

亚像素级的图像配准方法

卢浩^{1,2,3} 刘团结^{1,3} 尤红建^{1,3}

(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院 北京 100049;

3. 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)

摘要:在很多应用领域,要求图像配准的精度达到亚像素级,而多数亚像素级配准方法的运算量较大。文中阐述了一种高效的基于奇异值分解(SVD)的相位相关法。在无噪声干扰的情况下,该方法的精度达到0.02像素。通过对已知平移关系的图像的配准实验,比较了其于灰度相关函数内插法在无噪声和有噪声的情况以及应用于多光谱图像配准时的配准精度。实验表明,2种方法都有较好的抗噪声性能,在受噪声干扰不严重的情况下,基于SVD的相位相关法的配准精度优于灰度相关函数内插法。

关键词:图像配准;亚像素;奇异值分解;相位相关法;灰度相关函数内插法

中图分类号: TP 751.1 **文献标识码:** A

Method of subpixel image registration

Lu Hao^{1,2,3} Liu Tuanjie^{1,3} You Hongjian^{1,3}

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Procession and Application System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Subpixel image registration is required in many applications, but most of the subpixel image registration algorithms are inefficient. In this paper, we implement an efficient phase correlation method based on singular value decomposition (SVD). The accuracy of this method is 0.02 pixels when there is no additive gaussian white noise. Then we compared the registration accuracy between this method and intensity correlation function interpolation method using images with varying noise level and multispectral images. Experiment results verify that the accuracy of phase correlation method based on SVD is better than correlation function interpolation method.

Keywords: image registration; subpixel; singular value decomposition; phase correlation; intensity correlation function interpolation

0 引言

图像配准是对取自不同时间、不同传感器或者不同视角的同一场景的两幅或多幅图像进行空间变换处理,使得各个图像在几何上能够匹配对应起来^[1-6]。对于超分辨率遥感图像生成、高精度3D重建、视觉定位、医学图像等应用中的关键问题,需要亚像素级的图像配准。现有的亚像素级图像配准算法基本可分为3类^[7]:基于插值的方法^[8],扩展的相位相关法^[9-12],解最优化问题法^[13-14]。基于插值的方法包含2类:相似性函数内插法和图像灰度内插法。其中相似性函数内插法运算量极小,方法简单有效,

而图像灰度内插法运算量较大。扩展的相位相关法包含空域解法和频域解法2类。其中频域解法运算量较小,且精度较高,而空域解法的性能则较差。解最优化问题定义一个目标函数,应用迭代法精确求解变换参数,此类方法的运算一般较大。

基于奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的相位相关法^[11]是扩展的相位相关法中的一种频域解法,该方法具有较大的位移检测范围,对图像灰度依赖小,且能保证较高的配准精度,并且有较强的抑制噪声干扰的能力。灰度相关函数内插法^[15]是基于插值的方法中的一种相似性函数内插法,该方法简单有效,具有较强的稳定

性。上述2种方法的运算量都较小,前者由于不做上采样运算,节省了运算成本。后者由于先粗定位到像素级配准位置,然后以该位置为中心只对相关函数的邻近区域作插值运算,极大地减小了运算量。

本文阐述了基于SVD的相位相关法的原理和实现步骤,通过对已知平移参数的图像的配准实验验证了该方法的精度,比较了基于SVD的相位相关法与灰度相关函数内插法在未加噪声和加入噪声的情况下以及应用于多光谱图像配准时的配准精度。

1 基于SVD的相位相关法

1.1 方法原理

用二维离散函数 $f_1(x, y)$, $f_2(x, y)$ 来表示两幅 $M \times N$ 大小的图像 I_1 和 I_2 , I_2 由 I_1 在行和列上分别平移 x_0 和 y_0 像素而成, $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$ 分别是 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的二维离散傅里叶变换。根据傅里叶变换的性质,有:

$$F_2(u, v) = F_1(u, v) \cdot e^{-j2\pi[(x_0/M)u + (y_0/N)v]} \quad (1)$$

定义相位相关矩阵 $Q(u, v)$ 为 $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$ 的归一化互功率谱:

$$Q(u, v) = \frac{F_2(u, v)F_1^*(u, v)}{|F_2(u, v)F_1^*(u, v)|} = e^{-j2\pi[(x_0/M)u + (y_0/N)v]} \quad (2)$$

