

文章编号: 1001-1595(2011)05-0587-05

一种基于频谱段能量的高分辨率遥感图像边缘特征检测方法

吴桂平, 肖鹏峰, 冯学智, 王珂, 黄秋燕

南京大学地理信息科学系, 江苏南京, 210093

A Method of Edge Feature Detection from High-resolution Remote Sensing Images Based on Frequency Spectrum Zone Energy

WU Guiping, XIAO Pengfeng, FENG Xuezhi, WANG Ke, HUANG Qiuyan

Department of Geographical Information Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: In view of the characteristics of high-resolution remotely sensed imagery, a novel edge feature detection algorithm based on frequency spectrum zone energy is introduced. From the perspective of energy of image signal, the methods of sliding-window Fourier transformation and frequency energy sectional superposition are used to decompose signal into different frequency spectrum zones. Then according to good noise suppression capacity of DC (direct current) central frequency spectrum zone image, contribution degree of higher-order frequency spectrum zone energy to the image edge feature was further analysed. Finally, the edge detection results are obtained through aggregating spectrum energy coefficient within each window radius of frequency spectrum range from 1 to 1.5 and quantizing image gray between 0-255. The experimental results shows that this algorithm remains good edge of image and has good capability of edge detection in a specific direction as well.

Key words: edge feature; feature detection; frequency spectrum zone energy; window Fourier transform; high-resolution remotely sensed imagery

摘 要: 从图像信号的能量角度出发, 探讨一种基于频谱段能量的高分辨率遥感图像边缘检测的方法。该方法采用滑动窗口傅里叶变换和频谱能量分段叠置的手段, 将含有噪声的图像信号分解到不同的频谱段中, 然后根据直流中心频谱段图像良好的噪声抑制特性, 在此基础上进一步分析其高阶频谱段能量对图像边缘特征的贡献作用, 将 3×3 的滑动子窗口中频谱半径为 1~1.5 范围内的频谱能量系数进行求和叠置, 并量化至 0~255 的灰度范围, 得到最终的边缘检测图像。试验结果表明, 基于频谱能量所检测出的图像边缘特征响应较为显著, 视觉效果尚可, 并且具有特定方向上的边缘检测能力。

关键词: 边缘特征; 特征检测; 频谱段能量; 窗口傅里叶变换; 高分辨率遥感图像

中图分类号: P237

文献标识码: A

基金项目: 国家 863 计划(2008AA12Z106); 国家自然科学基金(40801166; 40771137)

1 引 言

边缘特征检测是遥感图像分割、目标识别以及区域形状提取等领域的核心技术, 目前已经成为遥感科学研究的热点问题之一^[1-3]。在现有的研究中, 有关遥感图像边缘特征检测的问题大都是集中在基于空域像元的梯度算子来进行的^[4-5], 即对图像的每个像元考察它在某个邻域范围内亮度值的变化, 利用边缘邻近一阶或二阶方向导数的变化规律来实现图像边缘的检测, 如 Robert 算子、Sobel 算子、Laplace 算子、LOG 算子等。然而在高空间分辨率的遥感图像上, 不仅地物的光谱特征更加明显, 而且图像具有灰度变化丰富、背景噪声复杂、边缘密度大的特点, 这些以微分为基础的空域检测算子对于高分辨率遥感图像而言, 难

以达到较好的边缘检测效果^[6-7]。

图像的边缘信息不单单靠空域中像元亮度值的变化程度来表现, 同时还可以通过其频域中所固有的频谱能量值来表征^[8], 频率域中频谱值作为物质能量的特征之一, 在描述物体的边缘形态特征上具有独特的优势^[9-10]。同时基于分块的窗口傅里叶变换方法在空频两域上具有突出信号局部特征和进行多分辨率分析的能力^[11-12], 为图像的边缘检测提供了新的有力的手段。基于此, 本文主要以 IKONOS 高分辨率遥感图像数据为基础, 从理论上探讨了一种基于频谱段能量的图像边缘特征检测方法, 该方法首先采用局部滑动分块的傅里叶变换, 分离出了由不同频谱段能量所表征的高、低频信息, 然后通过重点分析高阶频谱段能量对图像边缘特征信息的贡献作用, 同时结合直流中心频谱段

