

结合图像信息熵和特征点的图像配准方法

吴泽鹏^{1,2}, 郭玲玲^{1,2}, 朱明超¹, 贾宏光¹, 宣明¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在分析当前主要的图像配准技术之后, 针对图像特征点的分布和同名点的匹配问题, 提出了结合图像信息熵和特征点的图像配准方法。首先对图像进行一定程度的分块, 根据信息论的方法, 计算每一块的信息熵, 信息熵的大小基本反映了各个模块的纹理变换情况。然后根据各个模块的信息熵大小, 进行图像的粗匹配。之后在各个模块提取出一定数目的特征点, 信息熵大, 纹理信息丰富, 选取的特征点就相应较多, 反之则纹理信息变化不大, 选取的特征点数目较少。最后根据这些具有代表性的同名点进行精确匹配。为验证该方法的有效性, 对两幅图像进行传统方法和改进的图像配准方法的比较。

关键词: 图像配准; 信息熵; 特征点; 同名点

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2846-07

Improved image registration using feature points combined with image entropy

Wu Zepeng^{1,2}, Guo Lingling^{1,2}, Zhu Mingchao¹, Jia Hongguang¹, Xuan Ming¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: By analyzing the major image registration techniques at present, a new image registration method based on image entropy on account of the distribution issue of feature point and the registration of corresponding points was introduced. First, the image was divided into blocks to a certain extent and the image entropy of each block, which reflected the texture transformation within the block, was computed according to the information theory. The rough-match was then made on the basis of the computed image entropy. After that, a certain number of feather points were extracted from each block. The more information content the block had, the more abundant the texture became and so the larger extraction number we got. The precise match was made with these typical corresponding points. To demonstrate the validity of the proposed method, the improved image registration technique was compared to conventional methods on same images.

Key words: image registration; image entropy; feature point; corresponding point

收稿日期: 2013-02-06; 修订日期: 2013-03-14

基金项目: 中国科学院知识创新工程国防科技创新重要项目(YYYJ-1122)

作者简介: 吴泽鹏(1988-), 男, 硕士生, 主要从事图像处理, 图像跟踪方面的研究。Email: wuzepeng@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 宣明(1956-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事 MEMS 技术、精密机械等方面的研究。Email: xuanm@ciomp.ac.cn

0 引言

图像的配准可简单定义为两幅图像的位置变换和灰度变换,即对一幅图像的像素坐标 $X=(x,y)$ 映射到另一个新的坐标系中的某一坐标 $X'=(x',y')$,再对图像的灰度值进行重新采样。因而从理论上讲,两幅或者多幅图像之间必须要有一部分景物的来源是相同的,这是做图像配准的基本条件^[1-2]。

图像配准中存在三类主要的方法^[3]:基于灰度信息的配准方法、基于变换域的配准方法、基于特征的配准方法。基于灰度和变换域的配准方法有很明显的不足:受光照影响大,对灰度变换敏感;处理的信息量非常大,计算的复杂度很高;特别是对于旋转、尺度变换和遮掩极为敏感。而基于特征的图像配准方法则能够很好地避免上述缺点,而且图像中的特征数目比较少,特征间的匹配度量随着位置的变动比较大,可以利用图像之间特征的几何约束关系,对于干扰变形有很强的适应能力,因而基于特征的图像配准方法得到了广泛的运用,而特征点是图像中最常用的特征之一。

众所周知,在图像配准中特征点的选取尤为关键,特征点选取的好坏与其分布是否合理,决定着图像配准的后续步骤能否顺利精确地完成。文中提出了一种结合图像信息熵^[4-6]和特征点的图像配准方法:(1)首先对待配准图像和参考图像进行简单的分块处理^[6],这样能够保证,特征点能够较好的分布在整个图像上;(2)接着对上一步骤中的每一块子图像计算出相应的信息熵,根据信息熵的大小,预先进行粗略匹配并设置相应的特征点数目;(3)根据选取的特征点进行精确匹配^[7-8],这时候可以采用双向匹配的策略。

