

文章编号:1000-6893(2010)03-0553-11

景象匹配辅助组合导航中景象区域适配性研究进展

沈林成¹, 卜彦龙^{1,2}, 徐昕¹, 潘亮¹

(1. 国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

(2. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

Research on Matching-area Suitability for Scene Matching Aided Navigation

Shen Lincheng¹, Bu Yanlong^{1,2}, Xu Xin¹, Pan Liang¹

(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of

Defense Technology, Changsha 410073, China)

(2. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

摘 要: 对景象匹配辅助组合导航的关键技术之一——景象区域适配性技术的基本模型、国内外发展现状以及目前有待于继续完善的若干问题进行综述。首先对景象区域适配性涉及的概念、评价指标、关键技术进行综合分析,剖析各环节技术内涵与相互关系,提出景象区域适配性研究的一般框架;指出目前国内外研究方法中存在的差异,将目标跟踪领域中与景象区域适配性相关的技术成果引入景象区域适配性研究框架中;分析多源图像匹配中景象区域适配性与传感器特性、匹配算法以及应用约束间的制约关系。综述旨在扩展和深化景象区域适配性研究的理论与方法。

关键词: 景象匹配辅助组合导航; 景象区域适配性; 匹配概率; 匹配精度; 特征指标; 综合特征量; 适配性评价; 约束关系

中图分类号: V249.32; TJ765.22; TP391.4

文献标识码: A

Abstract: This article provides a comprehensive survey of the basic research model, technology development, and main issues for improving matching-area suitability, which is one of the key issues of scene matching aided navigation. First, the main concepts, evaluating criteria and key sub-technologies are analyzed. Based on the summary of each sub-technology and their correlations, a general research frame is proposed. Differences of study methods between researchers in China and abroad are pointed out, and subsequently some related techniques in the field of target tracking are introduced into the research frame of matching-area suitability. Finally, for multi-source image matching, the restrictions between matching-area suitability and sensor characteristics, image registration algorithms, and application constraints are summarized. The survey is expected to help enlarge the scope of technologies and methods for matching-area suitability.

Key words: scene matching aided navigation; matching-area suitability; matching probability; matching precision; feature criterion; synthetical feature; evaluation; restriction

在采用景象匹配进行辅助定位的导航系统中,为了获得高精度的定位结果,除了对匹配算法性能有较高要求以外^[1-2],还必须考虑选择合适的匹配区域,这样才能使高性能的匹配算法“有的放矢”。按照特定准则在飞行航迹上选取特征明显、信息量大、可匹配性高、大小满足要求的景象区域作为匹配区的技术被称为景象区域适配性(Matching Suitability)^[3]技术,又称为景象区域可导航性(Scene Navigability)^[4]技术或者景象区

域匹配性能(Scene Matching Performance)^[5]估计技术,其目的是保证飞行过程中机上成像传感器所拍摄的实时图与预先存储于数据库中的基准图进行成功匹配,其研究方法是在基准图选择时通过对候选景象覆盖区域匹配性能的分析、预测和评价,以从这些区域中选出受环境影响小、经过合适处理能够呈现稳定匹配定位特征的区域作为基准图匹配区。

对景象区域适配性的研究是伴随着景象匹配在组合导航中应用的深入而发展起来的,它是遥感图像处理、成像传感器与组合导航 3 个领域的综合交叉,其核心问题是典型特征的提取与综合评价,其理论基础是图像处理、模式分类与多属性

收稿日期:2009-02-23; 修订日期:2009-05-22

基金项目:国家自然科学基金重点项目(60234030);湖南省自然科学基金(07JJ3127);国防科学技术大学优秀博士创新基金(B070301)

通讯作者:卜彦龙 E-mail:byl_nudt@yahoo.com.cn

决策,同时广泛涉及信息融合和优化理论,且与具体应用密切联系,是一项富有挑战性的技术。回顾该技术近二十年的发展过程,其最初是为评价可见光图像间匹配效能而提出的,J. A. Ratkovic 和 H. H. Bailey 等^[6-7]基于图像信号的约翰逊假设^[8](即基准图和附加噪声都是平稳各态历尽的高斯过程)所建立的性噪比和正确截获概率间的关系成为关于景象区域适配性较早的理论研究。随着景象匹配问题研究的深入,匹配区的自动选择逐渐发展成精确匹配中独立的关键技术^[9],目标跟踪与目标识别^[10-11]、地形分析^[12]、表面加工^[13]等众多领域的重要成果被借鉴进来,景象区域适配性的理论模型也在逐渐深化^[14-15]。同时,随着成像传感器与遥感技术的成熟与发展,景象匹配概念已不再局限于可见光图像间的匹配,红外图像、雷达图像等多源图像间的匹配都已被广泛纳入了景象匹配的范畴,相应地,景象区域适配性技术的研究内容也随之拓展^[16-17],理论逐渐深入,但同时又给该技术带来了新的难题和挑战。

通过对相关文献的分析应当注意到,国内外针对景象区域适配性问题研究的侧重点是存在区别的。虽然景象辅助组合导航中的匹配区选取问题最初由国外研究者提出^[6,18],但是直接针对这个问题作出大量系统研究的却是国内相关机构,并且迄今所发表的所有关于景象区域适配性的国内文献仍在沿续着这一思路;对照而言,国外相关研究却主要集中在目标跟踪背景下基于特定兴趣区域(Region of Interest, ROI)的特征提取与特征选择^[19-25],其中仅少量文献对相应 ROI 的选取及评价进行分析^[26-27],而关于组合导航定位背景下图像 ROI 选择的文献始终非常有限^[6,28-29]。此外,部分文献在研究匹配算法的同时,从区配精度的角度考虑过算法适应的区域^[30-31]。

组合导航匹配定位与目标跟踪中的匹配存在着差别,在分析现有景象区域适配性理论的同时,也要思考国内外对区域适配性研究方法存在差别的原因,以及考虑不同方法间的相互借鉴。为此,本文对景象区域适配性技术的进展进行综述,首先描述匹配区选取的一般过程,由此引出景象区域适配性评价指标的合理定义;然后通过对景象区域适配性诸关键技术研究现状的总结与分析,深入探讨国内外在这个领域内研究思路与方法的异同;接着剖析目前景象区域适配性研究所存在的问题,指出其技术发展方向;在此基础上,对全文内容进行总结。

