

一种快速多模态图像匹配导航方案

范俐捷 高鑫 王岩飞 杨莹 潘卓
(中国科学院电子学研究所七室 北京 100190)

摘要: 为了能在飞行器自主导航系统中快速、精确地完成不同模态图像间的匹配, 该文提出了一种基于多分辨率分析的图像匹配导航方案。这种方案采用金字塔结构, 由粗到细进行匹配。在最小尺度上, 采用了逐步剔除的策略, 提出了边缘膨胀模板(EDT), 并推导了快速算法; 在中间级别上, 用 Hausdorff distance 作为相似准则; 在最后一级别上, 采用交互方差进行匹配。在匹配过程中, 除最小尺度上采用快速算法外, 在其他匹配阶段也推导和采用了一些加速算法来减少运算量。实验结果显示该文的方法可以快速、精确地完成多模态图像匹配。另外, 该文方法易于硬件实现, 有助于图像匹配导航系统的工程实现。

关键词: 自主导航; 图像匹配; 交互方差; Hausdorff 距离; 多模态图像

中图分类号: TN966

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)12-2876-05

A High Time-Efficiency Multi-modal Images Matching Scheme for Navigation

Fan Li-jie Gao Xin Wang Yan-fei Yang Ying Pan Zhuo
(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: In this paper, a new scheme based on multi-scale is presented to match multi-modal images, in the airborne autonomous navigation system. Pyramid structure is exploited, in the scheme from coarse to fine. In the coarsest scale, a stepwise elimination scheme is introduced, the Edge Dilatation Template (EDT) is presented and some methods are introduced to reduce the calculation. In the middle scales, Hausdorff Distance (HD) is exploited as similar measure. In the finest scale, mutual variance is exploited. Some methods are also introduced and deduced to speed up the calculation in other matching scales besides the finest scale. The results of the experiments indicate that the multi-scale method can achieve fast, precision matching between multi-modal images. It can be realized by hardware easily and helps to the engineering realization of image matching navigation system.

Key words: Autonomous navigation; Image matching; Mutual variance; Hausdorff distance; Multi-modal images

1 引言

在飞行器自主导航过程中, 多模态图像的匹配已经变得越来越重要。由于 SAR 成像系统的优点: 全天候, 全天时成像; 能一定程度地穿透云层, 树叶等, 实时飞行中往往借助 SAR 图像进行导航, 而用于匹配的参考图像却往往是不同模态的, 就需要借助多模态匹配算法来校正飞行器位置。由此, 多模态图像匹配方法的研究在匹配导航中也就成为一个热点。

时效性和匹配精度是飞行器匹配导航系统中匹配算法的两个重要指标。目前的图像匹配方法基本上分 3 类: 基于区域的匹配方法, 基于特征的匹配方法^[1,2], 基于解释的匹配方法^[3]。基于区域的方法中, 传统的交叉相关方法不适用于多模态图像间的匹配, 而互信息, 交互方差的方法, 却可以很好地处理不同模态图像间的匹配, 匹配精度比较高, 只是运算复杂度稍高。基于特征的方法可以处理多模态图像匹

配, 具有较低的运算复杂度, 但匹配精度比较依赖于特征提取的质量。基于解释的图像匹配方法建立在对图像正确解译的基础上, 从而非常不成熟。结合不同方法的优势, 本文考虑将基于灰度的方法和基于特征的方法结合起来使用, 并引进了多分辨率分析技术以保证较高的匹配精度和速度。目前采用的多分辨率分析有小波变换, B-Spline 变换, 金字塔分解等。小波, B-Spline 变换有两个缺点: 一是分解后的近似图像特征与原图像特征可能会有较大的差别, 会给中间匹配结果带来较大偏差; 另一个是小波, B-Spline 分解虽然有快速算法, 速度依然较慢, 很难满足实时要求。本文采用基于多视处理的金字塔结构对实时图像进行多分辨率分析。现有的基于多分辨率的匹配方法, 在不同的尺度上往往采用同一种优化方法进行匹配^[4,5]。本文在匹配过程中, 充分利用不同尺度上图像的特点, 不同的尺度级别上采用不同的方法, 以求达到较高的精度和速度。