1 基于特征点的图像配准

基于特征点的图像匹配流程如图 1 所示,其技

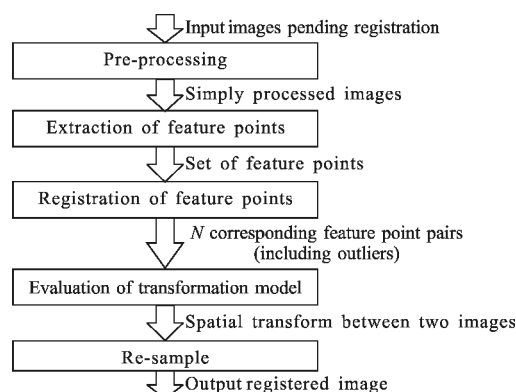


图 1 基于特征点的图像配准流程图

Fig.1 Feature point-based image registration flowchart

术主要有四个步骤:特征点的提取、同名点的对应(即为特征点的匹配)、图像变换模型的计算、图像的重采样。

2 图像的信息熵与互信息熵

从信息论理论可以知道图像所能够传递的信息量可以用图像的信息熵来表示,一个连续的图像存储在计算机中实际上已经是被离散化存储的。为了对这些离散的图像信息进行数据分析处理,可以利用所知道图像的相位或振幅的分布函数来建立图像信息的数学模型。设 $f(x,y)$ 为一幅具有 k 个灰度级的图像,其中第 $i(i=1\sim k)$ 级灰度出现的概率为 pi ,在传输信息时,当接受者能够很好的预测到所传的内容,例如当 pi 接近于 1 时,信息的不确定度就很小,相反的当 pi 接近于 0 时,图像传送的不确定度就较大。根据信息论的原理设定这个像素带的信息量为:

$$I(i)=\log(1/pi)=-\log(pi) \quad (1)$$

则这幅图像所带的加权平均信息量(信息熵)为:

$$H=\sum_{i=0}^{k-1} pi \cdot \log\left(\frac{1}{pi}\right)=-\sum_{i=0}^{k-1} pi \cdot \log(pi) \quad (2)$$

并且假设当 $pi=0$ 时 $pi \cdot \log(pi)=0$ 。

可以得到平均信息熵的意义是:图像出现的几率越大,它所具有的信息熵越小,所传递的信息内容也越少;反之,出现的几率越小,它所具有的信息熵越大,它所具有的信息内容却越大。可以证明,当各个 pi 值相等,即 $pi=1/n$ 时,信息熵达到最大值, $H=\log(n)$ 。

给定两幅图像,设为 A 、 B 。他们的互信息熵^[8]为:

$$MI(A,B)=H(A)+H(B)-H(A,B) \quad (3)$$

式中: $H(A)$ 和 $H(B)$ 分别为图像 A 和图像 B 的信息熵; $H(A,B)$ 表示为图像 A 和图像 B 的联合信息熵。若 $PA(a)$ 和 $PB(b)$ 分别表示图像 A 和 B 中灰度的概率密度分布函数,用 $PAB(a,b)$ 表示图像 A,B 的联合概率分布函数,则有:

$$MI(A,B)=\sum_{a,b} PAB(a,b) \log \frac{PAB(a,b)}{PA(a) \cdot PB(b)} \quad (4)$$

3 结合信息熵的图像配准的改进方法

在图像配准过程中,最重要的过程就是特征点的选取以及同名点的匹配。特征点的分布及其选取和同名点的匹配是后续精确匹配的一个重要前提,

为此,文中提出了以下的改进方法:(1)在特征点提取方面:首先利用分块策略^[7],对参考图像和待配准图像进行简单的分块,然后对每一块分别计算其信息熵,信息熵大的那一部分说明其纹理信息丰富,包含的内容较多,反之,纹理信息则少。对每一块子图像根据所含信息熵的大小,提取一定数目的特征点;(2)在同名点的匹配方面:根据每一块信息熵的大小,事先对图像进行粗略的匹配,然后利用提取的特征点,对图像采用基于信息熵分布的同名点搜索策略和基于双向匹配策略的图像匹配技术^[8-9]。

