

基于梯度结构的星载红外图像和全色图像配准方法

张翰墨^{1,2,3}, 尤红建^{1,2}

(1. 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:针对红外图像与全色图像的不同成像特性,提出了一种基于图像的梯度结构信息的匹配算法.首先对原始的红外和全色图像分别进行梯度计算,得到图像的梯度强度图;对梯度图进行结构相似性度量,获得图像间同名点对.然后采用 RANSAC 算法剔除误匹配的同名点.最后利用同名点对构建三角网小面元,并进行变换而得到配准图像.实验结果表明,算法可以有效地利用红外图像中地物的结构信息,匹配精度高.

关键词:红外;全色;梯度结构信息;配准

中图分类号:TP407.8 **文献标识码:**A

A gradient structure based registration method for space-borne infrared image and panchromatic image

ZHANG Han-Mo^{1,2,3}, YOU Hong-Jian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geo-spatial Information Processing and Application System Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Graduate university, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: According to different characters of infrared image and panchromatic image, a new image registration method was proposed based on the gradient structure information of the image. Firstly, the gradient of infrared image and panchromatic image were calculated. Then the structure similarity between two gradient images was measured to generate homologous points. RANSAC was used to robustly remove the wrong homologous points. Finally, after dividing image into small regions on triangle irregular network (TIN), the registered image was obtained by transforming the triangle. Experiment results show that the proposed approach is efficient and the register accuracy is high.

Key words: panchromatic image; infrared image; gradient structure; image registration

PACS: 07.05.Pj

引言

多源遥感影像在应用中遇到的问题之一就是图像匹配,其可以应用于图像配准、镶嵌、立体匹配等.目前多时相和多传感器遥感数据的庞大数量,自动化和高精度已经成为图像匹配研究的主要方向.图像配准的目的是将两幅图像在空间上进行精确的对准.由于不同传感器间成像机理的差异,导致异源遥

感图像上地物信息的灰度值表达各异.红外传感器是利用接收到的目标反射或散射红外波段电磁波,将温度差异和反射率的差异转换成灰度值.因此红外图像具有细节模糊,灰度分布集中,信噪比低,对比度低等特点^[1].而全色图像具有较高的对比度,较完善地反映了地物纹理细节信息.在应用中常常需要将同一地区的红外和全色图像进行融合和对比分析,达到对地物和目标的精确判读或解译,这就需

收稿日期:2012-03-01,修回日期:2012-04-05

基金项目:国家自然科学基金(61001176)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61001176)

作者简介 (Biography): 张翰墨(1985-),女,湖北武汉人,博士研究生,,主要研究领域为多源遥感图像处理. E-mail: zhanghanmo08@mails.ucas.ac.cn.

Received date: 2012-03-01, **revised date:** 2012-04-05

要对红外和全色图像进行配准.

目前的关于红外图像与全色图像的配准方法研究主要集中于基于特征的匹配方法,包括特征点、边缘等.张泽旭等使用全局光流场实现图像背景区域的配准,然后提取目标的特征点来匹配求得变换参数^[2].Z. Yi 等使用改进的 SIFT 算法对图像进行匹配^[3].对于红外遥感图像的低分辨率特点,在图像对上可能无法找到足够多的正确的特征点对.另一类基于图像的边缘特征的匹配方法中,Y. Kim 通过边界方向和灰度信息构建三维直方图,通过熵的一致性函数判据,寻找全局最小值,得到匹配变换参数^[4].Jorid Inglada 通过计算两幅图像的边界图像间的平均距离,通过最小化求解平均距离得到几何变换模型^[5].目前的基于边缘的匹配方法要求红外图像有较多的细节信息,并且需要对图像进行由粗到精的两个匹配步骤,而考虑到红外遥感图像的特点,计算量大且鲁棒性不足.

图像的梯度描述了地物的边界信息,红外和全色图像上的地物在梯度域上均能较好地得到显示,因此本文提出了一种基于图像梯度结构信息的匹配方法,图 1 给出了具体的实现流程.首先对大图像进行分块处理后,提取子图像的梯度信息,使用结构相似性(SSIM, structural similarity)进行匹配处理,取结构相似性系数峰值点坐标为同名点对;然后使用 RANSAC 算法对候选的同名点对进行筛选,利用正确的点对集构建三角网小面元模型,对图像进行变换.

