

基于高斯拟合的高光谱影像配准算法

高雅,周佳霖,侯雪,王晓飞*,王霄衣

(黑龙江大学 电子工程学院,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:传统的基于区域的配准方法是搜索配准控制点在离散的图像坐标点上进行的,从而限制了配准控制点定位精度这一问题,所以文中提出了一种基于高斯拟合的高光谱影像配准算法。与传统基于区域的配准方法类似,该方法是利用图像灰度信息,建立两幅图像之间的相似性度量,搜索使相似性度量值最大或最小的点作为配准控制点,但与传统方法不同之处在于,在搜索过程中,并不是直接寻找极值点作为配准控制点,而是通过在搜索过程中,首先生成相似度矩阵,利用极值点附近的值求出高斯拟合函数系数,利用高斯函数的极值点作为配准控制点。在对多组 Hyperion 高光谱影像进行配准的实验中,精度均优于传统方法,达到了亚像素级,满足后续的融合、变化检测等需要。

关键词: 遥感; 高光谱影像; 配准; 高斯拟合

中图分类号: TP751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S223002

Registration algorithm for hyperspectral image based on Gaussian fitting

Gao Ya, Zhou Jialin, Hou Xue, Wang Xiaofei*, Wang Xiaoyi

(School of Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: The traditional registration method is based on the search area registration and it is carried out at control points of the image coordinates of discrete points, but this method will limit the positioning accuracy of the registration control point. Aiming at this problem, a high spectral registration method which is based on Gaussian fitting was presented. Similar to the traditional registration method based on region, this method also used the gray information of images to build the similarity measure between two images and searched the point at which the similarity measure can reach its maximum or minimum to be the registration control points. Different with the traditional methods, it did not go straight for the extreme point and used it as the registration control point during the process of search, instead, the similarity-matrix was produced at first during the process of search and coefficients of Gaussian fitting function could be obtained from the value near the extreme points, the extreme points of Gaussian fitting function were used as the registration control points to complete the registration. The multiple sets of experimental results of hyperion high spectral registration all show that the method presented in the paper is more accurate than the traditional methods, and the registration accuracy reaches sub-pixel successfully, the method can meet the follow-up demands such as fusion, change detection and so on.

Key words: remote sensing; hyperspectral images; registration; Gaussian fitting

收稿日期:2016-08-12; 修订日期:2016-09-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0502502)

作者简介:高雅(1992-),女,硕士生,主要从事遥感图像处理与应用方面的研究。Email: gaoxiaoyahome@163.com

通讯作者:王晓飞(1977-),男,副教授,博士,主要从事遥感图像处理与应用方面的研究。Email: nk_wxf@hlju.edu.cn

0 引言

近几十年,高光谱成像技术得到高速发展,越来越多的搭载高光谱成像光谱仪的卫星升空,比较有代表性的如美国的 MODIS,Hyperion, 澳大利亚的 ARIES 卫星, 我国的环境卫星和高分专项中也有高光谱卫星系列, 这些卫星给我们带来了更多的可利用的高光谱数据,为工业、农业、环境、勘探、考古、安全等国民生活的各个领域提供信息服务。在高光谱应用过程中,经常都会将不同时期的高光谱数据进行融合或比较分析,而待分析处理的数据必须是经过严格配准的^[1]。虽然,一些卫星在提供数据的同时,有一些也附带了精确的经纬度信息,但是数据本身是粗配准的,由于设备本身原因,配准精度可能达不到要求,或者,数据本身并没有精确的经纬度信息,这些都需要后期进行高精度配准^[2](精度优于 0.5 像素)。

配准基本上包括三步^[3]:(1)人工或机器寻找输入图像和基准图像的同名点作为配准控制点;(2)根据配准控制点建立几何变换关系;(3)利用几何变换关系进行输入图像几何校正,从而使两幅或多幅图像同名点具有相同的空间坐标。而这三步中,技术的关键在于配准控制点的选取上,其控制点选取的精度直接会影响到最终的配准精度。