图像良好的噪声抑制特性,实现了高分辨率遥感图像边缘特征信息的有效检测。

2 频段能量

遥感图像实质上是空域中的二维函数,在其中包含有周期性成分、非周期成分、背景、边缘及噪声等信息,而这些成分往往相互纠缠在一起,在空域中很难将它们分离开来。根据傅里叶理论,一个满足一定条件的二维函数可以分解成一系列正弦或余弦函数在二维平面上的叠加。这样就定义了一个函数从空间域到频率域的变换,即傅里叶变换^[13]

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right)} \quad (1)$$

式(1)描述了一个尺寸为 $M \times N$ 的二维图像从空间域到频率域的傅里叶变换,其中每个 $F(u, v)$ 项包含了被指数项修正的 $f(x, y)$ 的所有值,其不同频率成分上频谱值 $|F(u, v)|$ 的大小很大程度上反映了这一图像的空间分布状态^[14]。在频谱图上,每一个频谱峰值均代表了空域中不同的频率成分,而且峰值的大小和位置分别反映了不同成分的周期和取向。同时,整个图像的背景轮廓信息主要反映在低阶频谱能量的分量上,当图像的边缘细节信息很丰富时,则频谱图上反映为高频能量也很丰富。由此可见,利用傅里叶变换技术,可以将图像的像元亮度分布 $f(x, y)$ 变换为对应的频谱能量分布 $F(u, v)$,使得不同频率的成分在频谱图中很好地反映出来,从而方便地实现图像背景、噪声及边缘等指定信息的分离和提取^[15-16]。

根据 Parseval 定理,傅里叶变换后的功率谱 $|F(u, v)|^2$ 与空域图像 $f(x, y)$ 的能量在数值上存在着相等的关系

$$\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} |f(x, y)|^2 = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} |F(u, v)|^2 \quad (2)$$

即变换前后信息的总能量是保持不变的,只是在空域上能量是按 (x, y) 分布的,而在频域中,能量是按照 (u, v) 叠置的。空域内图像的总能量等于频率域内不同频率位置上能量的叠置之和。这里,如果假设大小为 $M \times N$ 的频谱图像所形成的积分区域为 C ,该积分区域可分解为 n 个互不相交的子域 C_i (如图 1 所示),且 $C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$,则有

$$\sum \sum |f(x, y)|^2 = \sum \sum |F(u, v)|^2 + \dots +$$

$$\sum \sum_{C_i} |F(u, v)|^2 \quad (3)$$

式中,能量项 $\sum \sum_{C_i} |F(u, v)|^2$ 表示频谱图中频率子域 C_i 上的能量叠置的大小,该能量称为频段能量,其相应的子域 C_i 称为频段^[17]。因此,适当选取 C_i ,可以将频谱总能量在 n 个不同频率子域上进行分解,而某一个子域上的频段能量则表征了对应空域图像中特定的背景、边缘或噪声等信息特征。

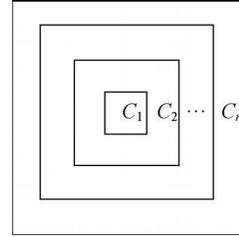


图 1 频段构建示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing construction of frequency spectrum zone

3 局部分块傅里叶变换

传统的二维离散傅里叶变换是空域和频域上的一种全局性变换,得到的是图像信号的整体频谱,因而无法表述图像在局部区域上的特征信息^[18]。这样,利用频段能量进行图像边缘特征检测时,如果将原始图像直接做傅里叶变换,并不能很好地获得该图像的边缘特征信息。为了弥补其不足,可以采用图像子窗口的形式对原图像进行抽取,并将抽取的子图像块分别进行傅里叶变换,从而利用频域子窗口中高阶频段上的频谱能量值来表征图像局部细节的丰富程度及其边缘的走向^[18]。