2 图像匹配算法

2.1 匹配结构

本文采用基于多视分解的方法获取各个尺度上实时 SAR 图像。(1)多视分解易于硬件实现,时效性较高;(2)多视分解可抑制图像中的干扰噪声,有利于小尺度级别上特征提取。多视分解利用金字塔式的数据结构对图像进行表达。多视分解的第 0 级对应整幅图像,第 i 级图像是第 $i-1$ 级的四视图,是通过第 $i-1$ 级图像中每 4×4 个像元加权平均为一个像元而生成。逐级递推可得到原图像的多个尺度的图像, im_0, im_1, \dots, im_m (设最小尺度上为第 m 级)。然后由粗到细进行匹配。本文定义前 m 级的匹配为粗匹配,最后一级为精匹配。

参考图像各个级别上的边缘图像、Hausdorff Distance (HD)图像、边缘膨胀模板(EDT: Edge Dilatation Template)可以事先制备,不占用实时处理时间。由于实时 SAR 图像经过了多视处理,一定程度上消除了干扰噪声的影响,采用 Canny 算子对其进行边缘提取。

2.2 粗匹配

2.2.1 第 m 级上的剔除方法 在第 m 级匹配中,要在整张图像上搜索候选点,需要优化方法来减少运算量。另外,由于是边缘图像间的匹配,很难完全对齐,需要具有一定容错性的相似准则。

为了能全局搜索匹配中降低运算量, Yacov Hel-Or^[6]曾采用 Walsh-Hadamard(WH)核对图像投影,逐步排除不符合条件的点完成匹配,匹配速度极快。但此方法中作为投影向量的 WH 列向量对图像的投影叠加的逼近值是两块图像的欧氏距离,只适宜于同模态且具有较小变化的图像间的匹配。通过研究,发现其降低运算量的核心思想在于其提前排除了大量不必要详细计算的位置和减少了大量的重复运算。当匹配中的图像是来自不同传感器的图像,文中在最小尺度上基于图像边缘特征进行匹配。由于不同模态图像边缘间很难严格对应,选择 HD^[7,8]作为相似准则。为降低运算量,并满足匹配精度要求,受文献[6]方法和 HD 的容错性和准确性的启发,本文设计一个只含有 -1 和 1 的模板($k \times k$): EDT, 对第 m 级的实时 SAR 边缘图像($n \times n$)进行初步搜索,排除一部分不符合条件的匹配点。在剩余匹配位置处进一步计算参考图像($k \times k$)的 HD 图($k \times k$)和实时 SAR 边缘图像窗口间的相关系数(也即有向 HD,文中简称为 HD),求极值确定匹配位置。

EDT 根据图像的边缘图制作而成。如图 1(a)所示的一幅边缘图像,将边缘进行膨胀可以得到图 1(b)。然后将图 1(b)上边缘处赋值为 $+1$, 非边缘处赋值为 -1 , 就得到了这个模板。若将图像窗口和 EDT 模板各自展开成一个列向量,求点乘可以得到一个值,称为 EDT 度量值。EDT 具有以下性质:

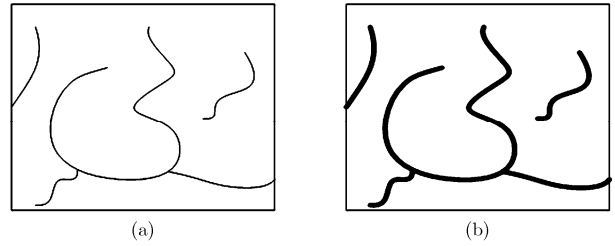


图 1 (a)边缘图像 (b)根据图 1(a)制作的模板图

(1)此模板可以根据参考图像事先制备,不占用飞行器上空时处理时间。

(2)由于对边缘有所膨胀,所以具有一定容错性。

(3)和模板相似的图像窗口中边缘大量会落在 $+1$ 处,不相似的窗口边缘大量会落在 -1 处,由此,EDT 度量值可以反映模板与窗口间的相似性,度量值越大,越相似。

