

基于支持向量机的 地面目标自动识别技术

Automatic Recognition of
Ground Target Based on Support Vector Machine

宋小杉 蒋晓瑜 胡双演 方林波 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

基于支持向量机的地面 目标自动识别技术

宋小杉 蒋晓瑜 胡双演 方林波 著



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书结合多传感器信息融合平台和支持向量机理论,探索了地面目标自动识别的可行方法。书中基于大量实验数据对 SVM 数据库构建、模型优化、特征选择等关键技术进行了深入研究,提出了新方法。

本书可供从事支持向量机、机器学习、人工智能、图像处理、目标识别等方向的科研人员参考,也可作为高等院校相关专业教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

基于支持向量机的地面目标自动识别技术/宋小杉等著. —北京:国防工业出版社,2018. 7

ISBN 978 - 7 - 118 - 11684 - 7

I. ①基… II. ①宋… III. ①向量计算机—地面—目标—自动识别 IV. ①TP38②TP391. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 185751 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京虎彩文化传播有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 8 字数 107 千字

2018 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1000 册 定价 56.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

地面目标自动识别是学术界研究的热点和难点。由于地面环境多变、背景复杂,传统的单传感器战场侦察系统远远不能满足侦察需求,从而发展出了一系列多传感器融合识别的理论和方法。多传感器融合识别分为数据级、特征级和决策级三个层级。

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)是一种特征级融合的机器学习方法,广泛应用于分类识别、回归估计等领域。相对于深度学习,SVM具有严格的理论基础,有效的小样本学习能力和优秀的泛化能力,更适用不具有大样本的场景。

本书以可见光、红外复合成像系统为多传感器信息融合平台,以支持向量机为技术手段,探索了地面目标自动识别的可行方法。共分为8章:第1章介绍了地面目标融合识别的相关研究背景;第2章介绍了统计学习和支持向量机相关理论;第3章基于实验采集图像,参考 Libsvm 进行了特征库构建;第4章研究了支持向量机模型选择方法,提出了基于类平均间距和改进 LOO 误差上界的二步选择方法;第5章研究了支持向量机特征选择方法,提出了基于改进 LOO 误差上界和基于最大类间距两种特征选择方法;第6章提出了基于增后向量的 SVM,是一种从特征库修正的角度对 SVM 进行优化的方法;第7章利用 VC++6.0 对书中所提理论和算法进行了编程实现;第8章对本书的总结和展望。

由于作者水平有限,书中难免出现错漏,欢迎读者批评指正。

作者

2018年3月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 多传感器信息融合	5
1.2.1 定义与一般模型	5
1.2.2 信息融合的主要技术和方法	7
1.3 基于多传感器信息融合的目标识别	7
1.3.1 融合识别的三个层次	8
1.3.2 融合识别研究现状	10
1.4 支持向量机的发展和研究现状	13
第2章 统计学习与支持向量机	16
2.1 统计学习理论	16
2.1.1 机器学习中的期望风险与经验风险	16
2.1.2 VC 维理论	18
2.1.3 结构风险最小原则	21
2.2 支持向量机	22
2.2.1 线性可分最优分类	22
2.2.2 线性不可分最优分类	25
2.2.3 SVM 的一般形式	27
2.2.4 常用的核函数	30
2.2.5 应用 SVM 的一般步骤	30
2.2.6 SVM 多类分类	31

