。

1.2 基于 Fourier-Mellin 变换的相位相关法

相位相关对影像间的旋转非常敏感,实验数据表明,当旋转角度达到 $\pm 3^\circ$ 时,脉冲幅度被完全淹没在噪声中,相位相关失效。基于 Fourier-Mellin 变换的相位相关法^[10]是一种基于 Fourier-Mellin 变换旋转-缩放不变性和 Fourier 变换平移定理的变换参数估计算法,可以较好地解决影像间的旋转、缩放和平移问题。假设影像 $f_1(x, y)$ 与 $f_2(x, y)$ 之间存在旋转、缩放和平移变换,即:

$$f_2(x, y) = f_1[\sigma(x \cos \alpha + y \sin \alpha) - x_0, \sigma(-x \sin \alpha + y \cos \alpha) - y_0] \quad (4)$$

式中, $\sigma, \alpha, (x_0, y_0)$ 分别是缩放、旋转、平移参数。则 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 对应的傅里叶变换 $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$ 之间满足:

$$F_2(u, v) = \sigma^{-2} F_1[\sigma^{-1}(u \cos \alpha + v \sin \alpha), \sigma^{-1}(-u \sin \alpha + v \cos \alpha)] \cdot \exp(-j2\pi(u x_0 + v y_0)) \quad (5)$$

分别提取 F_1 和 F_2 的幅度,有

$$|F_2(u, v)| = \sigma^{-2} \left| F_1 \left[\begin{matrix} \sigma^{-1}(u \cos \alpha + v \sin \alpha), \\ \sigma^{-1}(-u \sin \alpha + v \cos \alpha) \end{matrix} \right] \right| \quad (6)$$

从式(6)可以看出,两影像频谱的幅度只与缩放

因子 σ 和旋转角度 α 有关,与平移量 (x_0, y_0) 无关,因此,可以将缩放因子、旋转角度与平移量进行分离计算。将两幅影像的幅度谱分别变换至极坐标系 $\rho - \theta$ 下,令 $u = \rho \cos \theta, v = \rho \sin \theta$, 得:

$$|F_2(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta)| = \sigma^{-2} \left| F_1 \left[\begin{matrix} \frac{\rho}{\sigma} \cos(\theta - \alpha), \\ \frac{\rho}{\sigma} \sin(\theta - \alpha) \end{matrix} \right] \right| \quad (7)$$

令 $f_{2p}(\rho, \theta) = |F_2(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta)|, f_{1p}(\rho, \theta) = |F_1(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta)|$, 则式(7)可表示为:

$$f_{2p}(\rho, \theta) = \sigma^{-2} f_{1p}(\rho/\sigma, \theta - \alpha) \quad (8)$$

对式(8)的极径轴 ρ 进行对数变换,得:

$$f_{2p}(\log \rho, \theta) = \sigma^{-2} f_{1p}(\log \rho - \log \sigma, \theta - \alpha)$$

设 $\lambda = \log \rho, k = \log \sigma$, 变量代换后为:

$$f_{2p}(\lambda, \theta) = \sigma^{-2} f_{1p}(\lambda - k, \theta - \alpha) \quad (9)$$

式(9)说明,在转换至对数极坐标后,缩放与旋转变换已被转换为平移变换。式(9)与式(1)具有相同的形式,因此可以应用相位相关法求解。在对数-极坐标空间应用相位相关法求出 k 和 α , 若对数的底取为 e , 则 $\sigma = e^k$, 这样得到影像之间的缩放因子 σ 和旋转角度 α , 之后利用计算出的 σ 和 α 对原影像进行缩放和旋转矫正,消除两幅原始影像之间的缩放和旋转变换,最后,再次对矫正后的影像使用相位相关法即可求出平移参数 (x_0, y_0) 。

2 分层 Fourier-Mellin 相位相关的初始视差获取方法

航空与遥感影像间不仅存在仿射畸变,还存在一定的透视畸变。基于 Fourier-Mellin 变换的相位相关是在傅里叶变换和对数极坐标变换基础上的全局相位相关,可用于估计两幅影像之间大的平移位移,且对亮度变化不敏感,对噪声和遮挡等具有一定的鲁棒性,因此,也可用于获取具有仿射畸变与透视畸变的航空与航天遥感影像的初始视差。为了提高获取初始视差的效率、精度和鲁棒性,本文引入金字塔分层匹配思想,给出了分层 Fourier-Mellin 相位相关的影像匹配初始视差的全自动获取方法,具体过程如下。

1) 建立基准影像和待匹配影像的影像金字塔,分别对两幅影像的金字塔顶层影像进行傅里叶变换;

