

基于单演信号理论的 SAR 图像配准

王国力* 周伟 柴勇 关键 何友
(海军航空工程学院电子信息工程系 烟台 264001)

摘要: 该文提出一种基于单演信号理论的 SAR 图像配准的新算法。利用单演信号局部特征构造一个单演相位一致函数, 用来检测 SAR 图像特征。利用单演信号分量构造单演向量, 通过求单演向量相关, 解决 SAR 图像特征点的匹配问题。实验结果显示, 算法能较好完成 SAR 图像自动配准。

关键词: 合成孔径雷达图像; 单演信号; 图像配准

中图分类号: TP75

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)08-1779-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01487

SAR Image Registration Based on Monogenic Signal Theory

Wang Guo-li Zhou Wei Chai Yong Guan Jian He You
(Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical
and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: A new algorithm is proposed for SAR image registration based on monogenic signal theory. A monogenic phase congruency function is constructed using the characteristics to detect feature points in SAR image. On the other hand, a monogenic vector is composed by the 3-triple components to solve the problem of feature points matching in reference SAR image and sensed SAR image. Diverse SAR image data are used for verification and the experiment results indicate that the proposed algorithm has a good performance of SAR image registration.

Key words: SAR image; Monogenic signal; Image registration

1 引言

SAR 图像配准是目标识别分类、变化检测、数据融合、地图修正等应用的前期技术准备, 得到了较广泛的研究。目前 SAR 图像配准方法可分为 4 类: 第 1 类, 基于相似或非相似测度的方法。相似测度主要有互信息^[1,2]、相关系数^[3]、联合概率分布能量^[4]、Hausdorff 测度^[5]等。非相似测度主要有 L1 范数, L2 范数及其改进^[3], 联合熵^[6]等。该类方法大部分直接从光学图像配准方法移植而来, 计算量大, 只适用于微小差异的 SAR 图像。第 2 类, 基于由粗到精优化策略的方法^[7]。该类方法配准精度高, 但配准速度对优化方法依赖性较大。第 3 类, 基于多尺度不变特征的方法^[8,9]。该方法是利用基于多尺度高斯空间等多尺度理论和梯度直方图的不变特征检测与描述^[10]实现配准。配准速度快, 配准精度高, 是 SAR 图像配准研究的热点。第 4 类, 基于特征向量和相位一致的方法^[11-13]。利用该类方法结合单演信号理

论^[14], 研究光学、红外图像配准才刚刚兴起^[15], 尚未应用于 SAR 图像配准。

2 维单演信号是通过 Riesz 变换实现的 2 维希尔伯特变换推广, 不同于传统的梯度或微分运算, 能够优秀地表达图像的单演局部特征^[16], 如能量特征(局部幅值)、结构特征(局部相位)和几何特征(局部方向), 尤其是局部相位包含了图像的大部分信息^[17]。相位一致是 Morrone 等^[18]在分析各类信号傅里叶级数时发现的一个规律, 即信号的特征点总是出现在傅里叶相位叠合最大处。各种各样的特征类型, 包括阶跃、线、屋顶及马赫带等特征都出现在相位一致高的点处^[19]。

综上所述, 本文针对 SAR 图像自动配准问题, 引入单演信号理论, 从而提出了基于单演相位一致的 SAR 图像特征检测方法和单演向量相关的匹配方法。通过构造了一个单演相位一致(Monogenic Phase Congruency, MPC)函数, 检测相位一致(Phase Congruency, PC)特征。利用单演信号 3 个分量构造一个特征描述向量, 计算特征相关, 实现特征粗匹配, 再利用 RANSAC 算法, 实现精匹配。经过配准实验, 分析和验证了算法的有效性和存在不足。

2012-11-16 收到, 2013-02-01 改回

国家自然科学基金(61179017, 61201445)和“泰山学者”建设工程专项经费资助课题

*通信作者: 王国力 wanggl@sdu.edu.cn

2 单演相位一致特征检测

相位一致特征检测方法, 不同于空域基于灰度梯度的特征检测算法, 不受图像亮度和对比度的影响。实验和理论已论证相位一致与人类视觉对图像特征的认知基本相符^[20]。

