

同时偏振成像探测系统的偏振图像配准研究

杨长久, 李 双, 裘桢炜, 洪 津, 乔延利

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 光学遥感中心 中国科学院通用光学定标与表征
技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 同时偏振成像探测技术是一种新型的偏振成像探测技术, 它能在同一个探测器上同时获得被探测目标 0° 、 45° 、 90° 、 135° 4 个偏振方向的偏振强度图像。为了准确获取被探测目标的偏振信息, 这 4 幅图像的配准显得尤为重要。为了使配准精度达到 0.1 个像元, 结合同同时偏振成像探测系统的成像方式, 提出了一种基于空域和频域互相关的偏振图像配准方法。该方法使用硬件和软件相结合的方式完成图像的配准。首先使用空域互相关的算法实现图像的像元级粗配准; 然后使用频域互相关的像元级配准算法进行像元级精配准; 最后使用频域互相关的亚像元配准算法实现偏振图像的亚像元级配准。

关键词: 偏振图像配准; 亚像元; 互相关; 傅里叶变换

中图分类号: TP751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0262-06

Study on image registration of simultaneous imaging polarization system

Yang Changjiu, Li Shuang, Qiu Zhenwei, Hong Jin, Qiao Yanli

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Optical Remote Sensing Center, Anhui Institute of
Optical and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Detection technology of imaging polarization has potential applications in target detection and remote sensing, with this technology the polarization state of light emitted from and/or reflected from scene can be measured. Simultaneous Imaging Polarization (SIP) is a new imaging polarization technology, which can avoid false polarization effects in time-sequential polarization detection system caused by the motion of the platform or target. The detection system can simultaneously obtain polarization intensity images of the same target among 0° , 45° , 90° and 135° on the same detector. Consequently, there is mis-registration among these four images, though the registration parameters are constant after the system is assembled. So, in order to obtain accurate polarization information of the detected target, registration accuracy of four images must reach 0.1 pixel. The polarization image registration method which was based on the spatial and frequency domain cross-correlation was presented. Firstly, pretreatment of these

收稿日期: 2012-05-12; 修订日期: 2012-06-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿基金(073H9a1141)

作者简介: 杨长久(1986-), 男, 硕士生, 主要从事新型偏振成像探测技术的研究。Email: ycjstc@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 乔延利(1958-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学遥感信息检测方面的研究。Email: yljiao@aiofm.ac.cn

four images was prepared for image registration. Secondly, cross-correlation in spatial domain was used to achieve the pixel level of image registration. At last, cross-correlation in frequency-domain was used to achieve the sub-pixel level image registration. In order to validate the accuracy of this registration method, many experiments have been done and its registration accuracy can meet this SIP system's requirement.

Key words: polarization image registration; sub-pixel; cross-correlation; Fourier transform

0 引言

偏振成像探测技术^[1]作为新型遥感探测技术,与传统光度学和辐射度学探测技术相比,它可以获取目标辐射的偏振强度值、偏振度、偏振角、偏振椭率和辐射率等参数,大大增加被探测目标的信息量。在云和气溶胶的探测、地质勘探、海洋开发、农牧业发展和军事应用^[2-3]等领域都具有重要的应用价值。

同时偏振成像(Simultaneous Imaging Polarization, SIP)探测技术^[4-6]是通过一次曝光来获取同一景物的多幅不同偏振方向的偏振辐射图像,很好解决了时序测量方法存在的关键问题。当目标或探测平台处于运动状态时,该方法的优势更加突出,并且测量系统中无需转动部件,系统的可靠性、稳定性和测量精度会大大提高。因此,国外很多国家都开展了该项技术的研究^[1,5-6]。在国内,中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室开展了同时偏振成像探测技术的研究^[4]。

为了获取目标的偏振信息(如线偏振度、偏振方位角等),偏振成像探测系统所获得的多幅不同偏振方向图像必须进行加减运算。如果这些偏振图像之间存在位移,就会反演出被探测目标虚假偏振信息。特别是在目标的边缘部分,这种现象更明显。因此对于偏振成像探测系统,图像配准是非常重要的。对于 SIP 探测系统,图像配准也是必不可少的,因为只有对 SIP 探测系统所获取的图像完成配准后,才能进行后续的定标以及偏振测量实验研究。因此,为了准确获取被探测目标的偏振信息,SIP 探测系统所获得的偏振图像的配准精度必须达到 0.1 个像元^[6]。