2) 将各自的幅度谱转换至对数极坐标下进行相位相关运算,求得两幅影像之间的旋转与缩

放参数;

3) 利用旋转和缩放参数对待匹配影像进行旋转和缩放变形矫正;

4) 对金字塔顶层基准影像和矫正后的待匹配影像进行相位相关得到平移参数,计算出待匹配影像中心点的初始视差近似值;

5) 在金字塔的下一层影像上,分别选取待匹配影像中心点区域和基准影像上同样大小的同名区域进行相位相关运算;

6) 利用相关运算结果对初始视差近似值进行校正;

7) 重复步骤 5)~6),直到影像原始层时结束,从而得到更精确的初始视差。

3 实验与分析

实验选用三组典型的原始立体影像对,尺寸均为 $1\ 024$ 像素 \times $1\ 024$ 像素,图 1(a)与图 2(a)分别为具有重复纹理的较平坦地区的乡村与城市航空立体影像,图 3(a)为遮挡较严重的城市卫星立体影像。各图中左图均为基准影像,右图为待匹配影像,实验平台选择 MATLAB2008。对上

述三组立体影像分别进行分层 FM 相位相关匹配,计算待匹配影像中心点与其在基准影像上的同名点的初始视差,由初始视差可以计算基准影像上同名点的坐标,从而确定基准影像上同名点的位置。算法使用的影像金字塔共分 3 层,每层影像由两像素平均方式构建,最顶层金字塔影像的大小为 256 像素 \times 256 像素,对最顶层金字塔影像进行 Fourier-Mellin 变换相位相关,以下每层在上一层的视差约束下,使用分块相位相关,相关窗口大小为 31 像素 \times 31 像素。实验结果如图 1(b)、图 2(b)和图 3(b)所示。图 1(c)、图 2(c)和图 3(c)为相应的局部放大影像。各图中右图为矫正后的待匹配影像图,白色十字交叉点(白色圆圈中心)为矫正后的待匹配影像的中心点;各图左图中的白色十字交叉点为矫正后的待匹配影像中心点经匹配后在基准影像中的同名点。实验还采用了 Fourier-Mellin 变换相位相关匹配法进行对比,同样计算待匹配影像中心点在基准影像上的同名点,相应的实验结果如图 1(d)、图 2(d)和图 3(d)所示。表 1 显示的是对上述三组立体影像分别使用 Fourier-Mellin 相位相关和分层 Fourier-Mellin 相位相关获取初始视差的误差及所需要的运算时间。

表 1 Fourier-Mellin 相位相关和分层 Fourier-Mellin 相位相关的实验结果

Tab. 1 Results for Phase Correlation of Fourier-Mellin and Layered Fourier-Mellin

原始影像	Fourier-Mellin 法 x,y 方向视差误差/像素	分层 FM 法 x,y 方向视差误差/像素	Fourier-Mellin 运算耗时/s	分层 Fourier-Mellin 运算耗时/s
图 1(a)	(1,1)	(1,1)	207.98	133.62
图 2(a)	(2,3)	(3,1)	205.36	140.16
图 3(a)	(7,3)	(1,0)	216.05	137.91

