

基于线特征和控制点的可见光和 SAR 图像配准

李映¹ 崔杨杨¹ 韩晓宇¹

摘要 以具有典型人造目标的可见光和 SAR (Synthetic aperture radar) 图像为研究对象, 提出一种自适应多尺度快速 Beamlet 变换方法提取人造目标在可见光和 SAR 图像的共有特征——线特征, 并基于线特征构造控制点, 设计了一种基于控制点特征的匹配度函数, 采用基于特征一致的粗配准和基于控制点的精确配准方法, 对待配准图像实现由粗到精的自动配准. 实验表明, 在可见光和 SAR 图像存在较大灰度差异、旋转和平移的情况下, 该算法仍然能够精确配准图像.

关键词 图像配准, 控制点, 线特征, 自适应多尺度快速 Beamlet 变换, 特征一致

引用格式 李映, 崔杨杨, 韩晓宇. 基于线特征和控制点的可见光和 SAR 图像配准. 自动化学报, 2012, 38(12): 1968–1974

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.01968

Optical Image and SAR Image Registration Based on Linear Features and Control Points

LI Ying¹ CUI Yang-Yang¹ HAN Xiao-Yu¹

Abstract This paper presents a method for automatically registering multi-sensor images based on linear features and control points. Taking optical images and synthetic aperture radar (SAR) images containing man-made objects as examples, we propose an adaptive multi-scale fast discrete Beamlet transform to extract the common features for the same man-made objects shown in both images, i.e., the salient linear features. Then, we construct the control points based on the linear features and design the matching function based on the control point features. Automatic coarse-to-fine registration between images of different sensors is realized by the feature consensus based coarse registration and the control points based fine registration. The experiment results show that the proposed method has high registration accuracy for the optical image and SAR image which differ in intensity, rotation or translation.

Key words Image registration, control point, linear features, adaptive multi-scale fast Beamlet transform, feature consensus

Citation Li Ying, Cui Yang-Yang, Han Xiao-Yu. Optical image and SAR image registration based on linear features and control points. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(12): 1968–1974

随着航空科学和遥感技术的迅猛发展以及新型传感器的不断更新, 人们获取遥感图像数据的能力不断提高, 在同一地区可获得大量的不同尺度、不同视角、不同时段、不同光谱信息的遥感图像, 对异源图像的配准成为遥感图像处理和解译的研究热点. 特别是 SAR (Synthetic aperture radar) 图像和可见光图像具有不可或缺的互补优势, 但是二者完全不同的成像机理增加了图像配准的难度, 使得 SAR 图像和可见光图像的配准成为二者信息有效融合的“瓶颈”.

现有的图像配准方法大致分为两类: 基于区域

的配准方法和基于特征的配准方法^[1–2]. 基于区域的配准方法主要包括灰度互相关方法和互信息方法. 由于异源图像的成像机理不同, 灰度关联性较小, 基于区域的配准方法难以取得满意效果. 而基于特征的配准方法不直接利用灰度信息, 使得该类方法成为异源图像配准的主要研究方法. 在对 SAR 图像和可见光图像配准时, 利用其二者共有的边缘特征或轮廓特征进行特征匹配, 可得到配准所需的控制点. 但是有一些算法要求两幅待配准图像必须具有较稳定且易匹配的封闭轮廓^[3]. 文献 [4–6] 利用点特征或边缘特征构造相应的目标函数, 利用寻优方法来优化目标函数, 得到变换参数, 但是这种方法的复杂度较高. Stamos 等^[7] 提出了从轮廓点中提取直线段, 利用直线段的斜率和边缘轮廓的分布来确定变换参数. 这一方法在基于线特征配准方面是一个重大的突破, 为基于线特征的配准方法奠定了基础. 但是当出现多条位置、斜率相近的直线段时, 常常会导致直线出现误匹配. 文献 [8] 利用结构特征边缘构造虚拟角点, 采用边缘匹配函数对虚拟角点进行匹配, 实现 SAR 图像和可见光图像的配准. 但该方法在检测边

收稿日期 2011-10-26 录用日期 2012-03-01

Manuscript received October 26, 2011; accepted March 1, 2012
国家自然科学基金 (60873086), 航空科学基金 (2011ZD53049, 20125153025) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (60873086) and the Aeronautical Science Foundation of China (2011ZD53049, 20125153025)