1 景象匹配区选取过程描述

景象区域适配性分析和评价的最终目的是从原始基准图上选出符合给定匹配概率和匹配精度指标要求的特定尺寸的候选匹配区域图像作为适配基准图。过程中涉及 4 类不同属性的景象图,分别为原始基准图、候选匹配区域图、实时观测图以及适配基准图。原始基准图是对大面积区域进行成像并经过几何与辐射校正的景象图,常为卫星影像;所有的候选匹配区都对应于原始基准图中部分区域;为了对候选匹配区进行合理的适配性评价,需要引入对应于各个位置并符合特定尺寸要求的模拟实时观测图^[32];而适配基准图是指候选匹配区中满足景象区域适配性指标要求的一幅或若干幅景象图,即最佳候选匹配区。把适配基准图选取过程作为一个系统,则系统输入包括:原始基准图、匹配区的尺寸、实时图的尺寸、需要达到的适配性指标以及为模拟实时图或特征分析所必需的传感器成特性参数^[32-33];系统输出包括选取的匹配区及其相应的景象区域适配性指标估计值,匹配基准图选取过程如图 1 所示。

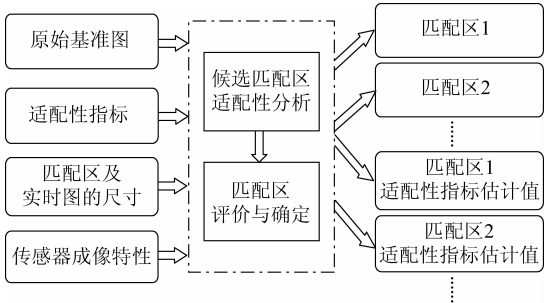


图 1 匹配区选取总体过程示意图
Fig. 1 Sketch map of suitable matching-area selection

由图 1 可知,匹配区选取的核心环节是候选匹配区域适配性分析,以及区域适配性指标评价和匹配区的确定。尽管不同文献的研究侧面各不相同,但综合来讲,用于选取匹配区的适配性研究可分为两大类:

(1) 直接基于图像信号相关计算的景象区域适配性研究

此类方法的基本思想是将匹配问题看做某个信号序列在由此信号序列变形而来的另一个信号序列中的定位问题,在对变形信号(实时图)参数作适当假设之后,利用两信号的相关度来衡量区域适配的性能。文献^[34]以理想的相关函数是白噪声为理论依据,提出了一种根据最小相关长度

来选择最佳匹配区的方法。文献[5]则将二维模拟实时图及原始基准图上与之对应的图像块按行(或列)扫描转化成一维序列,以传统的一维信号归一化互相关运算为基础建立了匹配概率估计模型。此类算法的优点是当参数确定后能够对景象区域适配性结果给出深入的理论评价,但问题同样也来自于参数模型的合理性和所需参数的可获取性。

(2) 基于综合特征量的景象区域适配性研究
此类方法的基本思想是通过对原始基准图像素点及区域特征进行综合描述,建立综合特征量与景象区域适配性指标间的关系。该类方法的适应性较广,是目前景象区域适配性研究的主流,本文将基于综合特征量的区域适配性分析和匹配区选择方法作为分析的重点。虽然各文献所选取的特征量及评价方法不尽相同,但此类方法的基本流程都可用图 2 来描述。

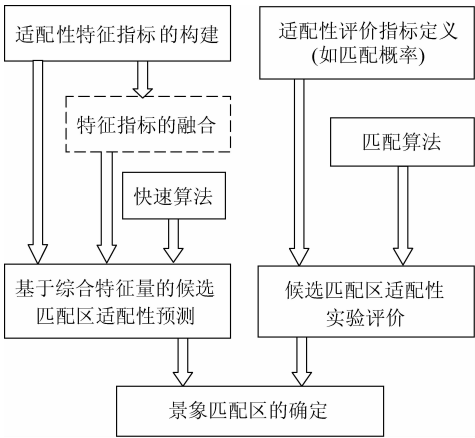


图 2 基于综合特征量的景象区域适配性分析基本流程
Fig. 2 Analysis process of matching-area suitability for scene matching based on synthetical features

2 景象区域适配性评价基本指标

在应用于组合导航的景象匹配中,匹配精度和匹配概率是评价某景象区域适配性能的基本指标。在保证匹配区高匹配概率的前提下不断提高匹配精度是景象区域适配性研究追求的目标。

2.1 匹配概率

匹配概率是针对特定尺寸的候选匹配区而言的,表示当相对较小的实时图处于该区域范围内时,其真实位置能够通过匹配算法正确检测的概率。易知匹配概率越高,则由该候选匹配区作为参考图进行匹配后所得的匹配结果越可靠。关于

匹配概率的确切定义,目前还未形成统一的标准^[35],但是文献[3]用捕获位置分布概率密度函数 $P_d(m,n)$ 来描述匹配位置的随机特性,然后结合各位置处的正确捕获概率,给出一种理论上较为合理的匹配概率定义,即

$$P_r = \sum_m \sum_n P_p(m,n) P_d(m,n) \tag{1}$$

式中: (m,n) 为飞行器在候选匹配区上的捕获位置; $P_d(m,n)$ 为对应于 (m,n) 处实时图窗口 w_{mm} 的捕获概率,且有 $P_d(m,n) = n_z / N_z$, 其中, N_z 为对实时图窗口 w_{mm} 做的试验总次数, n_z 为正确配准 w_{mm} 的次数; $P_p(m,n)$ 为飞行器在 (m,n) 处出现的概率。真实情况下,观测图处于任意位置 (m,n) 的概率可能不满足均匀分布,因而难以获得 $P_p(m,n)$ 的精确值,这为上述理论定义带来一定的应用困难。

目前应用最为普遍的匹配概率定义是文献[36]中给出的基于实验统计的配准率定义,其表达式为

$$P_{CMA} = \sum_{p \in CMA} CMP(p) / N_{CMA} \tag{2}$$

式中: $CMP(p)$ 为以与候选匹配区内某点 p 为中心的模板对应的实时图进行匹配试验的成功度; $\sum_{p \in CMA} CMP(p)$ 为所有试验成功匹配的次数; N_{CMA} 为试验总次数。配准率的定义建立在以相关匹配算法为基础,对大量仿真实验结果进行的统计之上,比较真实地反映了可见光图像间匹配时的区域适配特性,因此应用广泛^[35,37-38],但仍然存在着实时图仿真环境以及不同源图像匹配时采用相关算法的合理性问题。

