

文章编号: 1007-4619(2000)增-0111-06

# 机载多角度热红外图像的相关分析与自动配准

柳钦火<sup>1,3</sup>, 顾行法<sup>2</sup>, 田国良<sup>1</sup>, 李小文<sup>3</sup>, F. Jacob<sup>2</sup>,

J. F. Hanocq<sup>2</sup>, M. Friedl<sup>3</sup>, A. H. Strahler<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 遥感信息科学开放研究实验室, 北京 100101; 2. INRA-Unite De Bioclimatologie, Avignon, France;  
3. Center for Remote Sensing, Boston University, Boston, MA 02215, USA)

**摘要:** 为了从一系列多角度遥感图像中提取同一目标的方向信息, 首先需要进行图像的几何配准与校正。在进行热红外多角度遥感图像相关分析的基础上, 提出一个适合于机载多角热红外图像自动配准与几何校正的方案, 结果表明自动配准精度优于1个像元, 满足热红外多角度信息提取的需要。

**关键词:** 多角度热红外图像; 相关分析; 自动配准

**中图分类号:** TP722.5      **文献标识码:** A

## 1 引言

地表的机载热红外多角度遥感图像, 对地表热红外辐射方向特性的研究具有重要的意义, 为了从一系列多角度遥感图像中提取同一目标的方向信息, 首先需要进行图像的几何配准与校正。图像配准与校正的过程实际上就是要确定不同图像上对应的同名点坐标。在图像上通过人机交互方式选择足够的同名点(控制点)是几何校正最常用的方法。然而, 人工选择控制点是一项费时费力的工作, 尤其对于多角度图像序列来说, 要对每一幅图像都通过人机交互方式来选择控制点是不可行的, 有必要采用自动配准算法来实现多角度热红外图像之间的配准。现行自动配准算法主要包括两大类: 基于图像亮度和基于图像特征匹配的算法。

基于特征匹配的算法最早由 Stockman 等人提出用于具有旋转变形的图像校正<sup>[1]</sup>。这种算法首先要提取诸如点、线或多边形等图像特征要素, 然后匹配同类特征, 得到每一组特征匹配对之间的变换参数。最佳匹配对之间的变换参数便可作为图像几

何校正的变换参数<sup>[2]</sup>。

这种算法的技术难点在于图像特征提取和图像特征匹配。对于多角度热红外图像而言, 由于地表温度受地表能量平衡过程及大气湍流的影响, 加上水平热交换, 图像特征如田块边界, 角点等往往变得模糊而不易识别和提取。

基于图像亮度的匹准算法往往选用一个适当的窗口作为匹准模板, 然后在另一幅图像上搜索该模板的最佳对应位置。两个图像达到最大相关往往对应着模板的最佳匹配, 最大相关搜索效果好但一般计算时间长。因此关键技术是如何确定窗口的大小以保证窗口足够大以包含有足够的用于图像匹配信息, 而又必须足够小以避免图像变形的影响, 另一方面是如何减小自动匹配算法所需要的搜索时间<sup>[3,4]</sup>。

本文进行了航空热红外多角度遥感图像的相关性分析, 结合多角度热红外图像几何形变的特点, 设计了一个分步的适合于机载多角热红外图像的自动配准与几何校正方案, 结果表明自动配准与几何校正的精度可达到1个像元, 能满足热红外多

收稿日期: 1999-12-15; 修改日期: 2000-08-10

基金项目: 国家“九五”攀登预选项目(95-预-38), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077900), 国家863项目308-14-03(8), 美国NASA项目NAG5-7217资助。

作者简介: 柳钦火(1968—), 男, 1997年7月毕业于北京大学, 获博士学位。现任中国科学院遥感信息科学开放研究实验室副研究员, 主要从事红外遥感、多角度遥感信息机理研究。