早期配准控制点的选取是由人工寻找输入图像和基准图像作为同名点,但是该方法需要专业人员,费时费力,实时性不强,而且精度受人为影响严重。目前,自动的配准控制点方法一直被科研工作者们所关注,并取得了较好的精度。自动配准控制点选取上主要分为两类,一类是基于特征的配准方法,依赖的是图像中的某些特征^[4-5],如边缘的拐点、区域的重心和纹理等,主要应用于存在鲜明特征并易于提取的图像中,但方法受特征提取误差的影响,很难得到较高的配准精度,而且往往只对某些特定的图像有效。另一类是基于区域的配准方法^[6-7],此类方法依赖图像的一些灰度统计信息,如利用相关、互信息等作为相似性测度,比较适合于灰度分布上有线性关系的图像。但传统方法仅能在输入图像的离散坐标位置搜索配准控制点,无法得到更高精度的配准结果。其他算法还有结合了基于区域和基于特征的

两类方法优点的基于混合模型的配准方法,还有把图像理解为一个整体的物理模型,通过模拟形变过程,进行反演的基于物理模型的配准方法等等。

文中以 EO-1 搭载的高光谱图像 Hyperion 数据为例,从提高配准控制点精度出发,对经典基于区域的配准方法进行改进,利用模板搜索后生成的互信息矩阵进行二维高斯拟合的方法来寻找配准控制点,使配准精度较经典方法得到显著提高。

1 基于二元高斯函数拟合的配准控制点提取算法

1.1 互相关法配准原理

对于光学传感器获取的遥感图像而言,同一地面目标在每幅图像上都具有相应的图像结构,并且它们之间是十分相似的,这也是利用目视判读方式能找到同名点(配准控制点)的原因。由于它们之间具有这种相似性,导致它们之间具有一定的相关性,当两幅图像表示同一地物时,相关系数应达到一个极大值,这就是相关系数法提取配准控制点的原理。

设 f, g 为二幅大小相同的图像,则它们的相关系数^[8]为:

$$r = \frac{\sum_x \sum_y (f(x, y) - \bar{f})(g(x, y) - \bar{g})}{\sqrt{\left(\sum_x \sum_y (f(x, y) - \bar{f})^2 \right) \left(\sum_x \sum_y (g(x, y) - \bar{g})^2 \right)}} \quad (1)$$

式中: $f(x, y), g(x, y)$ 为图像在 (x, y) 点像素值; \bar{f} 为图像 f 的像素值的平均值; \bar{g} 为图像 g 的像素值的平均值。当图像 f 和图像 g 表示同一地物时,理论上相关系数 r 可达到极值1,但是由于噪声的存在,通常相关系数绝对值小于1。

如图1所示,设 F 为参考图像, G 为输入图像,可以根据相关系数法配准原理,通过分窗口相关的方法在 F 和 G 上搜索配准控制点,当 F 和 G 的分辨率大小不一样时,需要对低分辨率图像进行放大,使两幅图像的像素点对应的地面面积相同。具体的寻找配准控制点步骤如下:

(1)先在参考图像上选取以参考点为中心,大小为 $m \times n$ 的区域作为目标区域 T_1 。然后确定搜索图像的搜索区 S_1 ,其大小为 $J \times K$,要求 $J > m, K > n$,模板大小和搜索范围可根据图像间的相对平移程度和图像

分辨率估计后,根据实验得出。而搜索区区域大小可根据待配准图像与参考图像之间几何平移的大小来确定。

(2) 将模板 T_i 放入搜索区 S_i 内搜索同名点。从左至右,从上到下,逐像素的移动模板来计算目标区和搜索区内与模板同大小区域间的相关系数,将其存储在一个相关系数矩阵 $R=(r_{i,j})_{M \times N}$ 中,其中 $M=(J-m+1), N=(K-n+1)$ 。认为相关系数矩阵 R 中绝对值最大的元素所对应的区域与模板区域为同一地物,以两区域中心作为配准控制点。