本文责任编辑 刘一军

Recommended by Associate Editor LIU Yi-Jun

1. 西北工业大学计算机学院 西安 710129

1. School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129

缘时未考虑到 SAR 图像自身的特性, 同时采用最小二乘法的线特征提取方法, 会导致粗配准精度较差, 从而影响图像的精确配准。

针对上述问题, 本文以具有典型人造目标 (机场、建筑物、桥梁和道路等) 的可见光和 SAR 图像为研究对象, 提出了一种基于线特征和控制点的异源图像配准方法。

首先根据可见光和 SAR 图像的特点, 分别采用 Canny 算子和 ROA (Ratio of average) 算子^[9] 对可见光和 SAR 图像进行边缘检测, 并进行线性区域筛选, 去除一些弯曲不规则和过短的直线区域; 提出一种自适应多尺度快速离散 Beamlet 变换方法提取人造目标在可见光和 SAR 图像的共有特征—线特征, 并基于线特征, 采用基于特征一致的配准方法对可见光和 SAR 图像实现粗配准; 在粗配准的基础上, 基于线特征构造控制点, 提出一种基于控制点特征的匹配度函数, 由此生成候选匹配点集, 并基于 RANSAC (Random sample consensus) 算法剔除误匹配点, 最后利用最小二乘法得到变换矩阵, 实现可见光和 SAR 图像的精确配准。

1 线特征提取

在具有典型的人造目标, 如机场、建筑物、桥梁和道路等场景下, 无论可见光图像还是 SAR 图像, 都包含一些三角形、四边形或多边形形状的几何结构, 这些几何结构具有一定的分布规律, 通常有曲率稳定的边缘, 可以从中提取大量的线特征。这些线特征是图像的基本特征, 同时也是图像粗配准中基本和比较固定的特征。线特征提取分为两步: 首先采用边缘检测算子提取边缘点并进行线性区域筛选, 然后基于自适应多尺度 Beamlet 变换提取线特征。

1.1 边缘检测和线性区域筛选

在 SAR 图像中, 由于雷达波的相干特性, 存在较强的相干斑噪声, 该噪声为乘性噪声, 常用的边缘算子如 Sobel、Canny 等不适合对 SAR 图像直接进行边缘检测。而光学图像相对于 SAR 图像噪声为加性噪声, 图像空间分辨率高, 有利于提取更多的质量较高的边缘特征。本文采用 Canny 算子对可见光图像进行边缘检测, 采用对乘性噪声具有抑制作用的 ROA 算子^[9] 对 SAR 图像进行边缘检测。Touzi 等^[9] 已证明 ROA 算子在 SAR 图像中边缘检测是恒虚警的, 这对保持边缘检测的稳健性很有利。ROA 算子的基本思想是, 对一个像素的邻域是否均质区域进行似然比检验, 似然函数是该像素两边区域的均值之比。如果判定该邻域是均质区, 该点必定不是边缘点; 如果不是均质区, 则认为边缘点。

在得到边缘图像后, 不能直接对整个边缘图像利用 Beamlet 变换提取线特征, 因为 Beamlet 变换的运算量较大, 对遍布全图的所有边缘点处理时间

会很长。此外, Beamlet 变换本身带有直线拟合的功能, 很有可能把不在一起的直线或者轮廓链接起来并误判为一条直线。

由此, 在进行线特征提取之前, 先利用边缘点的梯度相位信息对边缘区域进行筛选, 以去除一些弯曲不规则的或者过短的边缘。由式 (1) 计算边缘点梯度的方向角:

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{G_y}{G_x} \quad (1)$$

其中, G_x 和 G_y 分别表示边缘点的水平和垂直梯度分量。当两个边缘点的梯度方向角相差大于预设阈值 $Threshold$ 时 (此处取 $Threshold = 20$), 表示边缘方向变化较大, 在此边缘点处断开。这样可将边缘分割成很多区域, 标记这些区域, 并统计区域内边缘点的数目, 删除边缘点数目较少的区域, 筛选后只保留了同向边缘点 (边缘方向变化较小) 较多的区域, 称之为线性区域。