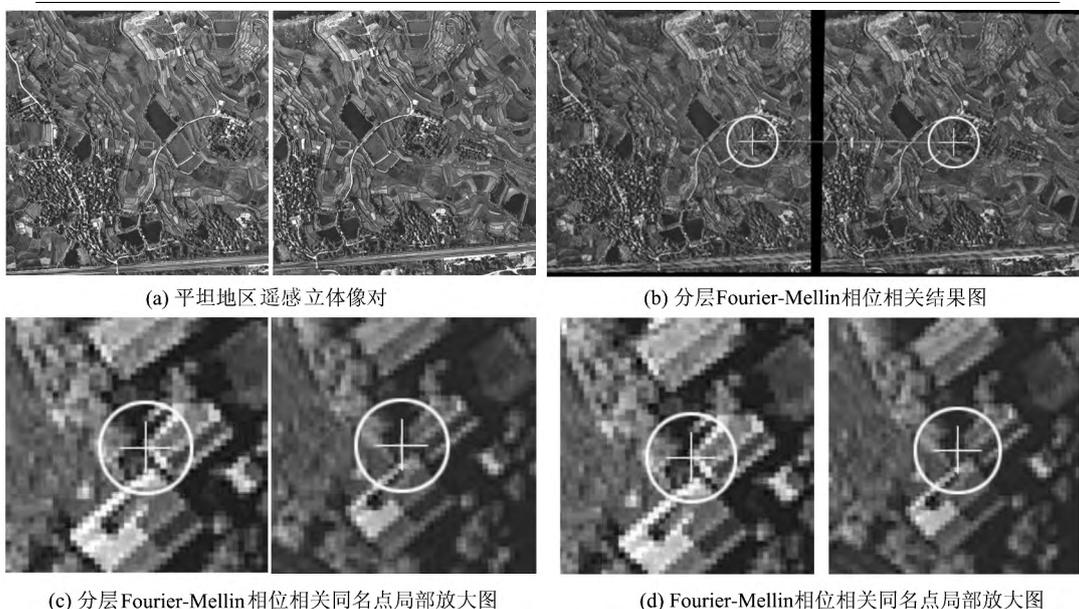


图 1 平坦地区遥感影像实验结果

Fig. 1 Experimental Result of Satellite Stereo Images of Flat Areas

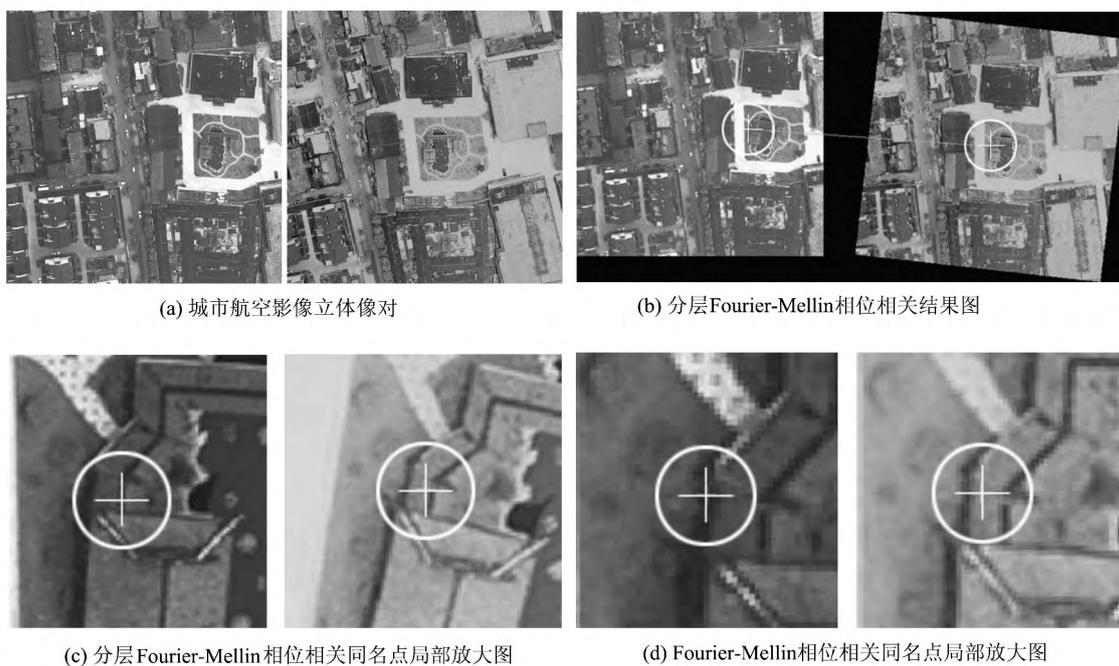


图 2 城市航空影像实验结果

Fig. 2 Experimental Result of Urban Aerial Stereo Image

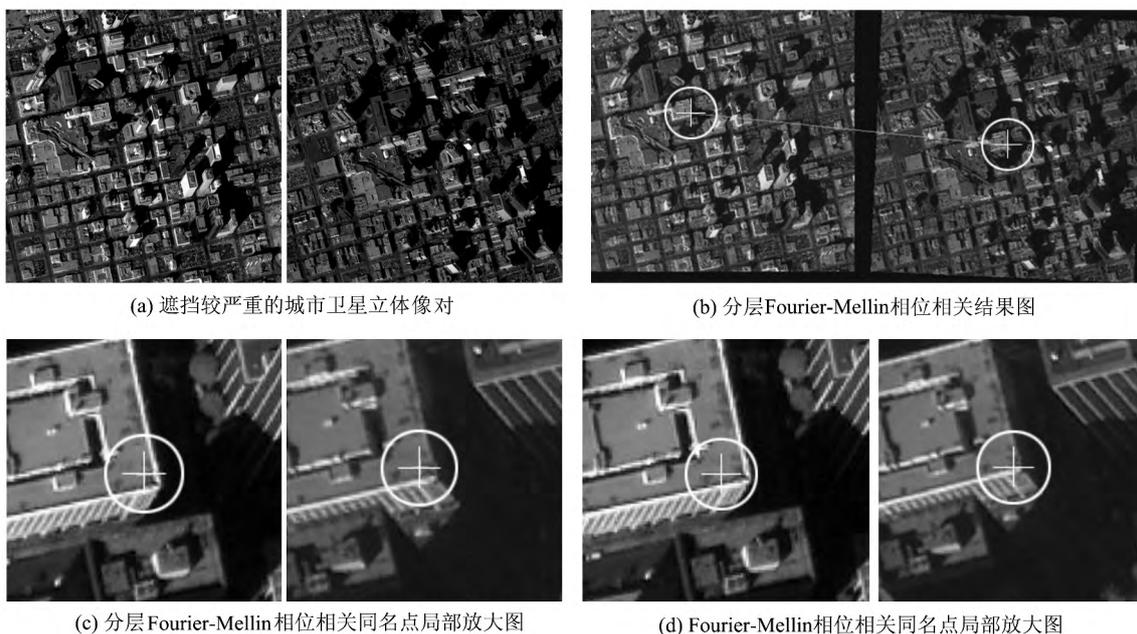


图 3 遮挡较严重的城市卫星影像实验结果

Fig. 3 Experimental Result of City Satellite Stereo Images with Obscured

从实验结果可以看到,采用 Fourier-Mellin 相位相关运算获取图 1(a)、图 2(a) 和图 3(a) 立体影像对初始视差所用时间分别为 207.98 s、205.36 s 和 216.05 s。图 1(a) 立体影像对中心点的 x 、 y 方向的视差误差均为 1 个像素,图 2(a) 立体影像对中心点的 x 、 y 方向的视差误差分别为 2 和 3 个像素,图 3(a) 立体影像对 x 和 y 方向的视差误差分别为 7 和 3 个像素。而采用分层 Four-

rier-Mellin 相位相关法获取图 1(a)、图 2(a) 和图 3(a) 立体影像对整体初始视差所用时间分别为 133.62 s、140.16 s 和 137.91 s,效率明显高于 Fourier-Mellin 相位相关法。实验中,分层 Fourier-Mellin 相位相关法使用了三次线性插值法对影像进行矫正,矫正过程用时较长。若想缩短矫正过程的用时,可以改用双线性或最近邻插值法,进一步提高效率。分层 FM 相位相关法在精度上