2.2 匹配精度

匹配精度不仅是重要的景象区域适配性评价指标,它还是合理定义匹配概率的基础,只有满足所规定精度要求的匹配才被认为是成功的。

匹配精度常以像素为单位进行度量。在实时图与基准图不存在形变并且匹配采用相关算法时,实时图位置偏差可以用其上任意一点的位置偏差来表示,此时匹配精度可以简单地定义为匹配所得位置中心与理想位置中心的距离^[36]。但由于遥感景象中,往往会因各种全局和局部畸变造成实时图与基准图本身无法准确对应,这时匹配精度度量就变得较为复杂,目前典型的度量方法包括各个对应匹配控制点的均方差(CPE)度

量,以及基于控制点的检测点误差(TPE)度量^[39-40],但其前提是存在可靠的特征定位和准确的变换模型^[30]。

目前景象区域适配性研究中匹配精度的度量常采用前一种定义,这主要是由于现有景象区域适配性分析多基于相关匹配,实时图通过基准图添加噪声来模拟。随着景象区域适配性研究的深入,应当结合所采用匹配算法的特点和所提取的特征度量匹配精度。

3 景象区域适配性研究的关键技术

景象区域适配性分析具体过程虽然复杂,但从本质上讲就是确定符合区域适配性基本指标的ROI。ROI是指自然场景中的一些特殊区域,在这些区域内某种特征属性区别于其相邻的区域^[41],确定ROI包含两方面含义:其一为选择感兴趣的地理区域;其二为在确定的地理区域内通过特征变换等方法获取感兴趣的特征图像。国外公开文献中较为关注后一方面含义,并将其作为目标跟踪的一项关键技术;而国内研究则兼顾到了两方面内容,从这个角度讲国内对景象区域适配性的分析更为全面,只是更加深入的研究应当广泛借鉴国外目标跟踪技术中特征提取及特征分析方面的成果。

根据ROI的定义,研究景象区域适配性时首先应当选取能够全面反映区域适配性能的特征集并量化形成特征指标,然后对各种特征指标进行信息融合形成综合特征量,而对某一候选匹配区适配性的综合评价建立在对综合特征量的评价基础上,同时必须考虑减小区域适配性研究过程中大量大尺度图像数据处理的计算时间。据此,以综合特征量为主线,景象区域适配性研究的关键技术可划分为:综合特征量中特征指标的确定,这与ROI定义的第2部分相对应;基于综合特征量的景象区域适配性评价方法,这与ROI定义的第1部分相对应;以及对适配性评价方法有效性的度量。

3.1 综合特征量中特征指标的确定

(1) 特征指标选取原则

特征指标是综合特征量的基本因素,但每一项特征指标往往只能反映图像内区域适配性能的某一方面。景象区域适配性与匹配算法对特征关注的角度不完全相同,通常匹配算法关注的只是能够提高匹配精度的特征,但适配性除了要求达

到高的匹配精度外,还要达到高的匹配概率。为使综合特征量能够准确地而简洁地反映图像区域的适配性能,综合相关文献,以不同区域适配性目标为基础,提出选取特征指标时需要遵循的4项基本原则如下:

① 能够反映景象信息丰富的程度^[30]。景象匹配区要包含足够的信息才能够进行匹配定位,图像信息越丰富越有利于成功匹配,因此特征指标应当能够反映图像信息的多少,即反映景象区域中特征信息丰富的程度。

② 能够反映景象中稳定的特征^[42]。由于实时成像传感器的成像质量往往较差,细小的地物被噪声平滑后,地物影像会变得模糊,甚至消失,最终导致匹配失败,所以特征指标必须保证匹配区具有稳定的特性,即能够反映景象区域中稳定的特征。

③ 能够反映景象中地物的唯一性^[43]。所选匹配区内若有多个相似的明显地物,就会极大地降低匹配成功概率。因此,特征指标应当能够反映特征的唯一性,以选择不存在重复的匹配区域。

④ 能够反映景象中的明显特征^[30]。为达到高的匹配精度,匹配位置必须明显区别于所有的非匹配位置,因此相关峰值应当足够大,同时相关峰形状应当尖锐。

(2) 特征指标的分类选取

通过上述分析,景象区域适配性技术与目标跟踪技术在特征指标的选取层面上是一致的。目前各种景象区域适配性及目标跟踪算法中,构成综合特征量的特征指标有很多种,它们大都从图像信息的不同角度反映图像适配性能,特征指标的定义和计算方法也各不相同,没有形成严格的理论体系。为了构建合理的综合特征量分析体系,在确定特征指标时有必要将各种特征指标进行分类。特征指标分类方法可以有多种,比如按照不同源图像匹配所选取的特征类型进行分类,或者按照上述综合特征量选取原则进行分类。这些分类方法虽然直观,但是没有揭示特征指标的本质特性,受到文献[44]中将特征按照对图像信息理解的程度分为基本特征和合成特征的启发,下面借鉴图像理解的特征分层思想,对具有相近属性的特征指标进行分类分析,以求揭示特征指标的本质,将景象区域适配性特征指标分为3类。

① 基于像素单元的统计指标。

此类区域适配性特征指标是以图像像素为基元的统计量。其中,一些统计指标是从地形分析

领域中借鉴过来的,这些指标较为直观,包括全图方差或标准差^[35]、绝对值粗糙度^[41]、基于标准差的信噪比^[12]、坡度、地形/图像信息熵^[45-46]和造成失配的噪声阈值(或称抗噪能力)^[35]等。由于自然景物图像所存在的分形特性^[47-48],文献[13]、文献[49]和文献[50]给出另一系列从整体灰度及纹理变化的统计分布描述景象区域适配性的方法,包括基于共生矩阵的纹理特征指标^[51]、基于分数布朗运动随机模型的平均分形维数指标^[49]以及基于 W-M 分形函数的等方性系数指标^[13],这些指标较好地反映了图像整体特征,但是计算时需要依靠复杂的模型。除了从空间域中提取统计指标,还可以从频率域刻画景象灰度空间分布情况,如文献[3]提出的纹理频谱分布特征是在对图像傅里叶变换基础上,以不同的半径在圆域内对功率谱进行积分,以积分值与总信号能量的比值来反映纹理的粗细程度。