在抽取子图像块时,最简单的方法是直接将原始图像分割成相互分离的 $s \times s$ 子块,并将分块后的一系列空域分析基元进行二维离散傅里叶变换(如图 2 所示),得到对应的频域分析基元,然后利用图 1 的方法,根据不同频谱半径的大小分离出各频率段的能量总和,从而生成反映不同空域特征信息的频段图像。然而直接分割分块的方法,其本质上是利用子窗口内各频段总能量特征作为该窗口中心点像元值的统计方法,基于这一方法,一方面显然会降低频段图像的分辨率,另一方面也会破坏每个子块边缘特征间的统计特性^[19]。针对此情况,本文采取基于滑动窗口的策略来对原图像

进行滑动抽取, 使得经过滑动子窗口抽取的图像块在原图像中的位置相互有重叠, 经过子窗口提取后, 将子窗口内各频谱段的能量和作为该窗口中心点像元值, 最后按照不同频谱半径的大小分离出对应的高低频信息。基于这种方法, 不但可以弥补子图像块频谱能量间的统计特性, 而且很好地保持了各频谱段图像的原始分辨率大小。

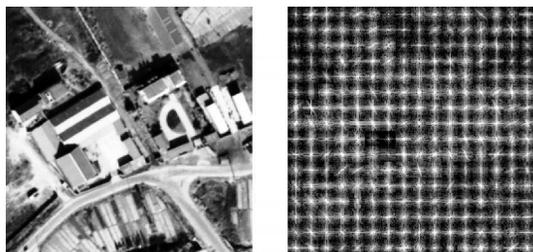


图 2 分块傅里叶变换示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing block Fourier method

在上述操作中, 滑动窗口的大小 s 对于图像特征信息的提取至关重要。一般而言, 为了获得较为细致的边缘特征, 往往需要选取较小的窗口尺寸。但是为了更好地检测和区分图像的背景、噪声和边缘等不同频谱段能量在频域空间的分布情况, 窗口尺寸又不能过小。为了处理问题的方便, 以更好地从理论上探讨基于频谱能量的图像边缘检测的可行性, 本文的滑动窗口大小拟定为 3×3 。而在实际应用中, 可以在水平及垂直方向上任意选取图上的几行和几列像元, 并对所选的行列像元分别进行一维傅里叶变换, 对于绝大多数典型图像来说, 直流分量后的第一个非零频率处的峰值对应了图像中特征信息的最低频率, 因此只需取这些频率对应的空间尺寸中较大的一个作为滑动窗口的尺寸即可。

4 边缘特征检测

图像边缘表征图像中灰度发生急剧变化的区域边界, 是图像中最为集中的高频信息。因此在利用频谱段能量进行图像的边缘检测时, 对图像高阶频谱段能量的分析是至关重要的, 也就是说高阶频谱段图像在一定程度上反映了原始空域图像中的边缘特征信息。但是由于实际处理的高分辨率遥感图像往往是存在着大量的噪声信息的, 而且噪声和边缘在空域中都表现为梯度的突变, 在频域中均表现为高频信息, 这就给边缘特征信

息的检测带来了困难。与噪声信息不同的是, 边缘信息具有较大的能量和范围, 其在均值平滑的作用下, 不会像噪声那样很快消失, 而是表现为模糊化, 因此可以在表征大尺度图像信息的低频能量段下抑制噪声, 可靠地识别边缘, 然后在表征小尺度细部信息的高频能量段下精确定位, 得到边缘的真实位置。

考虑到频谱图的直流分量表征了原始空域图像的亮度均值信息, 因此基于本文给出的滑动分块傅里叶变换方法, 边缘检测算法由以下几步完成: ① 根据选定的 3×3 子窗口, 将原始图像进行滑动分块, 同时对每一个滑动抽取的图像子块进行二维离散傅里叶变换; ② 将滑动窗口范围内频谱中心能量值 $\sum \sum_{c_1} |F(u, v)|^2$ 赋予窗口中心构成直流中心频谱段图像, 从而达到对图像噪声滤除的目的; ③ 对经过噪声滤除的直流中心频谱段图像量化至 0~255 的灰度范围, 并在此基础上进一步进行滑动分块傅里叶变换的操作; ④ 将每个分块子窗口中频谱半径为 1~1.5 范围内的频谱能量系数进行求和叠置, 生成高阶频谱段图像; ⑤ 最后对高阶频谱段图像进行量化, 得到最终的边缘检测图像。