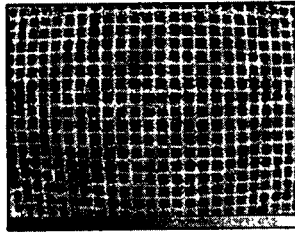
角度信息提取的需要。

## 2 机载热红外多角度图像的特征及几何配准总体方案

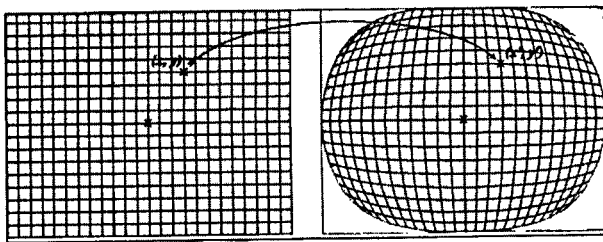
我们研究的机载热红外多角度遥感图像,是通过把一台装备 80° 广角镜头的红外热像仪 (INFRAMTRICS 760) 安装在小型飞机上连续飞行获取的 (图 1)。热像仪近似中心投影方式成像,我们采用 3 次多项式进行图像重采样以校正像元的几何畸变,校正后的图像为正射投影。

$$\begin{cases} x = a_1x^3 + a_2y^3 + a_3x^2y' + a_4xy'^2 + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7xy' + a_8x' + a_9y' + a_{10} \\ y = b_1x^3 + b_2y^3 + b_3x^2y' + b_4xy'^2 + b_5x^2 + b_6y^2 + b_7xy' + b_8x' + b_9y' + b_{10} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $x, y$  为校正后没有变形的图像坐标,  $x', y'$  为校正以前畸变的图像坐标。



a. 像元形变示意图



b. 图像几何校正原理示意图

图 1 红外热像仪成像的几何形变与校正示意图

注:  $(x', y')$  为变形图像坐标;  $(x, y)$  为校正后图像坐标

Fig. 1 Geometric deformation and correction of thermal camera Image

如图 2 所示为获取多角度热红外图像示意图。红外热像仪每秒钟可获取 25 帧  $230 \times 360$  的图像,飞机的飞行速度  $V$  为  $50\text{m/s}$ , 飞机航高  $H$  分别为  $3000\text{m}$ 、 $1500\text{m}$  和  $1200\text{m}$ 。

我们可以计算飞行速度为  $50\text{m/s}$ , 对应不同航高、不同采样频率时图像的重叠率,列表如表 1 所示。对应最高采样频率  $25\text{帧/s}$  时,相邻图像的重叠率大于  $99\%$ , 相邻图像的偏移量小于半个像元;当采样频率为  $1\text{帧/s}$  时,相邻图像的重叠率可达  $95\%$  以上,相邻两帧图像之间的位移只有几个像元的距离。

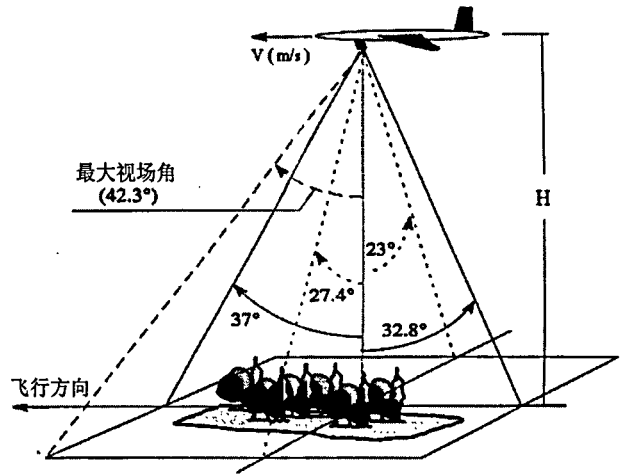


图 2 机载红外热像仪多角度图像获取示意图

Fig.2 Airborne thermal camera to acquire multi-angular imagery

表 1 图像分辨率与重叠率 (飞行速度  $50\text{m/s}$ )

Table 1 Image resolution and overlap ratio (speed at  $50\text{m/s}$ )

		航高	3000m	1500m	1200m
横向像元大小 / m			12	6	5
航向像元大小 / m			12	6	5
采样频率为 25 帧/秒	航向图像重叠率 / %		99.95	99.90	99.82
	相邻图像偏移量 / m		2	2	2
	相邻图像偏移像元数 / 个		1/6	1/3	2/5
	相邻图像观测角最大差值 / (°)		0.04	0.08	0.10
采样频率为 1 帧/秒	航向图像重叠率 / %		98.23	96.46	95.58
	相邻图像偏移量 / m		50	50	50
	相邻图像偏移像元数 / 个		4	8	10
	相邻图像观测角最大差值 / (°)		0.95	1.91	2.39