总体说来,基于像素单元的区域适配性特征指标多是针对原始基准图上整幅候选匹配区的统计量,而且未考虑到实时图与基准图的差别与联系,因此这类特征指标大多不能反映适配区域的稳定性和唯一性。

② 基于图像特征面的分析指标。

此类区域适配性特征指标是在图像特征面的基础上结合特征指标选取的各基本原则特点而建立的。图像特征面是个抽象的概念,通过预定准则将原始图变换成特征图,有助于增强感兴趣信息,同时排除干扰信息。目前景象区域适配性领域中广泛采用的特征面是基准图边缘图像和实时图与基准图的灰度相关面。

组合导航景象匹配的任务特点决定了不同传感器复杂的成像特性和实时图位置的随机性,因此基于边缘特征进行匹配较为稳定。边缘提取技术本身已经相当成熟,以边缘为基础提出了多种区域适配性特征指标,这些指标大多也是统计得出的,包括边缘图像方差、零交叉密度^[3]、边缘连续度^[51-52]、边缘密度^[53]和图像复杂度^[38]等。这些指标主要反映特征的丰富性和稳定性,却不能反映其唯一性。

合理的景象区域适配性分析还应当考虑两图像之间的关系,因此实时图与基准图灰度相关面也被视做描述图像间关系的抽象特征面。按照对匹配的作用,基于相关面的特征指标可以分为两类:反映匹配精确性的特征指标,以及反映匹配唯一性的特征指标。前一类特征指标具体包括互相

关值^[54]、相关长度^[55]、基于相关长度的独立像元数^[55]、相关面最高峰八邻域峰值比^[56]、相关面最高峰尖锐度^[56]、广义最高峰尖锐度^[17]、局部相关主峰曲率及尖锐度^[37]等;后一类特征指标具体包括自匹配系数^[55]、重复模式^[53]、次高峰与最高峰峰值之差、相关面次高峰与最高峰之比^[56]等。基于相关面的特征指标虽然能够稳定地反映匹配的正确性和精确性,但需要格外指出,相关面是通过各种灰度相关算法计算得出的,因而这些特征指标只适用于基于灰度(或区域)相关的匹配算法,而对于雷达图像匹配等需要基于图像复杂特征的匹配算法效果不佳^[57-58]。

与基于整幅候选匹配区像元统计的特征指标相比,基于抽象符号的特征指标多被限制在拟定的实时图尺寸的子景象区域内,文献[3]对计算尺度进行了定性分析,指出在候选匹配区上计算得到的是全局特征,而实时图属于基准图的局部,图像全局特征平滑了图像局部特征的差异,使得估计出的匹配性能与实际匹配性能存在较大差异,因此依靠基准图的局部统计特征对提高匹配性能非常重要。需指出,局部符号特征指标除了以实时图尺寸的子窗口为单元进行选择,还可以基于小窗口区域进行选择,如局部边缘密度、局部相关主峰曲率及尖锐度等^[37]。

③ 基于像面信息解释的特征指标。

这是从更高层面提出的一类特征指标,通过对判别区域进行信息解释,能够综合描述该匹配区域的适配特性,但同时这类指标也存在构造复杂,计算量大等问题。典型的信息解释特征指标有局部区域可跟踪度^[37],Gabor 小波特征向量^[38],及基于 Canny 算子的稳定强度^[17]等。局部区域可跟踪度指标首先基于窗口区域偏导函数构成特征显著性矩阵^[11],然后以此矩阵特征值来反映窗口的抗噪性和稳定性;Gabor 小波特征向量充分利用了 Gabor 小波刻画空域和频域纹理信息的能力,且方向和尺度可调节;基于 Canny 算子的稳定强度是在用 Canny 算子提取边缘和稳定地物分割之后,按照稳定强度定义^[59]构造的指标,能够反映特征的显著性。

目标跟踪中提出的部分特征指标同样符合区域适配性的需求。文献[26]在模板图与基准图间仅为高斯噪声的假设下,估计不同区域中斜方差矩阵,以平均误差的上界作为特征区域的选择指标,与文献[60]中基于角点评价的方法进行比较,基于模板匹配的特征指标不仅关注了角点信

息,同时也关注了非角点的纹理特性。文献[11]提出以二维变换矩阵的特征值作为衡量特征稳健性的指标,通过合理设置阈值可靠地跟踪角点、椒盐纹理等各种模式特征。

综合以上分析,表 1 给出典型特征指标的分类示意。

表 1 典型特征指标及其分类
Table 1 Classification of typical feature criteria

		按照特征指标选取原则			
		反映信息丰富程度	反映特征稳定程度	反映地物的唯一性	反映特征明显程度
按照理解过程	基于像素单元统计	地形/图像信息熵 ^[46] 、共生矩阵纹理特征 ^[51]	基于标准差的信噪比 ^[45] 、失配噪声阈值 ^[36] 、等方性系数 ^[13]		全图方差及标准差 ^[35] 、绝对值粗糙度 ^[11] 、坡度、平均分形维数 ^[49]
		频域指标			纹理频谱分布诸特征 ^[3]
		基于边缘面指标	零交叉密度 ^[3] 、边缘密度 ^[53] 、图像复杂度 ^[38]	边缘连续度 ^[51-52]	边缘图像方差
	基于特征面分析	基于相关面指标	互相关值 ^[54] 、相关长度 ^[55] 、基于相关长度的独立像元数 ^[55] 、相关面最高峰八邻域峰值比 ^[56] 、相关面最高峰尖锐度 ^[56] 、广义最高峰尖锐度 ^[17]	自匹配系数 ^[55] 、重复模式 ^[53] 、次高峰与最高峰峰值之差、相关面次高峰与最高峰之比 ^[56]	局部相关主峰曲率、局部相关主峰尖锐度 ^[37]
	基于像面信息解释		局部区域可跟踪度 ^[37] 、Gabor 小波特征向量 ^[38] 、基于 Canny 算子的稳定强度 ^[17] 、模板匹配平均误差上界 ^[26] 、二维变换矩阵的特征值 ^[11]		

3.2 基于综合特征量的景象区域适配性评价

景象区域的适配性是受多方面因素共同影响的,单独的特征指标只能反映图像某一方面的适配特点,因此对景象区域适配性的合理评价应当基于对图像中多个特征指标的综合评价,即需要构建能够全面反映适配性的综合特征量。但应指出,综合特征量并不总是以具体的函数形式给出,具有显式和隐式之分,目前各种基于综合特征量的适配性评价方法采用的理论不同,但总体而言都可以包含在多属性决策和模式分类两类基本理论体系中。