Kovesi提出了改进的相位一致函数^[19]

$$PC_2(x, y, s) = \frac{\sum_{i=0}^{N_1-1} \sum_{j=0}^{N_2-1} W_{ij}(x, y, s) [A_{ij}(x, y, s) \Delta \Phi_{ij}(x, y, s) - T]}{\sum_{i=0}^{N_1-1} \sum_{j=0}^{N_2-1} A_{ij}(x, y, s) + \varepsilon} \quad (1)$$

由文献[21]可知, 局部幅值、局部相位和相位一致都对应于{i1D}信号^[22]。另, 由文献[21]中定理 8 可知, 相位一致可由局部幅值的最大值求出。Felsberg 等人^[14]指出单演解析信号可由 3 个正交分量组成

$$f_M(x, y, s) = f_p(x, y, s) + f_x(x, y, s) + f_y(x, y, s) \quad (2)$$

所以 2 维单演信号的局部幅值、局部方向和局部相位分别为

$$A(x, y, s) = \sqrt{f_p^2(x, y, s) + f_x^2(x, y, s) + f_y^2(x, y, s)} \quad (3)$$

$$\theta(x, y, s) = a \tan(f_y(x, y, s)/f_x(x, y, s)) \quad (4)$$

$$\varphi(x, y, s) = -\text{sign}(f_x(x, y, s)) a \tan 2 \cdot \left(\sqrt{f_x^2(x, y, s) + f_y^2(x, y, s)} / f_p(x, y, s) \right) \quad (5)$$

根据这一理论基础, 对式(1)进行改进, 提出一种单演相位一致检测方法。

$$PC_3(x, y, s) = W \left[1 - a \cos \left(\frac{E}{A_\Sigma + \varepsilon} \right) - \frac{T}{A_\Sigma + \varepsilon} \right] \quad (6)$$

局部能量定义为

$$E = \sqrt{f_{p-\Sigma}^2 + f_{x-\Sigma}^2 + f_{y-\Sigma}^2} \quad (7)$$

局部幅值和定义为

$$A_\Sigma = \sum_{s=1}^n A(x, y, s) \quad (8)$$

式中 $f_{p-\Sigma} = \sum_{s=1}^n f_p(x, y, s)$, $f_{x-\Sigma} = \sum_{s=1}^n f_x(x, y, s)$, $f_{y-\Sigma} = \sum_{s=1}^n f_y(x, y, s)$ 。W 表示 Sigmoid 权重, T 表示噪声阈值。

首先根据式(6)所示单演相位一致函数, 计算参考图像和感知图像的单演相位一致性值, 分别得到单位相位一致特征图像; 其次是非最大值抑制滤波; 最后设置检测阈值为 0.8, 大于 0.8 的单演相位一致值对应特征点。

3 单演特征向量匹配

从式(2)可以看出, 单演信号由 3 个分量组成,

且三者相互正交, 可以用来构成特征向量。这里定义单演特征向量

$$\mathbf{V}(x, y, s) = [Uf_p(x, y, s), Uf_x(x, y, s), Uf_y(x, y, s)]^T \quad (9)$$

式中 U 表示特征点邻域内的所有分量。式(9)表示特征向量由 3 个分量的行向量组成。

特征匹配可分粗匹配和精匹配两个阶段。首先是采用特征向量相关法实现粗匹配, 即两个特征向量相关(相乘)得到特征相关矩阵, 特征相关矩阵行和列中都最大的元素对应匹配点对。其次是采用 RANSAC 算法实现精匹配, 即使用 RANSAC 算法估计仿射基本矩阵。仿射基本矩阵有 4 个自由度, 至少需要 4 对匹配点对才能计算仿射基本矩阵。