3.1 基于分块信息熵的特征点提取

在图像的特征中角点是图像的一个重要的局部特性,其直观的定义可简单地认为是在图像两个或者多个方向上灰度变化显著的点。图像中常用的角点主要有 Morevec, SUSAN, HARRIS 角点等^[10],不失一般性,文中主要采用 HARRIS 角点来说明改进的特征点提取方法。

HARRIS 角点检测的基本公式为:

$$E(u, v) = \sum_{x, y} w(x, y) [I(x+u, y+v) - I(x, y)]^2 \quad (5)$$

式中: $w(x, y)$ 为窗函数,可以为矩形窗或者高斯窗; $[I(x+u, y+v) - I(x, y)]^2$ 为图像灰度的梯度值。对于每个小的位移 (u, v) ,上式可以双线性地近似得表示为:

$$E(u, v) \cong (u, v) M \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (6)$$

M 是 2×2 的矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix} = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \otimes \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: I_x, I_y 分别为图像在 x, y 方向上的梯度值。

E 可以近似的作为局部互相关函数,矩阵 M 则描述了这个点上的形状。

HARRIS 算子可以用如下特征点响应函数表示:

$$R = \text{Det}(M) - K \text{Tr}^2(M) \quad (8)$$

式中: K 是常数因子,根据经验一般选取 $0.04 \sim 0.06$ 之间。只有公式(8)大于一定的阈值,并且该点具有局部极大值,才能够最后确定为图像的角点。

基于分块信息熵的特征点提取方法的主要步骤如下。

(1) 将参考图像分解为若干个子图像,子图之间必须保证两个条件:首先,子图之间必须保证不互相重叠,每一部分都是独立的;再者,所有子图加起来

可以覆盖原来的整幅图像,这样的分区方法体现了图像分块的独立性和整体性。

(2) 在将图片分块的基础上,计算出每一个子块图像的信息熵,再根据实际的需要以及信息熵的大小提取出一定数目的特征点。特征点数目可以利用以下公式来确定:

$$\text{提取特征点总数} = K_p \times \text{图片面积} \times \text{图片信息熵} \quad (9)$$

式中: K_p 为比例因子,根据大量实验数据验证, K_p 的取值一般在 $0.0004 \sim 0.0006$ 之间较为合适,这个根据具体的需要来确定大小,例如希望得到较多的特征点 K_p 的取值可以适当加大。实验中采用 K_p 值为 0.0004716 。

为验证算法的有效性,文中设计了一组具体的实验:首先将一幅图像分割为 8×8 块子图像;接着对这幅图像采用三种方式提取其特征点:(1)传统的特征点提取方法;(2)基于分块策略的提取办法;(3)利用分块信息熵的特征点提取方法。其中对传统的图像配准方法的特征点提取的数目为 640,而对基于分块策略的图像配准的特征点提取数目为每一个子块 10 个,总共也是 640 个特征点。而文中设计的基于分块信息熵的特征点提取方法的特征点数目则不受限制,根据实际需要自动设置数目大小。实验得到的结果如图 2 所示,其中,图(a)为传统方法提取特征点,图(b)所示为分区熵提取方法,图(c)为采用分区策略提取的特征点。