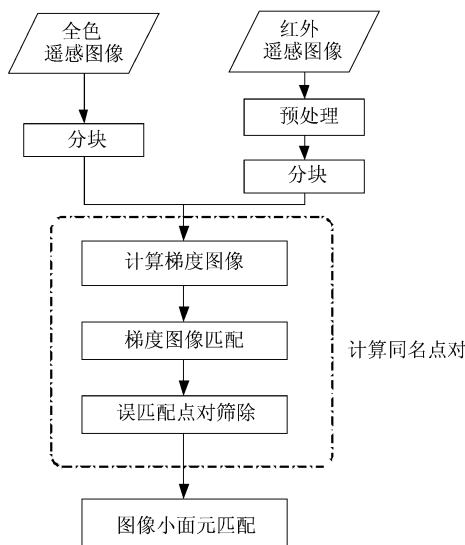


图 1 图像自动配准的流程
Fig. 1 Procedure of image registration method

1 图像的梯度特征分析

红外图像反映的是地物对红外波段辐射量的反射值,在地物的表达上与人眼直观感觉相似的全色图像不同.由于两类图像对于地物的反映信息不同,在图像上的表达也不同.全色图像反映的地物信息有较好的层次和信息,而红外图像上的地物显得则较为模糊,缺乏层次感.

在图像处理中,梯度是图像灰度的一阶导数.对于红外图像,根据相同地物的热辐射量均匀,而不同的地物间热辐射量不同的假设,不同地物 DN 值不同.梯度信息反映了不同热辐射值间地物的边界信息,较好地给出了不同地物间温度场的变化信息.尽管红外图像低对比度,梯度信息却能较丰富的反映红外图像中纹理信息.

数学上,可以用 x 方向和 y 方向一阶导数来计算,公式为:

$$f_x' = df(x, y)/dx, f_y' = df(x, y)/dy \quad (1)$$

而图像上每个像素的梯度值的近似表达为两个方向上的平方和的根,即:

$$g = \sqrt{f_x'^2 + f_y'^2} \quad (2)$$

图 2(a)、(b)为红外和全色图像提取的相同区域的图像切片.如图 2(d)所示的红外梯度图所示,图像中强、弱纹理的并不能用梯度值的大小进行很好的区分,其左上角处的纹理特征无法由强梯度值表达,图 2(g)、(h)也映证了边缘用于表达图像纹理的缺失性.相反,红外图像的梯度图中略低的梯度值所反映的纹理信息更为丰富(图 2(e)、(f)).

传统处理步骤中,为了保持较多的有效边缘信息,需要对求得的梯度图进行阈值处理或边缘连接等处理.然而,每幅图像不同的对比度使得阈值很难全局化.而图像的梯度域表达包括了所有地物的差异信息,代表了图像小面元的整体梯度信息,以此作为匹配的前提,有效的避免了提取的边缘信息不准确对匹配的正确性造成的影响问题.

2 图像梯度结构提取和匹配

首先对红外遥感图像进行均匀分块处理,通过图像的地理坐标进行粗定位,以获得在参考图像上对应的搜索图像,计算两幅对应子图像的梯度,在此基础上计算相似性系数来确定匹配的同名点的位置.为了剔除可能的的外点,采用 RANSAC 算法对同名点对集进行筛选,得到具有较高正确率的点对集.