(4)由于 -1 的存在,区分能力较强,以它作为第一步剔除操作,比用图像均值¹⁾(等效于向文献[6]中的 WH 的第一个向量投影值)的收敛效果好,如图 2 所示。

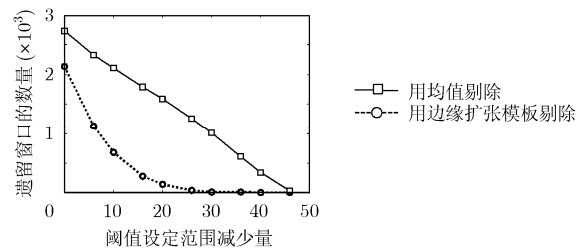


图 2 在阈值设定范围逐步缩小过程中,遗留窗口数的变化

(5)由于此模板上只有 -1 和 $+1$, 计算量比较小。

为进一步减少重复计算量,定义 EDT 的行(列)差异模板,通过前一匹配位置的 EDT 度量值推测本位置的 EDT 度量值。行差异模板这样定义,大小为 $k \times (k+1)$, 它的第一列是 EDT 第一列值的相反数,它的最后一列是 EDT 最后一列的值,中间部分是两个 EDT 行向偏移一列交叠部分对应相减,偏移后的减去原来的。同理,列差异模板大小为 $(k+1) \times k$, 第一行是 EDT 的第一行的相反数,最后一行是 EDT 的最后一行,中间部分是两个 EDT 列向偏移一行交叠部分对应相减,平移后的减去原来的。假设实时 SAR 图像的边缘图为 A_b , A_b 上以 (m,n) 为左上角坐标的 $k \times k$ 的图像块为 A_{bmn} , EDT 为 B_{bm} , 行,列差异模板分别为 B_{bh} , B_{bl} 。 A_{bmn} 和 B_{bm} 间的 EDT 度量值设为 $D(A_{bmn}, B_{bm})$ 。由此,得出如下的快速递推运算:

$$D(A_{bmn}, B_{bm}) = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^{k-1} A_{bmn}(i, j) B_{bm}(i, j) = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^{k-1} A_b(m+i, n+j) B_{bm}(i, j) \quad (1)$$

¹⁾由于用均值时, 阈值设置的是大于某个值小于某个值的一个范围,而本文的方法是大于某一个值的一个范围,用阈值来分析比较不太一致,所以本文用阈值所设定的范围减少量来进行比较。

$$D(A_{b(m+1)n}, B_{bm}) = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^{k-1} A_{b(m+1)n}(i, j) B_{bm}(i, j) \\ = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^{k-1} A_b(m+1+i, n+j) B_{bm}(i, j) \quad (2)$$

当窗口沿行方向移动, 有如下行推算公式:

$$D(A_{b(m+1)n}, B_{bm}) = D(A_{bmm}, B_{bm}) \\ + \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^{k-1} A_b(m+i, n+j) B_{bh}(i, j) \quad (3)$$

当窗口沿列方向移动时, 进行列推算, 可以得到类似的公式。

由于 EDT 中只有+1 和-1, 所以行, 列差异模板中的值只有+2, -2 和 0, 而且对于一幅边缘图, 它的差异模板中 0 占的比重往往很大。这样, 只需要计算图像和差异模板中非零位置的对应相乘的叠加值, 再加上前一个位置的度量值即可。

在匹配中, EDT 在实时 SAR 边缘图像中移动, 计算各处的 EDT 度量值 D 。事先设定一个门限 t , 如果 $D > t$, 则将此匹配点加入候选序列中, 求取 HD; 否则, 此点被排除。门限设置依据参考图像边缘图上处于边缘上的像素的个数, 具有一定的先验性。具体是先求得参考图像上处于边缘上的像素的个数, 然后再对这个值减去一个容限值, 即得到 t 。当参考图和实时图边缘对应得较好时(会受到实时图的信噪比, 匹配区的适配性等的影响), 容限值较小, 反之, 就较大。目前可以从具体情况和实验来定出这个值, 有待进一步研究。