传统的方法是对 $Q(u, v)$ 作傅里叶逆变换,得:

$$q(x, y) = \delta(x - x_0, y - y_0)$$

通过判定脉冲峰值的位置得到 x_0, y_0 的值,但这种方法只能得到整像素值^[16]。为了得到亚像素精度的结果,需要重采样 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$,这带来了巨大的运算负担,且配准精度受采样率的限制。 $Q(u, v)$ 的相位是一个二维锯齿函数,在 u, v 方向上周期变化,通过计算在各自方向上的周期数目能够得到平移参数^[9]。当受噪声干扰稍大时,这种方法不能准确的计算出周期数目,配准精度不能得到保证。

由于相位相关矩阵对于无噪声的纯平移模板是一个秩为1的矩阵,矩阵的奇异值分解是一种正交变换,则有:

$$Q = q q^H \quad (3)$$

$$q_x = (e^{-j(2\pi/M)x_0}, e^{-j(2\pi/M)2x_0}, e^{-j(2\pi/M)3x_0}, \dots, e^{-j(2\pi/M)Mx_0})^T,$$

$q_y = (e^{j(2\pi/N)y_0}, e^{j(2\pi/N)2y_0}, e^{j(2\pi/N)3y_0}, \dots, e^{j(2\pi/N)Ny_0})^T$ 。但考虑到噪声干扰的存在,对相位相关矩阵作奇异值分解,得:

$$Q = U \Sigma V^H \quad (4)$$

$$\text{式中: } U = (u_1, u_2, \dots, u_m) = \begin{bmatrix} u_{11} & \dots & u_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{m1} & \dots & u_{mm} \end{bmatrix}, V = (v_1, v_2, \dots, v_n) = \begin{bmatrix} v_{11} & \dots & v_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & \dots & v_{nn} \end{bmatrix}, \Sigma = \begin{bmatrix} \sum_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\sum_1 = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r), r = \text{rank}(Q).$$

$$Q = \sum_{i=1}^r u_i \sigma_i v_i^H \quad (5)$$

秩1估计也是一种过滤,它过滤的对象是奇异值,奇异值的最大分量受噪声干扰相对较小,因而达到了抑制噪声干扰的作用^[7]。用最大奇异值和相对应的奇异向量来估计相位相关矩阵 Q ,得:

$$Q \approx u_1 \sigma_1 v_1^H \quad (6)$$

$$q_x \approx u_1, q_y \approx v_1 \quad (7)$$

解缠 u_1, v_1 的相位,得 p_x, p_y 。用最小二乘法拟合 p_x, p_y 得, $p_x = k_x x + b_x, p_y = k_y y + b_y$, 则:

$$\begin{aligned} x_0 &= -\frac{k_x M}{2\pi} \\ y_0 &= \frac{k_y N}{2\pi} \end{aligned} \quad (8)$$

1.2 方法流程

如图1所示流程图,设 I, I_{ref} 分别是待配准图像和参考图像,大小为 $M \times N$, I 和 I_{ref} 间存在微小的平移。由于频谱混叠和边缘效应的影响,需要屏蔽掉 Q 中受干扰较严重的区域。以 R 为半径,屏蔽掉距离中心直流分量在此半径外的频率数据, R 选择为 $0.6N/2$ 左右的数值^[11], N 是 x, y 方向的最小采样值。也可以先对 Q 为方便处理,将 Q 截取为矩形区域,得到 Q' , 大小为 $M' \times N'$ 。最后对 Q' 做奇异值分解,得到奇异向量 u, v , 解缠 u, v 的相位,得到 P_u, P_v , 用最小二乘法拟合线性相位 P_u, P_v , 求得线性相位斜率 k_x, k_y , 按照式(8)计算得到 x_0, y_0 。