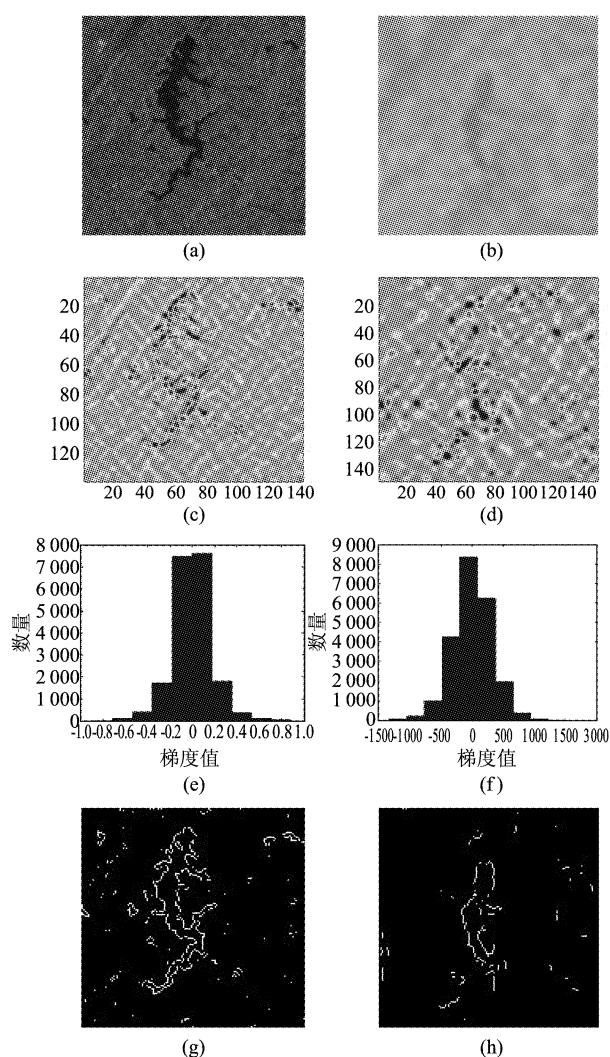


图2 图像切片对、梯度及其直方图 (a) 全色切片, (b) 红外切片, (c) 全色梯度图, (d) 红外梯度图, (e) 全色梯度直方图, (f) 红外梯度直方图, (g) 全色边缘图, (h) 红外边缘图

Fig. 2 Pair of images, gradient maps, gradient histograms, and edge maps (a) panchromatic image piece, (b) infrared image piece, (c) panchromatic gradient map, (d) infrared gradient map, (e) panchromatic gradient map histogram, (f) infrared gradient map histogram, (g) panchromatic edge map, (h) infrared edge map

2.1 红外遥感图像的预处理

红外遥感图像具有较多的低频信息,而匹配的条件是图像中纹理信息,故预处理的目的是对图像去除噪声而保留低频信息,利于在计算图像梯度图的步骤中对纹理的梯度信息表达更明显. 本文采用了高斯低通滤波器,能够较好地保留低频信息.

2.2 提取图像的梯度信息

图像梯度反映了 DN 值变化的可能方向和速率,即可以表达图像中地物信息结构的大致特征. 理论上采用一阶求导的方法计算梯度值. 但是,在实际

图像中几乎不存在理想边界,取而代之的多是阶梯边缘,并且考虑到噪声的存在,故在具体实现上,采用模板卷积的方法实现,能有效保留边缘信息且计算简便. 常用的算子包括 Sobel、Prewitt、Roberts 算子,图 3 给出了这三种算子在红外图像上的梯度图及归一化互相关匹配系数的结果.

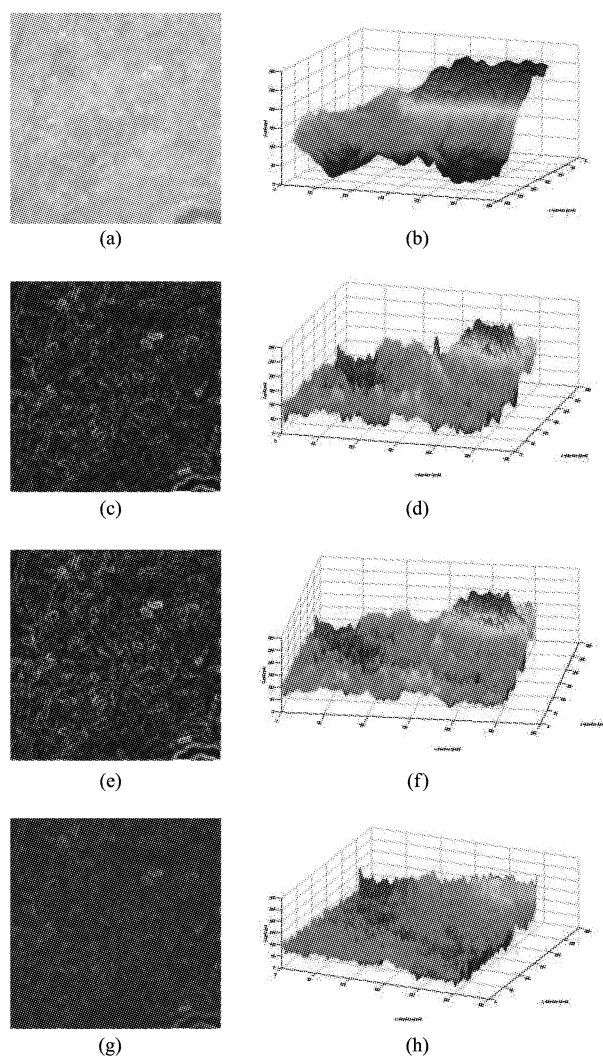


图3 红外图像及梯度算子结果图 (a) 红外图像切片, (b) 灰度匹配系数图, (c) 红外图像切片 Sobel 梯度算子结果, (d) Sobel 梯度结果匹配系数图, (e) 红外图像切片 Prewitt 梯度算子结果, (f) Prewitt 梯度结果匹配系数图, (g) 红外图像切片 Roberts 梯度算子结果, (h) Roberts 梯度结果匹配系数图