也明显高于 Fourier-Mellin 相位相关法。图 1(a) 立体影像对中心点的 x 、 y 方向的视差误差均为 1 个像素,图 2(a) 立体影像对中心点的 x 、 y 方向的视差误差分别为 3 个和 1 个像素,图 3(a) 立体影像对 x 和 y 方向的视差误差分别为 1 和 0 个像素,具体见表 1。图 3(a) 是存在着遮挡现象的具有透视变换的立体影像对,使用分层 FM 相位相关算法获得立体影像对 x 和 y 方向的视差误差分别为 1 和 0 个像素,耗时 137.91 s;而 Fourier-Mellin 相位相关法误差分别为 7 和 3 个像素,耗时 216.05 s。由此可见,分层 FM 相位相关法获得的初始视差在精度和效率上均优于 Fourier-Mellin 相位相关法。

4 结 语

本文将 Fourier-Mellin 变换、相位相关与金字塔影像技术相结合,提出了分层 Fourier-Mellin 相位相关的影像匹配初始视差的全自动获取方法,并给出了具体的实现过程,以及相应的实验结果。几种典型地貌的航空和航天遥感立体影像匹配实验证明,本文提出的分层 Fourier-Mellin 相位相关算法均能获得影像中心点的误差在三个像素以内的初始视差,对于存在一定辐射畸变与几何畸变的影像同样能够获得其中心点较精确的初始视差。该方法无需任何辅助信息与先验知识,适用于航空和航天遥感影像的中心点的高精度初始视差的自动获取。