4 实验结果与分析

为了验证本文所提算法的有效性和适用性, 本节对特征检测、特征匹配和图像配准 3 个环节分别设计实验, 分别对两幅不同视角、不同时相、不同波段的斜距 SAR 图像进行配准。

实验所用计算机硬件环境为 Intel Core2 Quad CPU Q8200, 内存为 2 G。操作系统为 Windows XP, 仿真实验的软件环境是 MATLAB 7.6。实验结果比较中使用的检测方法分别是 Harris、单演相位一致(MPC); 粗匹配方法分别是归一化互相关(NCC)、单演向量相关(MVC); 精匹配方法统一使用 RANSAC 算法。

4.1 特征检测实验

实验图像是美国 Sandia 国家实验室提供的 Ku 波段的 MiniSAR 图像。图 1(a)为原始 SAR 图像, 大小分别为 600 × 600。图 1(b)是文献[19]所提出的相位一致检测方法检测结果图。图 1(c)是单演相位一致方法检测结果图。对比图 1(b), 图 1(c)可以发现, 相位一致检测结果图中目标与背景分离效果不明显, 因相干斑噪声的影响较大, 有很严重的“棉絮”现象, 检测到的目标数量过大; 单演相位一致检测方法受相干斑噪声影响不明显, 目标的“颗粒”性较好, 目标数量不大。相比之下, 单演相位一致方法更适合 SAR 图像目标检测, 而相位一致方法检测效果较差, 且检测到的目标数量过大。这就是本文利用单演信号理论改进相位一致检测方法的原因。

4.2 特征匹配实验

特征匹配是图像配准的重要环节, 对配准效果有至关重要的影响。匹配结果主要受检测方法和匹配方法性能制约。实验 1 至实验 3 分别使用 Harris+NCC, Harris+MVC, MPC+NCC, MPC+MVC 4 种算法对 Ku 波段, L 波段和极化 SAR 图像

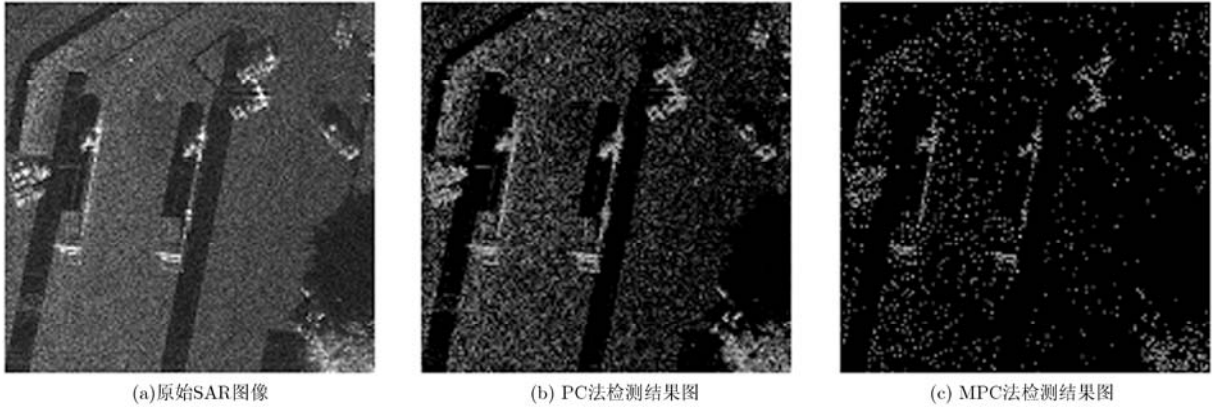


图1 相位一致与单演相位一致检测结果比较

进行匹配实验。实验中，Harris 检测算法的参数设置：检测圆半径为 3，高斯平滑标准差为 1，检测阈值为 500。匹配算法中，相关窗尺寸为 39。图 2 至图 4 为 4 种方法匹配结果显示。表 1 至表 3 为 4 种方法用于不同 SAR 图像匹配性能比较。