文中概述了同时偏振成像探测系统的探测原理,介绍了硬件和软件相结合的偏振图像配准算法。详细阐述了基于空域和频域互相关的像元级和亚像元级偏振图像配准方法,其中基于频域的互相关算法的配准精度能达到亚像元。最后给出了偏振图像的配准结果。

1 SIP 探测原理

同时偏振成像探测的测量方式可以分为:分振幅、分孔径和分焦平面 3 种方式^[1]。文中所提到的同时偏振成像探测系统采用分振幅的测量方式,它主要由光学系统、分振幅系统、偏振分析器、探测器和电子学系统组成。入射的目标辐射经过前置光学系统以后,被分振幅模块分为透射和反射两个部分,反射部分经过一个二分之一波片后,反射的目标辐射的偏振方向相对于透射的目标辐射的偏振方向旋转 45°。每一部分经过渥拉斯顿棱镜分成偏振方向相互垂直的两束分量(0°和 90°,45°和 135°),由斯托克斯理论可知:

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2} \quad \alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q} \quad (1)$$

$$Q = \frac{I_0 - I_{90}}{I_0 + I_{90}} \quad U = \frac{I_{45} - I_{135}}{I_{45} + I_{135}}$$

式中:Q 和 U 为线斯托克斯参量(从目前偏振应用来看,对于 Stokes 参量中的圆偏振分量可以忽略); I_0 , I_{90} , I_{45} 和 I_{135} 为 4 幅图像的光辐射强度;P 为线偏振度,为偏振方位角。图 1 为同时偏振成像系统的探测

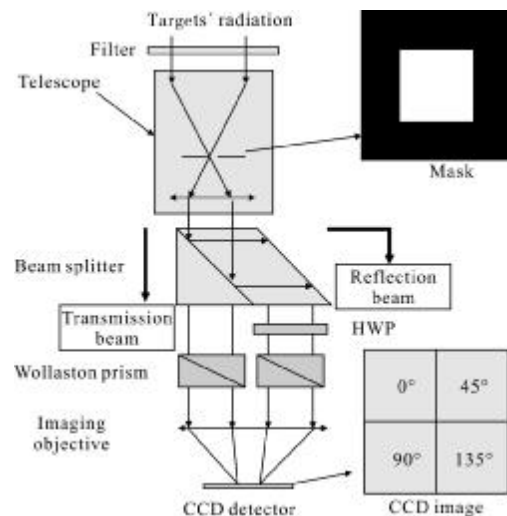


图 1 同时偏振成像探测系统的原理图

Fig.1 Detection schematic of SIP detection system

原理图, 图 2 为研制出的同时偏振成像探测系统的实物图。



图 2 同时偏振成像探测系统
Fig.2 Detection system of SIP

文中所提出的同时偏振成像探测系统是在同一个探测器上同时获取同一目标 4 个偏振方向的偏振强度图像, 该系统消除了多探测器同时偏振成像探测系统中由于各偏振探测单元 (光学系统、探测器等) 性能不一致而存在的误差^[1]。

2 偏振图像配准算法

图像配准(或图像匹配)是评价两幅图像的相似性以确定同名点的过程。图像配准的方法可分为: 基于图像灰度的方法, 如相关方法; 基于变换域的方法, 如基于傅里叶变换的方法^[7-8]; 基于图像特征的方法, 如边缘、角点检测等方法^[7]。

文中的 SIP 探测系统同其他偏振成像探测系统不同之处在于当 SIP 探测系统的光机系统组合固定之后, 它在同一探测器上所获取的 4 个偏振方向图像之间的配准参数是一个常量。因此, 当完成了 SIP 探测系统的图像配准后所获得的配准参数适用于该系统所获取的所有偏振图像的处理。文中提出了一种硬件和软件相结合的算法来完成偏振图像的配准。其算法步骤如下:

- (1) 使用 SIP 来获取内调焦平行光管内的交叉丝在不同位置处的图像并融合成网格图像;
- (2) 对某一组固定位置的网格图像进行切割等预处理并完成像元级粗配准;
- (3) 对完成像元级配准后的图像进行亚像元级配准并获取配准参数;
- (4) 对不同位置的交叉丝所形成的网格图像重复步骤(2)、(3)获取配准参数;
- (5) 分析配准参数并判断配准误差是否小于 0.1

个像元;

(6) 配准误差若小于 0.1 个像元则完成配准, 否则增加网格图像中交叉丝的个数并重复以上步骤。

该硬件和软件相结合的配准算法总流程如图 3 所示。下面详细阐述同时偏振成像探测系统亚像元配准算法的原理及具体实现流程。

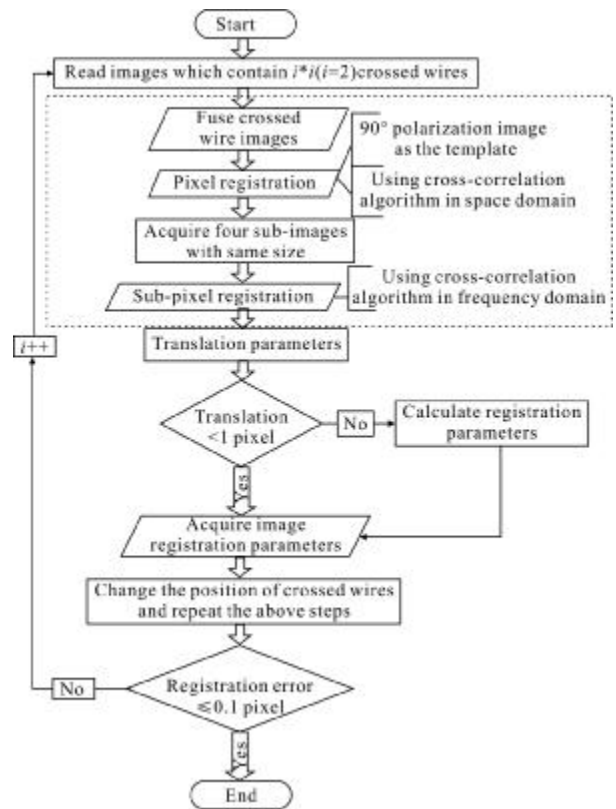


图 3 硬件和软件相结合的图像配准算法流程图

Fig.3 Flow chart of image registration algorithm which combined hardware and software

2.1 配准前图像的预处理

对于文中的 SIP 探测系统, 它能同时在一块 CCD 上获得 0° 、 45° 、 90° 和 135° 4 个偏振方向的大小不同的偏振强度图像。因此在图像配准之前, 必须对其进行图像的切割预处理。考虑整幅图中 4 幅图像的相对大小, 将其切割成合适大小的 4 部分: 90° 模板图、 0° 待配准图、 45° 待配准图和 135° 待配准图。

2.2 基于空域互相关的偏振图像像元级配准

鉴于 SIP 所获取的偏振图像的特点, 对图像的像元级配准算法中, 选择基于空域互相关的配准算法。该算法采用移动窗灰度相关的方法对图像上的

每一点进行搜索,来寻求最大相似度的位置,以达到配准的目的。相似度的定义如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M f(i,j)g(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M f(i,j)^2 \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W g(i,j)^2}} \quad (2)$$

其中, $H \geq M, W \geq N$ 模板图和待配准图坐标为 (i,j) 处的灰度值为 $f(i,j)$ 和 $g(i,j)$, 模板图的大小为 $M \times N$, 待配准图的大小为 $H \times W$ 。

算法具体实现流程如下:

首先,用 Sobel 算子^[8]分别对 4 个偏振方向的图像求取梯度图像。使得图像消除了差异较大的低频分量,将图像间共有的结构性信息保留下来;