对如图 1 (a) 和 1 (d) 所示的可见光和 SAR 图

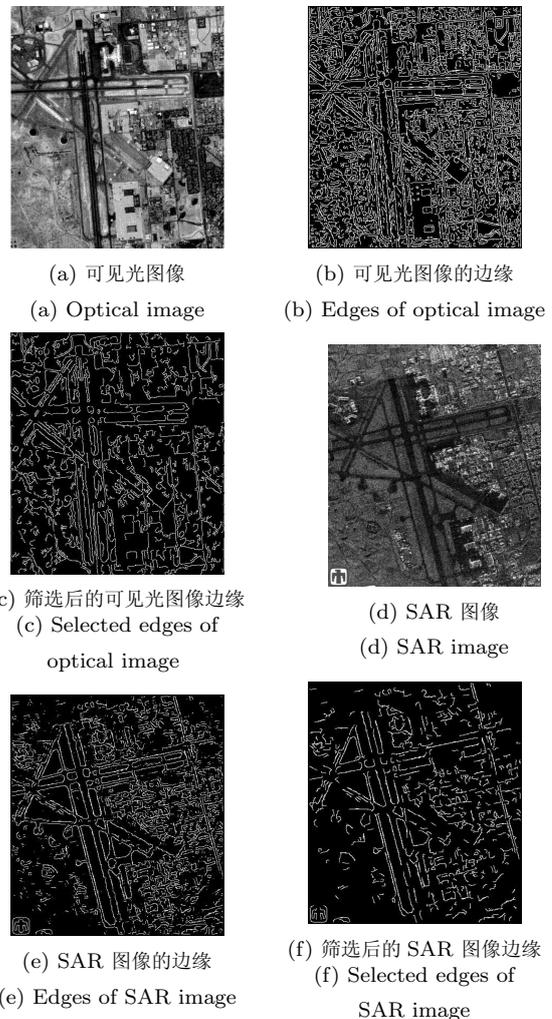


图 1 筛选后的可见光和 SAR 图像边缘
Fig. 1 Selected edges of the optical and SAR images

像分别采用 Canny 和 ROA 算子进行边缘检测, 得到如图 1 (b) 和 1 (e) 的边缘图. 对初始的边缘图进行线性区域筛选, 得到筛选后的边缘图. 如图 1 (c) 和 1 (f) 所示. 从图中可以看到, 经过线性区域筛选后的边缘图所保留的都是一些近似直线的边缘.

1.2 基于自适应多尺度快速 Beamlet 变换的线特征提取

经典的直线检测算法如 Radon 变换和 Hough 变换等, 虽然它们都能较快地检测出直线, 但是由于这两个方法都是基于离散点的, 因此无法提供线段的长度和端点信息. 而 Beamlet 变换^[10-11] 近年来提出的一种多尺度几何分析方法, 可以提供线段的局部尺度、位置和方向表示, 容易实现线特征的精确定位.

对于一个大小为 $N \times N$ ($N = 2^J$) 的边缘图像, 定义 j 为图像中二进方块的尺度, $j = 0, 1, \dots, J$. 连接二进方块边界上任意两个像素点所构成的线段 b 称为离散的 Beamlet 基. 在给定分区子块 S 上的快速离散 Beamlet 变换 (Fast discrete beamlet transform, FDBT) 系数^[11] 为

$$\tilde{T}_f(b) = \sum_{(i,j) \in \Lambda_b} G(f_{i,j}) \quad (2)$$

式中,

$$G(f_{i,j}) = \begin{cases} 1, & f_{i,j} = 255 \\ 0, & f_{i,j} = 0 \end{cases}$$

定义 FDBT 的截集为

$$B_{t^*} = \{b | E(b) > t^*, b \in S_{i_0, j_0, l_0}\} \quad (3)$$

其中

$$E(b) = \frac{\tilde{T}_f(b)}{\|\Lambda_b\|} \quad (4)$$

Λ_b 是 Beamlet 基 b 通过的像素集合, $\|\Lambda_b\|$ 是集合 Λ_b 的元素个数. 截集 B_{t^*} 的一个最基本的应用就是检测直线. 如果能量函数 $E(b)$ 超过一定阈值 t^* , 就认为存在这个直线. 阈值可以由 Otsu 算法得到. 这里 $E(b)$ 的作用类似于像素灰度值在阈值分割里的作用.

由于 FDBT 是在各分区子块上进行 Beamlet 变换的, 当图像尺寸较大时, 计算量就变得很大. 最初的分区块 ($j = 0$) 尺度为全图大小, 而图中的边缘点 (特别是经过线性区域筛选后) 可能只存在于一个有限的区域内, 最“坏”的情况下才散布在全图, 因此先找到图中边缘点存在的区域, 并以此区域作为最初分区块的尺度可以大大减少算法的计算量; 其次, FDBT 在某一尺度的分区子块中找到 Beamlet 直线后直接对该分区子块进行四等分, 由于截集阈值选取的问题, 一些直线虽然在该级子块内找不到,

但是直接四等分子块可能会把该直线截断. 为此, 本文提出一种自适应多尺度快速 Beamlet 变换, 该算法可自适应地缩小分区子块的大小, 在很大程度上减少了计算量, 提高了线特征提取的效率. 具体的实现过程如下:

在对初始的边缘图像进行线性区域筛选的同时, 将独立的线性区域以唯一的数字标识记录下来. 以图 2 为例, 其中图 2 (a) 为经过线性区域筛选后的边缘图, 图 2 (b) 为图 2 (a) 对应的线性区域分层图, 分别记录了原图的三个线性区域, 由于三个区域的标识不同, 等价于把原图中相互独立的线性区域分别记录在不同的层上, 而每个层有且仅有一个线性区域, 如图 2 (c) 所示. 在分层图上找到边缘点存在的区域, 并以此区域作为 FDBT 的最初分区子块, 如图 2 (d) 所示, 然后对每一个分区子块单独进行 FDBT. 每层独立处理的结果不仅能使邻近或者交叉的线性区域在提取线特征时互不干扰, 而且能够根据边缘点的情况自适应地缩小分区子块的大小, 极大地减少了计算量.

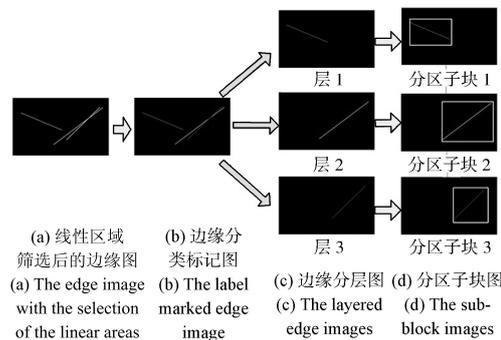
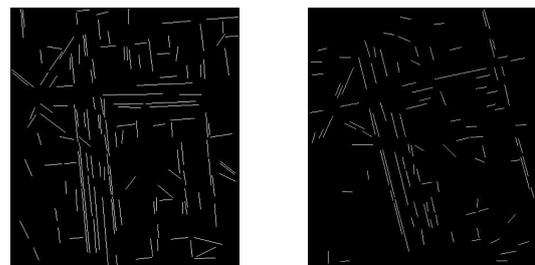


图 2 线性区域分层和各层上的自适应分区子块
Fig. 2 The layered linear areas and the adaptive partition of each sub-layer

基于上述的自适应多尺度快速 Beamlet 变换算法, 对可见光和 SAR 图像的线性区域分层图进行线特征检测, 提取出如图 3 所示的线特征.



(a) 可见光图像提取的线特征 (b) SAR 图像提取的线特征
(a) Extracted line features of optical image (b) Extracted line features of SAR image

图 3 提取的线特征
Fig. 3 Extracted line features of images

2 控制点及其匹配度函数

可见光和 SAR 图像虽然具有共同的较稳定的线特征, 但线特征的位置和长度往往不一致, 很难直接进行匹配. 但是这些线特征在两类图像中均呈现出较稳定的几何属性, 如直线的平行与相交等. 因此本文利用线特征的几何属性构造控制点, 并提出一种基于控制点特征的匹配度函数.

如图 4 所示, 线段 L_{o1} 和 L_{o2} 是可见光图像中的两条斜率不同的线特征, 交于点 p_m ; 线段 L_{s1} 和 L_{s2} 是 SAR 图像中斜率不同的两条线特征, 交于点 p_n . 以点 p_m 和 p_n 作为控制点. 控制点不一定对应着图像中某一个实际的角点, 却反映了两条线特征的几何属性. 控制点 p_m 和 p_n 的匹配度函数定义如下:

$$f(p_m, p_n) = \frac{|\theta_{o1} - \theta_{s1}|}{\theta_{o1} + \theta_{s1} + 1} \times \frac{|\theta_{o2} - \theta_{s2}|}{\theta_{o2} + \theta_{s2} + 1} + \frac{O_1 - \max\{L_{o1}, L_{s1}\}}{O_1 + \max\{L_{o1}, L_{s1}\}} + \frac{O_2 - \max\{L_{o2}, L_{s2}\}}{O_2 + \max\{L_{o2}, L_{s2}\}} + \frac{|D_1 - D_2|}{D_1 + D_2 + 1} + \frac{D_1 + D_2}{2T} \quad (5)$$

$$\text{s.t. } |\theta_{o1} - \theta_{s1}| < 1, \quad |\theta_{o2} - \theta_{s2}| < 1$$