(3) 选取下一个目标区,重复(1),(2)以得到其在搜索区的配准控制点。

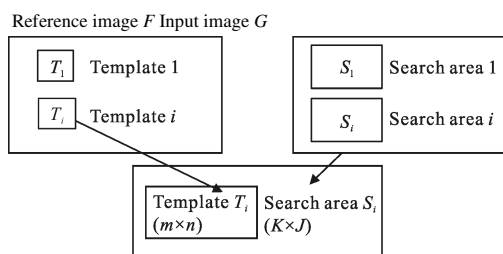


图 1 模板和搜索区的构成

Fig.1 Template and search area

前面介绍的相关系数法在配准控制点提取过程中,所采用的模板移动步长是离散的,因此最终所获得的控制点也只能是离散的值。而实际上在基准图像中提取的控制点在输入图像对应点的坐标不一定位于这些离散的位置,这样在进行控制点提取时将产生较大的量化误差,使配准结果无法达到较高的精度。事实上图像像素点的灰度值与其邻域点的灰度值并不是独立的,根据地理统计学知识,在观测现实世界时,空间自相关总是存在的。如图 2 所示,因为距离较近的区域比距离较远的区域更为相似,但随着距离的增加,空间自相关性会降低^[9]。由于这种

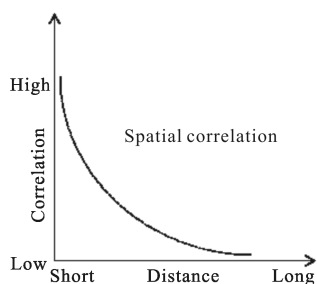
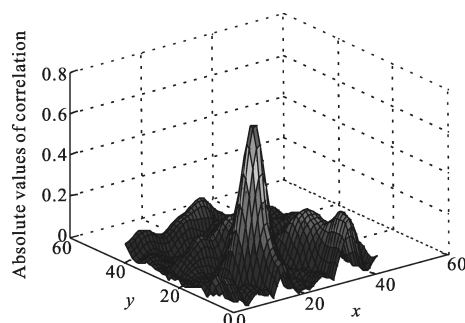


图 2 遥感图像空间相关性示意图

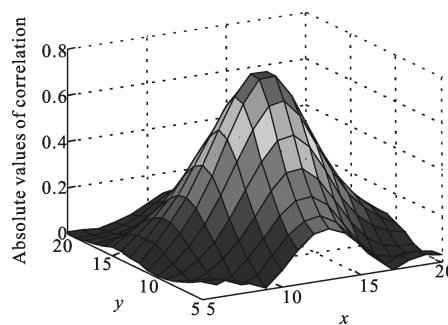
Fig.2 Spatial correlation of remote sensing image

相关性的存在,使相关系数矩阵 $R=(r_{i,j})_{M \times N}$ 在当两幅图像配准时取得最大值后,矩阵中最大值附近点的值近似呈现某种函数形式的下降。对此文中提出一种二维高斯拟合的方法,认为在没有噪声的干扰下,相关系数矩阵 R 的所有元素应为一个二维高斯函数上的对应点,因此对搜索配准控制点时生成的相关系数矩阵 R 进行高斯拟合,以拟合曲面 $r(x,y)$ 最大值的所对应的坐标作为控制点坐标。这样,配准控制点的位置将更为准确。图 3 即为正常区域时,生成的相关系数矩阵的三维显示及其局部放大图,从中可以看出在矩阵最大点附近所呈现出的高斯曲面形状。



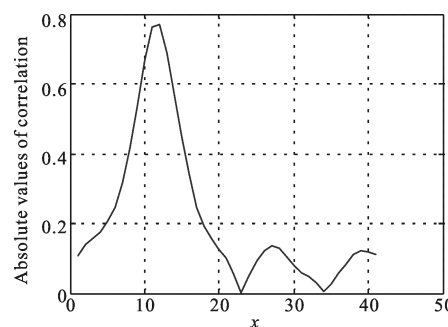
(a) 相关系数矩阵

(a) Correlation coefficient matrix



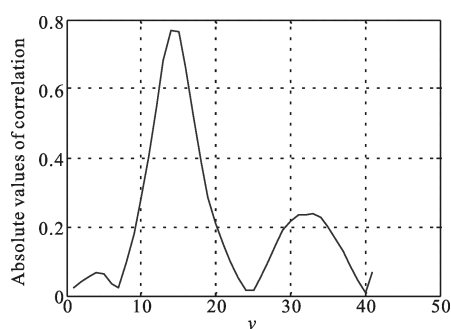
(b) 局部放大图

(b) Partial enlarged view



(c) 相关系数矩阵(x轴方向)

(c) Correlation coefficient matrix (x axis direction)



(d) 相关系数矩阵(y轴方向)

(d) Correlation coefficient matrix (y axis direction)

