

一种基于结构特征边缘的多传感器图像配准方法

苏娟^{1,2} 林行刚² 刘代志¹

摘要 图像配准是多传感器图像融合等处理的前提. 本文以包含人造目标的合成孔径雷达 (Synthetic aperture radar, SAR) 图像和可见光图像为处理对象, 提出了一种基于结构特征边缘的多传感器图像配准方法. 该方法提取人造目标在两类图像中表现的共性特征——结构特征边缘, 并基于边缘匹配构造虚拟角点, 采用基于特征一致的粗配准方法和基于虚拟角点的精配准方法, 对待配准图像实现由粗到精的自动配准. 实验结果表明, 本文方法能够取得较高的配准精度.

关键词 图像配准, 结构特征边缘, 边缘匹配, 特征一致, 虚拟角点

中图分类号 TP75

A Multi-sensor Image Registration Algorithm Based on Structure Feature Edges

SU Juan^{1,2} LIN Xing-Gang² LIU Dai-Zhi¹

Abstract Image registration is prerequisite to multi-sensor image processing, such as image fusion. Taking synthetic aperture radar (SAR) images and optical images containing man-made objects as examples, this paper proposes a multi-sensor image registration algorithm based on structure feature edges. The common features for the same man-made objects shown in the two kinds of images, i.e. structure feature edges, are extracted firstly, and virtual corners are constructed on the basis of edge matching. The coarse registration based on feature consensus and the fine registration based on virtual corners are used to realize the automatic coarse-to-fine registration between multi-sensor images. Experimental results show that the proposed algorithm has a high registration accuracy.

Key words Image registration, structure feature edge, edge matching, feature consensus, virtual corner

随着遥感技术的发展, 人们可以利用的传感器越来越多, 由于不同传感器图像在对成像目标的描述上具有互补性, 因此能够提供比单一传感器图像更多更丰富的信息. 以合成孔径雷达 (Synthetic aperture radar, SAR) 图像与可见光图像为例, 两者是目标对于不同电磁波波段的响应, 从中提取互补性特征, 可以有效扩展目标在电磁波谱域的表达, 克服单源图像检测的局限性, 提高目标检测性能. 但是, 由于不同传感器图像的成像机理和成像条件不同, 对不同传感器图像进行图像融合等处理必须在图像精确配准的前提下进行, 换言之, 图像配准是多传感器图像融合等处理的必要步骤. 常用的人工配准或半自动配准方法需要通过手工选择以确定配准所需的控制点, 但这项工作比较耗时费力且易受操作者的主观影响, 因此不能满足许多有实时性和全自动要求的图像处理系统的需要. 现阶段可见光图像之间的配准算法已比较成熟, 但是, 由于不同传感器的成像机理不同, 同一地物或目标的图像在灰度、

统计特性等方面都有较大的差异, 现有基于可见光图像的配准方法不能直接应用于多传感器图像配准. 因此, 必须针对不同传感器图像的特点, 设计相应的多传感器图像配准算法.

现有的多传感器图像配准算法以基于特征的算法为主. 文献 [1–3] 利用 SAR 图像和可见光图像的共性特征——边缘特征或轮廓特征, 进行特征匹配得到配准所需的控制点, 其中文献 [1–2] 算法的共同特点是两类不同传感器图像中必须具有比较稳定且易匹配的封闭轮廓, 否则算法易失效; 文献 [1, 3] 算法的共同特点是采用半自动配准的方法, 首先人工选择控制点, 对图像进行粗配准, 然后利用边缘特征匹配的方法确定控制点, 对图像进行精确配准. 文献 [4–5] 同样利用待配准图像的共性特征, 采用类似广义 Hough 变换的方法, 用投票方法确定配准模型的各个参数, 参数的投票过程可以分步进行. 这类算法所需的计算量和内存较大, 需要根据先验知识给出参数搜索的大致范围. 文献 [6–8] 利用点特征或边缘特征设计某种目标函数, 采用最优化方法使目标函数达到最优, 从而获得配准模型, 这类算法的复杂度较高.