2.2.2 第 $m-1$ 到第 1 级上的匹配 第 m 级粗匹配点设为 (a_m, b_m) , 推测 $m-1$ 级的匹配点应为 $(2a_m, 2b_m)$ 。对得到的 $(2a_m, 2b_m)$ 点设定一个范围 r , 然后计算参考图像和左上角在此范围内的实时图像窗口间的 HD(采用相关系数的快速递推运算^[9]), 求取极值找到第 $m-1$ 级上的粗匹配点 (a_{m-1}, b_{m-1}) 。同理, 这个粗匹配点会用来指导第 $m-2$ 级上的匹配, 直到得到第 1 级上的粗匹配点 (a_1, b_1) 。

2.3 精匹配

由于最大尺度上, 干扰噪声比较显著, 为避免轮廓提取误差对定位的影响, 采用精确度很高的交互方差 CI^[10]作为相似准则进行匹配。时永刚曾对其性能作过详细的分析。从分析结果来看, 其对噪声有较好的鲁棒性, 对小量的偏转有一定的容错性, 并可以适用于不同模态图像间的配准, 比较符合导航系统的实际情况。交互方差的表达式如下:

$$CI = \frac{1}{\sigma_B} \sum_a \frac{N_A(a)\sigma_B(a)}{N} + \frac{1}{\sigma_A} \sum_b \frac{N_B(b)\sigma_A(b)}{N} \\ \left. \begin{aligned} \mu_B(a) &= \frac{1}{N_A(a)} \sum_{A_a} B(p_A) \\ \mu_A(b) &= \frac{1}{N_B(b)} \sum_{B_b} A(p_B) \\ \sigma_B(a) &= \frac{1}{N_A(a)} \sum_{A_a} (B(p_A) - \mu_B(a))^2 \\ \sigma_A(b) &= \frac{1}{N_B(b)} \sum_{B_b} (A(p_B) - \mu_A(b))^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 N 为图像所含像素的数目, $N_A(a)$ 和 $N_B(b)$ 分别是图像 A 和 B 重叠区域内灰度为 a 和 b 的像素数目 ($a, b \in \{0, 1, \dots, 254, 255\}$), 亦即为各自的直方图。 $\sum_{A_a} B(p_A)$ ($\sum_{B_b} A(p_B)$) 表示图像 A (B) 中所有像素灰度值为 a (b) 的点所在位置对应图像 B (A) 上同一位置的像素灰度值之和, 意义类似。 σ_A 和 σ_B 分别为 A 和 B 灰度分布的方差。

CI 是一种基于图像灰度的相似准则, 它利用图像窗口全部信息, 而不是单纯的图像边缘, 具有较高的精确度, 只是运算量稍大。为了提高定位的精确度, 文中选择它在最大尺度上, 在获得了前一级指导的条件下使用, 既提高了匹配的精度, 又避免了复杂度高的问题。并且本文为了进一步降低运算量, 推导出它的快速递推计算。

以下先对 CI 进行一下分析, 假设本级别上参考图像大小为 $k_0 \times k_0$, SAR 实时图像大小为 $n_0 \times n_0$, 可以将其展开为如下表达式:

$$CI = \frac{1}{N} \left\{ \frac{1}{\sigma_B} \sum_a \left(\sum_{A_a} B^2(p_A) - N_A(a)\mu_B^2(a) \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{S_A - k_0^2 \times \bar{A}} \sum_b \left(\sum_{B_b} A^2(p_B) - N_B(b)\mu_A^2(b) \right) \right\} \quad (5)$$

$$\bar{A} = \sum_{i=0}^{k_0-1} \sum_{j=0}^{k_0-1} A(i, j), \quad S_A = \sum_{i=0}^{k_0-1} \sum_{j=0}^{k_0-1} A^2(i, j)$$