(1) 基于多属性决策理论的景象区域适配性评价

这类评价方法的基本思想是将适配性评价过程抽象成一个决策过程,将各特征指标作为决策的基本属性,通过特定的决策模型构造选好函数组成综合特征量,这类方法中综合特征量以显式选好指标的形式给出,其计算值与区域适配性评价结果间呈同态关系。

就多属性决策问题本身而言,其理论已经发展得较为成熟,按照决策方法采用的基本模式进行分类,可分为:以基于属性序(与基数)偏好信息的决策及基于方案偏好信息的决策为代表的确定

性多属性决策方法^[61],以分层分析为代表的定性定量结合的决策方法^[62],以及基于模糊理论的模糊性多属性决策方法^[63]。

但是总体而言,目前基于多属性决策理论的景象区域适配性评价方法尚限于较为简单的基于属性序(或基数)偏好信息的确定性决策方法,将属性的序或基数偏好以权向量来表示,典型算法有:区域内各特征指标极值的简单加权^[3,56],多个特征指标的简单乘积^[32],通过正交实验设计获得各全局(或统计)特征指标加权系数,通过反馈修正获取加权系数^[64],利用修正 D-S 理论等^[45]。确定权向量时,按照其代表属性的性质,可以分为反映属性相对重要性的重要性权、反映各属性包含信息量的信息量权以及重复性权和可靠性权等。可以采用相邻比较法、两两赋值法、二项系数法和最小二乘法等方法获取重要性权向量;可以通过变异系数法和熵法等方法来获得信息量权向量^[65]。

尽管通过确定权向量可以获得一个综合指标,但是要注意特征指标间存在无公共量纲、变化范围不同、非独立性甚至对抗性等问题,而且由于不同特征指标性质存在差异,用简单的权向量反映属性之间复杂关系并不完全合理。虽然在决策之前通过线形变换、S 形变换等可以对属性值进行规范化

(或归一化)处理,但仍解决不了多特征指标对决策不同层次的影响,因此分层分析法在景象区域适配性分析过程中的作用也十分重要,文献[17]分别通过边缘密度筛选、概率曲面估计和自匹配系数精选 3 层选择,在不同层次中分别兼顾了信息量、稳定性和唯一性,获得了较好的适配区选择结果。

从已掌握文献看,模糊决策技术在景象区域适配性研究中的应用尚不深入,但应注意到模糊性多属性决策方法对于解决特征指标(即属性)值和权重值未能明确给出的一类景象区域适配性问题应当是有所裨益的。

(2) 基于模式分类理论的景象区域适配性评价

这类评价方法的基本思想是将各个特征指标值作为感知信息,按照预先选定的分类准则设计或者训练分类器,从而将匹配概率估计问题转化为对像素或区域的分类问题,这类方法中综合特征量被隐式地反映在分类过程中。

模式分类的基本过程是通过有监督或者无监督的训练学习来获得对象类别的本质属性,然后将分类对象按照其本质属性进行正确归类^[66]。模式分类在景象区域适配性评价中应当有广泛的应用前景。因为在目前对影响区域适配性的本质因素把握并不十分全面的情况下,特征指标的选取往往带有一定主观性,通过学习和训练分类器参数,可以把先验知识很好地融合到基于特征指标的区域适配性评价中,从而有利于深入分析对适配结果造成影响的本质因素。

模式分类技术可以不同的方式应用到景象区域适配性评价中,包括实验分类方式、直接分类方式和复杂分类方式。最简单的分类方式是在已知样本区域适配性评价结果的前提下,通过针对各特征指标样本值的实验,建立匹配概率和特定特征指标的函数关系,给出适配的特征区间,将各项指标都满足区间的区域作为适配区^[53],但这种方法的假设前提难以满足,且存在由于特征指标选择不合理带来奇异点的问题;直接分类方式是将区域直接划成适合匹配与不适合匹配的二分问题,如文献[37]提出的采用 Mumford-Shah 模型,通过水平集(Level-Set)曲线演化,得到对匹配稳定局部区域和不稳定局部区域两个集合的最优划分;复杂分类方式则基于典型区域的特征,训练不同的分类器参数,然后以与某候选适配区特征参数最接近的分类器参数作为该区域的近似分类器,进行特征分类与区域适配性评价,基于这种思

想,文献[38]中采用支持向量机(SVM)估计分类参数,文献[35]中利用 Fisher 分类器设计错分率最小的阈值,都得到了较好的结果。

目前所提出的基于多属性决策理论的景象区域适配性评价方法和基于模式分类理论的景象区域适配性评价方法之间是相互独立的,但是如果从综合层面看待景象区域适配性评价问题,则应当在多属性决策和模式分类两种方法之间建立联系,如将决策充分应用到模式分类过程之中可能获得更好的分析结果^[67]。

3.3 适配性评价方法有效性的度量

景象区域的适配性以匹配概率来衡量,但是在选择景象适配区域时,不可能事先通过大量匹配实验计算出匹配概率。我们希望提出的适配性评价方法能够对景象区域的适配性作出准确估计,因此必须对评价方法的有效性进行度量。

对于基于多属性决策理论的适配性评价方法,希望将图像适配性的优劣以综合特征量的计算值来反映。如果综合特征量构建合理,则其计算值与图像适配性评价结果间呈同态关系。由若干已知匹配概率的图像组成测试图像库,将该综合特征量作用于测试图像库中各个图像得到的计算值和各图像对应匹配概率构成曲线的单调程度作为该综合特征量有效性的度量值,也可以该综合特征量所选适配图像的平均匹配概率作为有效性度量函数。

对于基于多属性决策理论的适配性评价方法,由于综合特征量隐式地反映在分类过程中,无法通过综合特征量计算值建立评价方法与匹配概率的直接关系。此时应当以一个较大范围的测试区域内所选适配区域的平均匹配概率作为适配性评价方法有效性的度量。

4 有待完善的若干问题

尽管近年来面向组合导航的景象区域适配性研究得到了迅速发展,但由于景象区域适配性分析涉及到包括景象匹配、传感器特性和组合导航在内的多个领域和学科,因此其发展也受到相关学科和技术发展的限制。作为一个研究领域,景象区域适配性的理论框架和实现方法均需要得到进一步完善。