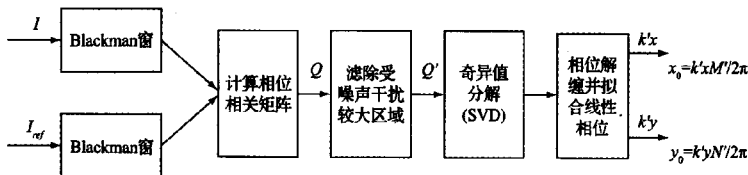


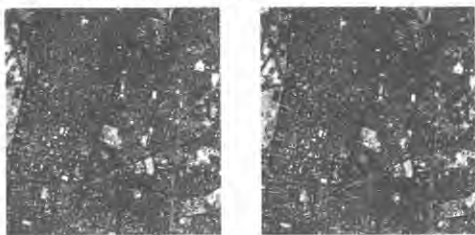
图1 基于SVD的相位相关法流程

1.3 仿真结果

通过对两幅存在整数像素平移关系的图像做降采样的方法,以得到存在亚像素平移关系的图像。图2是通过

对两幅大小为 5120×5120 , 平移关系为 $(76, 82)$ 的图像做10倍降采样得到的大小为 512×512 , 平移关系为 $(7.6, 8.2)$ 的图像, 其中图2(a)为参考图像, 图2(b)相对于图2

(a)向右平移了7.6像素,向下平移了8.2像素。



(a)参考图像

(b)待配准图像

图2 平移关系为(7.6,8.2)的图像

按照1.2所述流程,计算图2(a)和图2(b)的相位相关矩阵 Q ,滤除受干扰较严重的边缘区域,保留以直流分量为中心的大小为 300×300 的正方形区域 Q , Q 的二维相位如图3所示。通过对 Q 作奇异值分解,得到奇异向量 u, v ,求的 u, v 的相位 P_u, P_v 并解缠,解缠后的相位 P_x, P_y 如图4所示。计算得到图4中 P_x, P_y 的斜率 $k_x = -0.1005, k_y = 0.0933$,由式(8)得 $x_0 = 8.1874, y_0 = 7.6058$ 。