参 考 文 献

- [1] Huang Yuqi, Mu Xiaohui, Qian Zengbo. Total-automatically Image Matching of Stereoscopic Pair of Aerial Photograpy [J]. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 2000,17(4):277-283(黄玉琪,牟晓辉,钱曾波.航空摄影立体像对的全自动影像匹[J].测绘学院学报,2000,17(4):277-283)
- [2] Yuan Xiuxiao, Xu Ji, Xie Chou. An Algorithm for Determining Parallax of Aerial Images Based on Histograms od Edges and Grads[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(9):762-765(袁修孝,许骥,谢酬.基于边缘梯度投影图的航空影像初始视差确定[J].武汉大学学报·信息科学版,2005,30(9):762-765)
- [3] Zhang Jianqing, Zhang Yong. Vertical Lines Supported Tie Points Auto Extraction of Large Scale Aerial Triangulation over Urban Areas [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008,33(6):556-559(张剑清,张勇.铅垂线辅助的大比例尺城区空三自动转点[J].武汉大学学报·信息科学版,2008,33(6):556-559)
- [4] Li Xiaoming, Zheng Lian, Hu Zhanyi. SIFT Based Automatic Registration of Remotely-sensed Imagery [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006,10(6):885-892(李晓明,郑链,胡占义.基于 SIFT 特征的遥感影像自动配准[J].遥感学报,2006,10(6):885-892)
- [5] Preddv B S, Challerji B N. An FFT-based Technique for Translation, Rotation, and Scale-invariant Image Registration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(8):1 266-1 271
- [6] Li Xiaoming, Zhao Xunpo, Zheng Lian, et al. An Image Registration Technique Based on Fourier-Mellin Transform and Its Extended Applications [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2006, 29(3): 466-472(李晓明,赵训坡,郑链,等.基于 Fourier-Mellin 变换的图像配准方法及应用拓展[J].计算机学报,2006,29(3):466-472)
- [7] Shi Xiaojin, Zhang Yunhua. A New Image Registration Method for Repeat-pass InSAR Based on Fourier-Mellin Transform and Correlation-Coefficient Algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 803-807(石晓进,张云华.基于 Fourier-Mellin 变换和相干系数法的重复轨道干涉 SAR 图像配准新方法[J].电子与信息学报,2009,31(4):803-807)
- [8] Lin Hui, Liang Liang, Du Peijun, et al. Image Registration Based on Fourier-Meliin Transform [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012,37(6):649-652(林卉,梁亮,杜培军,等.利用 Fourier-Mellin 变换的遥感图像自动配准[J].武汉大学学报·信息科学版,2012,37(6):649-652)
- [9] Kuglin C D, Hines D C. The Phase Correlation Image Alignment Method [C]. *IEEE International Conference on Cybernetics and Society*, New York, 1975
- [10] Chen Q, Defrise M 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):1 156-1 168

(下转第 468 页)

3D Building Change Detection by Combining LiDAR Point Clouds and Aerial Imagery

PENG Daifeng¹ ZHANG Yongjun¹ XIONG Xiaodong¹

¹ School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan, 430079, China

Abstract: As the elevation information is not considered in the traditional building change detection methods, this paper presents an algorithm of combining LiDAR data and aerial imagery for the 3D building change detection. With the proposed method, we can extract both the elevation change information and the area change information of the buildings at the same time. Firstly, two DSMs are generated using two periods of LiDAR data. Secondly, differencing, filtering and morphological operations are performed to get the changed DSM area, which is then projected onto the aerial images according to the collinearity equations. After that, the interference of the pseudo-changing areas such as trees is removed using spectrum and texture information of aerial image. Finally, the value of elevation changes and area changes are calculated. Experimental results show that the proposed algorithm can extract the change information of the elevation and area quantitatively, which can provide more comprehensive and accurate information for the building change detection.

Key words: LiDAR point clouds; DSM; aerial imagery; 3D building change detection; elevation change; area change

First author: PENG Daifeng, PhD candidate, specializes in change monitoring applications of satellite images. E-mail: daifeng@whu.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Yongjun, PhD, professor. E-mail: zhangyj@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41171292.

(上接第 456 页)

A Method for Automatically Determining Parallax of Image Matching Based on Layered Fourier-Mellin Phase Correlation

WEI Chuntao^{1,2} ZHANG Zuxun³ ZHANG Jianqing³ WU Ping^{2,4}

¹ School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

² College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

³ School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

⁴ Fujian Provincial Geomatics Center, Fuzhou 350001, China

Abstract: Automatic determination of the initial parallax is a key technology of automatic image matching. The previous methods for determination of the initial parallax are analyzed and summarized in the paper first, and then a novel method, called layered FM phase correlation, is proposed. This method is based on Fourier-Mellin transform theory in combination with layering matching and phase correlation techniques. The method is capable of obtaining high-precision of initial parallax automatically and efficiently without human intervention and other auxiliary data. The validity of the method is conducted by experiments on the several typical image pairs.

Key words: image matching; initial parallax; phase correlation; Fourier-Mellin transform

First author: WEI Chuntao, PhD, professor, specializes on the research of processing and application of remote sensing image. E-mail: gxglwctl@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41171351, 41162011; Guangxi Natural Science Foundation, Nos. 2014GXNSFDA118038.