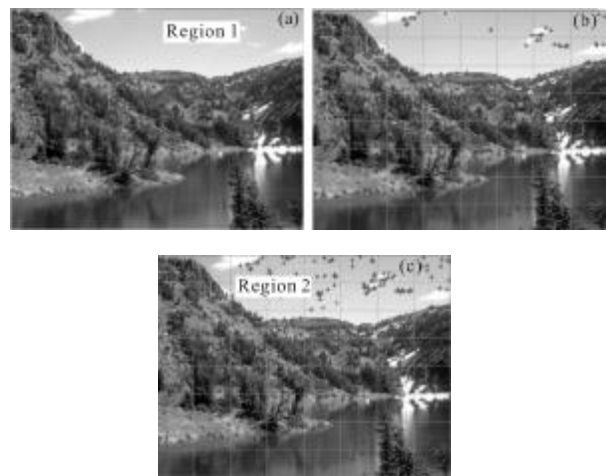


图 2 特征点提取方法对比图

Fig.2 Comparison of different feature point extraction methods

从图 2 可以看出,传统的特征点提取方法的特

征点都集中在整幅图像中特征比较明显的地方,特征点的分布较为集中,但是也存在着一些具体的缺点:例如图 2 中区域 1 确实能够较好地反应图像的特征,但是传统的方法却没有能够将其识别出来。而分块策略的特征点分布则较为均匀,而且在每个分块的内部,特征点依然是分布在那些特征较为明显的地方。这种方法仍然存在一些缺点:在每个分块内部,由于其中一部分可能其纹理变化不明显,根本就没有能很好反映图片内容的特征,而在实际特征点提取过程中依然提取了较多的特征点(例如图 2 中的区域 2),这对后续同名点的匹配会带来较大的困难。而且上述两种方法中需要人为地根据实际情况设置阈值来确定特征点数目,自动化程度不高,而基于分块信息熵的图像配准方法则很好地解决了以上两个问题:它首先采用分块的策略避免了特征点分布太过于集中,又避免了在纹理信息不丰富的子块提取出太多的特征点。而且在特征点的数目控制上不需要人为地设置阈值,极大地提高了特征点提取的自动化程度。

3.2 同名点匹配的改进方法

在同名点匹配过程中,一般的匹配方法是在待配准图像中,对于每一个提取出来的特征点,在基准图像中的所有特征点中选取与之相似度最大的一个特征点,这时的两个特征点即为匹配得到的同名点对。但是在实际的应用中,因为待配准图像中提取的特征点数目往往较多,而且两幅图像中的可能存在较大差异的区域,这样简单的匹配方式可能存在大量的错误匹配点,使得后续变换模型的计算量大大提高,而且很有可能会导致匹配模型的计算失败,为此文中提出了以下改进的方法。

(1) 基于信息熵分布的同名点搜索策略

算法的主要思想:在特征点提取过程中,因为上一步骤的计算中将图片分成若干个子图像,已经能得到各个子图像的信息熵,因而将这些图像进行合并,就能大致得到这幅由子图像拼接成的原图像的信息分布。故而在基准图像特征点和待配准图像特征点的同名点匹配中,就可以利用这些图像信息的分布规律。

文中采用方法是将每一幅图像获取的子图像进行“像素化”,即将每一幅子图像看做一个像素,这样

原来的一整幅图像就被归一化为 8×8 个像素点,灰度值可以看做各个子图像的信息熵。接下来就可以对这个 8×8 个像素点的图像进行匹配了。其中重要的一点是在这个图像配准过程中,采用的是刚体变换模型,因为这时像素点代表的数值只是一个大致的图像信息量分布,刚体变换模型已经能够满足变换需要。在完成匹配过程之后就能知道基准图像中的每一块子图像与待配准图像中的子图像的一一对应关系。接着,在完成这一步配准方法之后,就可以对待配准图像子块内的特征点(A_0),利用已经得到的子图像块对应关系,查找基准图像相应子图像块以及其周边 8 邻域图像块(如图 3 所示)内的特征点。

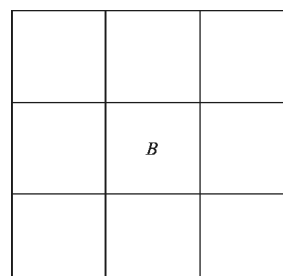


图 3 8 邻域图像块示意图

Fig.3 Schematic diagram of 8-neighborhood image block

从这个 8 邻域图像块内得到与 A_0 相似度最大的一个特征点 B_0 ,这样就完成了特征点 A_0 的同名点匹配工作,通过这样粗匹配与精匹配的结合,大大降低了同名点匹配过程的时间复杂度以及匹配的出错率。

(2) 双向匹配策略

算法的基本思想:采用双向匹配策略的主要目的是为了提高同名点匹配的可靠性,首先假设在基准图像上得到的对应点是正确的,那么用同样的匹配方法和参数将该对应点反向匹配到待配准图像上得到匹配点,如果之前得到的对应点是正确的匹配点,应该与原始点的位置是相同的;如果与原始点的位置差异很大,则说明在基准图像上得到的同名点是不正确的。