图 3 相关系数矩阵显示

Fig.3 Correlation coefficient matrix

1.2 二元高斯函数拟合

由于经典的互相关法在配准控制点提取过程中,所采用的模板移动步长是离散的,因此最终所获得的控制点也只能是离散的值。而实际上在基准图像中选取的控制点在输入图像对应点的坐标不一定位于这些离散的位置,这样在进行控制点选取时将产生较大的量化误差,使配准结果无法达到较高的精度。事实上图像像素点的灰度值与其邻域点的灰度值并不是独立的。因为图像能量密度函数可近似认为是二维高斯分布,而这种相关性的存在,使互相关矩阵(将模板与搜索区域间的互信息与平移坐标对应后得到的矩阵)在当两幅图像配准时取得最大值后,矩阵中最大值附近点的值近似呈现一种高斯函数形式的下降。对此文中提出一种二维高斯拟合的方法来改进经典方法的不足,即对在搜索配准控制点时生成的互信息矩阵 $I(x,y)$ 进行高斯拟合,以拟合曲面 $f(x,y)$ 最大值点的坐标作为控制点坐标。这样,配准控制点的位置将更为准确。

一个二维高斯方程可以表示为:

$$f(x,y)=Ge^{-\left[\frac{(x-x_0)^2}{2\delta_x^2}+\frac{(y-y_0)^2}{2\delta_y^2}\right]} \quad (2)$$

式中: G 为高斯分布的幅值; δ_x, δ_y 为两个方向上的标准差。对公式两边取对数,并同乘以 $f(x,y)$,整理得到:

$$f \ln f = \left[\ln G - \frac{x_0^2}{2\delta_x^2} - \frac{y_0^2}{2\delta_y^2} \right] \cdot f + \frac{x_0}{\delta_x^2} \cdot x f + \frac{y_0}{\delta_y^2} \cdot y f - \frac{1}{2\delta_x^2} x^2 f - \frac{1}{2\delta_y^2} y^2 f \quad (3)$$

将 N 个数据点 $\{x_i, y_i, f(x_i, y_i)\}$ (其中, $i=1, 2, \dots, N$) 分别代入得到方程组

$$A=BC \quad (4)$$

其中, A 为向量 $N \times 1$, 其元素为:

$$a_i = f_i \cdot \ln f_i \quad (5)$$

B 为 $N \times 5$ 矩阵, 其行向量为:

$$[b_i] = [f_i \quad f_i x_i \quad f_i y_i \quad f_i x_i^2 \quad f_i y_i^2] \quad (6)$$

C 为由待估计的高斯参数组成的向量

$$C^T = [c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4 \quad c_5] =$$

$$\left[\ln G - \frac{x_0^2}{2\delta_x^2} - \frac{y_0^2}{2\delta_y^2}, \frac{x_0}{\delta_x^2}, \frac{y_0}{\delta_y^2}, -\frac{1}{2\delta_x^2}, -\frac{1}{2\delta_y^2} \right] \quad (7)$$

当 $N=5$ 即可求出方程的解。为提高精度,文中在互信息矩阵最大值点周围选取 $N=25$ 个点,利用最小二乘法拟合求出 C , 这样可以得到高斯拟合的极值点 (x_0, y_0) , 该点即为配准控制点在输入图像中的坐标。

$$x_0 = -\frac{c_2}{2c_4}, y_0 = -\frac{c_3}{2c_5} \quad (8)$$

2 实验结果及性能分析

实验采用网上下载的 Hyperion 数据, 两组数据都是拍摄于美国圣地亚哥地区, 第一组数据: Entity ID: EO1H0220322007234110KY_PF1_01, 时间是 2007/08/22, 中心纬度 $39^\circ 05' 46.84'' N$, 中心经度 $88^\circ 14' 56.78'' W$, 少云天气。第二组数据: Entity ID: EO1H0220322007224110PZ_SGS_01, 时间是 2007/08/12, 中心纬度: $39^\circ 06' 54.64'' N$, 中心经度: $88^\circ 16' 40.24'' W$ 。这里配准实验采用的是其中部分图像, 大小为 512×512 的全部波段数据, 图 4(a)、(b) 分别是其彩色合成图像。因其包括了空间信息数据, 自动实现了粗配准, 但是, 存在明显的配准偏差。