另外, 边缘信息的频谱能量特征是其空间特性在频域中的反映, 不同方向上的频谱段能量反映了图像边缘轮廓的走向的不同。在实际的一幅遥感图像中, 有时候可能需要研究某一特定方向上的边缘特征, 这就要求根据边缘方向的不同, 提取不同方向上的频谱段能量。在上述操作的第 ④ 步中, 将滑动窗口内与空域边缘走向相垂直的方向上的频谱能量系数进行求和叠置, 同时将叠置的能量值作为各个滑动窗口的中心像元值, 便可以检测出相应方向边缘的最大响应特征。

5 试验与结果分析

为了验证本文方法的有效性, 选取了 2000 年 9 月 15 日获取的江苏省南京市的两块 IKONOS 全色影像(农田影像和厂房影像)进行试验, 影像空间分辨率为 1 m, 图像大小均为 256 像素 \times 256 像素(如图 3(a)所示)。在试验之前, 首先将原始遥感图像进行了直方图线性拉伸, 使拉伸后的图像直方图包含 0~255 全部可能的灰度级, 以有利于图像边缘特征的精确检测。图 3(b) 是由滑动窗口的直流中心频谱能量所构成的低频频谱段图

像,图 3(c) 为分块子窗口中频谱半径为 1~ 1.5 范围内的频谱能量所叠置生成的高阶频谱段图像。从图中可以看出,图 3(b) 对噪声表现出比较明显的抑制作用,并很好地反映了原图像的背景信息,而图 3(c) 由于是由高频能量叠置所得,因此图像在整体上表现出边缘特征的同时,还含有大量的细部噪声信息,使得检测出的边缘轮廓很不清晰。图 3(d) 是在经过低阶频谱段图像噪声抑制的基础之上,再次进行滑动分块傅里叶变换及高阶频谱段能量叠置之后所得到的边缘检测结果。从结果可以看出,图 3(d) 很好地反映出了原

始遥感图像的边缘轮廓信息,边缘定位比较准确。在对边缘细节的检测上,与其他空域检测算子相比,基于本文的方法所检测到的边缘较光滑、骨架连续性好,并且噪声得到抑制的同时,图像原有边缘轮廓特征较为明显(如图 4 所示)。另外,图 5 显示了基于频谱段能量的方法所获得的特定方向上的图像边缘检测结果。其中,图 5(a) 和图 5(b) 有效地检测出了农田影像在 0° 和 90° 方向上的边缘特征信息,图 5(c) 及图 5(d) 比较准确地反映了厂房影像在 45° 和 135° 方向上边缘信息的最大响应特征,并且所得到的方向边缘图像的纹理较好。