采用双向匹配的主要过程:假设 (x_i, y_i) 为待配准图像上的特征点,通过归一化互相关法获得它在基准图像上的匹配点是 (x_i', y_i') ,再将 (x_i', y_i') 作为目标点,在待配准图像上找到相对应的匹配点 (x_i'', y_i'') ,这一过程可称之为反向匹配。如果 (x_i, y_i) 和 (x_i'', y_i'') 距离小于 t (t 为某一数值,一般设置为 1 个像素),则确定

(x_i, y_i) 和 (x_i'', y_i'') 为正确的匹配对,否则这对匹配点将不是正确的匹配点,应该予以剔除。

通过双向匹配的策略可以在进行下一步算法前,剔除了大量的外点,大大增加同名点的正确性。

3.3 基于改进的图像配准技术的实验结果及其分析

综合上述改进的特征点配准算法结合具体的实验结果进行分析,实验步骤如下。

Step 1:首先对待配准图像和基准图像采用基于信息熵的自适应算法和基于分块策略的算法提特征点。

Step 2:同名点匹配,在匹配过程中使用上基于信息熵分布的同名点搜索策略和双向匹配策略来获得同名点对。

Step 3:剔除错误匹配对,估计变换参数和重采样,利用 RANSAC 算法,找到正确点匹配点集,再根据最小二乘法来最终确定变换模型。

对 A 组图像(图书馆校车图)利用文中方法配准得到的实验结果如图 4 所示。

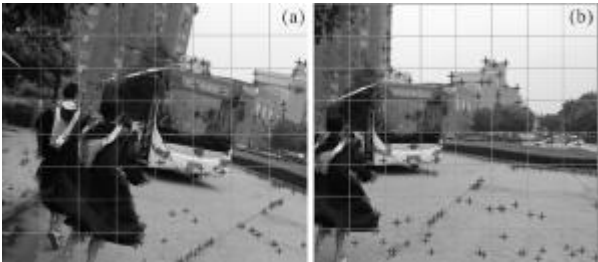


图 4 A 组两幅参考图像的特征点提取

Fig.4 Feature point extraction from two reference images of A

从图 4 可以得到参考图像和待配准图像的特征点分布情况,而表 1 和表 2 则是计算出了两幅图像中各个子图像的信息熵分布状况,从表 1,2 可以清

表 1 参考图像的信息熵分布(单位:bit)

Tab.1 Reference image information entropy distribution (unit: bit)

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8
6.036	6.463	5.994	5.547	6.118	3.289	2.754	2.735
6.378	6.750	5.601	6.373	7.368	3.939	2.956	3.309
6.349	6.607	6.583	6.372	7.177	6.692	6.665	6.237
6.714	7.339	6.798	6.541	7.038	6.548	6.828	6.489
6.051	5.414	7.000	6.408	7.254	7.199	6.896	6.675
6.667	4.765	4.103	6.074	6.394	6.642	5.807	6.763
6.607	6.702	4.775	5.724	4.051	3.883	4.706	5.094
6.042	6.760	6.835	5.700	5.054	5.124	4.310	4.302

表 2 待配准图像的信息熵分布(单位:bit)

Tab.2 Pending registration image information entropy distribution (Unit: bit)

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8
6.715	6.200	4.156	2.295	2.815	2.697	2.945	2.690
5.525	5.930	4.509	3.144	3.693	3.682	3.516	3.532
5.872	7.087	7.013	6.203	6.426	5.711	3.435	4.108
6.774	6.283	6.234	6.564	6.992	6.858	6.300	6.307
7.084	7.084	7.436	7.469	6.981	6.945	7.313	7.229
4.967	6.173	5.793	4.788	4.938	5.245	5.537	6.467
5.041	5.834	4.341	5.004	4.455	4.025	3.996	4.463
6.936	5.578	5.335	4.675	4.377	4.490	4.349	4.791