其中参考图像 B 的方差 σ_B , 直方图 $N_B(b)$ 可以事先计算好, 为固定值。 S_A , \bar{A} , $N_A(a)$ 可以通过递推公式来运算。其中, 前两个量的递推方法在文献[9]中有讲述。

假设, 实时 SAR 图像上以 (g, h) 为左上角坐标的图像窗口内灰度值为 a 的点的个数为 $N_{A(g,h)}(a)$ 。当模板沿行方向从 (g, h) 滑动到 $(g, h+1)$ 时, $N_A(a)$ 有如下递推公式:

$$N_{A(g,h+1)}(a) = N_{A(g,h)}(a) - \sum_{i=0}^{k_0-1} h_a(A(g+i, h)) \\ + \sum_{i=0}^{k_0-1} h_a(A(g+i, h+k_0)) \quad (6)$$

其中 $h_a(x) = 1 (x = a); h_a(x) = 0 (x \neq a)$ 。

当模板沿列方向滑动时, 同理也可以推导出类似的递推公式。

2.4 匹配算法及流程

假定参考图像 B 被分成 $m+1$ 层。事先处理得到 B 的各个尺度的边缘图像, HD 图, 均值, 方差, 直方图; 由 B 最小尺度上的边缘图获取 EDT 模板 B_{bm} , 行, 列差异模板 B_{bh}, B_{bl} ; 并统计出 B 最小尺度上的边缘图像上的边缘所处位置的像素个数 nE , 以此设置门限阈值 $t = nE - nB$, nB 就是前面曾提到的容限值。

(1) 实时 SAR 图像 A 通过多视处理, 得到 $m+1$ 层的不同尺度的图像。

(2) 对第 m 级实时图像用 canny 算子进行边缘提取, 得

到边缘提取图 A_{mb} 。

(3)用 B_{bm} (结合 B_{bl} , B_{br})在 A_{mb} 上搜索, 获得 (i, j) 处的投影值 $v_m(i, j)$, 若 $v_m(i, j) \geq t$, 则 (i, j) 为候选点, 在此点计算实时 SAR 图像窗口和参考图像的 HD; 否则, 剔除此点。找到 HD 最大的位置作为第 m 层上粗匹配位置 (Px_m, Py_m) 。

(4)在第 $m-1$ 尺度级别上, 根据(3)的结果, 在实时 SAR 边缘图像上左上角范围为 $(2Px_m \pm r_m, 2Py_m \pm r_m)$ 图像窗口内计算 HD, 获取 HD 最大的位置。

(5)重复类似(4)的过程, 直到找到第一尺度级别上的匹配点。

(6)将 B 和 A , 在 A 上位置为 $(2Px_1 \pm r_1, 2Py_1 \pm r_1)$ 范围内以交互方差作为相似准则进行搜索, 找到极值点 (Px_0, Py_0) , 就是最终的精匹配位置。

在匹配中, m 的选择和图像分辨率及图像尺寸都有关系。 m 过大, 会使得最小尺度上信息大量丢失, 特征提取效果过差, 引起失配; m 过小, 会使得最小尺度上图像尺寸比较大, 搜索范围过大, 影响匹配时效性, 一般来说通常仅使用不超过 5 的分层数^[12], 一般取 3 或 4。 r_m (搜索半径)的选择也要适当, 过小会影响定位精度, 过大会影响匹配速度, 可以根据参考图像所示区域的特征而设定, 是具有一定先验性的。

3 实验结果及分析

本文用多幅真实的多模态图像(光学图像和 SAR 图像)对提出的方法进行测试。实验是在 PIV, 3.0GHz, 2.0GB 内存的硬件配置下, VC++6.0 的开发环境下进行的。选用的 SAR 图像大小为 1024×1024 , 作为实时图像; 光学图像大小为 256×256 , 作为参考图像。根据所选图像, 在实验中设置: $m=2$ (分成三级进行匹配), $r_m=4$ 。对 30 组图像数据进行实验, 实验结果如图 3 所示(图 3 只是其中一组实验)。可以看出, 算法能够找到正确的匹配位置。