如果我们选用  $1\text{帧/s}$  的频率数字化多角度热红外图像,覆盖同一地面目标有  $36$  幅以上的影像,地面同一点在相邻图像上的观测角最大差值对应  $3000\text{m}$ 、 $1500\text{m}$  和  $1200\text{m}$  航高分别为  $0.95^\circ$ 、 $1.91^\circ$  和  $2.39^\circ$  可以满足获取地表多角度热红外信息的要求。相邻两幅图像获取的时间差为  $1\text{s}$ , 地表温度变化一般不大 (大气湍流影响例外), 如果飞机与传感器的姿态参数也变化不大, 那么相邻两幅图像的亮度温度图像应该是高度相关的。据此, 我们可以归纳机载多角度热红外遥感图像的特征如下: (1) 图像重叠率高, 需要处理的图像数量巨大; (2) 图像边缘因成像角度大而变形大; (3) 相同的像元因观测角度的不同而方向亮温不同, 在不同的图像上

具有不同的亮度值；(4) 图像的边缘、角点等特征因热交换而变得不稳定；(5) 图像采用面阵方式成像，因此图像内部的相对几何形变关系稳定；(6) 相邻图像具有很高的相关性。

根据热红外多角度图像的这些特点，我们利用相邻图像的高度相关特性，采用逐步改正图像之间的配准参数来进行图像的自动配准与几何校正（图3）。

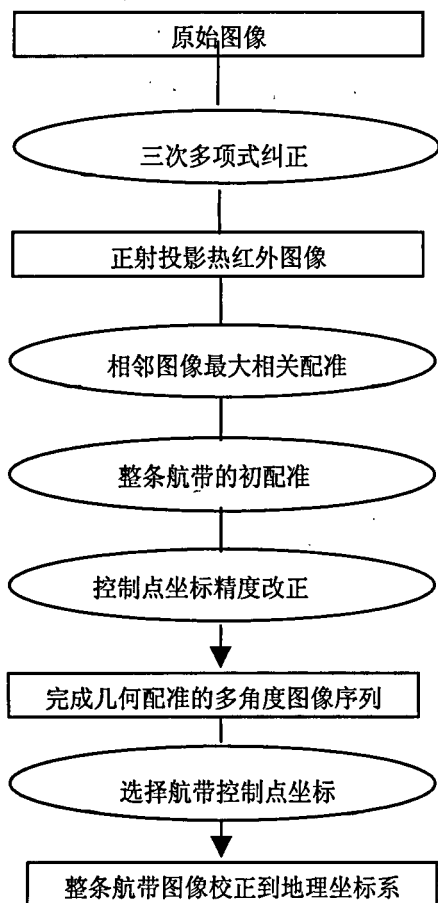


图3 机载热红外多角度图像的几何配准与校正流程图

Fig. 3 Geometric merging and registering flow chart of airborne thermal multi-angular imageries

### 3 机载热红外多角度图像的自动配准与几何校正

#### 3.1 相邻图像的自动配准

由于获取相邻图像时飞机与传感器的姿态参数变化不大，我们只考虑相邻图像之间的平移与旋转变形，用一次多项式就能满足相邻图像配准的要求。而飞机在获取图像时一般都沿航向直线飞行，旋转变形一般也是很小的，因此我们可以把相邻图像匹配的转换方程简化成以下形式：

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Dx & 1 & \theta \\ Dy & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ X_2 \\ Y_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中  $(X_1, Y_1)$ 、 $(X_2, Y_2)$  分别为第 1 幅图像及第 2 幅图像的坐标。Dx 和 Dy 为两幅图像之间的偏移量； $\theta$  为两幅图像之间的旋转角。我们定义两幅图像的相关系数如下：

$$C = \frac{\sum[(Tb_{1i} - \bar{T}b_1)(Tb_{2i} - \bar{T}b_2)]}{\sqrt{\sum(Tb_{1i} - \bar{T}b_1)^2 \sum(Tb_{2i} - \bar{T}b_2)^2}} \quad (3)$$