第3章 基于支持向量机的目标特征库的建立	33
3.1 UCI 开放实测特征库介绍	33
3.2 图像的特征提取	36
3.2.1 图像不变矩	37
3.2.2 主成分分析	40
3.3 低分辨率图像特征库的组建及 SVM 识别性能比较	40
3.3.1 低分辨率图像特征库的组建	40
3.3.2 基于三种特征库的 SVM 识别性能比较	43
3.4 高分辨率图像特征库的组建及 SVM 识别性能比较	44
3.4.1 高分辨率图像特征库的组建	44
3.4.2 基于两种特征库的 SVM 识别性能比较	46
3.5 两类装甲车辆特征库的建立	47
3.5.1 图像获取	47
3.5.2 基于 Mean Shift 的图像平滑与分割	48
3.5.3 装甲车辆红外特征库与可见光特征库的建立	54
3.5.4 特征融合及融合特征库的建立	56
3.5.5 基于各特征库的 SVM 识别效率比较	58
第4章 支持向量机模型选择	60
4.1 传统模型选择方法	60
4.1.1 k -折交叉验证	60
4.1.2 LOO 误差	61
4.1.3 LOO 误差上界	62
4.2 基于改进 Joachims 上界的模型选择方法	63
4.2.1 两个 LOO 误差上界的等价性	63
4.2.2 改进的 Joachims 上界	64
4.2.3 模拟实验	67
4.3 基于类间距的两步模型选择法	72
4.3.1 RBF 核参数对空间映射的影响	73

4.3.2 基于 ICMD 的核参数评价方法	75
4.4 SVM 模型选择实验	79
第 5 章 支持向量机特征选择	82
5.1 特征选择的基本问题	82
5.1.1 特征的打分策略	82
5.1.2 特征的去留策略	83
5.1.3 特征的搜索策略	84
5.2 传统的特征选择方法	86
5.2.1 Relief 算法	86
5.2.2 基于 k -折交叉验证的 SVM - RFE 方法	86
5.3 基于改进 LOO 误差上界的 SVM - RFE 方法	88
5.4 基于核空间类间距的 SVM - RFE 方法	89
5.5 特征选择方法实验比较	91
第 6 章 基于增后特征库的支持向量机	94
6.1 增后特征库的定义和性质	94
6.2 基于增后特征库的 SVM 目标识别	96
6.3 模拟实验	97
6.3.1 5-折交叉验证结果比较	97
6.3.2 对测试集的认识实验	98
第 7 章 支持向量机目标识别的软件实现	100
7.1 特征库的建设	100
7.2 支持向量机的训练	103
7.3 支持向量机的识别	104
第 8 章 总结与展望	107
参考文献	109

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

地面战场环境恶劣,背景极为复杂,不仅有草地、河流、山涧、树林,还有各种各样的伪装技术,使得地面目标的侦察与识别难度巨大,在新一代作战系统中依靠单传感器提供信息已无法满足作战需要,必须运用包括微波、毫米波、电视、红外、激光、电子支援措施(ESM),以及电子情报技术(ELINT)等覆盖宽广频段的有源和无源探测器在内的多传感器集成,来提供多观测数据;通过优化综合处理,实时获取目标坐标、状态估计、目标属性、行为意图、态势评估、威胁分析等信息,为火力控制、作战指挥提供辅助决策,实现从传感器到射手的一体化。在多传感器系统中,由于信息表现形式的多样性,信息数量的巨大性,信息关系的复杂性,以及要求信息处理的实时性,都已经大大超出了人脑的信息综合处理能力,因此,20 世纪 70 年代出现了一个新的学科——多传感器信息融合(MSDF),并在现代 C⁴ISR 系统中和各种武器平台上得到了广泛应用。

30 多年来,多传感器信息融合技术越来越受到人们的普遍关注,“融合”一词十分频繁地被诸多军事领域引用^[1-10],包括海上和空间监视、空-空和地-空防御、战场情报、监视和获取目标以及战略预警和防御等。20 世纪 70 年代,美国开始用独立声纳信息融合测出敌潜艇准确位置;1988 年,美国将信息融合列为重点研究的 20 项关键技术之一,并列为最优发展的 A 类;美国开发的多种信息融合系统在最近的几场

战争中都发挥了作用;美国陆军计划下一代坦克中采用热像仪和毫米波雷达两种传感器进行信息获取,并融合得到战场综合信息;俄罗斯米-28 武装直升机采用雷达、红外、可见光、夜视仪等多种传感器实现战场的全天候侦察和作战;英国正在研制多平台、多传感器的信息融合系统。