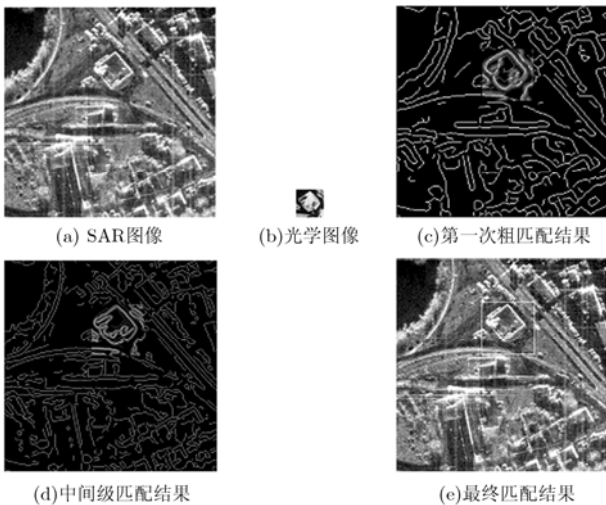


图 3 SAR 图像和光学图像匹配结果(为了便于比较匹配结果, 显示的图片尺寸有所改动, (c),(d),(e)原本分别大小为 256×256 , 512×512 , 1024×1024)

为了验证算法的匹配精度及运算速度, 做出此匹配实验的时间曲线和误差曲线如图 4 和图 5 所示, 并将此方法和 2006 年的一篇文章中提到方法^[13](是一种改进后的基于 HD 和遗传算法的匹配方法, HD 是处理特征匹配的一种经典方法, 遗传算法也是一种经典的匹配策略)进行比较如表 1 所示。图 4 所示的平均匹配时间为 521ms, 具有很高的效率(用于同模态匹配的相关运算 FFT 算法的匹配时间为 3500ms^[6])。误差包括 x 方向和 y 方向误差, 将其求平方和, 再开平方, 得到图 5 所示的误差曲线, 平均误差为 2.77 个像素, 具有较高的精确度, 可以满足工程需要。从表 1 来看, 在与基于 HD 和遗传算法的方法相比时, 精确度相差不大, 但速度大大提高。进一步分析, 精度降低主要是由于在较小尺度上引入了误差, 特征提取方面有待进一步研究。

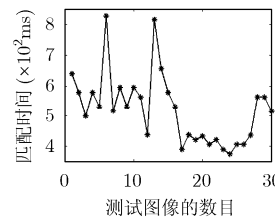


图 4 匹配时间曲线

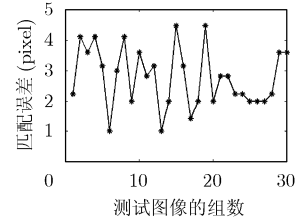


图 5 匹配误差曲线

表 1 本文方法与 HD 遗传算法的效率和精度对比

方法	基准图像尺寸	匹配图像尺寸	平均匹配时间(ms)	平均匹配误差(像素)
HD 遗传算法	384×512	128×128	2287	1.83
本文方法	1024×1024	256×256	521	2.77

影响计算量的因素主要有: 特征提取过程中的计算量, 相似度量的计算量, 搜索次数的多少。影响定位精度的因素有: 进行匹配的两幅图像之间存在的畸变程度, 特征提取过程中产生的误差, 相似准则的定位精度。往往提高匹配速度都是从匹配策略及减少不必要的运算入手。提高匹配精度主要是要有较好的特征提取算法和定位精度高的相似准则, 而在匹配算法研究中最主要考虑的是精度高的相似准则。由以上分析, 本文方法在提高效率和精度方面主要做了如下贡献: (1)采用了多尺度匹配及逐步剔除的策略, 减少了搜索次数, 并在每一尺度中采用快速算法, 减少了相似度量的计算量。(2)只在较小尺度上采用基于特征的方法, 在最大尺度上利用图像所有的信息, 采用基于灰度的相似准则提高定位精度。实验也验证了本文方法的有效性和优越性。