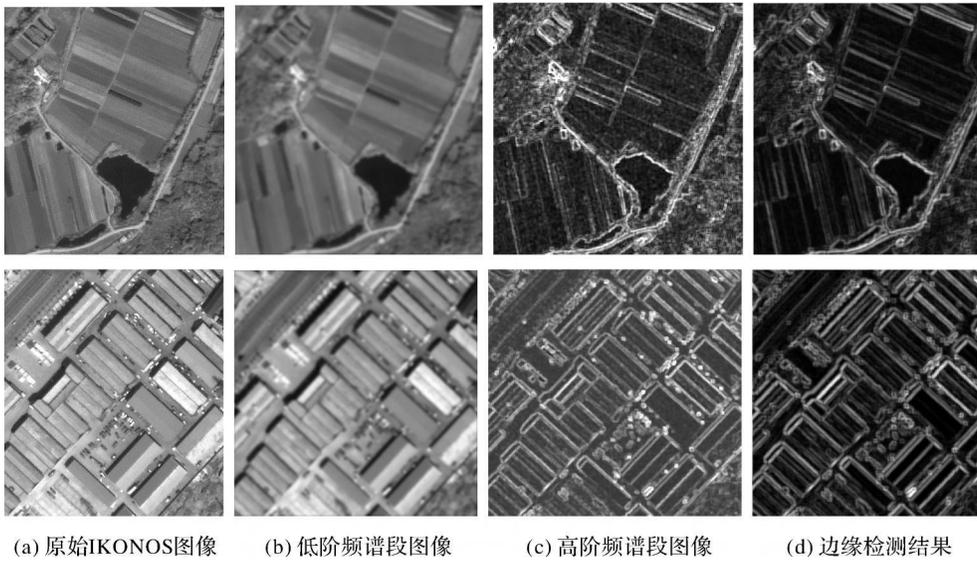


图 3 基于频谱段能量的 IKONOS 遥感图像边缘特征检测

Fig. 3 Edge feature detection from IKONOS image based on frequency spectrum zone energy