实验 1 Ku 波段多时相 SAR 图像匹配。参考图像(图 2(a)右图)和感知图像(图 2(a)左图)大小分别为 600×600 和 460×460 ，场景差别较大，其中感知图像中目标比较多，目标间关系比较复杂。从

表 2 L 波段 SAR 图像匹配性能对比

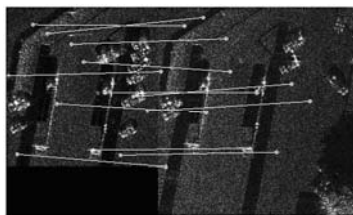
检测方法	匹配方法	粗匹配 点对	精匹配 点对	匹配率 (%)
Harris	NCC	727	589	81
Harris	MVC	729	569	78
MPC	NCC	213	176	83
MPC	MVC	210	177	84

表 3 极化 SAR 图像匹配性能对比

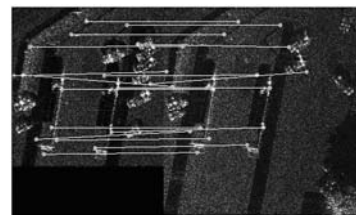
检测方法	匹配方法	粗匹配 点对	精匹配 点对	匹配率 (%)
Harris	NCC	757	684	90
Harris	MVC	493	433	88
MPC	NCC	693	605	87
MPC	MVC	560	522	93

表 1 Ku 波段 SAR 图像匹配性能对比

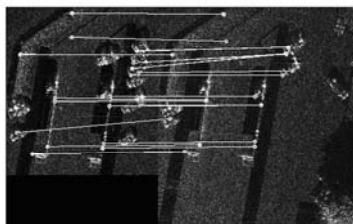
检测方法	匹配方法	粗匹配 点对	精匹配 点对	匹配率 (%)
Harris	NCC	805	240	30
Harris	MVC	604	338	56
MPC	NCC	39	33	85
MPC	MVC	34	29	85