目前,世界各国竞相开展信息融合技术的研究项目,取得了大量的研究成果,开发研制出了众多多传感器信息融合技术的应用实体,用来解决大量复杂的信息处理问题,并首先在军事领域获得成功应用。比较典型的有战术指挥控制(TCAC)系统、战场利用和目标截获(BETA)系统、自动多传感器部队识别(AMSVI)系统、海面监视信息融合专家(OSIF)系统、炮兵情报数据融合(AIDD)系统等。除在军事领域的大量应用外,多传感器信息融合技术还成功应用于机器人、智能控制、图像处理、物体分类与识别、多目标跟踪、遥感遥测等众多领域^[9]。

文献[11]介绍了加拿大国家防御中心在 20 世纪 90 年代中后期研制的一套多传感器战场目标信息获取平台。该项目名称为共用孔径多传感器(CAMUS)系统,该系统中包括三个传感器,一个是可见光摄像机、一个是 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 红外摄像机和一个 94GHz 的毫米波雷达。CAMUS 系统的主要目的是为火控系统提供一种先进的瞄准系统,希望能够提高火控系统对地面目标的探测和分类识别能力。瞄准系统通过单个屏幕为操作手提供融合图像和信息。此系统对车辆和人员的早期探测距离达到 7km,由毫米波雷达完成。系统一旦发现目标就会对其进行跟踪,并分配供以后处理。当同一个目标进入光学系统的探测范围(3km)时,目标的 2D 位置信息将被发送到图像处理单元以完成目标的跟踪和分类。融合图像和信息将提供给操作手,由操作手做出最终决定。

该系统中的三个传感器是在单平台上集成的,以同孔来减少传感器融合中出现的轴线不重合和视差等问题。CAMUS 系统的结构:平台中心安装光学系统,雷达的两副天线安装在光入射窗的两边,如图 1-1

所示。该系统 1994 年就已经开始研制,2001 年样机研制成功,近几年没有见到相关报道。该系统是一套典型的单平台多传感器信息融合系统。

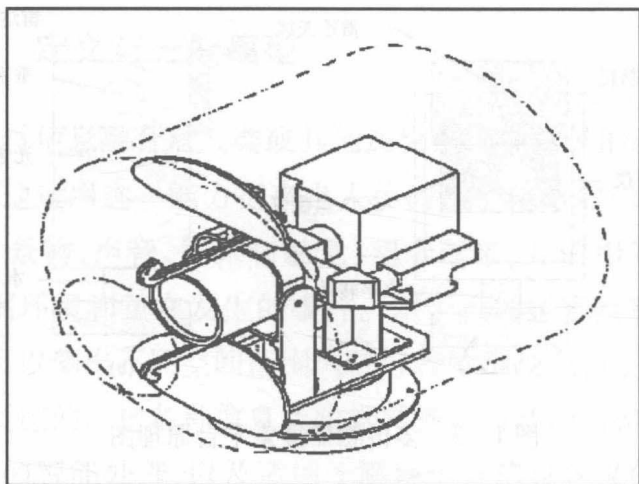


图 1-1 CAMUS 系统的单元整体结构

国内类似的多传感器侦察系统也进行了初步研究。2006 年,装甲兵工程学院设计研制了一套多传感器战场侦察原型系统,如图 1-2 所示。该系统由可见光 CCD 传感器、红外摄像仪、激光测距仪和光电编码器组成,可以全天候地对战场目标进行搜索、定位和跟踪。