其中, θ_{o1} 、 θ_{o2} 、 θ_{s1} 和 θ_{s2} 分别是 L_{o1} 、 L_{o2} 、 L_{s1} 和 L_{s2} 与水平轴的夹角; D_1 是 L_{o1} 和 L_{s1} 之间的距离, D_2 是 L_{o2} 和 L_{s2} 之间的距离; O_1 是 L_{o1} 和 L_{s1} 的重叠距离, 定义为 L_{o1} 的两个端点在 L_{s1} 上的投影点与 L_{s1} 重合的那段距离. O_2 表示 L_{o2} 和 L_{s2} 的重叠距离, 定义为 L_{o2} 的两个端点在 L_{s2} 上的投影点与 L_{s2} 重合的那段距离. T 是粗配准精度. 控制点匹配度函数 $f(p_m, p_n)$ 由 5 部分组成: 式 (5) 的第 1 项表示 L_{o1} 和 L_{s1} 的平行性及 L_{o2} 和 L_{s2} 的平行性, 当其值为 0 时, 则 L_{o1} 和 L_{s1} 平行, L_{o2} 和 L_{s2} 平行; 第 2 项表示 L_{o1} 和 L_{s1} 的长度匹配度, 其值为 0 时, 则 L_{o1} 和 L_{s1} 长度相等; 第 3 项表示 L_{o2} 和 L_{s2} 的长度匹配度, 其值为 0 时, 则 L_{o2} 和 L_{s2} 长度相等; 第 4 项表示 L_{o1} 和 L_{s1} , L_{o2} 和 L_{s2} 之间的距离之差, 其值为 0 时, 则 $D_1 = D_2$; 第 5 项确定控制点匹配的搜索范围, 其中 T 是经验阈值, 经过实验发现, 粗配准精度在 10 个像素以内, 所以设置 $T = 10$. 式 (5) 的约束条件限制了 L_{o1} 和 L_{s1} 以及 L_{o2} 和 L_{s2} 是两对近似平行的直线对.

控制点匹配度函数 (5) 反映了两个控制点之间的匹配程度. 当 $f(p_m, p_n) = 0$ 时, 表明这两个控制点完全匹配; 函数值越大, 表示控制点越不匹配. 本文根据实验设定: 当 $f(p_m, p_n) < 0.5$ 时, 则认为 p_m 和 p_n 是匹配的控制点对, 由此得到候选匹配点集.

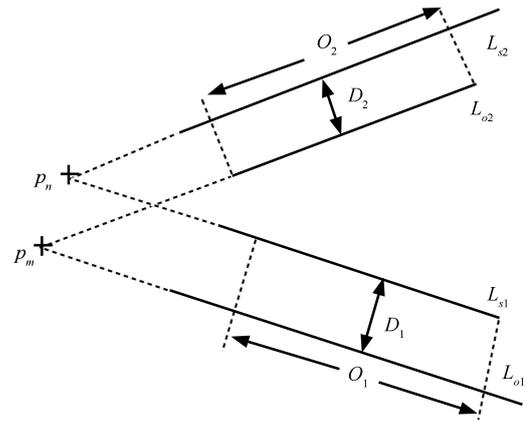


图 4 控制点匹配

Fig. 4 Matching of the control points

3 配准算法

本文提出的配准算法包括以下主要步骤: 边缘检测和线性区域筛选、线特征提取、基于特征一致的粗配准、控制点提取和基于控制点的精确配准, 具体流程如图 5 所示.