Fig. 3 Infrared image, three gradient map and coefficient maps (a) infrared image piece, (b) coefficient map matched on the basis of gray-level, (c) infrared gradient map by Sobel operator, (d) coefficient map matched on the basis of Sobel gradient map, (e) infrared gradient map by Prewitt operator, (f) coefficient map matched on the basis of Prewitt gradient map, (g) infrared gradient map by Roberts operator, (h) coefficient map matched based on Roberts gradient map

以上三种边界算子,以不同的近似方式来表达图像的灰度梯度值,梯度图表示出了不同的特征信息.从匹配效果上来看,Sobel 算子近似表达的梯度在匹配上准确性较高.

2.3 梯度结构的匹配

匹配的主要目的是通过度量梯度图的相似性来确定最佳的同名点位置,以获得同名点对.基于区域相似性的度量方法主要有归一化互相关、结构相似性、相关率和交互方差,由于结构相似性度量反映了区域内的结构信息,因此本文采用了结构相似性度量方法进行匹配.结构相似性原本是 W. Zhou 等根据人眼视觉系统(HVS)对场景中结构信息的敏感性提出一种用于图像质量评价的方法^[6].它分别从图像的亮度、对比度、和结构相似性三个方面来对图像对进行度量.本文使用了其中对结构相似性的度量方法,其具体公式表达为^[6]:

$$s(x, y) = (\sigma_{xy} + c) / (\sigma_x \sigma_y + c) \quad , \quad (3)$$

其中 x 和 y 为图像对, c 为常数,式中统计特征的计算公式分别为^[6]:

$$\sigma_x^2 = 1/(N-1) \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \quad , \quad (4)$$

$$\sigma_y^2 = 1/(N-1) \sum_{i=1}^N (y_i - \mu_y)^2 \quad , \quad (5)$$

$$\sigma_{xy} = 1/(N-1) \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \quad , \quad (6)$$

其中 μ_x 和 μ_y 为两图像均值.

图4(a)、(b)分别给出了全色和红外图像的子块,两幅图像间的位置对应关系大致如图4(c)所示.对两幅图像进行梯度信息提取,得到图4(d)(e)的梯度图.通过 SSIM 对图像梯度图计算其相似系数,其在(289, 282)位置得到峰值点,对应着图4(c)中所示红外图像在全色图像上的起始坐标.此峰值点坐标即为全色图像上对应相同红外图像区域的坐标,即得到两幅图像的同名点对.

2.4 误匹配对剔除

由于图像纹理信息分布不均匀等原因,同名点对集合可能包含误匹配点对. RANSAC 算法是随机一致性检验中较为经典常用的算法,其基本原理是假设共获得 n 对同名点,首先随机选取计算变换模型参数最小数量的点对,如二次多项式模型的最小点对数为 6 对,然后统计符合此参数模型的点对数量,重复该过程知道满足收敛条件.收敛条件为 k 此采样中至少有一次全是内点(正确的点对)的概率不小于 η_0 设 ε 为内点概率,收敛条件满足:

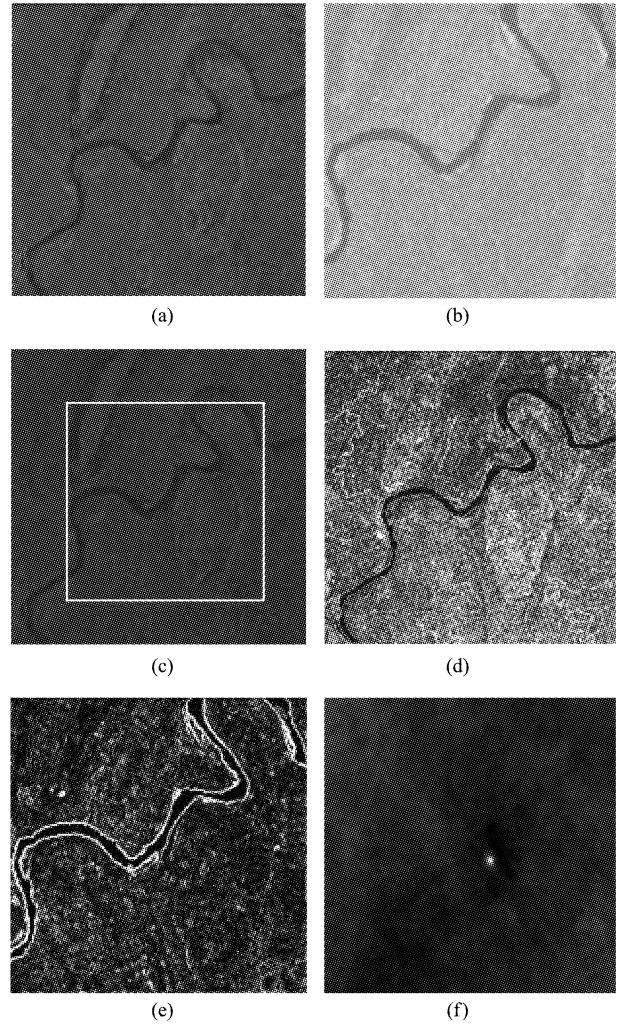


图4 图像块及匹配示意图(a)全色图像块,(b)红外图像块,(c)图像对应示意图,(d)全色梯度图,(e)红外梯度图,(f)匹配系数图

Fig. 4 Pair of images, and matched result (a) panchromatic image, (b) infrared image, (c) corresponding location display, (d) panchromatic gradient map, (e) infrared gradient map, (f) matched coefficient map

$$(1 - \varepsilon^m)^k < 1 - \eta \quad , \quad (7)$$

求解得到迭代次数为:

$$k > \ln(1 - \eta) / \ln(1 - \varepsilon^m) \quad , \quad (8)$$

其中 ε 为未知数,通常用每次迭代时的最大匹配点对数的比例代替.迭代过程中, ε 会根据当前的正确点对集合增大, k 也不断增大,直到满足式(7)时终止.此时至少有一次是正确采样的概率不小于 η , η 取值通常非常小. RANSAC 算法的计算简单,且鲁棒性高,能很好的筛选出正确的匹配点对.

2.5 基于 TIN 小面元的图像变换

以上步骤得到的同名点对为图像配准提供了控制基准,采用不规则三角形网(TIN)是构建小面元

是一种比较理想的方法. 即通过同名点构成的三角形小面元来覆盖整幅图像, 在每个三角形内部的像元点可以认为符合简单的仿射变换关系, 计算出三角形小面元内部各个像元点的对应关系, 从而达到精确配准的目的. 本文采用了狄洛尼三角网, 其特点是构建的三角网是唯一的, 能保证最近邻的点构成尽量为等边的三角形.

每三对同名点构成两个相互对应的三角形小面元, 而两者间的变换模型采用仿射变换模型进行模拟, 仿射变换的数学表达为:

$$\begin{cases} i = a_0 + a_1x + a_2y \\ j = b_0 + b_1x + b_2y \end{cases}, \quad (9)$$

其中, (i, j) 为全色图像坐标, (x, y) 为红外图像坐标.

三对同名点对 $CP_1(i_1, j_1, x_1, y_1)$ 、 $CP_2(i_2, j_2, x_2, y_2)$ 、 $CP_3(i_3, j_3, x_3, y_3)$, 代入上式有方程计算仿射变换系数, 然后在此基础上对每个小面元图像进行变换.

3 实验结果与分析

为验证本文算法, 采用 Landsat 红外与全色遥感图像进行实验. 两幅图像大小为 17500×15400 与 4400×3800 像素, 图像分辨率相差倍数为 4 倍, 故在图像进行匹配前, 首先将红外图像上采样至与全色图像同分辨率, 以消除图像分辨率差异对算法的影响. 两幅图像间实际的地理位置关系为经度方向 500 米位移, 维度方向 -400 m 的位移.

3.1 图像子块尺寸与搜索范围大小对误匹配率和计算时间的影响

图 5 给出了图像子块大小分别为 128×128 像素, 256×256 像素, 512×512 像素, 1024×1024 像素和 2048×2048 像素大小时, 误匹配率和计算时间的曲线. 此时, 在参考图像上选取的搜索范围在子块图

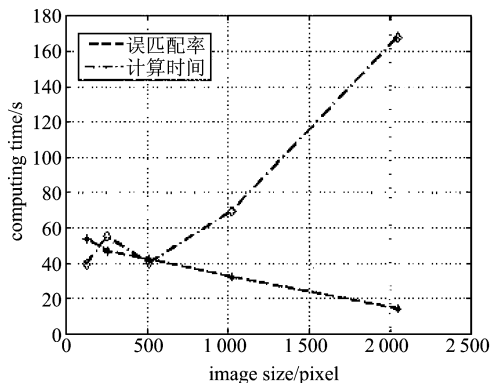


图 5 不同图像尺寸影响示意图
Fig. 5 Curves of different window size

像大小上扩展一倍, 即分别为 256×256 像素, 512×512 像素, 1024×1024 像素, 2048×2048 像素和 4096×4096 像素. 可以看出当子块大小为 2048×2048 像素时, 计算时间大幅上升, 但是相应的误匹配率下降至最小. 即子图像中所包含的地物信息越多匹配率越高. 另外在 128 像素至 512 像素间在计算时间出现的波动, 是由于子图像块数量的不同所致.