与已有方法不同, 本文提出了一种新的基于结构特征边缘的多传感器图像配准方法. 该方法以包含人造目标的 SAR 图像和可见光图像为处理对象, 由粗至精地实现 SAR 图像和可见光图像的自动配准. 在粗配准过程中, 通过提取人造目标在两类图像

收稿日期 2007-11-06 收修稿日期 2008-04-07
Received November 6, 2007; in revised form April 7, 2008
国家自然科学基金 (60472028) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60472028)

1. 第二炮兵工程学院 西安 710025 2. 清华大学电子工程系 北京 100084

1. The Second Artillery Institute of Engineering, Xi'an 710025
2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.00251

中的结构特征边缘,采用特征一致的方法对 SAR 图像和可见光图像进行粗配准;在精配准过程中,提出了一种新的基于边缘匹配和虚拟角点的控制点对生成方法,用于对经过粗配准的图像进行精配准.该方法不要求两图中具有稳定且易匹配的封闭轮廓或角点,能实现多传感器图像的全自动配准.

1 算法

如图 1 所示,本文提出的配准方法包括以下步骤:结构特征边缘提取、基于特征一致的粗配准和基于虚拟角点的精配准.本文方法并不考虑 SAR 图像固有的几何变形问题,假定待配准的 SAR 图像已经过必要的预处理,如斜地校正、叠掩和阴影补偿以及斑点噪声消除等.

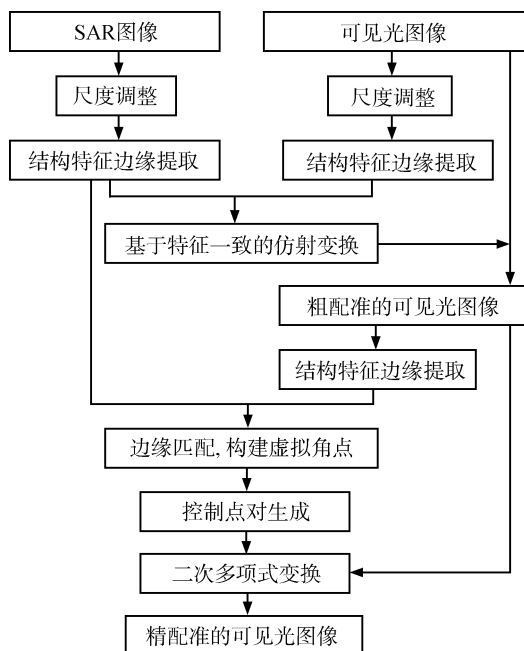


图 1 方法的总体框图

Fig. 1 Overall flowchart of the proposed algorithm

1.1 结构特征边缘提取

无论是在 SAR 图像中,还是在可见光图像中,结构特征都是表征人造目标的主要特征.我们关注的人造目标主要包括建筑物、道路、桥梁、机场等,经过大量样本统计发现,上述目标的几何结构以平行线、L 型线或其组合为主,具有较稳定的组织结构模式,并且,构成这些几何结构的边缘具有比较稳定的曲率.因此,本文从图像的边缘图中提取出曲率稳定的平行边缘与垂直边缘,并将其定义为目标的结构特征边缘,用于后文的粗配准与精配准过程.具体的做法如下:

1) 运用 Canny 算子对原始灰度图像进行边缘提取,得到二值边缘图.采用基于邻域搜索的边缘点

连接方法从二值边缘图中提取边缘线段,并填补边缘线段上的小间隙,默认填补间隙为 1 个像素.

2) 计算边缘线段上每个边缘点的曲率,并采用基于曲率尺度空间的方法提取角点^[9],将提取的边缘线段在角点位置断开.

3) 对每条边缘线段计算边缘点曲率的均值 \bar{k} ,如果该边缘线段上满足 $|k_i - \bar{k}| < th$ (th 为预设阈值,本文据经验选取为 0.02) 的点的个数达到边缘点总数的 $2/3$,则认为该边缘线段具有比较稳定的曲率.

4) 采用最小二乘拟合对保留的曲率稳定的边缘线段进行直线拟合,根据拟合所得的直线斜率与截距提取出相互垂直的边缘线段和相互平行的边缘线段,将其作为目标的结构特征边缘.对每条结构特征边缘进行标识,记录边缘线段的端点,组成边缘线段的边缘像素的坐标,拟合直线的斜率与截距等.