楚地看出图像信息的大致分布状态,图像哪个部分的纹理信息丰富,哪个部分的纹理信息不明显都能从表中得到。

最后,利用选取的特征点和子图像的信息熵分布,得到配准后的图像如图 5 所示(重合部分则是两幅图像中的公有区域)。



图 5 配准后图像

Fig.5 Registration of images

图 6 则是使用相同的方法对 B 组图像(长春市内

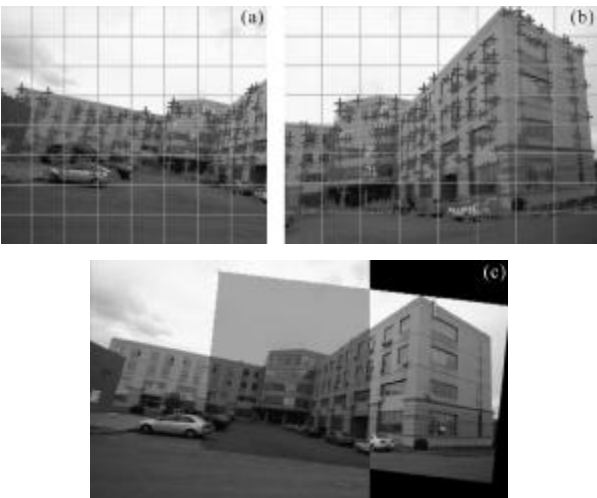


图 6 建筑物配准过程

Fig.6 Registration of building's images

某一建筑物)从不同角度拍摄的两幅图像进行配准,并合成拼接。从配准的结果可以发现,改进的方法在特征点提取时,既避免了特征点分布的过分集中,又有效地避免了在天空这些特征不明显的地方提取过多的特征点,这样的特征点选取保证了算法的准确性和灵活性,最后匹配得到的结果也与预期的效果非常吻合。

3.4 文中算法与改进前算法的比较

分别对图 4 和图 6 的两组图片(A 组,B 组)使用改进前的方法进行配准,此次实验主要以 HARRIS 特征点提取算法为例。得到的实验结果如图 7 所示。



(a) A 组图像的传统配准结果

(a) Registration of A



(b) B 组图像的传统配准结果

(b) Registration of B

图 7 基于传统配准方式的配准结果

Fig.7 Registration results based on traditional methods

将 3.3 小节改进方法得到的结果与图 7(a)、(b)对比,可以直观地发现,改进的方法提取的特征点明显更具有代表性和分布平衡性,这样的特征点分布有效地避免了特征点资源的过分集中,充分有效地利用了整幅图像的特征信息,非常有利于后续图像的匹配过程。为此,根据得到的特征点进行图像匹配,通过比较两组数据的匹配时间和同名点对的准确率来分析两种方法的优劣,匹配时间指的是图像提取

出来特征点之后,进行特征点的匹配以及两幅图像变换模型生成所需要花费的时间(文中的实验平台为 windows 7, 2 G Memory, Pentium(R), Dual-Core CPU E5200@2.5 GHZ, 编程环境为 VC2008),而同名点对的准确率指的是图像提取出来的同名点对,通过 RANSAC 算法剔除外点之后得到同名点对的数目与原来数目比较,其结果如表 3 所示。

表 3 算法比较结果

Tab.3 Comparison of different algorithms

		Elapsed time/s	Accuracy of registration
Group A	Before revision	7.5	52%
	Proposed method	4.6	98%
Group B	Before revision	5.2	47%
	Proposed method	4.0	98%

从表 3 中不难看出,文中提出的方法无论在匹配时间和同名点对的匹配准确率上,均有很大的提高。匹配时间的提高对于实际应用的图像,特别是高分辨率,大尺寸图像的配准过程有着非常优越的效果;而同名点对准确率的提高,对于图像后续配准变换模型的建立,配准精确的提高,都有非常重要的意义。

4 结 论

文中针对图像配准中常见的一些问题,利用信息论的方法对其中一些算法进行了适当的改进:为了使得特征点的分布均匀,提取特征点时采用了分块处理方法;针对特征点数目的控制自动化程度不高的缺点,使用了基于信息熵的自适应控制特征点数目的方法;为了提高图像特征点的初始匹配效率,采用了基于信息熵分布的同名点搜索策略和双向匹配的策略。实验改进的方法对于实际的图像配准以及后续图像融合的工作均有较大的意义。

文中的图像配技术主要着眼于同源图像之间的配准,对于两个不同源之间的图像配准未做相应的分析,这有待于将来的工作来进一步完成。

参考文献:

- [1] Brown L G. A survey of image registration techniques [J].