图 6 给出了搜索区域尺寸对误匹配率和计算时间的影响. 其中子图像块尺寸与图 7 中一样, 只是将搜索区域扩展尺寸减小至子图像块的一半大小. 图 6 中, 计算时间在 512 像素及以下的变化趋势与子图像块的数量减少相同. 而 1024 像素和 2048 像素的计算时间主要受到由大尺寸图像匹配影响. 此图中更直观的给出了正确匹配率与子图像块中包含的地物信息量近似正比.

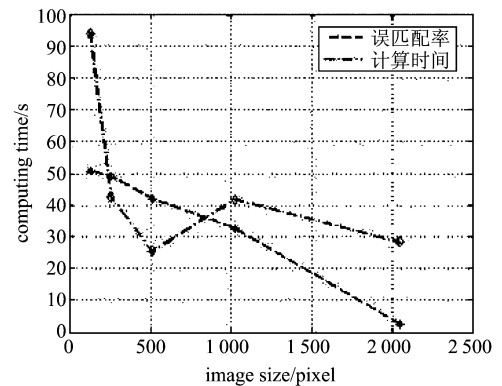


图 6 不同搜索区域尺寸影响示意图
Fig. 6 Curves of different size search window

但是由于本实验采用的图像在经纬方向相差没有超过 1000 m, 故在搜索范围扩展尺寸减半的情况下仍然保持了甚至达到了更高的正确匹配率.

3.2 匹配结果与分析

在对图像块匹配得到候选的同名点对集后, 需要采用 RANSAC 算法来对误匹配对剔除. 基于二元二次多项式对匹配点对间的坐标关系进行拟合, 算法收敛条件中设置匹配对的坐标残差值在 10 m 以内, 而全色图像分辨率为 14.25 m, 即得到的正确匹配对残差值在 1 个像素内. 本组数据共得到 153 对同名点对, 其中正确匹配点对的比例仅为 67%, 筛选前残差值为 28049.69 m; 筛选后共得到 103 对同名点对, 残差值为 0.0774 m (表 1), 保留了所有的正确点对.

采用 TIN 三角网对待匹配图像进行小面元划分. 逐一对连续且相邻的小面元区域进行图像变换.

表 1 筛选前后匹配点对数量及残差值
Table 1 Numbers and RMSE before and after RANSAC

	筛选前	筛选后
匹配点对数(对)	153	103
正确点对比例	67%	100%
匹配点对残差值(米)	28049.69	0.00774

图像变换后的图像在实际像素下通过人眼观察无误差,部分图像如图 7(c)所示,各种地物在交叉处表现自然且平滑.其中图 7(a)、(b)给出了两处细节部分,均无视觉误差.

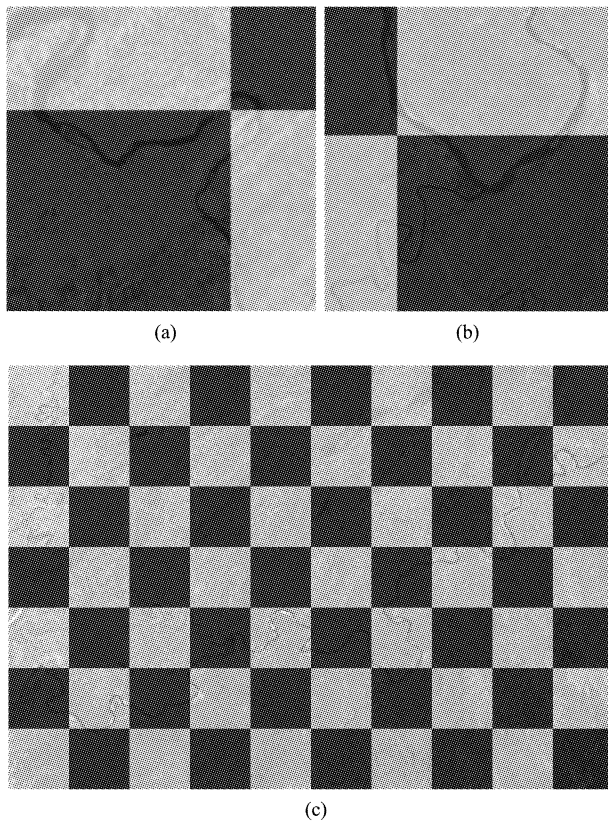


图 7 图像匹配结果交错拼合示意(a)局部拼接细节 1, (b)局部拼接细节 2, (c)图像匹配结果

Fig. 7 Composing map of image registration result (a) composing details 1, (b) composing details 2, (c) result of image registration

此外,为了定量检验精匹配的结果,本文在两幅精匹配结果上手动选择了 24 对同名点对用于分析.这些同名点均处于明显地物的交叉点或角点位置,具体坐标如表 2 所示.根据这些点对进行计算,得到的匹配精度为 0.675 像素.