结构特征边缘的提取过程相当于对 Canny 边缘图进行滤波,保留有意义的、满足人造目标几何结构定义的边缘,去除大量杂乱散碎的边缘.图 2 给出了两幅待配准的 SAR 图像与可见光图像,以及两图对应的结构特征边缘图,其中 SAR 图像为参考图像,可见光图像为待配准的传感图像.两图已经过尺度调整,图像尺寸为 350×420 . 本文将以图 2 所示图像为例,详细介绍本文算法的各个模块.

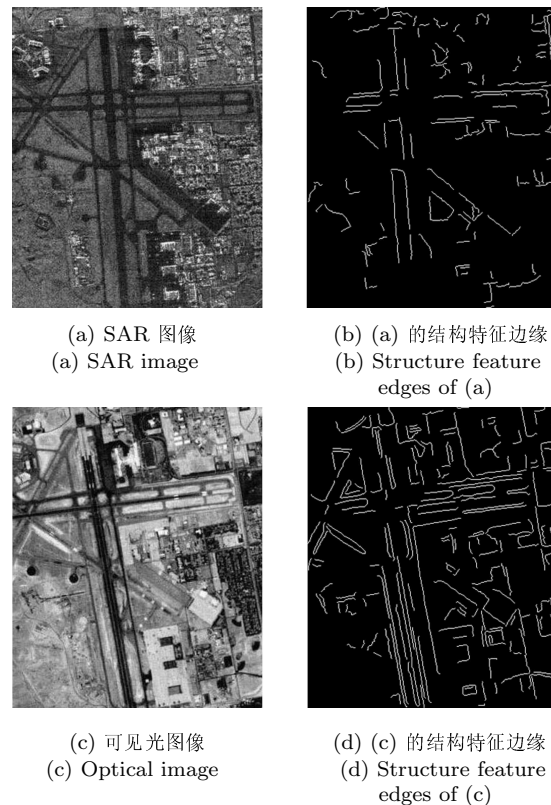


图 2 结构特征边缘

Fig. 2 Structure feature edges

1.2 基于特征一致的粗配准

粗配准的目的是消除两幅待配准图像间的整体旋转和平移差异,所以我们选用四参数仿射变换模型,并采用特征一致的方法^[4]对SAR图像和可见光图像进行配准.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 决定,在此变换模型下,参考图像中的点 (x, y) 与其在传感图像中的对应点 (X, Y) 满足以下关系

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

该变换模型可以写成如下所示的四步变换^[4]

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = T_{t_y} T_{t_x} T_s T_\theta \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2)$$

第一个需要估计的变换参数是旋转角度 θ .如果 l 和 l' 是传感图像和参考图像中对应的结构特征边缘,斜率分别为 ϕ 和 ϕ' ,则 ϕ 和 ϕ' 应满足 $\phi' = \phi + \theta$,因此, θ 的估计可以通过计算从两图中提取的结构特征边缘的斜率的差值实现^[4-5].分别计算两图的结构特征边缘图的边缘斜率分布直方图,然后计算两个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 .

第二个需要估计的变换参数是尺度因子 s .如图1所示,在配准之前,首先以分辨率低的图像为准,根据先验知识(如成像卫星的分辨率)对待配准的SAR图像和可见光图像进行尺度调整,使两图具有近似相同的分辨率,因此可认为 s 近似等于1.

接下来需要估计的变换参数是平移参数 t_x 和 t_y .首先根据估计的旋转角度 θ ,将已进行尺度调整的传感图像进行旋转变换,提取旋转变换后的传感图像和参考图像的结构特征边缘图,然后对两幅边缘图计算互相关函数,其最大峰值位置对应的 x 轴和 y 轴坐标即为所估计的平移参数 t_x 和 t_y .

估计出上述变换参数以后,即可对两幅待配准图像进行粗配准.以图2所示的SAR图像和可见光图像为例,粗配准的可见光图像如图3所示.可以看出,经过基于特征一致的粗配准后,两幅图像之间的大部分平移和旋转差异都可以得到消除.但是,由于待配准图像来自不同传感器和不同成像条件,图像之间的变形差异较大,基于特征一致的粗配准模块的变换参数是通过对结构特征边缘进行相关统计求出的,一般情况下,该方法能比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结构特征边缘图中噪声的影响.采用手工挑选控制点计算配准精度的方法对算法粗配准部分的配准性能进行评估,该对配准实验对象的配准误差为21.50.在对配

准精度要求较高的应用场合(如图像融合、目标检测和变化检测等),该配准精度远远不能达到应用要求.因此,下一小节将根据人造目标在SAR图像和可见光图像中所表现的共性特征,提出虚拟角点的概念,用于提取精配准所需的控制点,然后采用基于控制点的二次多项式纠正模型,对粗配准后的SAR图像和可见光图像进行精配准.