4 结束语

本文提出了一种基于多分辨率分析的多模态图像匹配方法, 用于飞行器实时匹配导航。各个尺度的参考图像, 参

考图像的边缘图像、HD 图像和 EDT 等可事先制备, 节省飞行器上空时处理时间。在处理过程中, 该方法用多视处理快速完成实时图像的多分辨率分析, 采用由粗到精的策略进行匹配。最小尺度上, 提出了 EDT 来对所有匹配窗口进行初步衡量, 剔除大部分窗口, 对遗留匹配窗口再求取 HD, 找到此级的匹配点。中间级别上用 HD 作为相似准则进行匹配。在最大尺度上, 为提高匹配精度, 采用基于灰度的方法, 以交互方差为相似准则, 找到精确匹配点。为了降低各个级别上的运算量, 本文推导, 采用了一系列快速运算。经实验验证, 提出的匹配方法快速, 精确, 有助于飞行器导航系统的工程实现。

参 考 文 献

- [1] Brown L G. A survey of image registration techniques[J]. *ACM Computing Surveys*, 1992, 24(4): 325-376.
- [2] Candocia F. A similarity measure for stereo feature matching[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1997, 6(10): 1460-1464.
- [3] Dai Xiaolong and Khorram S. A feature-based image registration algorithm using improved chain-code representation combined with invariant moments[J]. *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2351-2362.
- [4] Pluim J P W, Maintz J B A, and Viergever M A. Mutual information matching in multiresolution contexts[J]. *Image and Vision Computing*, 2001, 19(1): 45-52.
- [5] He Ren-jie and Narayana P A. Global optimization of mutual information: Application to three-dimensional retrospective registration of magnetic resonance images[J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2002, 26(4): 277-292.
- [6] Yacov Hel-Or and Hagit Hel-Or. Real-time pattern matching using projection kernels[J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(9): 1430-1445.
- [7] Huttenlocher D P, Klanderman G A, and Rucklidge W J. Comparing images using the Hausdorff distance[J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, 15(10): 850-863.
- [8] Kwon Oh-kyu, Sim Dong-gyu, and Park Rae-hong. Robust Hausdorff distance matching algorithm using pyramidal structure[J]. *Pattern Recognition*, 2001, 34(7): 2005-2013.
- [9] 于秋则. 合成孔径雷达(SAR)图像匹配导航技术研究. [博士论文], 华中科技大学, 2004.
- [10] 王东峰, 邹谋炎. 基于最大化对齐度的多模态图像自动配准[J]. *电子与信息学报*, 2003, 25(6): 755-762.
Wang Dong-feng and Zou Mou-yan. Automatic registration of multi-modal images based on the maximization of the alignment metric[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(6): 755-762.
- [11] 时永刚, 刘小军, 王东峰, 等. 多模态图像配准的配准测度和性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2004, 26(11): 1706-1713.
Shi Yong-gang, Liu Xiao-jun, and Wang Dong-feng, et al. Performance analysis of registration measures of multi-modal image registration[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(11): 1706-1713.
- [12] 李弼程, 彭天强, 彭波. 智能图像处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 261-262.
Li Bi-cheng, Peng Tian-qiang, and Peng Bo. Intelligent Image Processing Technique[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 261-262.
- [13] 于秋则, 程辉, 柳建, 等. 基于改进的 Hausdorff 测度和遗传算法的 SAR 图像与光学图像匹配[J]. *宇航学报*, 2006, 27(1): 130-134.
Yu Qiu-ze, Cheng Hui, Liu Jian, et al. Matching SAR image to optical image using modified Hausdorff distance and genetic algorithms[J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(1): 130-134.

范俐捷: 女, 1982年生, 博士生, 研究方向为图像解疑、图像匹配和图像配准。

高 鑫: 男, 1966年生, 研究员, 研究方向为图像解疑、图像配准、自动目标识别。

王岩飞: 男, 1963年生, 研究员, 研究方向为数字信号处理和微波成像技术。