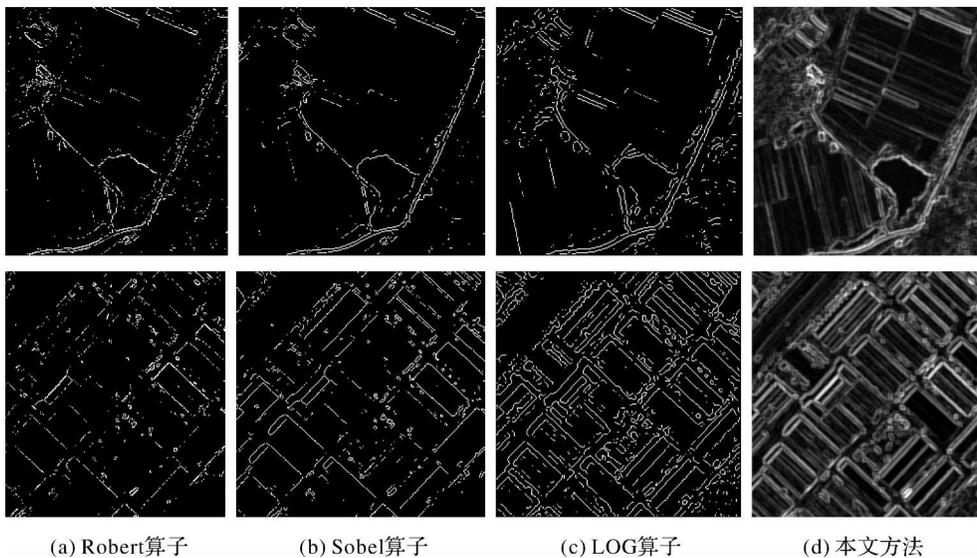


图 4 不同边缘特征检测算法的结果比较

Fig. 4 The comparison of edge detection results among different methods

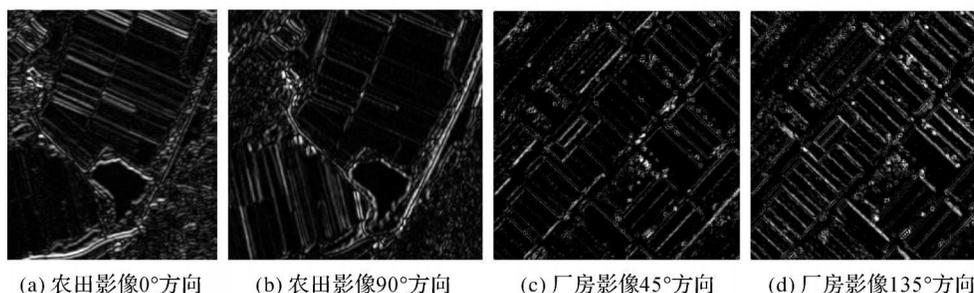


图5 特定方向上的边缘检测结果

Fig. 5 Edge detection results in specific direction

6 结论与讨论

本文方法从图像信号本身出发,利用滑动分块傅里叶变换和频谱能量分段叠置的手段,将含有噪声的图像分解到不同的频段中,同时结合直流中心频段图像良好的噪声抑制特性,实现了高分辨率遥感图像边缘特征信息的快速精确检测。试验结果表明,基于频谱能量所检测出的图像边缘特征的响应较为显著,视觉效果尚可,并且具有特定方向上的边缘检测能力。纵观该方法的整个过程,既利用了滑动窗口细化并强化了边缘信息,又利用了高阶频段能量寻边,避免了边缘不连续的问题,这是传统的基于空域像元的梯度算子所无法得到的效果,因此该方法对于高分辨率遥感图像的边缘特征检测及降噪是行之有效的。然而,在利用频段能量进行边缘特征检测时还有一些待完善之处,例如对于最佳滑动窗口的选取能否采用更为科学的方法进行;能否根据频谱能量系数对边缘特征的叠置情况进行分析,精确地确定哪一个频段半径对边缘轮廓的特征起主要贡献等,都需要继续优化和深入。

参考文献:

- [1] TOUZI R, LOPES A, BOUSQUET B. A Statistical and Geometrical Edge Detector for SAR Images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(6): 764-773.
- [2] ZHAO Xi'an, LI Deren. Constructing Two Dimension Symmetric Wavelets for Extracting Edge Features of Image at Multiscales [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(4): 313-319. (赵西安, 李德仁. 2维对称小波与多尺度影像边缘特征提取[J]. 测绘学报, 2003, 32(4): 313-319.)
- [3] LEI Xiaoqi, WANG Weixing, LAI Jun. A Method of Road Extraction from High-resolution Remote Sensing Images

Based on Shape Features [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(5): 457-465. (雷小奇, 王卫星, 赖均. 一种基于形状特征进行高分辨率遥感影像道路提取方法[J]. 测绘学报, 2009, 38(5): 457-465.)

- [4] ROBERTS L G. Machine Perception of Three-dimensional Solids [C] // Optical and Electro-optical Information Processing. New York: Garland Pub, 1965: 159-197.
- [5] SOBEL I. Neighbourhood Coding of Binary Images for Fast Contour Following and General Array Binary Processing [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1978: 127-135.
- [6] XIAO Pengfeng, FENG Xuezhi, ZHAO Shuhe, et al. Feature Detection from High-resolution Remotely Sensed Imagery Based on Phase Congruency [J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(3): 303-310. (肖鹏峰, 冯学智, 赵书河, 等. 一种基于相位一致的高分辨率遥感图像特征检测方法[J]. 遥感学报, 2007, 11(3): 303-310.)
- [7] ZHANG Xiaodong, LI Deren, CAI Dongxiang, et al. A trous Wavelet Decomposition Applied to Detecting Image Edge [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(1): 29-33. (张晓东, 李德仁, 蔡东翔, 等. A trous 小波分解在边缘检测中的应用[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2001, 26(1): 29-33.)
- [8] KUI Zhongyu. Initial Research on Geographic Frequency Spectroscopy: Imaging Mechanism of Stripes Structure Information of Terrestrial Objects [J]. Image Technology, 1998(1): 1-11. (夔中羽. 地物频谱学研究始步: 地表物体纹理结构信息成像机理[J]. 影像技术, 1998(1): 1-11.)
- [9] TAN Yanying, DONG Zhixin. Spectrum Analyzing of Image Edges and Application in Transform Coding [J]. Acta Electronica Sinica, 1995, 23(9): 61-65. (谭雁英, 董志信. 图像边缘信息的谱分析及其在变换编码中的应用[J]. 电子学报, 1995, 23(9): 61-65.)
- [10] YAN Xueqiang, LIU Jilin, GUO Xiaojun, et al. Texture Segmentation Algorithm Based on Spatial Frequency Domain [J]. Journal of Zhejiang University: Natural Science, 1998, 32(6): 726-731. (严学强, 刘济林, 郭小军, 等. 基于空间频率域的纹理分割算法[J]. 浙江大学学报: 自然科学版, 1998, 32(6): 726-731.)