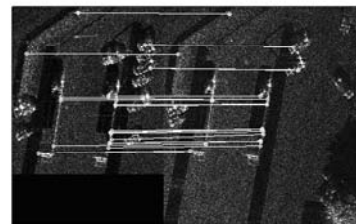
(a) Harris+NCC匹配结果图



(b) Harris+MVC匹配结果图



(c) MPC+NCC匹配结果图



(d) MPC+MVC匹配结果图

图 2 Ku 波段 SAR 图像匹配结果比较

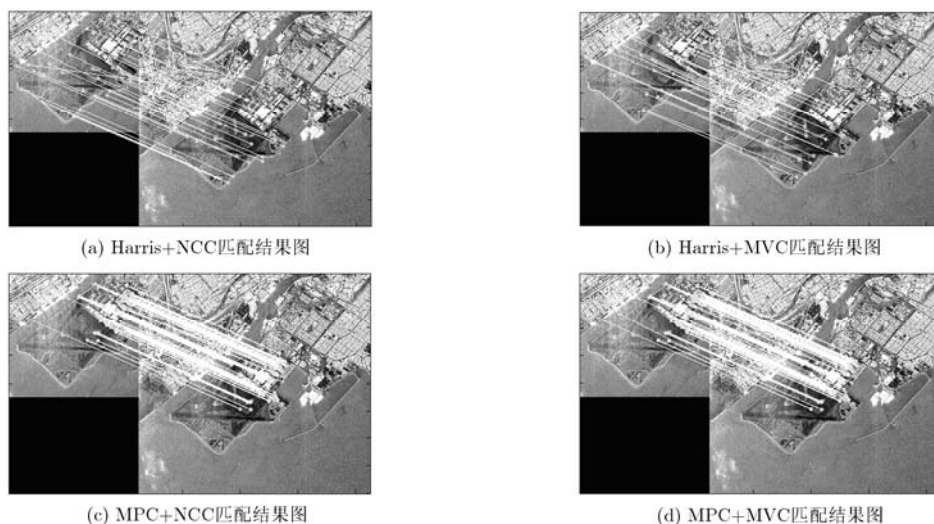


图 3 L 波段 SAR 图像匹配结果比较

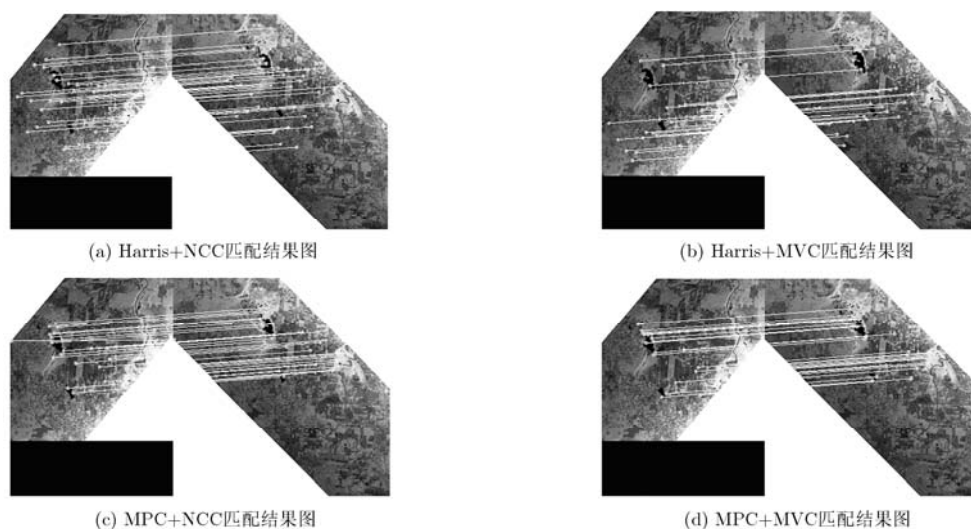


图 4 极化 SAR 图像匹配结果比较

图 2 的比较可看出, MPC 方法具有较强的边缘特征检测和定位性能。从表 1 的比较可看出, 对于 Ku 波段 SAR 图像, 在相同匹配方法情况下, MPC 检测方法比 Harris 检测方法匹配率高; 在相同检测方法情况下, MVC 匹配方法比 NCC 匹配方法匹配率高。

实验 2 L 波段多时相 SAR 图像匹配。参考图像(图 3(a)右图)和感知图像(图 3(a)左图)大小分别为 800×800 和 450×450 。图 3 所示为不同时相、不同视角美国 UAVSAR 图像匹配结果图。从图 3 可看出, 对于 L 波段 SAR 图像, Harris 方法和 MPC 方法都表现出良好边缘检测性能, 只是前者检测的特征点数量较多。从表 2 看, 4 种方法都具有较好匹配性能, 其中 MPC+MVC 组合性能最好。

实验 3 极化多时相 SAR 图像匹配。参考图像

(图 4(a)右图)和感知图像(图 4(a)左图)大小分别为 600×600 和 450×450 。虽然匹配结果显示为伪彩色, 但在匹配计算过程中, 是将原始伪彩色图像转换为灰度图像处理的。从图 4 和表 3 看, 对于极化 SAR 图像, Harris 方法和 MPC 方法都表现出良好边缘检测性能, 两者检测出特征点数量都比较多。4 种方法匹配性能都较好, 其中 MPC+MVC 组合性能最好。

4.3 配准实验

配准中图像的变换统一采用仿射变换模型。图 5 是本文算法对 Ku 波段, L 波段和极化 SAR 图像配准的结果图。为显示配准效果, 实验设计参考图像尺寸大于感知图像。为了增加对比度, 便于从直观视觉上观察配准效果, 配准结果图像进行简单合并全部采用伪彩色显示, 两图像显著边缘对齐情