将文中算法与经典配准算法生成的互相关图进行比较, 一个具体例子如图 5 所示。图 5(a) 为搜索过程生成的测度矩阵的三维图。根据最大相似性测度

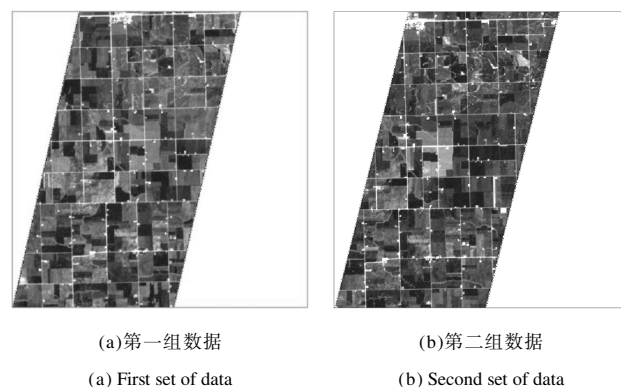
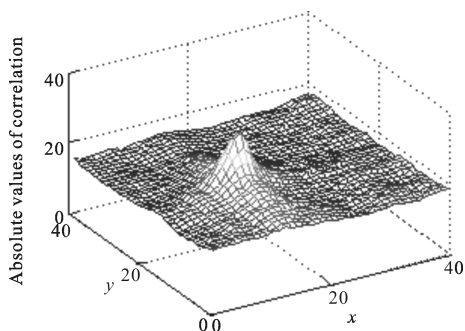


图 4 实验用数据

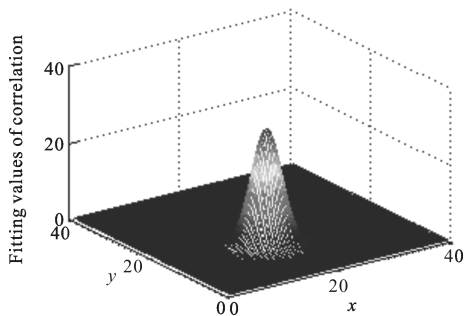
Fig.4 Experimental data

判别准则,将选择点(117,215)来确定控制点位置。而图 5(b)所示为将测度矩阵进行二维高斯拟合得到的曲面,函数的最大值位置在(117.273 1,214.656 9)处。可以看出,采用文中算法可以避免传统算法仅在离散点位置搜索控制点的不足。



(a)互相关算法

(a) Cross correlation algorithm



(b)文中算法

(b) Algorithm in this paper

图 5 两种方法的互相关三维图

Fig.5 Cross-correlation 3D map of the two methods

(a)模板大小的选择

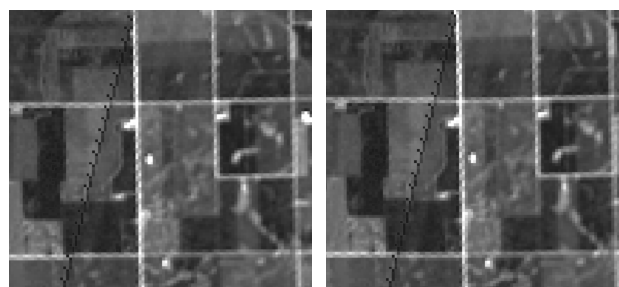
实验中首先要选择合适大小的模板,当模板越大时公式(13)中的联合概率 $P_{xy}(x,y)$ 的估计误差越小。但过大的模板会带来计算量的增加。通过对不同大小的模板进行实验得到,当模板大小选择 21×21 像素时,互信息矩阵的峰值就比较明显了。

(b)平坦区域的处理

对于平坦区域(如水域,广场,草地等),理想情况下灰度值应为相同值,因此在计算互相关时,模板移动搜索过程中会很难找到真实的对应点位置。这种容易产生错误的配准控制点对。为了避免这种情况的出现,实验过程中对平坦区域将不再搜索控制点,这样,一方面可以减少大误差的控制点的出现,而且可以减小计算量,提高计算效率。

(c)不同方法的对比

为验证文中方法的有效性,实验分别采用经典的互相关法和文中方法进行配准。图 6(a)为数据原始地理坐标匹配后效果、(b)为文中配准后叠加效果、(c)为对输入图像进行配准结果图。表 1 为从中任意选取 4 对配准控制点的误差对比,其中误差评