(1) 更为合理的景象适配性研究理论框架

整体而言,目前景象区域适配性研究基本流程采用的是开环过程(如图 2 所示),特征指标选

择的主观性较大。虽然在基于综合特征量的区域适配性评价方法设计过程中,有人引入反馈以修正加权系数^[64],或者通过学习和训练获得评价函数^[38],但这都是在所采用的特征指标被人为确定的前提下进行的,因此属于局部范围的闭环。而要解决不同原始基准图对应不同的特征指标,以及如何从众多特征指标中选取最优的特征组合等问题,则需要一个整体的闭环反馈过程。

实际上,目标跟踪及目标识别等领域对于这些问题已经给出了一些有借鉴意义的成果,例如:利用基于二叉树协进化的特征选择与组合方法显著提高目标识别的成功率^[68],基于目标特征模型评估各种特征集合的效能^[69],基于最大搜索效率对特定图像中各种特征的匹配性能动态排序^[21],对于不同图像动态选择特征集来计算图像相似性^[22]。可以预测,把这些方法应用于景象适配性研究中,将有利于景象区域适配性研究理论的进一步完善。

(2) 适配性特征指标的构建应与多源图像匹配算法及传感器特性相结合

目前除可见光图像外,各种波段的合成孔径雷达(SAR)图像及红外图像都已被广泛地应用于景象匹配辅助组合导航。一个景象区域是否适合匹配与所采用的匹配算法有关,如基于灰度相关面的特征指标只适用于可见光图像或某些同源图像匹配的场所,而对于多源图像匹配却不适合。多源图像间主要基于典型特征进行匹配,近年来基于互信息的算法也广泛地应用于多源遥感图像匹配中并取得了良好的效果^[30,70]。为了增强景象区域适配性算法的适应性,当基准图和实时图来自不同图源时,适配性特征指标的构建和选择应当充分结合多源匹配算法的特点,若以角点作为典型特征进行匹配,角点密度与分布等统计指标就应当作为适配性特征指标,若采用互信息匹配时,可以用互信息特征面代替灰度相关面来定义各种区域适配性特征指标。

传感器成像特性也是构建和选择适配性特征指标应当考虑的内容。传感器成像特性与图像特征密切相连,但目前除少数文献考虑传感器噪声对图像信噪比的影响以生成模拟实时图外,并未深入结合传感器成像过程。实际上,区域适配性也是针对特定成像传感器而言的,比如 SAR 成像会因地形起伏产生复杂的几何畸变,因此地形起伏剧烈的地区就不适合用于 SAR 景象匹配,尽管这些区域能够表现出丰富的纹理信息,是可见光

图像匹配理想的适配区域。进一步研究中,应当将传感器成像特性对图像的影响与适配性评价准则的设计联系起来,如在构建 SAR 适配性特征指标时,不仅要考虑匹配特征,还要考虑相干斑噪声对特征的影响,不仅从图像像面信息角度来考虑区域适配性,还要根据地形起伏情况及校正的难易程度判断景象区域是否适配^[71]。

(3) 景象区域适配性研究与应用约束进一步结合

面向应用永远是景象区域适配性研究的目标,因此有意义的景象区域适配性研究结果应当结合应用中提出的具体约束,包括飞行器特性对图像分辨率的影响、实时图尺寸与候选适配区尺寸的合理确定等,这些是景象区域适配性研究的重要前提,对其进行分析有利于将景象区域适配性研究结果向实际应用的转化。另外,专家经验是指导选取优良匹配区的重要先验知识,进一步研究同样应结合这方面信息。

5 结 论

景象区域适配性技术是面向组合导航的景象匹配中的一项关键技术,该技术经历了若干年的发展,取得了众多的理论成果,但仍然存在较大的理论研究空间,同时随着高分辨率雷达及超光谱等技术的广泛应用,新的问题和难点不断涌现。本文结合已发表的文献对景象区域适配性技术目前的研究成果进行阶段性的总结和评述,包括景象区域适配性基本评价指标、理论框架、关键技术以及有待进一步完善的理论和应用问题,希望为面向应用的景象区域适配性技术的发展作铺垫。

参 考 文 献

[1] Bustos J P, Donoso F, Guesalaga A, et al. Matching radar and satellite images for ship trajectory estimation using the Hausdorff distance [J]. IET Radar Sonar Navig, 2006, 1(1): 50-58.

[2] Jie M, Huang X L. The vision navigation based on lunar surface control point registration[C]// Chinese Control Conference. 2006: 2236-2239.

[3] 赵锋伟, 刘扬, 沈振康, 等. 景象匹配评估系统中图像特征指标的选择(一)图像统计特征[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(4): 265-269.

Zhao Fengwei, Liu Yang, Shen Zhenkang, et al. Selection of image feature set in performance evaluation system scene matching algorithm (Part I: image statistic feature) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(4): 265-269. (in Chinese)