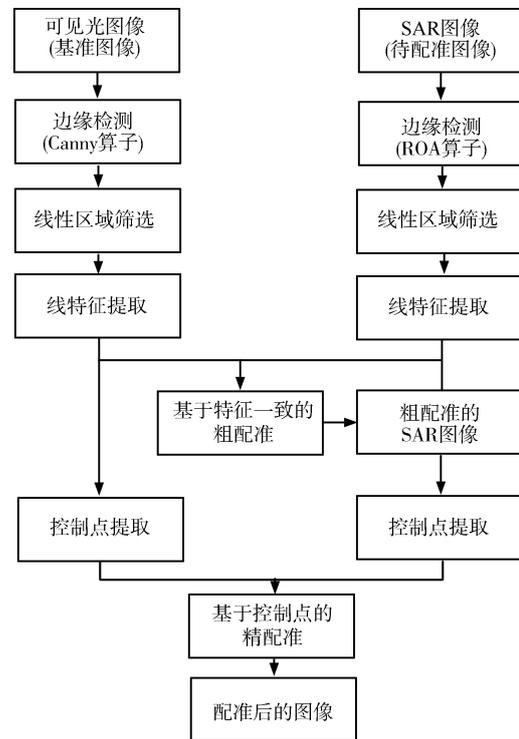


图 5 配准算法的流程图

Fig. 5 The flowchart of the image registration algorithm

3.1 基于特征一致的粗配准

粗配准是为了消除两幅图像间的整体旋转、缩放和平移差异, 所以采用基于特征一致的粗配准方法^[12]. 该方法利用四参数仿射变换模型, 由尺度因

子 S 、旋转角度 θ 及平移参数 t_x 和 t_y 组成, 在此变换模型中, 参考图像中的点 (X, Y) 与其在待配准图像中的对应点 (x, y) 满足下列关系:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于一般情况下 SAR 和可见光图像分辨率是已知的, 所以可估计出缩放因子 S . 令 L 和 L' 是可见光和 SAR 图像相对应的线特征, 斜率分别为 k 和 k' , 则 k 和 k' 应满足 $k = k' + \theta$. θ 可以通过计算两幅图中提取的线特征的斜率的差值得到, 即分别计算两幅图像的线特征的斜率直方图, 然后计算直方图的互相关函数, 其峰值对应的角度即为所估计的旋转角度 θ .

接下来需要估计的是平移参数 t_x 和 t_y . 首先根据缩放因子 S 和旋转角度 θ 对 SAR 和可见光的直线特征图进行缩放和旋转变换, 然后计算可见光和 SAR 图像线特征图的互相关函数, 其峰值所对应的 x 轴和 y 轴坐标即为所平移参数 t_x 和 t_y . 根据式 (6), 利用估计得到的变换参数对 SAR 和可见光图像进行粗配准. 如图 6 所示, 经过基于特征一致的粗配准, SAR 和可见光图像的大部分缩放、旋转和平移差异都得以消除.

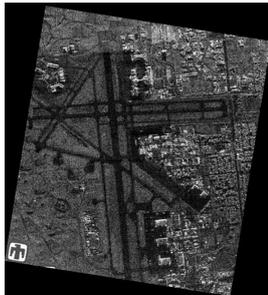


图 6 粗配准的 SAR 图像

Fig. 6 Coarsely registered SAR image

3.2 基于控制点的精确配准

由于可见光和 SAR 图像来自不同的传感器和成像条件, 图像之间的变形差异较大, 基于特征一致的粗配准能够较准确地对旋转角度进行估计, 但对平移参数的估计容易受到噪声的干扰. 因此, 要实现图像的精确配准, 必须从两幅图像中找到若干个匹配控制点对. 在可见光图像中, 角点比较稳定且易求取, 通常被选取为候选控制点, 但 SAR 图像与可见光图像灰度差异很大, 并存在相干斑噪声, 难以获得与可见光图像相对应的角点. 然而, 可见光和 SAR 图像都具有共同的较稳定的线特征, 这些线特征在两类图像中均呈现出较稳定的几何属性, 如直线的平行与相交等, 可以从中拟合出一系列线特征的交

点作为控制点, 并基于控制点进行精确配准. 具体的配准过程如下:

1) 提取控制点

如图 4 所示, 以两条线特征 (线段) 所在直线相交的交点作为控制点, 从粗配准后的可见光和 SAR 图像的线特征中分别提取控制点集 $P = \{P_i | (X_i, Y_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ 和 $P' = \{P'_j | (X_j, Y_j), j = 1, 2, \dots, m\}$, n 和 m 分别表示可见光和 SAR 图像中控制点的个数.

2) 对控制点进行初始匹配

对控制点集 P 和 P' , 按照匹配度函数 (5) 计算控制点集中每一个点对的匹配度 $f(P_i, P'_j)$. 如果 $f(P_i, P'_j) < 0.5$, 则认为是匹配的点对, 由此构成候选匹配点集 $PP = \{(P_t, P'_t) | (X_t, Y_t), (x_t, y_t), t = 1, 2, \dots, k\}$, k 表示候选匹配点的对数.

3) 剔除误匹配点

精确配准采用如下的仿射变换模型 T , 可见光图像中控制点 (X, Y) 与其在 SAR 图像中对应的控制点 (x, y) 符合以下关系:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{其中, 实变换矩阵 } H = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 & a_5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

控制点经过初始匹配得到的候选匹配点集中还存在误匹配点, 这里采用 RANSAC 算法^[1] 进行剔除, 具体步骤如下:

a) 在候选匹配点集 PP 中任选由 3 对不共线的匹配点估算变换矩阵 H ; b) 在余下点对中选择第 i 对匹配点 (P_i, P'_i) , 若 $\|P_i - T(P'_i)\| < \varepsilon$, 则将这对候选匹配点定义为内点, 重复这一步骤直到取完所有余下的候选匹配点对; c) 若步骤 b) 得到的内点数大于某一阈值 T_n , 则进行下一步, 否则返回步骤 a); d) 选择内点对为精确匹配点对.