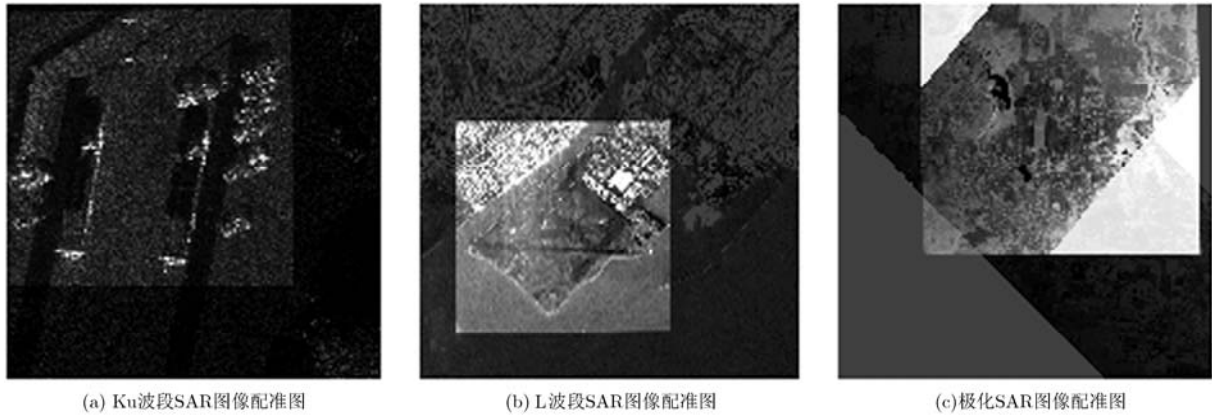


图 5 本文算法对不同变化 SAR 图像配准结果图(伪彩色显示)

况表现图像差异。从图 5 所示伪彩色显示配准结果看，通过观察图像细节中边缘对准情况，即可大致判断图像配准程度。从图 5 直观看，本文算法的配准误差在 1 个像素左右。

表 4~表 6 分别给出了 Harris+NCC, Harris+MVC, MPC+NCC, MPC+MVC 4 种算法对 Ku 波段, L 波段和极化 SAR 图像配准精度对比和配准时间对比。图像配准精度采用均方误差平方根(RMSE)和最大误差(ME)^[6], 单位是像素。配准时间 T 是指从特征检测、特征匹配、图像变换等整个配准的总时间, 单位是 s。从表 4, 表 5, 表 6 的比较结果可看出, MPC+MVC 算法总体配准精度要好于另外 3 种算法, 配准精度在 1 个像素左右, 与目视观察结果一致。但从配准时间看, 图像特征的局部本征维数对配准效率影响很大。图 2 和图 3 中包含 {i1D} 信号特征比较多, MPC+MVC 算法配准效率较高, 而图 4 中包含 {i2D} 信号特征(曲线边缘、角点、曲率角点、线端、交会点、斑点等)较多, 而 {i1D} 信号较少, 导致 MPC+MVC 算法配准效率较低。问题主要体现于单演向量相关匹配方法匹配效率低。单演局部特征的求解是通过多尺度的 Log-Gabor 滤波器实现, Log-Gabor 滤波器利用的是线性高斯核, 对线性特征(即 {i1D} 信号特征)能有效表达, 对非线性特征(即 {i2D} 信号特征)不能有效表达。文献[22]提出, 对于 2 维图像信号 $u(x, y)$, 依据下列规则可归属于某一类, {i0D}, {i1D} 或 {i2D}:

$$u(x, y) \in \begin{cases} \{i0D\}, & u(x, y) = \text{常数} \\ \{i1D\}, & u(x, y) = u(a_{11}x + a_{12}y), \\ & (a_{11} \neq 0) \vee (a_{12} \neq 0) \\ \{i2D\}, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