图3 粗配准的可见光图像

Fig. 3 Coarsely registered optical image

1.3 基于虚拟角点的精配准

在可见光图像配准中,因为角点比较稳定且易求,通常被选取为候选控制点,并通过在其邻域定义某种相似度,对候选控制点进行匹配^[10].在SAR图像和可见光图像配准中,由于两类图像来自不同的传感器和成像条件,图像的灰度差异很大,地面目标的实际角点在两幅图像中的对应关系不能得到很好的保持,并且现有的基于灰度相关或形状相关的相似度也不适用于这两种灰度和统计特性相差较大的图像.但是,如前所述,在包含人造目标的SAR图像和可见光图像中,存在许多与人造目标几何特性有关的结构特征边缘线段,这些边缘线段在两类图像中均呈现出比较稳定的特性,如边缘线段之间的位置关系(平行、垂直与相交等)在两图中能得到很好的保持.因此本文提出了虚拟角点的概念,通过虚拟角点对两类图像进行精确配准.虚拟角点被定义为边缘线段所在直线的交点.我们首先通过边缘匹配的方法找出两图中相互对应的边缘线段,然后找出相互对应的虚拟角点,用来作为精配准所需的控制点.

对粗配准所得的图像进行结构特征边缘提取,得到结构特征边缘图.边缘匹配如图4(见下页)所示,传感图像中的边缘 L_i 经过粗配准阶段的仿射变换 T_1 后变换为边缘 \bar{L}_i ,端点 P_{i1} 和 P_{i2} 相应变换为 \bar{P}_{i1} 和 \bar{P}_{i2} ,边缘匹配的目的是要在参考图像的边缘图中找出与 \bar{L}_i 最匹配的边缘,搜索范围为参考图像

边缘图中与 \bar{L}_i 具有近似相等的斜率的边缘. 如图 4 所示, d_{ij} 表示边缘 \bar{L}_i 的中点到候选边缘 L'_j 所在直线的正交距离, d_{ij} 越小表示边缘 \bar{L}_i 与 L'_j 越接近; O_{ij} 表示边缘 \bar{L}_i 到候选边缘 L'_j 所在直线的重叠距离, 定义为边缘 \bar{L}_i 的两端点在候选边缘 L'_j 所在直线上的投影点之间与边缘 L'_j 重合的那段距离, O_{ij} 越大表示边缘 \bar{L}_i 与 L'_j 越重合. 如果边缘 \bar{L}_i 与候选边缘 L'_j 之间的正交距离 d_{ij} 越小, 重叠距离 O_{ij} 越大, 则边缘 \bar{L}_i 与候选边缘 L'_j 就越匹配. 因此定义以下的匹配度函数

$$F(i, j) = O_{ij} \times f(d_{ij}) = O_{ij} \times \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{2 \times \sigma^2}\right) \quad (3)$$

其中, $f(d_{ij})$ 为均值为零和方差为 σ 的高斯函数, 具有随着 d_{ij} 的增长而不断下降的性质, 当 $d_{ij} = 0$ 时, 有 $f(d_{ij}) = 1$, $F(i, j) = O_{ij}$, d_{ij} 越大, 则 $f(d_{ij})$ 的值越小, 当 $f(d_{ij})$ 接近于零时, $F(i, j)$ 也接近于零, 与 O_{ij} 的取值无关. 对十余对图像的实验结果进行统计可知, 粗配准的配准误差在 30 个像素以内, 也就是说, 如果两条边缘的正交距离 d_{ij} 大于 30, 则两者匹配的可能性应该很小, 此时应有 $f(d_{ij})$ 接近于零, 本文据此设定 $\sigma = 8$. 式 (3) 定义的匹配度充分考虑了正交距离和重叠距离在边缘匹配中的作用. 在边缘匹配时, 对粗配准的传感图像的结构特征边缘图中的每一条待匹配边缘, 根据斜率在参考图像结构特征边缘图中确定匹配过程的搜索范围, 对搜索范围中的每条边缘, 根据式 (3) 计算相应的匹配度, 选取匹配度最大的边缘作为待匹配边缘在参考图像结构特征边缘图中的匹配边缘.