- [4] 肖轶军, 丁明跃, 周成平. 基于捕获位置分布的导航参考图适配性分析及快速计算[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(5): 26-29.
Xiao Yijun, Ding Mingyue, Zhou Chengping. Suitability analysis of reference map and fast calculation algorithm based on capture position distribution[J]. Infrared and Laser Engineering, 1999, 28(5): 26-29. (in Chinese)
- [5] 张国忠, 沈林成, 常文森, 等. 互相关景象匹配系统的正确匹配概率研究[J]. 宇航学报, 2002, 23(1): 30-33.
Zhang Guozhong, Shen Lincheng, Chang Wensen, et al. Research on acquisition probability of cross-correlation scene matching systems[J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(1): 30-33. (in Chinese)
- [6] Ratkovic J A. Performance considerations for image matching systems[R]. AD-A082084, 1979.
- [7] Bailey H H, Blackwell F W, Lowery C L, et al. Image correlation, Part I: simulation and analysis[R]. AD-A03665, 1976.
- [8] Johnson M W. Analytical development and test results of acquisition probability for terrain correlation devices used in navigation systems[C]//AIAA 10th Aerospace Sciences Meeting. 1972: 1-9.
- [9] 沈振康. 地形(地图)匹配系统[M]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 1984.
Shen Zhenkang. Terrain (map) matching system[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1984. (in Chinese)
- [10] Hall E L, Davies D L, Casey M E. The selection of critical subsets for signal, image, and scene matching[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1980, 2(4): 313-322.
- [11] Shi J B, Tomasi C. Good features to track[C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 1994: 593-600.
- [12] 李德华, 杨灿, 胡昌赤. 地形匹配区选择准则研究[J]. 华中理工大学学报, 1996, 24(2): 7-8.
Li Dehua, Yang Can, Hu Changchi. On the selection criterion for a terrain matching field[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1996, 24(2): 7-8. (in Chinese)
- [13] 张国忠, 沈林成, 常文森. 基于等方性系数的地形可导航性的方向性研究[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(4): 102-106.
Zhang Guozhong, Shen Lincheng, Chang Wensen. Isotropy-coefficient based directional study of terrain navigability[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000, 22(4): 102-106. (in Chinese)
- [14] Goldenberg R, Kimmel R, Rivlin E, et al. Fast geodesic active contours[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(10): 1467-1475.
- [15] Tian X Z, Hu T S. A method of debris image segmentation based on SVM[C]//Proceedings of International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences. 2006: 307-311.
- [16] 李俊山, 李旭辉, 罗蓉, 等. 不同传感器图像的景象匹配区选取准则研究[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(1): 210-213.
Li Junshan, Li Xuhui, Luo Rong, et al. Research on selection criterion of scene matching field for different sensors[J]. Microelectronics and Computer, 2007, 24(1): 210-213. (in Chinese)
- [17] 江标初, 陈映鹰. 层次景象匹配区选取准则[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(6): 830-833.
Jiang Biaochu, Chen Yingying. A rule of selecting scene matching area[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(6): 830-833. (in Chinese)
- [18] Ratkovic J A, Conrow E H. Almost everything one needs to know about image matching systems [R]. AD-A100024, 1980.
- [19] Plaza A, Le M J, Netanyahu N S. Automated image registration using morphological region of interest feature extraction[C]//Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2007: 421-424.
- [20] Toews M, Arbel T. Entropy-of-likelihood feature selection for image correspondence[C]//Proceedings of 9th IEEE International Conference on Computer Vision. 2003, 2: 1041-1047.
- [21] Cham T J, Rehg J M. Dynamic feature ordering for efficient registration[C]//Proceedings of 7th IEEE International Conference on Computer Vision. 1999, 2: 1084-1091.
- [22] Meng Y, Chang E, Li B T. Enhancing DPF for near-replica image recognition[C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2003, 2: 416-423.
- [23] Lin H J, Kao Y T, Yen S H, et al. A study of shape-based image retrieval[C]//Proceedings of 24th International Workshop on Distributed Computing Systems. 2004: 118-123.
- [24] You J, Dillon T, Pissaloux E. Feature guide: a statistically based feature selection scheme[C]//Proceedings of International Conference on Image Processing. 2001, 2: 717-720.
- [25] Olson C F. Maximum-likelihood image matching [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(6): 853-857.
- [26] Kaneko T. Feature selection for reliable tracking using template matching[C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2003: 796-802.
- [27] Poon C, Wong D C M, Shen H C. A new method in locating and segmenting palmprint into region-of-interest[C]//Proceedings of 17th International Conference on Pattern Recognition. 2004, 4: 533-536.
- [28] Jarrad G A, McMichael D W. Remote sensing with spotter[C]//Proceedings of IDC99. 1999: 413-418.

- [29] Lucas B D, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[C]//International Joint Conference on Artificial Intelligence. 1981: 674-679.
- [30] Zitova B, Flusser J. Image registration methods: a survey[J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(11): 977-1000.
- [31] Chalermwat P. High performance automatic image registration for remote sensing[D]. Fairfax: George Mason University, 1999.
- [32] 付文兴, 王建民, 金善良. 一种实用的景象匹配区选择方法[J]. *宇航学报*, 2003, 24(4): 348-353.
Fu Wenxin, Wang Jianmin, Jin Shanliang. A practical method for selecting scene matching area[J]. *Journal of Astronautics*, 2003, 24(4): 348-353. (in Chinese)
- [33] 刘扬, 姚娅媚, 李兵, 等. 景象匹配置信度计算方法的实验分析[J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(5): 383-386.
Liu Yang, Yao Yamei, Li Bing, et al. Experimental analyzing on calculation of confidence level for image matching[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(5): 383-386. (in Chinese)
- [34] 王晓静, 徐大新, 许高升. 用于信号、图像和景象匹配的特征区选择方法[J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(5): 378-381.
Wang Xiaojing, Xu Daxin, Xu Gaosheng. Subset selection in signal, image and scene matching[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(5): 378-381. (in Chinese)
- [35] 杨昕, 杨新. 匹配概率估计方法[J]. *红外与激光工程*, 2003, 32(3): 231-233.
Yang Xin, Yang Xin. Approach to estimation of matching probability[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(3): 231-233. (in Chinese)
- [36] 李俊, 杨新, 朱菊华, 等. 一种选择适配区的算法[J]. *数据采集与处理*, 2000, 15(4): 495-499.
Li Jun, Yang Xin, Zhu Juhua, et al. Approach to selection of suitable-matching area from reference image[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2000, 15(4): 495-499. (in Chinese)
- [37] 李俊, 杨新, 杨莉. 基于简化 Mumford-Shah 模型的导航基准图适配区分割方法[J]. *自动化学报*, 2004, 30(1): 45-56.
Li Jun, Yang Xin, Yang Li. Mumford-Shah model based critical subset segmentation from navigation reference images[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(1): 45-56. (in Chinese)
- [38] 曹国, 杨新. 基于 Gabor 滤波器与支持向量机的景象匹配概率估计方法[J]. *上海交通大学学报*, 2006, 40(3): 485-489.
Cao Guo, Yang Xin. The estimation of scene matching probability using Gabor filters and support vector machine[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(3): 485-489. (in Chinese)
- [39] Joseph V H, David J H, Derek L G H. Medical image registration[M]. Baton Rouge, Florida: CRC Press, 2001: 117-139.
- [40] Fitzpatrick J M, West J B. Predicting error in rigid-body point-based registration[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1998, 17(5): 694-702.
- [41] Chauvin A, Herault J, Marendaz C, et al. Natural scene perception: visual attractors and images processing[C]//Proceedings of 7th Workshop on Neural Computation and Psychology. 2001: 236-247.
- [42] Meth R, Chellappa R. Stability and sensitivity of topographic features for SAR target characterization[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. 1997, 3: 464-467.
- [43] Caves R G, Harley P J, Quegan S. Registering SAR images to digital map data using a template matching technique[C]//Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1991: 1429-1431.
- [44] Zhou X S, Huang T S. Image retrieval: feature primitives, feature representation, and relevance feedback[C]//Proceedings of IEEE Workshop on Content-based Access of Image and Video Libraries. 2000: 10-14.
- [45] 曹治国, 马怡伟, 邹腊梅, 等. 基于特征的景象匹配置信度融合计算[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(9): 18-20.
Cao Zhiguo, Ma Yiwei, Zou Lamei, et al. Fusion calculation of confidence level for image matching based feature[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition*, 2004, 32(9): 18-20. (in Chinese)
- [46] 李雄伟, 刘建业, 康国华. 熵的地形信息分析在高程匹配中的应用[J]. *应用科学学报*, 2006, 24(6): 608-612.
Li Xiongwei, Liu Jianye, Kang Guohua. Analysis of terrain information using elevation matching based on entropy[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2006, 24(6): 608-612. (in Chinese)
- [47] Wornell G W. Wavelet-based representations for the $1/f$ family of fractal processes[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1993, 81(10): 1428-1450.
- [48] Barton R J, Poor H V. Signal detection in fractional Gaussian noise[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1988, 34(5): 943-959.
- [49] 李俊, 杨新, 朱菊华, 等. 用于精确定位的最佳匹配区选择分形法[J]. *上海交通大学学报*, 2001, 35(2): 305-308.
Li Jun, Yang Xin, Zhu Juhua, et al. Selection of suitable matching area by fractal based approach for high precision location[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2001, 35(2): 305-308. (in Chinese)
- [50] 邹宁, 柳健, 周曼丽. 基于分形的地形分类技术及其在导航中的应用[J]. *华中理工大学学报*, 1999, 27(5): 3-5.
Zou Ning, Liu Jian, Zhou Manli. Technology of terrain classifying based on fractal and its application in navigation[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Tech-*