{i0D}类是常量信号, 即与 (x, y) 无关的常量信号。
{i1D}类由所有可以写成适当旋转坐标系下变量函

数的信号组成, 其中常量 a_{11} 和 a_{12} 是对应的仿射变换系数。所有不属于 {i0D} 类和 {i1D} 类的信号都是 {i2D} 类。由式(10)可知, 对参考图像和感知图像对应的 {i1D} 信号特征而言, 经过单演局部特征简单表示(多尺度 Log-Gabor 滤波后), 相当于完成一系列的仿射变换。所以 {i1D} 信号特征匹配对是不相交的(直线没有交点), 表现在经过式(9)表示和形成的单演特征向量相关矩阵, 关于行和列最大元素是稀疏的。而对 {i2D} 信号特征匹配对, 单演特征向量相关矩阵, 关于行和列最大元素是非稀疏的。正是这种非稀疏导致特征匹配时, 匹配特征过多。加上本文提出匹配方法是多尺度的, 加剧了匹配搜索计算复杂度, 使匹配效率明显下降。

通过特征检测实验、特征匹配实验和配准实验的比较可以发现, 对于 {i1D} 信号特征, MPC 检测

表 4 Ku 波段 SAR 配准性能对比

检测方法	匹配方法	RMSE	ME	$T(s)$
Harris	NCC	3.7959	3.9964	37.7023
Harris	MVC	0.8651	1.0323	44.3761
MPC	NCC	4.8931	6.3948	3.5859
MPC	MVC	1.2628	1.5547	3.8238

表 5 L 波段 SAR 配准性能对比

检测方法	匹配方法	RMSE	ME	$T(s)$
Harris	NCC	2.6859	3.5894	177.9852
Harris	MVC	1.5691	1.9920	265.3579
MPC	NCC	2.8723	3.0460	18.2331
MPC	MVC	1.2450	1.8623	21.7584

表 6 极化 SAR 配准性能对比

检测方法	匹配方法	RMSE	ME	$T(s)$
Harris	NCC	1.2665	1.8662	25.7323
Harris	MVC	3.5691	5.9827	38.3606
MPC	NCC	2.0232	3.6460	98.2471
MPC	MVC	0.8289	1.0316	104.5855

方法性能好于 PC 检测方法和 Harris 检测方法；MVC 匹配方法性能与 NCC 匹配方法相当；总体来讲，本文算法具有较好的配准性能。但对 $\{i2D\}$ 类的信号，本文算法配准效率下降明显。通过实验可以验证，本文算法对一部分 SAR 图像配准是有效的，实用的。

5 结束语

本文研究了 SAR 图像自动配准问题。由单演信号理论，提出了基于单演相位一致的 SAR 图像特征检测方法和基于单演向量相关的粗匹配方法。首先利用单演局部特征设计一种单演相位一致检测器，用于 SAR 图像特征检测。其次利用单演特征向量，给出单演向量相关的 SAR 图像特征点匹配方法，完成特征粗匹配，再利用 RANSAC 算法，实现精匹配。最后估计仿射变换模型参数，实现图像变换，完成图像配准。实验结果显示，本文算法适用于 SAR 图像配准。因原理性的缺陷，本文算法只对局部本征维数为 1 的 SAR 图像有较好的适应性，对于局部本征维数不为 1 的 SAR 图像，配准效果较差。如何进一步提高算法的适应性，是下一步需要解决的问题。