4 结论

基于梯度结构的红外和全色遥感图像匹配方法,充分利用了图像在梯度域上能够较多的表达图

表 2 检查点匹配精度
Table 2 The accuracy of control points

点对号	红外图像上检查 点坐标(像素)		全色图像上检查 点坐标(像素)		像素坐标差 (像素)	
	高度方向	宽度方向	高度方向	宽度方向	高度方向	宽度方向
1	1722.43	10938.25	1722.75	10937.37	-0.32	-0.88
2	3187.58	4929.15	3187.05	4927.97	0.52	-1.18
3	13559.03	2599.00	13559.25	2598.61	-0.22	-0.39
4	9790.29	3388.50	9790.75	3387.81	-0.46	-0.69
5	9947.37	11910.25	9948.25	11909.70	-0.88	-0.55
6	12235.31	13142.50	12235.75	13142.59	-0.44	0.09
7	7067.73	12744.00	7067.75	12744.76	0.98	0.76
8	8882.96	7943.75	8881.75	7943.99	1.21	0.24
9	11474.54	4653.25	11474.50	4654.24	0.04	0.99
10	12377.16	7261.00	12377.25	7261.75	0.91	0.75
11	7816.45	4897.75	7817.00	4898.34	-0.55	0.59
12	12871.28	10573.75	12871.50	10573.07	-0.22	-0.68
13	8194.02	9390.50	8193.50	9390.94	0.52	0.44
14	8602.68	2247.80	8602.58	2248.14	0.10	0.34
15	3740.99	2416.50	3741.50	2417.42	-0.51	0.92
16	13590.30	4089.50	13590.75	4089.16	-0.45	-0.34
17	4525.32	10935.00	4526.00	10935.74	-0.68	0.74
18	4858.36	3772.73	4857.09	3772.76	1.27	0.03
19	3191.86	1221.64	3191.40	1221.06	0.46	-0.58
20	10411.31	9297.27	10411.18	9295.99	0.13	-1.28
21	7015.90	1591.55	7015.36	1590.77	0.54	-0.78
22	2512.99	8142.18	2513.00	8141.68	-0.01	-0.50
23	5262.82	8271.09	5262.98	8270.95	0.16	-0.14
24	6236.73	7145.09	6236.15	7146.52	-0.58	1.43
	标准差				0.383	
	匹配精度				0.675	

像内在结构信息.和传统的边缘匹配算法不同,本算法不是利用了图像的完整强边缘,而是采用图像的全局梯度信息,因此无需进行阈值处理,保留了相对完整的纹理特征,对于相对低对比度和低分辨率的红外图像来说,更适合匹配处理.采用结构相似性作为梯度图像的相似性度量,计算快速简单,对形变估计的高准确性和对噪声的鲁棒性适用于此匹配.通过 RANSAC 算法对图像中错误的点对进行筛选得到正确率较高的点对.同时基于三角网小面元的图像变换能有效校正局部形变.实验结果表明本文方法在红外与全色遥感图像的自动匹配处理上具有计算速度快,达到了较高的匹配精度.

REFERENCES

- [1] Li J. *Infrared image processing, analysis and fusion* [M]. Beijing: Science Press, (李俊山. 红外图像处理、分析与融合题目.北京:科技出版社), 2009, 20-25.
- [2] Zhang Z, Li J, Li D. Research of automated image registration technique for infrared images based on optical flow field analysis [J], *J. Infrared Millim. Waves*, (张泽旭, 李金宗, 李冬冬. 基于光流场分析的红外图像自动配准方法研究, *红外与毫米波学报*), 2003, 22(4): 307-312.
- [3] Kim Y S, Lee J H, Ra J B, Multi-sensor image registration based on intensity and edge orientation information

- [J]. *Pattern Recognition*, 2008, **41**(4): 3356 – 3365.
- [4] Inglada J, Adragna F, Automatic multi-sensor image registration by edge matching using genetic algorithms, IGARSS 2001: SCANNING THE PRESENT AND RESOLVING THE FUTURE[C]. 2001, VOLS 1-7: 2313 – 2315.
- [5] Yi Z, Zhiguo C, Yang X, Multi-spectral remote image reg-

istration based on SIFT[J]. *Electronics Letters*, 2008, **44**(2).