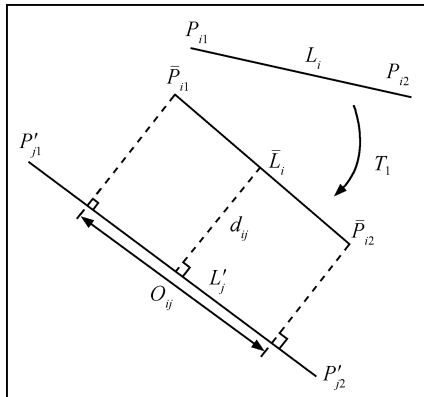


图 4 边缘匹配

Fig. 4 Edge matching

边缘匹配确定了两图中相互匹配的边缘线段. 在同一幅图中, 如果多条非平行的边缘线段所在直线的交点位于图内, 则构成了虚拟角点; 在两幅待配准的图像中, 如果虚拟角点由相互匹配的边缘线段构成, 则构成匹配的虚拟角点, 即可用于配准的控制

点. 如图 5 中边缘 L_1 和 L_2 构成虚拟角点 P_1 , 边缘 L'_1 和 L'_2 构成虚拟角点 P'_1 , 由于边缘 L_1 和 L'_1 匹配, 边缘 L_2 和 L'_2 匹配, 则点 P_1 和 P'_1 匹配, 构成一对控制点.

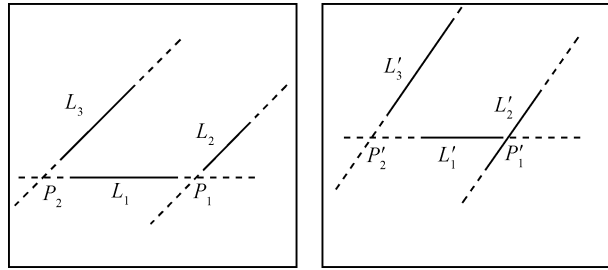


图 5 匹配的虚拟角点

Fig. 5 Matched virtual corners

精配准采用的变换模型是二阶多项式模型, 因此此模型能更精确地描述图像之间的变形差异. 在此模型下, 参考图像中的控制点 (x, y) 与其在传感图像中的对应点 (X, Y) 满足以下关系

$$\begin{aligned} X &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \\ Y &= b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \end{aligned} \quad (4)$$

将采用基于边缘匹配和虚拟角点的控制点提取方法得到的控制点坐标代入式 (4), 可以求得配准模型的各个系数. 但是, 由于部分控制点误差较大, 对应关系较差, 对整体配准精度的影响较大, 因此称这样的控制点为外点. 本文采用以下方法对外点进行剔除.

1) 采用相对距离差法对明显错误的外点进行剔除. 相对距离差的定义为

$$dist_diff(i, j) = \text{abs}(dist(P_i, P'_i) - dist(P_j, P'_j)) \quad (5)$$

其中, (P_i, P'_i) 和 (P_j, P'_j) 分别表示第 i 个和第 j 个匹配对, $dist$ 表示两个匹配点之间的距离. 假设共有 N 对匹配点, 对第 i 个匹配对, 可以得到该匹配对相对于其他 $N - 1$ 个匹配对的 $N - 1$ 个相对距离差. 如果满足

$$dist_diff(i, j) > threshold1 \quad (6)$$

的个数大于 $p \times N$ (p 为比例系数, $threshold1$ 为预设门限), 则认为第 i 个匹配对是错误匹配对, 予以剔除. 经过多次实验, 设定 $threshold1 = 5$, $p = 0.6$. 相对距离差法在实际应用中取得了良好效果, 能剔除明显错误的匹配对.