参考文献

- [1] Yu T and Li X R. Automatic remote sensing image registration based on VTS-PCMIC algorithm[C]. Proceedings of Fuzzy Systems and Knowledge Discovery International Conference 2012, Sichuan, China, 2012: 48-52.
- [2] Zhou X Z and Boulanger P. A fast hierarchical radiometric invariant stereo matching algorithm[C]. Proceedings of Information Science, Signal Processing and Their Applications, Montreal, QC, Canada, 2012: 383-388.
- [3] Evangelidis G D and Psarakis E Z. Parametric image alignment using enhanced correlation coefficient maximization[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(10): 1858-1865.
- [4] Shapiro L G and Stockman G C. Computer Vision[M]. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001: 219-221.
- [5] 王子路, 李智勇, 粟毅. 一种基于非线性扩散方程和 Hausdorff 测度理论的 SAR 图像与光学图像配准方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(2): 386-390.
- [6] Wang Zi-lu, Li Zhi-yong, and Su Yi. Matching optical image to SAR image using nonlinear equation and Hausdorff distance[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(2): 386-390.
- [7] Goshtasby A A. Image Registration, Advances in Computer Vision and Pattern Recognition[M]. London: Springer-Verlag, 2012: 40-431.
- [8] Chang Yu-lin, Zhou Zhi-min, Chang Wen-ge, et al. A new registration method for multi-spectral SAR images[C]. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Souel, Korea, 2005, 3: 1704-1708.
- [9] 王山虎, 尤红建, 付琨. 基于大尺度双边 SIFT 的 SAR 图像同名点自动提取方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 287-293.
- [10] Wang Shan-hu, You Hong-jian, and Fu Kun. An automatic method for finding matches in SAR images based on coarser scale bilateral filtering SIFT[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 287-293.
- [11] Wang Shan-hu, You Hong-jian, and Fu Kun. BFSIFT: a novel method to find feature matches for SAR image registration [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4): 649-653.
- [12] Mikolajczyk K, Tuytelaars T, Schmid C, et al. A comparison of affine region detectors[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2005, 65(1, 2): 43-72.
- [13] Ding Ming-tao, Jin Zi, Tian Zheng, et al. Object registration for remote sensing images using robust kernel pattern vectors [J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2012, 55(11): 2611-2623.
- [14] Wong A and Orchard J. Robust multimodal registration using local phase-coherence representations [J]. *Journal of Signal Processing Systems*, 2009, 54(1-3): 89-100.
- [15] Fan Deng-ke, Ye Yuan-xin, Pan Li, et al. A remote sensing adapted image registration method based on SIFT and phase congruency[C]. Proceedings of Image Analysis and Signal Processing, Wuhan, China, 2011: 326-331.
- [16] Felsberg M and Sommer G. The monogenic signal[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, 49(12): 3136-3144.
- [17] Ureche M C, Vaida M F, and Chiorean L D. Non-rigid multimodal medical image registration using features extracted from the monogenic signal[C]. Proceedings of E-Health and Bioengineering Conference, Iasi, Romania, 2011: 1-4.
- [18] Felsberg M and Sommer G. The monogenic signal[R]. [Technical Report], Christian-Albrechts-University of Kiel, 2001.
- [19] Zang D and Sommer G. Phase based image reconstruction in the monogenic scale space[C]. The 26th DAGM-Symposium

- on Pattern Recognition, Tuebingen, Germany, 2004: 171-178.
- [18] Morrone M C and Owens R A. Feature detection from local energy[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1987, 6(1): 303-313.
- [19] Kovsi P. Invariant measures of image features from phase information[D]. [Ph.D. dissertation], Perth, Western Australia, The University of Western Australia, 1996.
- [20] Morrone M C and Burr D C. Feature detection in human vision: a phase-dependent energy model[J]. *Proceedings of the Royal Society B, Biological Sciences*, 1988, 235(1280): 221-245.
- [21] Felsberg M and Sommer G. The Monogenic scale-space: a unifying approach to phase-based image processing in scale-space[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2004, 21(1,2): 5-26.
- [22] Krieger G and Zetsche C. Nonlinear image operators for the evaluation of local intrinsic dimensionality[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(6): 1026-1041.
- 王国力：男，1975年生，博士生，工程师，研究方向为SAR图像目标检测、不变特征描述、图像配准。
- 周伟：男，1980年生，博士，讲师，主要研究方向为目标检测与识别、侦察图像解译。
- 柴勇：男，1979年生，博士，讲师，主要研究方向为图像信息融合。
- 关键：男，1968年生，教授，博士生导师，主要研究方向为雷达目标检测、侦察图像处理和信息融合。