- ACM Computing Surveys, 1992, 24(4): 325-376.
- [2] Barbara Zitova', Jan Flusser. Image registration methods: a survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21: 977-1000.
- [3] An Jianni, Liu Guixi. Image mosaic algorithm base on feature points matching and automatic transform parameters identifying [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40 (3): 564-569. (in Chinese)
- [4] Josien P W Pluim, J B Antoine Maintz, Max A Viergever. Image registration by maximization of combined mutual information and gradient information [J]. IEEE Transaction on Medical Imaging, 2000, 19(8): 809-814.
- [5] Bai Lianfa, Han Jing, Zhang Yi, et al. Registration algorithm of infrared and visible images based on improved gradient normalized mutual information and particle swarm optimization [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41 (1): 248-254. (in Chinese)
- [6] Yang Biwu, Ni Zhibin. Template selection for image registration based on maximal entropy [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S): 98-101. (in Chinese)
- [7] Chen Chao, Qin Qiming, Jiang Tao, et al. An improved method for remote sensing image registration [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, 46(4): 629-635. (in Chinese)
- [8] Mark Jenkinson, Stephen Smith. A global optimization method for robust affine registration of brain images [J]. Medical Image Analysis, 2001, 5(2): 143-156.
- [9] He Baigen, Zhu Ming. Improved fully affine invariant SIFT-based image matching algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(10): 2472-2477. (in Chinese)
- [10] Harris C G, Stephens M J. A combined corner and edge detector[C]//Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference Manchester, 1988: 147-151.

.....

(上接第 2799 页)

- [2] Shen Jin'e, Rong Jian, Liu Wenxin. Progress of terahertz in communication technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S): 342-347. (in Chinese)
- 申金娥, 荣健, 刘文鑫. 太赫兹技术在通信方面的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 342-347
- [3] Lu Yimin, Wang Jiachun, Shi Jiaming, et al. Application of THz technology for detection in soot and wind-blown sand[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 487-490. (in Chinese)
- 陆益敏, 汪家春, 时家明, 等. 太赫兹技术在烟尘与风沙探测中的应用[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 487-490.
- [4] Hirata A, Kosugi T, Meisl N, et al. High-directivity photonic emitter using photodiode module integrated with HEMT amplifier for 10 -Gbit/s wireless link [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2004, 52(8): 1843-1850.
- [5] Hirata A, Takahashi H, Yamaguchi R, et al. Transmission characteristics of 120 -GHz -band wireless link using radio-on-fiber technologies[J]. J Lightwave Technol, 2008, 26(15): 2338-2344.
- [6] Takahashi H, Kosugi T, Hirata A, et al. 10 -Gbit/s quadrature phase-shift-keying modulator and demodulator for 120 -GHz -band wireless links [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2010, 58(12): 4072-4078.
- [7] Radoslaw Piesiewicz, Thomas Kleine-Ostmann, Norman Krumbholz, et al. Short-range ultra-broadband terahertz communications: concepts and perspectives [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007, 49(6): 24-39.
- [8] Thomas Kürner, Martin Jacob, Radoslaw Piesiewicz, et al. An integrated simulation environment for the investigation of future THz communication systems: extended version [J]. Simulation, 2008, 84(2/3): 123-130.
- [9] Kleine-Ostmann T, Pierz K, Hein G, et al. Audio signal transmission over THz communication channel using semiconductor modulator [J]. Electron Lett, 2004, 40(124): 124-126.
- [10] Liu T A, Lin G R, Chang Y C, et al. Wireless audio and burst communication link with directly modulated THz photoconductive antenna[J]. Optics Express, 2005, 13(10416): 10416-10423.
- [11] Möller L, Federici J, Sinyukov A, et al. Data encoding on terahertz signals for communication and sensing[J]. Opt Lett, 2008, 33(393): 393-395.
- [12] Chen Z, Tan Z Y, Han Y J, et al. Wireless communication demonstration at 4.1 THz using quantum cascade laser and quantum well photodetector [J]. Electronics Letters, 2011, 47(17): 1002-1004.