(下转第609页)

- Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(10): 856-859. (袁修孝. POS数据用于立体模型恢复时的上下视差分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(10): 856-859.)
- [5] GREENING T, SCHICKLER W, THORPE A. The Proper Use of Directly Observed Orientation Data: Aerial Triangulation is Not Obsolete[C] // Proceedings of 2000 ASPRS Annual Conference. Washington DC: ASPRS, 2000.
- [6] GRUEN A, BAER S. Aerial Mobile Mapping—Georeferencing without GPS/INS [C] // Proceedings of the 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology. Cairo: [s. n.], 2001.
- [7] JACOBSEN K, WEGMANN H. Dependencies and Problems of Direct Sensor Orientation[C] // Proceedings of the OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation. Hannover: [s. n.], 2001.
- [8] CRAMER M, STALLMAN D. System Calibration for Direct Georeferencing[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, 34: 79-84.
- [9] HONKAVAARA E. Calibration Field Structures for GPS/IMU/Camera-system Calibration [J]. The Photogrammetric Journal of Finland, 2003, 18(2): 3-15.
- [10] WANG Zhizhuo. Principles of Photogrammetry [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1990. (王之卓. 摄影测量原理[M]. 北京: 测绘出版社, 1990.)
- [11] ACKERMANN F. GPS for Photogrammetry [C] // Proceedings of Tutorial on Mathematical Aspects of Data Analysis. [S. l.]: ISPRS. 1991: 17-70.

(责任编辑: 雷秀丽)

收稿日期: 2010-06-28

修回日期: 2010-12-25

第一作者简介: 张永军(1975—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事数字摄影测量与遥感、计算机视觉方面的研究。

First author: ZHANG Yongjun(1975—), male, PhD, professor, PhD supervisor, majors in digital photogrammetry and remote sensing, computer vision.

E-mail: zhangyj@whu.edu.cn

(上接第591页)

- [11] CAO Rong, WANG Ying, LI Xianglin. An Adaptive DFT Domain Digital Watermarking Scheme [J]. Computer Engineering and Applications, 2006(10): 77-78. (曹荣, 王颖, 李象霖. 一种自适应的 DFT 域数字水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2006(10): 77-78.)
- [12] ZHANG Xiaoyun, ZHU Qingsheng, ZENG Lingqiu. Algorithm of Document Skew Detection Based on Straight-line Fitting[J]. Application Research of Computers, 2005(6): 251-253. (张晓芸, 朱庆生, 曾令秋. 基于直线拟合的文本倾斜检测算法[J]. 计算机应用研究, 2005(6): 251-253.)
- [13] JAIN A. Fundamentals of Digital Image Processing[M]. New York: Prentice-Hall, 1989.
- [14] YE Zetian. Frequency Spectrum Zone Images and Their Applications[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 8(2): 139-146. (叶泽田. 频谱段图像及其应用的探讨[J]. 环境遥感, 1993, 8(2): 139-146.)
- [15] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital Image Processing [M]. Second Edition. New York: Prentice Hall, 2002.
- [16] BALLARD D, BROWN C. Computer Vision[M]. New York: Prentice-Hall, 1982.
- [17] YE Zetian. Frequency Spectrum Zone Images and Their Applications[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 8(2): 139-146. (叶泽田. 频谱段图像及其应用的探讨[J]. 环境遥感, 1993, 8(2): 139-146.)
- [18] YU Zhenming, MAO Shiyi, GAO Fei. Image Fusion via Localized Fourier Transform[J]. Signal Processing, 2004, 20(3): 227-230. (玉振明, 毛士艺, 高飞. 用局部傅里叶变换进行图像融合[J]. 信号处理, 2004, 20(3): 227-230.)
- [19] HUANG Qihong, LIU Zhao. Image Edge Feature Extraction Based on Independent Component Analysis [J]. Infrared, 2006, 27(5): 13-16. (黄启宏, 刘钊. 基于独立分量分析的图像边缘特征提取[J]. 红外, 2006, 27(5): 13-16.)

(责任编辑: 丛树平)

收稿日期: 2010-09-06

修回日期: 2010-11-16

第一作者简介: 吴桂平(1980—), 男, 博士生, 研究方向为高分辨率遥感影像处理。

First author: WU Guiping (1980—), male, PhD candidate, majors in high-resolution remote sensing image processing.

E-mail: csuwgp@126.com