其次,以 90° 模板图分别对 0° 待配准图、 45° 待配准图和 135° 待配准图按公式(2)进行相似度计算,并求出最大相似度点所对应的像元位置;

最后,以上述算法求得的最大相似度点的坐标为基点,分别对 0° 、 45° 、 90° 和 135° 待配准图按 90° 模板图的大小进行切割,完成 SIP 图像的像元级配准。

2.3 基于频域互相关的偏振图像的亚像元级配准

对偏振图像完成了像元级粗配准之后,使用基于频域互相关的算法进行亚像元级配准,其算法原理^[9-10]如下。

考虑 2 幅图像 $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$, 假设它们之间存在一定的位移量 x_0 和 y_0 , 则它们之间的归一化均方根误差(NRMSE)^[9,11]为:

$$E = \sqrt{\frac{\min_{x_0, y_0} \sum_{x,y} |g(x-x_0, y-y_0) - f(x,y)|^2}{\sum_{x,y} |f(x,y)|^2}} \quad (3)$$

$$\sqrt{1 - \frac{\max |r_{fg}(x_0, y_0)|^2}{\sum_{x,y} |f(x,y)|^2 \sum_{x,y} |g(x,y)|^2}}$$

其中互相关函数为:

$$r_{fg}(x_0, y_0) = \sum_{x,y} f(x,y)g^*(x-x_0, y-y_0) \quad (4)$$

其离散傅里叶变换为:

$$R_{fg}(u,v) = \text{DFT}[r_{fg}(x_0, y_0)] = F(u,v)G^*(u,v) \quad (5)$$

通过定位出两幅图像之间的互相关函数峰值的位置即可完成配准。当存在亚像元平移时,精度为

$1/k$ 的算法具体实现过程如下:

(1) 选取 2.2 中的大小为 $M \times N$ 的 90° 模板图为参考图像 $f(x,y)$, 其他偏振方向的图像为待配准图像 $g(x,y)$;

(2) 分别对模板图 $f(x,y)$ 和待配准图 $g(x,y)$ 进行二维快速傅里叶变换得出各自的频谱 $f(u,v)$ 和 $g(u,v)$;

(3) 计算出互相关函数的频谱 $R_{fg}(u,v)$, 并对其进行 2 倍补零过采样;

(4) 对其进行二维快速傅里叶反变换并搜索互相关函数最大值;

(5) 计算出峰值点对应的位置为亚像元搜索初始位置;

(6) 在初始位置附近 1.5×1.5 的像素邻域范围内使用矩阵乘法的 DFT 进行 k 倍过采样及傅里叶反变换;

(7) 计算互相关并搜索其峰值得到亚像元配准平移参数。

该亚像素级配准算法的复杂度为 $O(MNK)$ 。因此,为了获得较高的配准精度且不增加太大计算量,文中的过采样倍数 k 取为 100。由于偏振解析所要求的配准精度指标是 0.1 个像元,因此使用该算法对上述图像进行亚像元配准能满足 SIP 的偏振图像配准精度要求。图 4 为亚像元配准的算法流程图。亚像元配准完成后,使用双线性插值的方法^[8],对配准后的图像进行插值运算,获得最终配准图像。