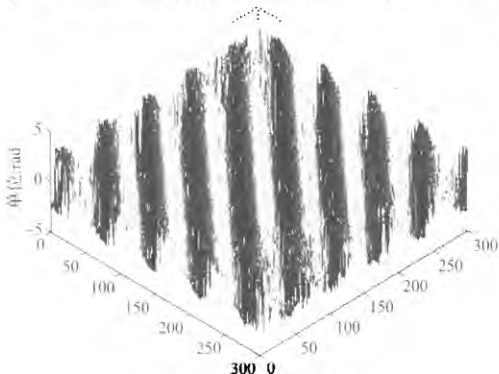


图3 Q 的二维相位图

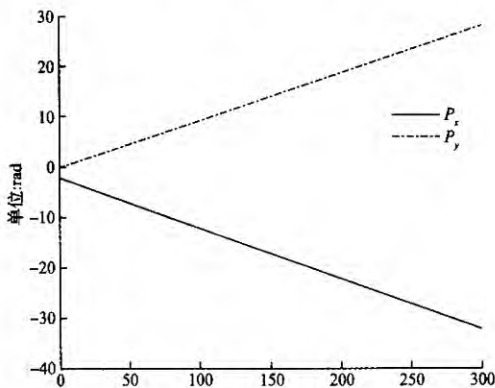


图4 解缠后相位

2 配准精度比较实验

灰度相关函数内插法,首先确定像素级的配准位置,然后以该位置为中心对相关函数的邻近区域作上采样,由

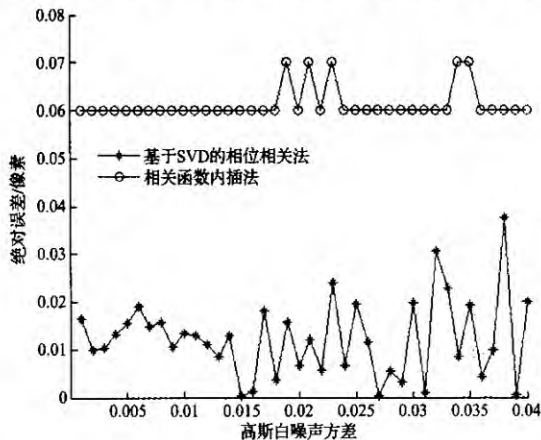
此达到亚像素级的配准精度。该方法的配准精度受采样率的限制,但由于插值区域较小,不会带来太大的运算量。为了比较基于SVD的相位相关法与灰度相关函数内插法的配准精度,依照1.2中的方法,获得一组已知平移关系(如表1所示)的图像。以保证0.01像素的精度要求,在此将灰度相关函数内插法的采样率设为100。分别用灰度相关函数内插法和基于SVD的相位相关法计算平移参数,计算结果如表1所示。

表1 无噪声干扰时配准精度比较

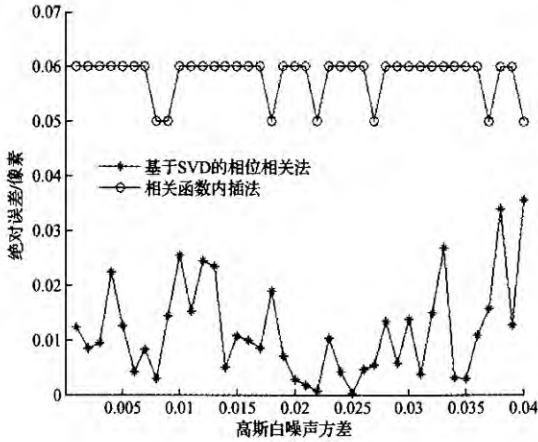
平移关系	灰度相关函数 内插法	基于SVD的 相位相关法
(5.7,0.0)	(5.760 0,0.000 0)	(5.707 8,0.000 3)
(3.8,3.2)	(3.860 0,3.140 0)	(3.812 3,3.188 2)
(5.5,3.7)	(5.480 0,3.760 0)	(5.493 8,3.711 4)
(0.0,4.2)	(0.010 0,4.140 0)	(0.004 5,4.186 8)
(4.5,5.5)	(4.500 0,5.500 0)	(5.497 6,4.499 3)
(8.2,7.6)	(8.140 0,7.640 0)	(8.187 4,7.605 8)

为了比较2种方法的抗噪声能力,先将实验用的图像灰度值归一化,再向待配准图像中加入均值为0,方差为0.001~0.04的高斯白噪声,然后分别用基于SVD的相位相关法和灰度相关函数内插法计算平移参数,得到2种方法在不同噪声强度下的配准绝对误差。选择与参考图像存在(3.8,3.2)平移关系的待配准图像,2种方法在不同噪声干扰下的配准绝对误差分别如图5(a)和图5(b)所示。图5(a)是2种方法在不同噪声强度下的行配准误差,图5(b)是2种方法在不同噪声强度下的列配准误差,横坐标表示高斯白噪声的方差,纵坐标表示配准误差的绝对值。

为了进一步比较2种方法的性能,选取同一场景的多光谱图像中的蓝、绿、红、近红外4个波段的图像如图6所示,图像大小为 256×256 。显然,不同波段的图像间存在明显的灰度差异,其中近红外波段同其他波段的差异较大,



(a)行配准绝对误差



(b) 列配准绝对误差
图5 不同强度噪声下配准精度比较

在植被区域近红外图像较亮,而其他波段图像较暗。将近红外波段的图像作亚像素级的平移,得到与其他波段的平移关系分别为(5,2,4,8)和(10,4,5,8)的两幅近红外图像。分别用基于SVD的相位相关法和灰度相关函数内插法计算平移参数,结果如表2所示。表2中灰度相关函数内插法在最后一项实验中所得结果误差较大,没能准确的得到相关函数的峰值点位置。