其中  $Tb_1$  和  $Tb_2$  分别为同名点在两幅图像上的亮度温度。给定一个 Dx、Dy 步长为 1， $\theta$  步长为 0.005 弧度的搜索空间，搜索得到最大相关系数，此时所对应的参数 Dx、Dy 和  $\theta$  即为两图像配准参数。我们分析了相关系数与 Dx、Dy 和  $\theta$  之间的关系，结果表明旋转偏移量一般都小于 0.5 个像元所对应的旋转角，因而对于相邻图像来说，可以忽略旋转变形。

#### 3.2 整条航带的粗配准

在获得相邻图像两两配准以后，由于相邻图像的旋转变形可以忽略，我们可以根据两两之间的偏移量计算整条航带的配准参数，如公式（4）所示。

$$\begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=M}^{N-1} Dx_i & 1 & 0 \\ \sum_{i=M}^{N-1} Dy_i & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ X_N \\ Y_N \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中  $(X_M, Y_M)$ 、 $(X_N, Y_N)$  分别为第 M 和 N 幅图像坐标， $Dx_i$ 、 $Dy_i$  分别为第 i 幅图像与紧邻下一幅图像的横向和纵向偏移量。

然而非相邻图像之间的匹配会由于误差的累积而超出精度要求。按照误差传播定律，如每两相邻图像的配准误差为 m，则间隔为 n 幅图像匹配的误差为  $\sqrt{n \cdot m^2}$ ，n 越大，则误差越大。实际上非相邻图像之间的形变已不能仅用一次多项式来描述，必须进行进一步的精度改进。

#### 3.3 图像匹配控制点精度的自动改正

为了提高非相邻图像之间配准精度，我们在一条航带中选出一组覆盖研究试验区的图像作为整条航带图像匹配的控制图像。选择的原则是先选一幅试验区在图像中心可作为整条航带图像匹配的

基准图像；再以此图像为基准，往航带的两头间隔一定距离各选择一组控制图像，要求它们之间的重迭率不小于 50%。再把整条航带图像与基准图像进行匹准。配准采用二次多项式进行图像坐标的转换，控制点的坐标以相邻图像自动匹配的结果按公式 (4) 推算为基础，再用局部窗口最大相关自动匹配方法进行精度改进，具体过程如下：

(1) 把基准图像分成  $6 \times 6$  的子块，每块的中心作为控制点；

(2) 对应同名点的坐标可根据相邻图像自动匹配的结果用公式 (4) 计算得到，忽略相邻图像之间的旋转变形，对应同名点的坐标等于基准图像坐标加上从基准图像到匹准图像之间的所有相邻图像偏移量之和。

(3) 对每一块区域，选择围绕中心的一个子窗口作为模板，搜索子窗口最大相关匹配的坐标偏移量，以改正控制点的坐标。为了保证自动匹配的精度，要根据图像的分辨率和图像的结构调整窗口的大小，同时，设定一个质量控制域值，如果搜索得到的最大相关系数小于特定域值，则舍去该组控制点对。

(4) 得到改正后的控制点坐标对，就可以用最小二乘法回归得到图像配准的二次多项式坐标变换方程。

(5) 把整条航带的图像坐标都变换到基准图像坐标系统中，即完成了整条航带的自动匹配。

### 3.4 图像到地理坐标系的几何较正

为了实现不同航带之间的匹准，以提取和分析地标的方向亮温信息，我们再对已实现了整条航带匹配的所有图像进行图像到地图的几何校正，统一变换到地理坐标系中去。红外热像仪近似中心投影方式成像，可采用通用几何校正算法，用人工交互方式选择控制点，以实现图像到地图的几何校正。我们用一张已校正到地理空间坐标的 POLDER 图像做为标准图像。几何校正所用的重采样像元大小选用  $10\text{m} \times 10\text{m}$ 。要求图像几何校正的精度满足小于 0.5 个像元的要求，对于航带边缘的少数图像因边界模糊，控制点选择困难其几何校正的精度大于 1 个像元。我们舍弃精度差于 1 个像元的图像，以保证提取的多角度信息的可靠性。