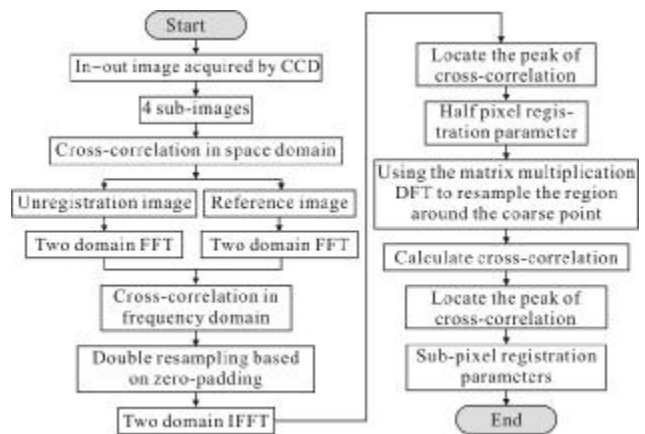


图 4 亚像元配准算法流程图

Fig.4 Flow chart of sub-pixel registration algorithm

3 配准结果

按照上述配准流程,使用 MATLAB 进行编程^[11],对 SIP 所获得的大小为 1024×1024 的交叉叉丝所形

成的网格图像按照文中的算法进行配准。图 5 所示为待配准的 2×2 的网格图像，图 6 所示为配准后的网格图像。表 1 所示为 9 个叉丝所组成的不同位置

2×2 的网格图像的配准结果。其中第 2 行到第 7 行数据

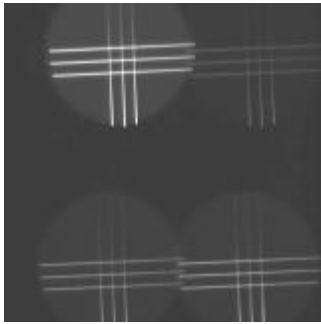


图 5 待配准网格图

Fig.5 Unregistration grid image

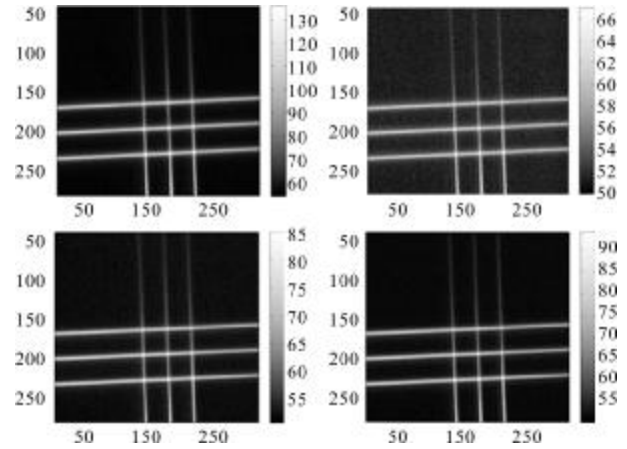


图 6 配准后的网格图

Fig.6 Registered grid image

表 1 2×2 网格图像的配准结果

Tab.1 Registration results of 2×2 grid images

Registration Parameters	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Mean	Standard deviation
N_0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
M_0	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	0
N_45	167	167	167	167	167	167	167	167	167	167	167	167	167	167	167	0
M_45	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	0
N_135	162	162	162	162	162	163	163	163	163	163	163	163	163	163	163	0
M_135	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	0
X_0	0.65	0.65	0.64	0.69	0.67	0.65	0.64	0.64	0.64	0.67	0.66	0.65	0.64	0.64	0.65	0.02
Y_0	0.75	0.92	0.85	0.57	0.71	0.84	0.90	0.78	0.61	0.62	0.75	0.88	0.88	0.74	0.77	0.11
X_45	0.81	0.82	0.95	0.99	0.91	0.84	0.77	0.71	0.64	0.65	0.58	0.5	0.44	0.36	0.71	0.19
Y_45	0.10	0.10	0.09	0.23	0.23	0.22	0.22	0.20	0.21	0.30	0.28	0.25	0.22	0.20	0.20	0.06
X_135	0.69	0.77	0.85	0.87	0.98	0.93	0.87	0.81	0.75	0.73	0.65	0.58	0.52	0.45	0.74	0.15
Y_135	0.43	0.27	0.16	0.09	0.69	0.51	0.33	0.21	0.06	0.21	0.27	0.45	0.33	0.19	0.30	0.14

分别为 0°、45°和 135°偏振图像水平和垂直方向像元剪切起始位置，第 8 行到第 13 行数据分别为 0°、45°和 135°偏振图像水平和垂直方向亚像元平移参数。其中第 17 列为 15 次实验结果的均值，该均值作为 SIP 的图像配准参数。第 18 列为这些配准参数的标准差。分析标准差数据可知，配准参数的标准差均达到了 0.1 个像元。因此配准精度达到了亚像元。