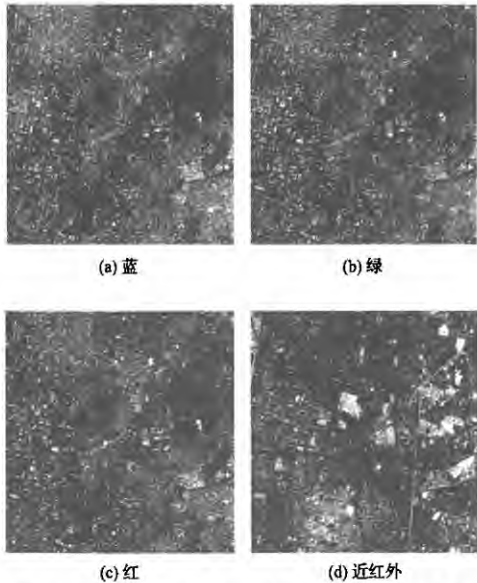


图6 同一场景蓝、绿、红、近红外4个波段的图像

表2 多光谱图像配准精度比较		
波段	灰度相关函数 内插法	基于SVD的 相位相关法
红(5.2,4.8)	(5.110 0,4.900 0)	(5.171 9,4.836 6)
绿(5.2,4.8)	(5.130 0,4.900 0)	(5.216 0,4.853 8)
蓝(5.2,4.8)	(5.150 0,4.910 0)	(5.212 0,4.878 3)

续表

波段	灰度相关函数 内插法	基于SVD的 相位相关法
红(3.4,2.6)	(3.320 0,2.680 0)	(3.381 6,2.622 1)
绿(3.4,2.6)	(3.340 0,2.690 0)	(3.427 8,2.646 0)
蓝(3.4,2.6)	(-62.350 0,19.000 0)*	(3.560 4,2.612 9)

注: * 表示结果错误

3 实验结果分析

由表1所示的6组实验结果可知,在未加入噪声的情况下,基于SVD的相位相关法比灰度相关函数内插法的配准精度高,配准绝对误差小于0.02像素。对于灰度相关函数内插法,虽然设定了100倍的采样率,但实际配准精度没有达到理论值0.01像素。在不受加性高斯白噪声干扰的情况下,基于SVD的相位相关法比灰度相关函数内插法的精度略高。

如图5所示,是在受不同高斯白噪声干扰下2种方法的配准误差的绝对值。由图5可知,当高斯白噪声的方差为0.04时,2种方法的配准误差依旧很低,而此时图像已被噪声严重干扰如图7(b)所示。图7(a)是原图像,图7(b)是受方差为0.04的高斯白噪声干扰的图像,图像质量下降较为严重,而此时2种方法的配准精度都优于0.1像素。可见,基于SVD的相位相关法和灰度相关函数内插法都有较强的抗噪声能力。前者由于SVD有抑制噪声的作用,故能够保证较高的配准精度。对于后者,由于相关函数的峰值较大,噪声没有影响到相关函数峰值点的位置,所以该方法也有较强的抑制噪声的能力。通过对2种方法在相同噪声干扰下配准精度的比较可知,基于SVD的相位相关法的配准精度高于灰度相关函数内插法。

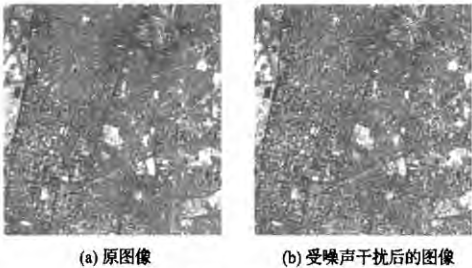


图7 受噪声干扰前后的图像对比

由表2可知,对于多光谱图像,由于各波段图像的灰度差异较大,致使基于SVD的相位相关法和灰度相关函数内插法的配准精度都有所下降,但基于SVD的相位相关法的配准精度仍比灰度相关函数内插法高。基于SVD的相位相关法对灰度不敏感,当待配准图像和参考图像的灰度差异较大时,仍能较准确的估算出平移参数。而灰度相关函数内插法,当待配准图像和参考图像的灰度差异较