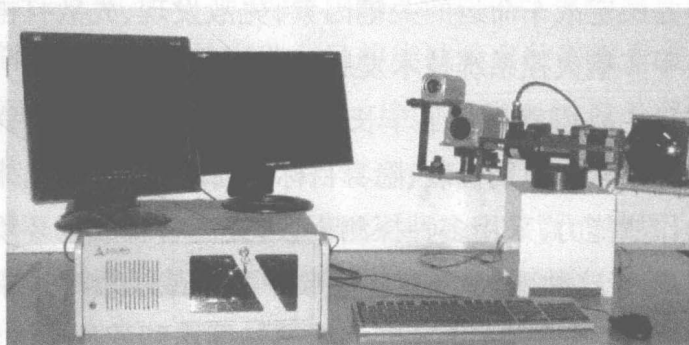


图 1-2 多传感器战场侦察系统

2010 年,某所研制的目标搜索与信息管理系统主要基于一个多传

感器平台,该平台上所用的传感器与 CAMUS 系统中的传感器大致相同,如可见光摄像机、红外摄像机和毫米波雷达,其样机结构如图 1-3 所示。

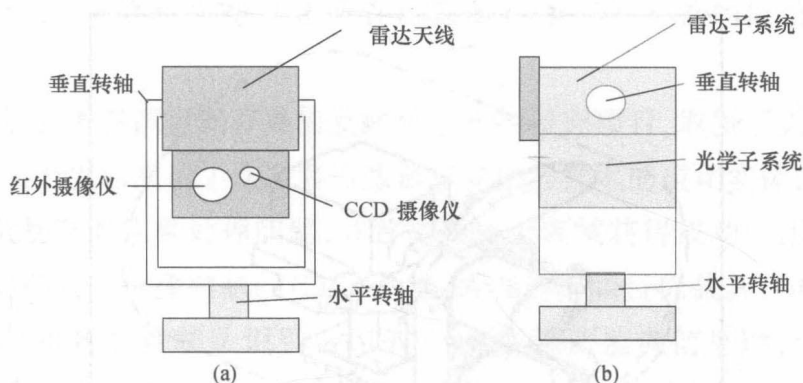


图 1-3 多传感器搜索平台原理图

与图 1-2 所示的多传感器战场侦察系统相比,该系统用毫米波雷达代替了激光测距仪和光电编码器,使得目标跟踪的距离和灵活性大大增加;与 CAMUS 系统相比,该系统三个传感器的孔径并不是同孔径,使得后续数据处理相对复杂,但是平台的搭建相对简单。

在战场上,战车的生存概率主要取决于对敌方目标的发现概率和我方武器的首发命中率,在武器首发命中率接近的情况下,对敌方目标发现概率将是决定战车命运的关键因素,先敌发现、先敌打击已经成为未来坦克装甲车辆火控系统技术发展的主要方向。

我国现役主战坦克具备了车长依靠可见光周视搜索目标的能力,在全天候目标搜索和识别伪装、隐身目标方面却显欠缺^[12],未来坦克应具有全天候作战能力,采用多种探测手段,提高各种战场环境的目标捕获概率^[13]。基于这种现状,开展坦克装甲车辆战场目标搜索与信息管理技术的研究,增强坦克装甲车辆战场感知能力和战场主动性,可以确保能够先敌发现目标、先敌射击,掌握战场主动权。

1.2 多传感器信息融合

1.2.1 定义与一般模型

多传感器信息融合是人类或其他逻辑系统中常见的基本功能。人类非常自然地运用这一能力把来自人体的各个传感器(眼、耳、鼻和四肢)的信息(景物、声音、气味和触觉)组合起来,并使用先验知识去估计、理解周围环境和正在发生的事件。由于人的感官具有不同的度量特征,因而可以测出不同空间范围内的各种物理现象,这一过程是复杂的,也是自适应的。把各种信息或数据转换成对环境有价值的解释,需要大量不同的智能处理,以及适用于解释组合信息含义的知识库。信息融合就是要仿照人脑,把来自不同的传感器的信号合理地组合、支配和使用,以获得对被测对象的一致性解释和描述。下面给出信息融合的一般定义。

1. 定义

虽然人们对信息融合的研究已经有 20 ~ 30 年的历史,但至今没有一个普遍被接受的定义。这是因为其应用非常广泛,而各行各业按照自己的理解给出了不同的定义。目前能被大多数研究者接受的定义是由美国三军组织实验室理事联合会(JDL)提出来的^[10, 14-16]。JDL 从军事应用的角度给出信息融合的定义:

定义 1.1 信息融合就是一种多层次、多方面的处理过程,包括对多元数据进行检测、相关、组合和估计,从而提高状态和身份估计的精度,以及对战场态势和威胁的重要程度进行适时完整的评价。

从定义可以看出,信息融合是在几个层次上完成对多元信息处理的过程,其中每一个层次反映对原始观测数据不同级别的抽象。下面给出信息融合的一般模型。

2. 一般模型

为了建立共同的语言和概念,White^[15]给出了一个著名的一般处理模型,其基本思想如图 1-4 所示,他把信息融合分为三个层次:第一层,位置融合和身份估计;第二层,敌我军事态势估计;第三层,敌方兵力威胁度估计。

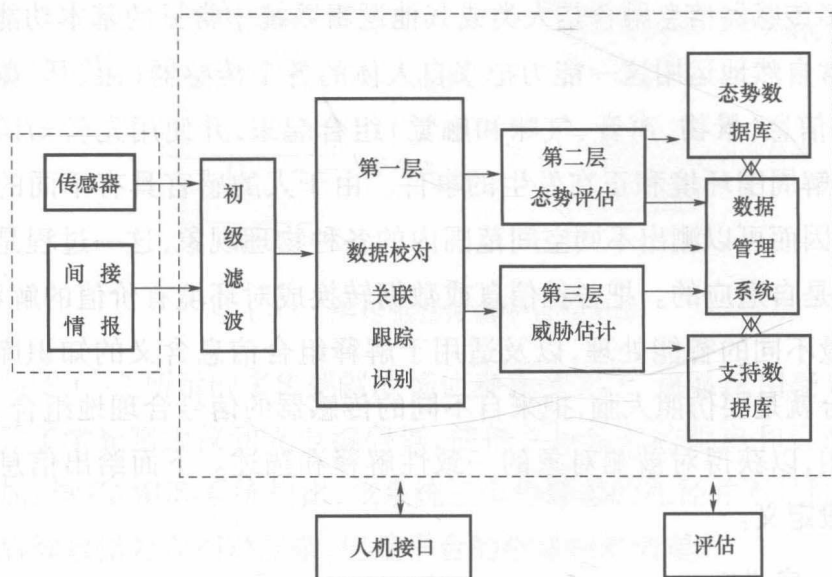


图 1-4 信息融合处理一般模型

在如图 1-4 所示的模型中,信息融合的功能主要有数据校对、关联、跟踪和识别。其中数据校对和关联是为对目标进行跟踪和识别做准备的,第一个层次的融合属于初级融合。高级融合包括态势评估和威胁度估计,这两个层次上的信息融合必须以第一个层次的融合为基础。

这个模型已成为我国学者研究信息融合的基本出发点。每个融合系统都应该尽量达到这样的要求:该系统所实施的每一个融合过程,在其每一个环节上,各种数据所携带的有用信息量都应发挥到最大程度,使得融合结果对系统用户有利。另外,每一组数据携带的有用信息量在其所处的局部过程中所起的作用应该与其他部分的作用有机地承接在一起,以使得各个部分达到和谐统一。

1.2.2 信息融合的主要技术和方法

多源信息的综合处理过程具有本质的复杂性。传统的估计理论和识别方法为新系统和技术奠定了不可或缺的理论基础。另外,近年来出现了一些基于统计推断、人工智能以及信息论的新方法,下面作简要介绍。

(1) 信号处理与估计理论方法:包括用于图像增强与处理的小波变换技术^[17,18]、加权平均、最小二乘和卡尔曼滤波等线性估计技术,以及扩展卡尔曼滤波(EKF),高斯和滤波(GSF)^[19]等非线性估计技术等。另外,期望极大化(EM)算法^[20,21]为求解在具有不完全观测数据情况下的参数估计和融合问题提供了一个全新的思路。