使用同时偏振成像探测系统采集了运动中小红旗的一幅偏振强度图像，如图 7 所示。使用上述所得的像元级剪切参数和亚像元级平移参数对该偏振图

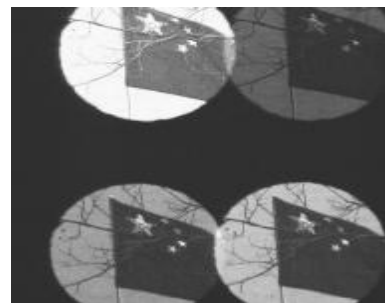


图 7 待配准实验图像

Fig.7 Registered experimental image

像进行处理,能获得 4 幅大小都为 290×320 的配准图,它处理后的效果图如图 8 所示。

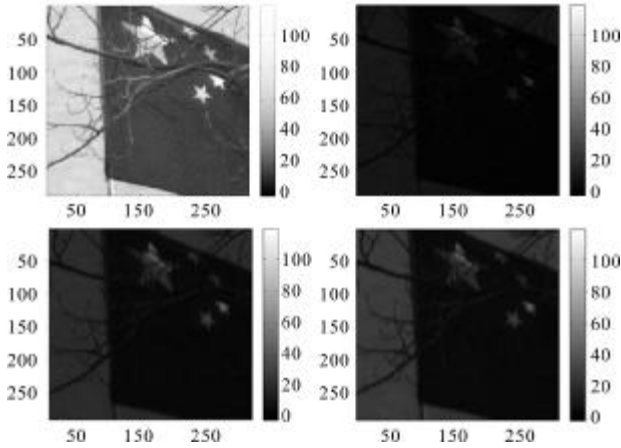


图 8 配准后实验图像

Fig.8 Registered experimental image

4 结 论

随着偏振成像探测技术在各个领域的应用日益广泛,同时偏振成像探测技术将进一步扩展偏振成像探测的应用领域。文中概述了同时偏振成像探测系统的原理并从同时偏振成像探测系统所获取的图像特征出发,提出了一种适合该系统的软件和硬件相结合的偏振图像配准算法。实验结果表明配准精度能达到 0.1 个像素,满足了偏振图像解析目标偏振信息的要求。由于文中只研究了 4 个偏振方向图像之间只存在平移的配准算法,而这些图像之间还应存在比较小的旋转和缩放的问题。因此考虑这 4 幅图像之间存在的旋转和缩放问题并对该算法进行进一步的改进和优化是作者下一步的工作。

参考文献:

- [1] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [2] Wang Zhen, Qiao Yanli, Hong Jin, et al. Detecting camouflaged objects with thermal polarization imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 853-856. (in Chinese)
- [3] Zhang Chaoyang, Cheng Haifeng, Chen Zhaohui, et al. Polarimetric imaging of camouflage screen in visible and infrared wave band [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 424-427.
- [4] Li Shuang, Qiu Zhenwei, Yang Changjiu. Preliminary study on the detection technology of Simultaneous Imaging Polarization(SIP)[J]. *Journal of Atmospheric and Environment Optics*, 2010, 5(3): 198-202. (in Chinese)
- [5] Fujita K, Nishida M, Itoh Y, et al. Development of simultaneous imaging polarimeter [C]//SPIE, 2006, 6269: 62693D1-62693D8.
- [6] Pezzaniti J L, Chenault D B. A division of aperture mwir imaging polarimeter[C]//SPIE, 2005, 5888: 58880V1-58880V12.
- [7] Zitova B, Flusser J. Image registration methods: a survey[J]. *Image and Vision Computing*, 2003: 977-1000.
- [8] Gonzalez R C. *Digital Image Processing Using MATLAB* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [9] Guizar-Sicairos M, Thurman S T, Fienup J R. Efficient subpixel image registration algorithms [J]. *Optics Letters*, 2008, 34(2): 156-158.
- [10] Qiang Zanzia, Peng Jiexiong, Wang Hongqun. Remote sensing image registration algorithm based on FFT [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(4): 385-388. (in Chinese)
- [11] Guizar -Sicairos M, Thurman S T, Fienup J R. Efficient image registration algorithms for computation of invariant error metrics[C]//OSA Technical Digest Series, 2007: SMC3.