## 4 结果讨论与分析

我们用 1997 年 5 月 22 日第 2 条航带热红外遥

感图像做实验，飞机航高 3000m。结果分析如下：

### 4.1 相邻图像自动相关配准结果

整条航带共有 113 幅图像，相邻图像相关配准结果如表 2。

表 2 相邻图像自动配准结果

Table 2 Automatic merging result of neighboring images

航向偏移量 $D_x$		纵向偏移量 $D_y$		旋转角 $\theta$		最大相关系数	
平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
5.6	0.72	0.1	1.47	0	0	0.92	0.007

从表 2 可以看出，相邻图像的相关关系较好，而且标准偏差很小，稳定性好，这为图像的自动配准提供了保障。自动配准的结果表明相邻图像之间的偏差航向为 5.6 个像元，略大于理论计算值 4 个像元，这是因为飞机的航高和飞行速度与理论略有偏差造成的。相邻图像之间的偏移量  $D_x$ ,  $D_y$  的标准差较小，这有利于我们减小搜索空间，减少搜索时间，提高自动配准速度，一般选取正负 5 倍标准差作为搜索空间。

图 4 所示为 30 至 50 幅图像与第 40 幅图像的最大相关系数曲线。非相邻图像配准的最大相关系数随着图像间隔的增大而减小，这说明非相邻图像之间因图像变形，方向性亮度温度差异等原因而使得相关性降低。当图像间隔大于 10 以后，最大相关系数小于 0.8，图像之间的变形较大，有必要进行进一步的基于局部窗口最大相关方法来改进图像之间的配准精度。

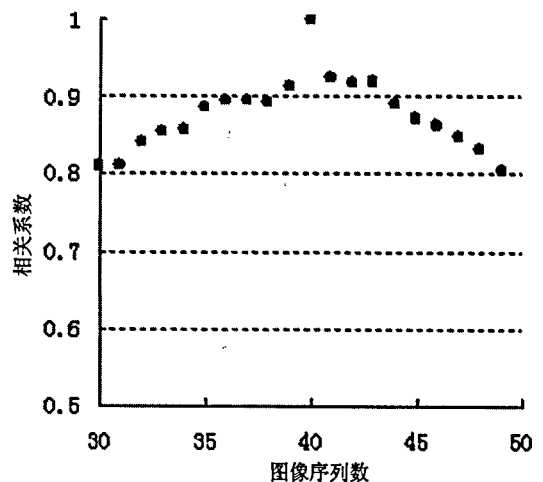


图 4 与第 40 幅图像自动配准最大相关系数分布图

Fig. 4 Distribution of maximum correlation coefficients of automatic matching

### 4.2 整条航带配准的结果

图 5 为整条航带图像相关配准最大相关系数分布图，图 6 为整条航带图像自动配准误差分布，图 7 为图像配准精度检验示意图，我们把第 20, 40 和 60 幅图像自动配准后分别赋以蓝、红、绿三色进行合成。

结果表明整条航带校正的精度优于 1 个像元，这样我们只要进行一次人机交互选择几何校正的地面控制点，就可以完成整条航带的几何校正，这种方法实用可靠，是热红外多角度图像几何校正新的实用方法。