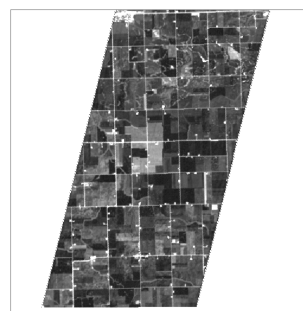


(a)原始配准效果

(b)文中方法配准效果

(a) Original registration effect

(b) Registration effect of proposed method



(c)配准结果图

(c) Registration results

图 6 配准结果图

Fig.6 Registration results

表 1 不同方法配准控制点精度对比

Tab.1 Comparison of precision of control point registration with different methods

	Reference image registration control point		Input image registration control point (conventional method)			Input image registration control point (the proposed method)		
	x	y	x	y	RMSE	x	y	RMSE
1	100.000 0	100.000 0	107.000 0	158.000 0	0.321	107.310 7	157.987 4	0.142 9
2	200.000 0	200.000 0	208.000 0	257.000 0	0.283	207.825 9	257.354 9	0.122 1
3	300.000 0	300.000 0	308.000 0	358.000 0	0.337	307.742 3	357.650 1	0.066 7
4	400.000 0	400.000 0	409.000 0	457.000 0	0.326	408.656 2	457.303 7	0.070 3

定采用的是均方根误差^[10](RMSE)。可以看出,采用文中方法可以提高配准控制点精度。

3 结论

文中在分析基于区域的配准算法中配准控制点是在离散的图像坐标点上进行这一问题上,对其进行改进,提出了一种基于高斯拟合的图像配准方法。文中提出的方法可以在实数范围内获取配准控制点,使其更接近地面实际情况,从而得到更为准确的同名像素位置,进而实现高精度的遥感图像配准。并且实验结果已表明,对已经粗校正后的 Hyperion 高光谱影像进行的配准实验,文中方法表现出比传统方法更好的配准效果,而且精度达到亚像素级,可以高光谱影像进行的配准实验,文中方法表现出比传统方法更好的配准效果,而且精度达到亚像素级,可以满足后续融合、变换检测等需要。

参考文献:

- [1] Li Yingjie, Zhang Junju, Chang Benkang, et al. Remote multiband infrared image fusion system and registration method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 4526002-1-7. (in Chinese)
李英杰, 张俊举, 常本康, 等. 远距离多波段红外图像融合系统及配准方法 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 4526002-1-7.
- [2] Wang Zhaozhong, Zhou Fugen, Liu Zhifang, et al. Image matching algorithm with high precision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 36(6): 751-755. (in Chinese)
王兆仲, 周付根, 刘志芳, 等. 一种高精度的图像匹配算法 [J]. 红外与激光工程, 2006, 36(6): 751-755.
- [3] Goshtasby A A. 2-D and 3-D Image Registration: For Medical, Remote Sensing, and Industrial Applications [M]. Hoboken: Wiley-Interscience Publication, 2005.
- [4] Zhang Jiadong, Li Na, Zhao Huijie, et al. Automatic geometric precision correction of hyperspectral data based on SIFT feature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2414-2420. (in Chinese)
张佳栋, 李娜, 赵慧洁, 等. 采用 SIFT 特征的高光谱数据自动几何精校正[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2414-2420.
- [5] Zhao M, An B, Wu Y, et al. A robust delaunay triangulation matching for multispectral/multidate remote sensing image registration[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(4): 711-715.
- [6] Xu M, Varshney P K. A subspace method for fourier-based image registration[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(3): 491-494.
- [7] Pradhan S, Patra D. Enhanced mutual information based medical image registration [J]. *IET Image Processing*, 2016, 10(5): 418-427.
- [8] Fan Youchen, Zhao Hongli, Sun Huayan, et al. Application of cross-correlation algorithm in moving target rangedated three-dimensional laser active imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0617003-1-9. (in Chinese)
范有臣, 赵洪利, 孙华燕, 等. 互相关算法在运动目标距离选通激光三维成像中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0617003-1-9.
- [9] Jensen J R. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective [M]. 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1986: 141-148.
- [10] David Kelbe, Jan van Aardt, Paul Romanczyk, et al. Marker-free registration of forest terrestrial laser scanner data pairs with embedded confidence metrics[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(7): 4314-4330.