(2) 统计推断方法:包括经典推理、贝叶斯推理、D-S 证据推理^[22,23]、随机集理论^[24]以及支持向量机(SVM)理论等。

(3) 信息论方法:运用优化信息度的手段融合多元数据,获得问题的有效解决。典型的算法有熵算法^[25]、最小描述长度方法^[26]等。

(4) 决策论方法。决策论方法往往应用于高级别的决策融合。Fitzgerald^[27]借助决策论方法融合可见光、红外以及毫米雷达数据用于报警分析。

(5) 人工智能方法:包括模糊逻辑、神经网络、支持向量机、遗传算法、基于规则的推理,以及专家系统、逻辑模板法、品质因素法等,在信息融合领域中的运用也取得了一定效果。

1.3 基于多传感器信息融合的目标识别

一个简单的多传感器信息融合系统包括转台控制、目标跟踪、目标识别、态势显示、威胁度估计以及各个信息传输模块等若干子系统,其中目标识别是最为核心的子系统之一。目标识别是信息融合模型中第一层的主要内容^[16],是信息融合的基础,也是近年来人们研究的热点。

由目标识别获得目标的身份信息,经过进一步融合,可得到战场态势和敌方威胁度的翔实评估。基于多传感器信息融合的目标识别称为目标的融合识别^[5,6,9,10],由于可以融合多个传感器的信息,融合识别的识别准确度和稳定性高于单传感器识别。另外,由于传感器工作波段和条件不同,融合识别可以实现全天候的目标识别。

1.3.1 融合识别的三个层次

根据信息融合的方法,融合识别可分为三个层次,分别是数据级融合、特征级融合和决策级融合^[5,6,10]。

1. 数据级融合识别

数据级融合识别直接对来自同类传感器的数据进行配准和融合,以得到品质更高的信号。数据级融合识别的层次最低,信息损失最少,在数据配准正确的情况下准确度较高。但是,它也有很大的局限性,如对通信带宽和计算机等资源的要求较高,受环境等因素的影响较大,数据级融合对参与融合的数据配准关系要求较高等;在特征级融合目标识别中,各传感器根据各自获取的原始测量数据提取目标特征,融合中心对各传感器提供的目标特征向量进行融合,并将融合后获得的融合特征向量进行分类得到目标的身份说明。数据级融合识别如图 1-5 所示。

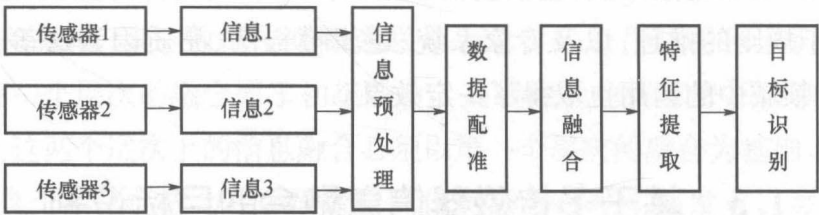


图 1-5 数据级融合识别

2. 特征级融合识别

特征级融合识别可对不同类型传感器得到的不同类型的数据进行融合。首先对不同传感器获取的数据分别进行信息与处理和特征向量

的提取,然后对各特征向量进行融合,最后基于联合特征向量进行属性判断。特征级融合识别对数据配准要求不如数据级融合严格,参与融合传感器可以是异质传感器,具有较大的灵活性。但是融合特征向量中各特征量纲不统一的问题更加突出,而且融合特征向量维数一般都比较 高,这些给后面的模式分类将带来更大困难。特征级融合识别原理如图 1-6 所示。