2) 采用迭代算法对剩余的匹配点中的外点进行剔除. 首先利用剩余的所有准正确匹配对, 根据式 (4) 得到多项式变换模型 T_2 , 每对控制点的匹配精

度由如下所示的误差函数决定

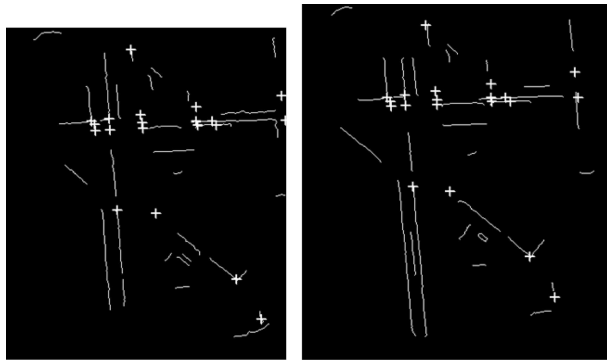
$$dist(i) = \|P_i - T_2(P'_i)\| \quad (7)$$

根据式(7)计算每对控制点的匹配精度,设置阈值 $threshold2$ (本文根据配准精度的需要设定 $threshold2 = 1.5$),如果最大误差大于阈值,则将最大误差对应的控制点对剔除.对其余控制点对重复上述计算,直到满足迭代终止条件,即对所有的控制点对,均有 $dist(i) \leq threshold2$.采用最终保留的控制点对计算所得的二次多项式变换模型即为最终的精配准模型.精配准部分的配准精度由均方根误差(Root of mean square error, RMSE)决定

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \|P_i - T_2(P'_i)\|^2 \right)} \quad (8)$$

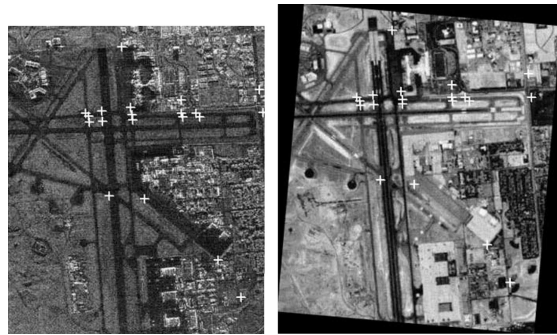
式中 N 表示最终保留的控制点的数目.

图6给出了对图3所示的粗配准图像进行基于边缘匹配和虚拟角点的控制点提取结果.从图6(b)中通过目视可以定性地看出,精配准部分提取的控制点对在SAR图像和粗配准的可见光图像中的对



(a) 匹配的边与虚拟角点

(a) Matched edges and virtual corners



(b) 映射到图像中的控制点对

(b) Control point pairs mapped into images

图6 基于边缘匹配和虚拟角点的控制点提取

Fig.6 Extraction of control points based on edge matching and virtual corner

应关系较好.表1定量地给出了精配准模型中各对控制点的匹配精度以及整体配准精度.可以看出,绝大多数控制点的RMSE均小于1,整体配准精度为0.81.实验结果充分说明,基于边缘匹配和虚拟角点的精配准方法能够明显地改善和修正粗配准的配准性能,取得较高的配准精度.

表1 控制点对的匹配精度与整体配准精度

Table 1 Matching accuracies of control points and overall RMSE

No.	Base _x	Base _y	Warp _x	Warp _y	Predict _x	Predict _y	RMSE
1	119	107	128	109	127.85	109.01	0.16
2	116	129	125	131	124.89	130.69	0.33
3	130	130	138	132	138.98	131.66	1.03
4	231	139	240	141	240.60	140.45	0.82
5	111	168	120	169	119.98	169.12	0.13
6	101	237	111	238	110.12	237.13	1.24
7	87	343	96	342	96.34	341.60	0.52
8	123	111	133	113	131.88	112.94	1.12
9	131	112	139	114	139.93	113.92	0.93
10	29	156	37	157	37.46	157.37	0.58
11	235	187	246	187	244.76	187.75	1.44
12	121	170	131	171	130.04	171.09	0.96
13	128	171	137	171	137.08	172.07	1.07
14	369	318	380	317	379.94	316.73	0.28
15	119	257	128	256	128.28	256.82	0.87
16	124	262	133	262	133.32	261.75	0.41
17	119	237	128	238	128.22	237.11	0.91
18	124	239	133	239	133.26	239.08	0.27
19	318	287	328	286	328.54	286.22	0.59
20	118	348	128	346	127.54	346.50	0.68
overall							0.81

2 实验分析

由于多传感器图像配准算法的设计与具体应用背景和所利用的数据源密切相关,该领域缺乏比较实验的平台,比如公共实验数据库和同类算法的性能参数等,因此相关文献大多采用式(8)所示的配准精度来衡量算法性能.本文亦不做此方面的对比实验,而是通过计算配准精度对算法性能进行客观测试,以及通过人工目视对提取的控制点的对应关系进行主观评价.