- nology, 1999, 27(5): 3-5. (in Chinese)
- [51] Sharma M, Singh S. Evaluation of texture methods for image analysis[C]// Proceedings of 7th Australian and New Zealand Intelligent Information Systems Conference. 2001: 117-121.
- [52] Xiao Y J, Ding M Y, Zhou C P. Matching suitability analysis of reference map for scene-matching-based navigation [C]// Proceedings of International Symposium on Multi-spectral Image Processing. 1998: 100-103.
- [53] 杜菁, 张天序. 景象匹配区的选择方法[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(4): 368-369.
- Du Jing, Zhang Tianxu. Selection of matching region for scene matching [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(4): 368-369. (in Chinese)
- [54] 刘扬, 赵峰伟, 金善良. 景象匹配区选择方法研究[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(1): 168-170.
- Liu Yang, Zhao Fengwei, Jin Shanliang. New method of selecting scene matching reference map[J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(1): 168-170. (in Chinese)
- [55] 马龙, 缪栋, 沈绪榜. 基于图像自匹配性的景象匹配区的选定准则[J]. 上海航天, 2001(1): 50-54.
- Ma Long, Miu Dong, Shen Xubang. A selection criterion of scene matching field based on image self-matching[J]. Aerospace Shanghai, 2001(1): 50-54. (in Chinese)
- [56] 赵峰伟, 刘扬, 沈振康, 等. 景象匹配评估系统中图像特征指标的选择(二)相关面统计特征[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(5): 350-352.
- Zhao Fengwei, Liu Yang, Shen Zhenkang, et al. Selection of image feature set in performance evaluation system of scene matching system Part II: correlation plane statistic feature[J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(5): 350-352. (in Chinese)
- [57] Li H, Manjunath B S, Mitra S K. Optical-to-SAR image registration using the active contour model[C]// Proceedings of 27th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. 1993, 1: 568-572.
- [58] Ali M A, Clausi D A. Automatic registration of SAR and visible band remote sensing images[C]// Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2002, 3: 1331-1333.
- [59] 江标初. 雷达景象可匹配性及相关问题研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- Jiang Biaocho. Study on matching probability of radar scene and relative problems [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [60] Smith S M, Brady J M. SUSAN—a new approach to low level image processing[J]. International Journal on Computer Vision, 1997, 23(1): 45-78.
- [61] Ahn B S, Park K S. Comparing methods for multiattribute decision making with ordinal weights[J]. Computers and Operations Research, 2008, 35(5): 1660-1670.
- [62] Yakowitz D S, Wedwick S J, Wertz M A. Computing multiple attribute value function ranges under a hierarchy of the attributes with application to environmental decision making[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 1997, 1: 323-328.
- [63] Fan Z P, Ma J, Zhang Q. An approach to multiple attribute decision making based on fuzzy preference information on alternatives[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 131(1): 101-106.
- [64] 韩先锋, 李俊山, 孙满囤. 一种新的选取最佳景象匹配区准则[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(12): 149-153.
- Han Xianfeng, Li Junshan, Sun Mantun. A new rule for selecting the best scene-matching region [J]. Microelectronics and Computer, 2004, 21(12): 149-153. (in Chinese)
- [65] 魏世孝, 周献中. 多属性决策理论方法及其在 C3I 系统中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- Wei Shixiao, Zhou Xianzhong. The application of multi-attribute theory in C3I systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [66] Richard O D, Peter E H, David G S. Pattern classification [M]. 2nd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2000.
- [67] Horiuchi T. Decision rule for pattern classification by integrating interval feature values [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(4): 440-448.
- [68] Lin Y Q, Bhanu B. Evolutionary feature synthesis for object recognition[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2005, 35(2): 156-171.
- [69] Jain A, Zongker D. Feature selection: evaluation, application, and small sample performance[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(2): 153-158.
- [70] Xie H, Pierce L E, Ulaby F T. Mutual information based registration of SAR image[C]// Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2003, 6: 4028-4031.
- [71] Takeuchi S. Image registration between SAR and TM data using DEM and slant range information[C]// Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1993, 3: 1351-1353.

作者简介:

沈林成(1965—) 男,教授,博士生导师。主要研究方向:任务规划,模式识别与智能系统。

Tel: 0731-84576342

E-mail: lcshen@nudt.edu.cn

卜彦龙(1979—) 男,博士研究生。主要研究方向:图像处理与精确制导。

E-mail: byl_nudt@yahoo.com.cn

徐昕(1974—) 男,博士,副研究员。主要研究方向:智能控制,机器学习,智能机器人。

(编辑:张利平,孔琪颖)