大时,其灰度相关函数的峰值可能受到干扰,致使不能正确的确定峰值点的位置,进而影响了配准精度。为了先得到准确的像素级配准位置,先对图像做2倍上采样,然后再求灰度相关函数,如图8所示,是平移关系为(3.4,2.6)的近红外波段图像与蓝波段图像的灰度相关函数。显然图8中标注的峰值点被干扰,致使得到了表2中所示的错误结果。

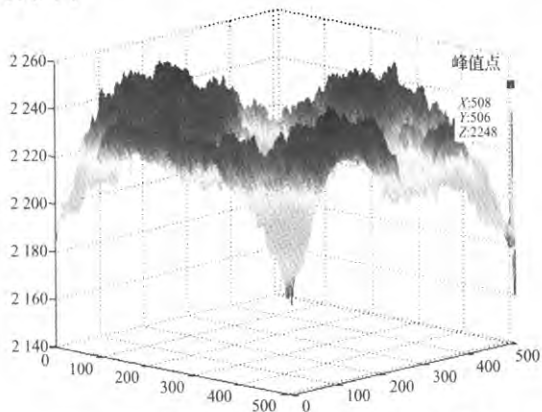


图8 近红外图像与蓝波段图像的灰度相关函数

4 结束语

在不受噪声干扰的情况下,基于SVD的相位相关法能够得到精度优于0.02像素的配准结果,有较强的抑制噪声的能力。在受高斯白噪声干扰较小的情况下,基于SVD的相位相关法和灰度相关函数内插法都能保证优于0.1像素的配准精度,且前者的配准精度优于后者。对于不同波段的多光谱图像,由于存在明显的灰度差异,算法的配准精度有所下降,相比之下基于SVD的相位相关法的配准误差小于灰度相关函数内插法。

参考文献

- [1] BROWN L G. A survey of image registration techniques[J]. ACM Comput. Surv, 1992, 24(4): 325-376.
- [2] ZITOVA B, FLUSSER J. Image registration methods: a survey[J]. Image and vision computing, 2003, 21(11): 977-1000.
- [3] 黄汉川,王培刚. 基于改进频域配准算法的图像超分辨率重建[J]. 电子测量技术, 2010, 33(5): 58-61.
- [4] 申林,杨进华,赵群,等. 基于图像匹配的长焦透镜焦距测量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(11): 1043-1047.
- [5] 杨欣,费树岷,周大可. 基于MAP的自适应图像配准及超分辨率重建[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(8): 1771-1775.

- [6] 朱智超,闫钧华,徐诚. 基于亚像素红外与可见光配准方法[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(9): 25-29.
- [7] 黎俊,彭启民,范植华. 亚像素级图像配准算法研究[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(11): 2070-2075.
- [8] TIAN Q, HUHNS M N. Algorithms for subpixel registration[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1986, 35(2): 220-233.
- [9] BALCI M, FOROOSH H. Subpixel estimation of shifts directly in the Fourier domain[J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 2006, 15(7): 1965-1972.
- [10] FOROOSH H, ZERUBIA J B, BERTHOD M. Extension of phase correlation to subpixel registration[J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 2002, 11(3): 188-200.
- [11] Hoge W S. A subspace identification extension to the phase correlation method[J]. Medical Imaging, IEEE Transactions on, 2003, 22(2): 277-280.
- [12] STONE H S, ORCHARD M T, CHANG E C, et al. A fast direct Fourier-based algorithm for subpixel registration of images[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2001, 39(10): 2235-2243.
- [13] KERN J P, PATTICHIS M S. Robust multispectral image registration using mutual-information models[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2007, 45(5): 1494-1505.
- [14] 赵歆波,邹晓春,张定华,等. 一种基于梯度下降的图像配准方法[J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(5): 642-645.
- [15] MANUEL G S, SAMUEL T T, JAMES R F. Efficient subpixel image registration algorithms[J]. Opt. Lett., 2008, 33(2): 156-158.
- [16] REDDY B S, CHATTERJI B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration[J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 1996, 5(8): 1266-1271.

作者简介

卢浩, 1986年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为多光谱遥感图像波段配准研究。

E-mail: luhao86_07@163.com

刘团结, 1969年出生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为光学遥感图像处理研究。

E-mail: tuanjieliu@sina.com