- [6] Wang Zhou, Lu Ligang, Bovik A C. Video quality assessment based on structural Distortion measurement [J]. *Signal Processing: Image communication*, 2004, **19**(1): 1 – 9.

(上接 269 页)

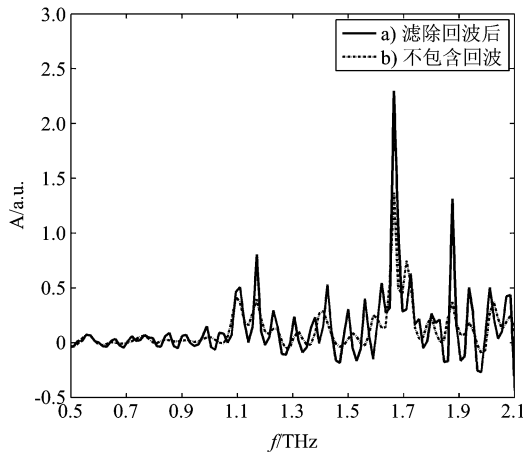


图 10 水蒸气太赫兹波段吸收谱
Fig. 10 Spectrum of water vapor

图中虚线表示不包含回波的情况,实线为去除回波后计算得到的水蒸气吸收谱. 观察水蒸气在 1.177 THz、1.67 THz 和 1.87 THz 处三个吸收峰,去回波以后,峰强度明显增加,半峰宽分别为 15 GHz、15 GHz、15 GHz,不包含回波时,半峰宽度分别为 30 GHz、30 GHz、15 GHz,频谱分辨率提高了接近一倍,验证了算法的可行性与正确性. 由于水蒸气吸收峰很窄,接近系统分辨能力的极限,故计算半峰宽时,做了近似估计.

4 结论

本文在解卷积去回波算法的基础上,进一步提出了在非线性吸收介质情况下,回波滤除的方法,通过恢复未知的回波振荡包络以及回波相对于主脉冲的时间延迟,对回波的滤除取得了很好的效果. 本算法可应用在太赫兹时域光谱系统中,去除 GaAs 天线和 ZnTe 晶体产生的回波,旨在提高太赫兹时域光

谱系统的频域分辨率,算法参数与硬件系统有关,和样品的种类无关,可用于物质检测、安全检查等相关领域的实用系统.

REFERENCES

- [1] Ferguson B, Wang S, Gray D, *et al.* Identification of biological tissue using chirped probe THz imaging[J]. *Microelectronics Journal*, 2002, **33**:1043 – 1051.
- [2] Hiromichi Hoshina, Yoshiaki Sasaki, Aya Hayashi, *et al.* Noninvasive mail inspection system with terahertz radiation [J]. *Applied Spectroscopy*, 2009, **63**(1):81 – 86.
- [3] GE Xin-Hao, LV Mo, ZHONG Hua, *et al.* Terahertz wave reflection imaging system based on backward wave oscillator and its application[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(葛新浩, 吕默, 钟华, 等. 反射式太赫兹返波振荡器成像系统及其应用. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(1):15 – 31.
- [4] Shen Y C, Lo T, Taday P F, *et al.* Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **86**, 241116:1 – 3.
- [5] Davies A G, Burnett A D, FAN Wen-Hua, *et al.* Terahertz spectroscopy of explosives and drugs [J]. *Materials today*, 2008, **11**(3):18 – 26.
- [6] Nakajima S, Hoshina H, Yamashita M, *et al.* Terahertz imaging diagnostics of cancer tissues with a chemometrics technique[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**, 041102: 1 – 3.
- [7] Mittleman D M, Gupta M, Neelamani R, *et al.* Recent advances in terahertz imaging [J]. *Applied Physics*, 1999, **68**:1085 – 1094.
- [8] Hirsch O, Alexander P, Gladden L F. Techniques for cancellation of interfering multiple reflections in terahertz time-domain measurements[J]. *Microelectronics Journal*, 2008, **39**:841 – 848.
- [9] Naftaly M, Miles R E. A method for removing etalon oscillations from THz time-domain spectra[J]. *ScienceDirect Optics Communications*, 2007, **280**:291 – 295.
- [10] Gallot G, Zhang Jiang-Quan, McGowan R W, *et al.* Measurements of the THz absorption and dispersion of ZnTe and their relevance to the electro-optic detection of THz radiation[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **23**(7): 2449 – 2452.