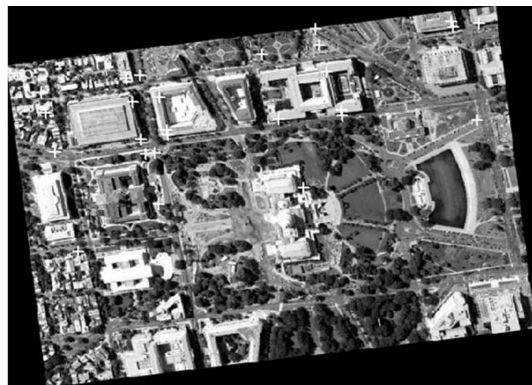
本文对十余对图像进行了实验,均取得了较好效果,限于篇幅,本节只给出三对图像的实验结果,分别如图6(b)、图7和图8(见下页)所示,图中白色十字表示采用本文方法提取得到的控制点.由图可知,本文方法提取的控制点的对应关系比较好,而且部分控制点还来自特征并不明显的区域,在这些

区域里, 由于不存在明显的特征 (如封闭轮廓或角点), 即使采用手工提取的方法, 也很难准确提取控制点, 但本文方法能降低对图像特征的要求, 即使图像中不存在明显的特征, 也能基于边缘匹配和虚拟角点提取出对应关系较好的控制点. 并且, 以上三个实验的精配准模块的配准误差均在一个像素以内.



(a) SAR 图像上的控制点

(a) Control points in the SAR image



(b) 粗配准可见光图像上的控制点

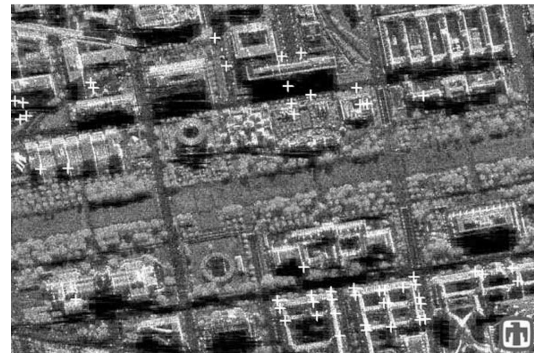
(b) Control points in the coarsely registered optical image

图 7 配准实验二 (配准精度为 0.95)

Fig. 7 Registration experiment 2 (RMSE = 0.95)

本文方法的精配准模块采用了基于控制点提取的多项式变换模型, 配准精度取决于提取的控制点的匹配精度. 由于精配准是在粗配准基础上进行的, 粗配准消除了两幅待配准图像之间的大部分平移差异和旋转差异, 使得边缘匹配能够在两幅已经过粗配准的图像上进行, 并且用于匹配的边缘是在两图中保持关系较好的结构特征边缘, 使得边缘匹配具有较高的精度, 继而使得基于边缘匹配的虚拟角点的匹配精度也相应较高, 这是本文方法能够取得较高配准精度的原因.

本文和文献 [11] 均采用了由粗至精的两步配准方法, 但在具体采用的特征和匹配方法上有所不同. 文献 [11] 方法在粗配准和精配准阶段, 除了采用边



(a) SAR 图像上的控制点

(a) Control points in the SAR image



(b) 粗配准可见光图像上的控制点

(b) Control points in the coarsely registered optical image

图 8 配准实验三 (配准精度为 0.98)

Fig. 8 Registration experiment 3 (RMSE = 0.98)