实验中, 设置 $\varepsilon = 0.2$, $T_n = k/2$, 可得到精确匹配点集 $PK = \{(P_t, P'_t) | (X_t, Y_t), (x_t, y_t), t = 1, 2, \dots, N\}$, N 为精确匹配点对的个数.

4) 精确配准

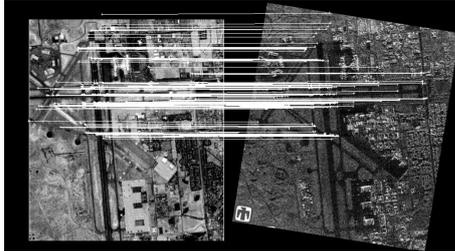
由得到的精确匹配点集 PK , 利用最小二乘法得到可见光和 SAR 图像之间的最佳变换矩阵 H , 再利用反向插值得到精确配准的图像.

4 实验结果及分析

为了验证本文提出的配准方法的有效性, 我们对实际的含有典型人造目标的可见光图像和 SAR 图像进行配准, 所有实验都是在 Core (TM) i3-

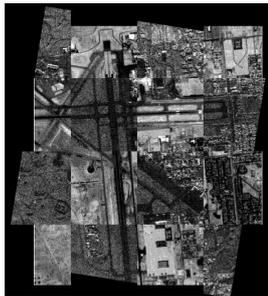
2.93 Hz 处理器和 2.0 G 内存 PC 机的硬件环境下, 采用 Matlab 2010a 编程实现.

限于篇幅, 这里只给出两组可见光和 SAR 图像的配准结果, 如图 7 和图 8 所示. 从图中可以看出, 本文提出的配准方法在图像特征不明显的区域仍可得到较稳定的控制点特征.



(a) 控制点的匹配结果

(a) Control point matching results

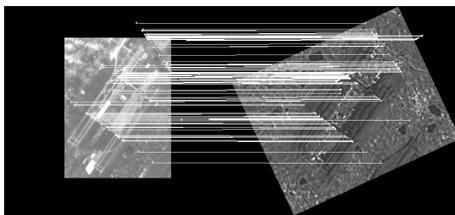


(b) 精配准后的可见光和 SAR 图像

(b) Fine registered optical and SAR images

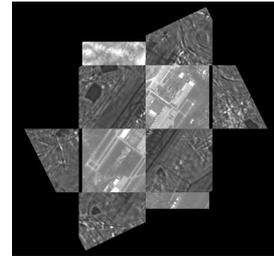
图 7 第一组配准结果

Fig. 7 Registration results of the first experiment



(a) 控制点的匹配结果

(a) Control point matching results



(b) 精配准后的可见光和 SAR 图像

(b) Fine registered optical and SAR images

图 8 第二组配准结果

Fig. 8 Registration results of the second experiment

此外, 我们给出了本文和文献 [8] 中提出的配准方法在两组实验上的定量比较, 如表 1 所示. 这里采用精确匹配点集的均方根误差 (Root mean squared error, RMSE) 作为配准精度的评价准则:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \|P_i - T(P'_i)\|^2 \right)} \quad (8)$$

其中, N 表示精确匹配点对的个数, T 为式 (7) 所示的仿射变换.

从表 1 可以看出, 本文方法比文献 [8] 具有更好的配准精度, 同时运算时间略有降低. 本文和文献 [8] 都采用了由粗到精的配准方法, 但是在具体采用的特征和配准方法上有所不同. 文献 [8] 利用 Canny 算子提取 SAR 图像边缘, 很容易受到 SAR 图像中乘性噪声的影响, 如在第二组实验中用 Canny 算子对 SAR 图像检测到的边缘因为效果不好, 已无法进行后续的配准. 此外, 文献 [8] 在线特征提取时采用了最小二乘拟合方法, 该方法的拟合精度较低, 会直接影响到粗配准的精度. 精配准时, 采用边缘匹配度函数对线特征进行匹配, 但由于线特征在位置和长度上的差异, 容易造成误匹配, 同时变换模型采用的是二阶多项式模型, 算法复杂度较高. 而本文利用 ROA 算子对 SAR 图像进行边缘检测可以较好地抑制乘性噪声; 同时在线特征提取时采用自适应多尺度快速 Beamlet 变换, 定位精确; 精确配准时, 采用