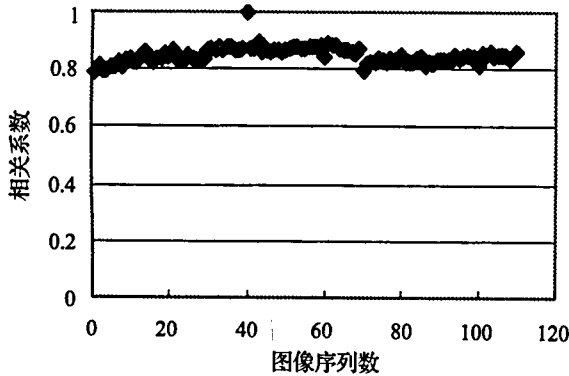


图 5 整条航带图像相关配准最大相关系数分布图  
Fig.5 Maximum correlation coefficient distribution

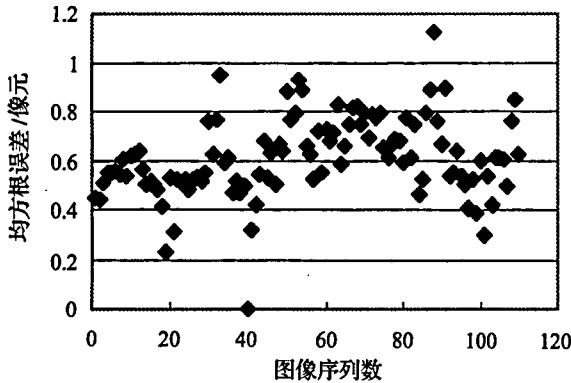


图 6 整条航带图像自动配准误差分布  
Fig. 6 Geometric registration error distribution

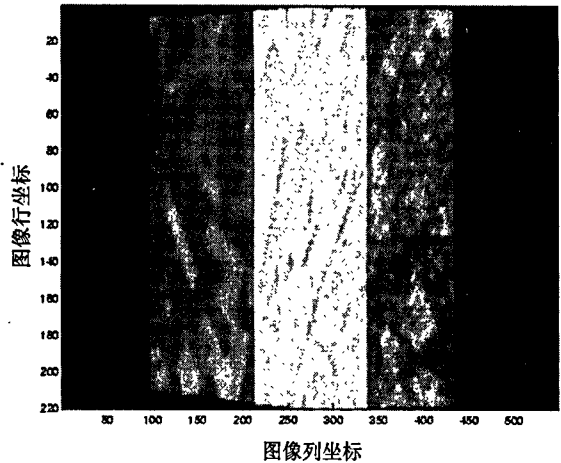


图 7 图像配准精度检验  
(1997 年 5 月 22 日第 20、40 和 60 幅图像自动配准  
后分别以蓝红绿三色合成)

Fig. 7 Composed by matched images

### 参 考 文 献 (References)

- [1] G. Stokman, S. Kopstein, S. Benett. Matching images to models for registration and objet detection via clustering[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 1982, PAMI-4 (3): 229—241.
- [2] Goshtasby A. A region-basied Approach to Dital Image Registration with Subpixel Accuracy[J]. *IEEE Tans. On Geoscience and Remote Sensing*, 1986, 24(3): 390—399.
- [3] Goshtasby A. Registration of imgaes with Geometric Distortioins[J]. *IEEE Tans. On Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(1):60—64.
- [4] Zhu Chongguang, Guo Jun, Yu Fangfang. Procedures for Registering POLDER Airborne Simulated Multiangular Images [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(Suppl.):200—202. [朱重光, 郭军, 虞芳芳. 机载模拟 POLDER 多角度图像配准. 遥感学报, 1997, 第 1 卷增刊: 200—202.]

## Correlation Analyses and Automatic Merging of Airborne Multi-angular Thermal Infrared Imagery

LIU Qin-huo<sup>1,3</sup>, GU Xing-fa<sup>2</sup>, TIAN Guo-liang<sup>1</sup>, , LI Xiao-wen<sup>3</sup>,  
F. Jacob<sup>2</sup>, J. F. Hanocq<sup>2</sup>, M. Friedl<sup>3</sup>, A. H. Strahler<sup>3</sup>

( 1. Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;

2. INRA-Unite De Bioclimatologie, Avignon, France;

3. Center for Remote Sensing, Boston University, Boston, MA 02215, USA )

**Abstract:** Thermal video camera equipped with wide-angle FOV lens has been used to acquire multi-angular thermal imagery. In order to extract the directional information for individual pixels at different view angles, image merging is needed to co-register multi-view angle imagery. This paper describes an automated image merging procedure to accomplish this task. After analyzing the relationship between TIR image's correlation coefficients, spatial resolution, image texture and image overlap ratios, a multi-step automatic merging algorithm procedure is described. The method is tested using multi-angular airborne thermal infrared imagery for an experimental site characterized by agricultural land use. Results from these tests show that the accuracy is better than one pixel.

**Key words:** image correlation; automatic merging; thermal infrared imagery