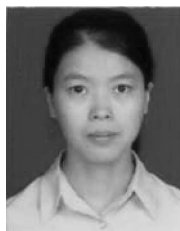
缘作为配准所需的特征以外, 还需要提取和匹配建筑区和森林等目标, 而这些目标本身的提取和匹配复杂度就很高. 并且, 在精配准阶段, 在建立基于边缘匹配的精配准目标函数时, 是以待匹配边缘上的点为单位, 而不是以整条边缘为单位, 因此计算量较大. 而本文方法的粗配准和精配准模块都是在提取的结构特征边缘的基础上进行, 这种特征物理意义明了, 计算简单易行, 简化了后续的大量工作. 并且, 粗配准消除了两幅待配准图像之间的大部分平移和旋转差异, 将精配准过程中边缘匹配的搜索空间缩小为参考图像边缘图中与待匹配边缘具有近似相等斜率的边缘, 从而大大降低了方法的复杂度. 以图 2 所示实验对象为例, 在 Intel Pentium 1.5 G 处理器和 512 M 内存的硬件配置下, 采用 Matlab 2006 a 的编程环境, 计算时间约为 2 分钟左右, 其中精配准过程中的边缘匹配和控制点提取模块耗时间约占总计算时间的三分之二. 必须说明的是, 本文方法所需计算时间与图像内容密切相关, 图像中结构特征边缘丰富, 则计算时间相应较长. 本文对十余对图像进行了实验, 所需计算时间从一分钟到五分钟不等.

3 结束语

本文以包含人造目标的 SAR 图像和可见光图像为处理对象,提出了一种基于结构特征边缘的多传感器图像配准方法.实验结果表明,本文方法能取得较高的配准精度.本文方法具有以下几个特点:1)采用基于特征一致的粗配准方法和基于虚拟角点的精配准方法,对待配准图像实现由粗到精的自动配准;2)提出一种新的基于边缘匹配和虚拟角点的控制点生成方法,使得本文算法对图像特征的要求降低,不要求两图中具有稳定且易匹配的封闭轮廓或角点;3)由于本文方法以人造目标的结构特征边缘为基础,因此不但适用于 SAR 图像与可见光图像的自动配准,而且适用于其他不同类型的多传感器图像的自动配准,只要待检测的图像中具有比较明显可见的目标结构特征边缘即可.

References

- Li H, Manjunath B S, Mitra S K. A contour-based approach to multisensor image registration. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, 4(3): 320–334
- 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
- Hong T D, Schowengerdt R A. Automated precise registration of radar and optical satellite images. In: Proceedings of SPIE Conference on Applications of Digital Image Processing. San Diego, USA: IEEE, 2003. 88–96
- Shekhar C, Govindu V, Chellappa R. Multisensor image registration by feature consensus. *Pattern Recognition*, 1999, 32(1): 39–52
- Middelmann W, Pepelka V, Thoennessen U. Registration of multiaspect InSAR images. In: Proceedings of SPIE Conference on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery. Orlando, USA: SPIE, 2003, 98–109
- Yao J C, Kian L G. A refined algorithm for multisensor image registration based on pixel migration. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(7): 1839–1847
- Keller Y, Averbuch A. Multisensor image registration via implicit similarity. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(5): 794–801
- Kruger W. Robust and efficient map-to-image registration with line segments. *Machine Vision and Applications*, 2001, 13(1): 38–50
- He X C, Yung N H C. Curvature scale space corner detector with adaptive threshold and dynamic region of support. In: Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Cambridge, UK: IEEE, 2004. 791–794
- Bentoutou Y, Taleb N, Kpalma K, Ronsin J. An automatic image registration for applications in remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(9): 2127–2137
- Borghys D, Perneel C, Acheroy M. A hierarchical approach for registration of high-resolution polarimetric SAR images. In: Proceedings of SPIE Conference on Image and Signal Processing for Remote Sensing. Toulouse, France: SPIE, 2002. 11–22



苏娟 清华大学电子工程系博士研究生. 主要研究方向为遥感图像处理与模式识别. 本文通信作者.

E-mail: suj04@mails.tsinghua.edu.cn
(SU Juan Ph.D. candidate at the Department of Electronic Engineering, Tsinghua University. Her research interest covers remote sensing image processing and pattern recognition. Corresponding author of this paper.)



林行刚 清华大学电子工程系教授. 主要研究方向为图像/视频处理与分析, 视觉信息压缩编码及应用, 模式识别.

E-mail: linxg@image.ee.tsinghua.edu.cn
(LIN Xing-Gang Professor at the Department of Electronic Engineering, Tsinghua University. His research interest covers image/video processing and analysis, video coding and communications, and pattern recognition.)



刘代志 第二炮兵工程学院教授. 主要研究方向为模式识别, 军事情报侦测工程和军事地球物理学研究.

E-mail: daizhiliu@163.com
(LIU Dai-Zhi Professor at the Second Artillery Institute of Engineering. His research interest covers pattern recognition, reconnaissance engineering

of military intelligence, and military geophysics.)