表 1 本文方法和文献 [8] 在两组配准实验上的定量比较

Table 1 Quantitative comparison of the proposed registration algorithm with [8]

	配准方法	控制点对数	运算时间 (s)	RMSE
第一组实验结果	文献 [8]	22	142.1	0.80
	本文算法	128	129.4	0.40
第二组实验结果	文献 [8]	/	/	/
	本文算法	84	89.7	0.43

基于控制点的匹配度函数,对生成控制点的线特征进行整体考虑,避免了单条线特征匹配时由于位置和长度的差异而造成的误匹配,因此具有更高的配准精度。

5 结论

本文针对具有典型人造目标的可见光和 SAR 图像,提出一种基于线特征和控制点的异源图像配准算法。因为提取的线特征的精度直接影响到配准的结果,因此这一步骤在整个配准算法流程中至关重要。本文提出的基于自适应多尺度快速 Beamlet 变换的线特征提取方法,不但对线特征可以精确定位,而且相比于经典的快速 Beamlet 变换,大大提高了算法的运算速度。此外,基于线特征构造控制点,设计了一种基于控制点特征的匹配度函数,避免了单条直线匹配时由于长度和位置差异造成的误匹配,提高了匹配的精度。需要指出的是,本文提出的配准算法,不仅适用于可见光和 SAR 图像的配准,也适用于其他具有明显线特征的异源图像配准,如可见光和红外图像的配准等,这时需要针对不同的图像采用合适的边缘检测算子。

References

- 1 Dawn S, Saxena V, Sharma B. Remote sensing image registration techniques: a survey. *Image and Signal Processing*, 2010, **6134**: 103–112
- 2 Chen X, Qiu P H. Intensity-based image registration by nonparametric local smoothing. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, **33**(10): 2081–2092
- 3 Dare P, Dowman I. An improved model for automatic feature-based registration of SAR and SPOT images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, **56**(1): 13–28
- 4 Tang Min. A novel image registration method combining morphological gradient mutual information with multiresolution optimizer. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(3): 246–250
(汤敏. 结合形态学梯度互信息和多分辨率寻优的图像配准新方法. *自动化学报*, 2008, **34**(3): 246–250)
- 5 Keller Y, Averbuch A. Multisensor image registration via implicit similarity. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, **28**(5): 794–801
- 6 Kim Y S, Lee J H, Ra J B. Multi-sensor image registration based on intensity and edge orientation information. *Pattern Recognition*, 2008, **41**(11): 3356–3365
- 7 Stamos I, Leordeanu M. Automated feature-based range registration of urban scenes of large scale. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2003, **2**: 555–561
- 8 Su Juan, Lin Xing-Gang, Liu Dai-Zhi. A multi-sensor image registration algorithm based on structure feature edges. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(3): 251–257
(苏娟, 林行刚, 刘代志. 一种基于结构特征边缘的多传感器图像配准方法. *自动化学报*, 2009, **35**(3): 251–257)
- 9 Touzi R, Lopes A, Bousquet P. A statistical and geometrical edge detector for SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, **26**(6): 764–773
- 10 Donoho D L, Huo X M, Jermyn I, Jones P, Lerman G, Levi O, Natterer F. Beamlets and multiscale image analysis. *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, 2001, **20**: 149–196
- 11 Shi Q F, Zhang Y N. Adaptive linear feature detection based on Beamlet. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Shanghai, China: IEEE, 2004. 3981–3984
- 12 Shekhar C, Govindu V, Chellappa R. Multisensor image registration by feature consensus. *Pattern Recognition*, 1999, **32**(1): 39–52



李映 西北工业大学教授。主要研究方向为图像处理与模式识别,数据挖掘,智能信息处理。本文通信作者。
E-mail: lybyp@nwpu.edu.cn

(LI Ying Professor at the School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University. Her research interest covers image processing and pattern recognition, data mining, and intelligent information processing. Corresponding author of this paper.)



崔杨杨 西北工业大学计算机学院硕士研究生。主要研究方向为图像处理和计算机视觉。
E-mail: cuiyangyang25@163.com

(CUI Yang-Yang Master student at the School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University. His research interest covers image processing and computer vision.)



韩晓宇 西北工业大学硕士研究生。主要研究方向为模式识别与机器学习。

E-mail: hanxiaoyu@mail.nwpu.edu.cn

(HAN Xiao-Yu Master student at the School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University. Her research interest covers pattern recognition and machine learning.)