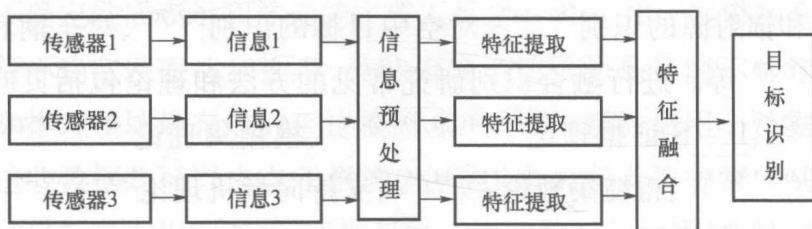


图 1-6 特征级融合识别

3. 决策级融合识别

决策级融合识别是各传感器先在本地分别进行预处理、特征提取、模式分类,建立起对所观察目标的初步结论,然后融合中心对各传感器的识别结果进行融合以得到最后的目标身份说明。决策级融合对传感器的依赖性小,参与融合的传感器既可以是同质的也可以是异质的,而且可以处理异步信息。因此,目前基于信息融合的目标识别所取得的成果大多是在决策级上的,并构成了信息融合研究的一个热点。但相对来说,决策级融合的信息损失量最大,预处理代价较高。决策级融合识别如图 1-7 所示。

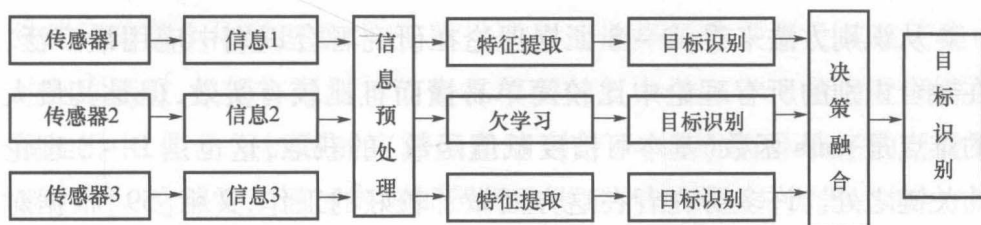


图 1-7 决策级融合识别

1.3.2 融合识别研究现状

融合目标识别可以获得比任意单传感器更加准确、更加稳定的目标识别结果,因而近几年得到广泛研究。目前人们对融合识别的研究已经涉及军事、生活等各个方面,例如对人脸和汉字的识别^[54-56]、对地震动信号的识别^[57]、对水雷的识别^[58]、对红外目标的识别^[59-61]、对雷达目标和辐射源的识别^[62-68]、对空中目标的识别^[69,70]、对车辆和行人的识别^[77,78]等。进行融合识别研究常见的方法和理论包括贝叶斯理论^[69,79-82]、D-S 证据理论^[28-41,57,59-61,68]、模糊集理论^[45-47,58,72,73]、神经网络^[48,62,66,74]、粗糙集理论^[42-44,65]、支持向量机理论^[49-53,60,76]、灰度关联算法^[71,75]等。

从识别对象来看,红外目标和雷达目标的识别占据着主流的地位。随着工艺和技术的不断发展,现在的红外成像设备和成像雷达的精度越来越高、体积越来越小、价格越来越低,而红外和毫米波又有着穿透力强和全天候工作的优越特性,所以备受人们的青睐。但是人们的研究中所涉及的目标以空中目标和水下目标居多,对地面目标识别不是很常见,地面环境非常复杂,背景的多样性和极容易被遮挡,使得地面目标的识别跟踪非常困难。文献[68]用三维激光雷达进行地面目标识别,三维激光雷达可以产生三维数据。地面的人造目标结构一般比较复杂,可以分解为若干个矩形,本书用来进行识别的算法的核心是矩形估计,并用蒙特卡罗模拟对矩形估计算法进行统计评估,最后用坦克做了识别实验。

从识别方法来看,D-S 证据理论在研究融合识别中应用最广泛,在融合识别的所有理论中比较简单易懂而且比较有实效,但是其最大的难点是 mass 函数(基本可信度赋值函数)的获取,这也是 D-S 理论的关键之处。许多研究者在这方面做了较好的工作,文献[59]根据对目标提取的特征,利用模糊 C 均值聚类的方法进行基本概率分配,最后利用改进的 D-S 组合公式进行融合识别;文献[66]针对 ESM 系统提