

绪论

1.1 多源信息融合的一般概念与定义

1.1.1 定义

多源信息融合 (multi-source information fusion) 又称为**多传感信息融合 (multi-sensor information fusion)**, 是 20 世纪 70 年代提出来的。军事应用是该技术诞生的源泉。事实上, 人类和自然界中其他动物对客观事物的认知过程, 就是对多源信息的融合过程。在这个认知过程中, 人或动物首先通过视觉、听觉、触觉、嗅觉和味觉等多种感官(不是单纯依靠一种感官)对客观事物实施多种类、多方位的感知, 从而获得大量互补和冗余的信息; 然后由大脑对这些感知信息依据某种未知的规则进行组合和处理, 从而得到对客观对象统一与和谐的理解和认识。这种由感知到认知的过程就是生物体的多源信息融合过程。人们希望用机器来模仿这种由感知到认知的过程。于是, 一门新的边缘学科——多源信息融合便诞生了。由于早期的融合方法研究是针对数据处理的, 所以有时也把信息融合称为**数据融合 (data fusion)**。这里所讲的**传感器**也是广义的, 不仅包括物理意义上的各种传感器系统, 也包括与观测环境匹配的各种信息获取系统, 甚至包括人或动物的感知系统^[1,2]。

虽然人们对这门边缘学科的研究已经有 20 至 30 年的历史了, 但至今仍然没有一个被普遍接受的定义。这是因为其应用面非常广泛, 而各行各业会按自己的理解给出不同的定义。目前能被大多数研究者接受的有关信息融合的定义, 是由美国三军组织实验室理事联合会 JDL (Joint Directors of Laboratories) 提出来的^[3~5]。JDL 从军事应用的角度给出信息融合的定义。

定义 1.1.1 信息融合就是一种多层次、多方面的处理过程, 包括对多源数据进行检测、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。

从该定义可以看出, 信息融合是在几个层次上完成对多源信息处理的过程, 其中每一个层次反映对原始观测数据不同级别的抽象。

也有专家认为,信息融合应该按如下定义给出。

定义 1.1.2 信息融合就是由多种信息源,如传感器、数据库、知识库和人类本身来获取有关信息,并进行滤波、相关和集成,从而形成一个表示构架,这种构架适合于获得有关决策、对信息的解释、达到系统目标(如识别或跟踪运动目标)、传感器管理和系统控制等。

我们认为,目前所研究的多传感信息融合用下面的定义可能具有更大的包含度。

定义 1.1.3 所谓多源信息融合,主要是指利用计算机进行多源信息处理,从而得到可综合利用信息的理论和方法,其中也包含对自然界人和动物大脑进行多传感信息融合机理的探索。信息融合研究的关键问题,就是提出一些理论和方法,对具有相似或不同特征模式的多源信息进行处理,以获得具有相关和集成特性的融合信息。研究的重点是特征识别和算法,这些算法使得多传感信息的互补集成,改善不确定环境中的决策过程,解决把数据用于确定共用时间和空间框架的信息理论问题,同时用来解决模糊的和矛盾的问题。

我们所研究的多源信息融合,实际上是对人脑综合处理复杂问题的一种功能模拟。在多传感器系统中,各种传感器提供的信息可能具有不同的特性,时变的或非时变的,实时的或非实时的,确定的或随机的,精确的或模糊的,互斥的或互补的等。多传感信息融合系统将充分利用多个传感器资源,通过对各种观测信息的合理支配与使用,在空间和时间上把互补与冗余信息依据某种优化准则结合起来,产生对观测环境的一致性解释或描述,同时产生新的融合结果。其目标是基于各种传感器的分离观测信息,通过对信息的优化组合导出更多的有效信息,最终目的是利用多个传感器共同或联合操作的优势来提高整个系统的有效性。

当前,制约信息融合向深入发展的因素有三:

- (1) 信息类型的高度相异性和内容的模糊属性;
- (2) 多源信息和多任务引入的固有复杂性;
- (3) 目前尚没有数学工具用来统一描述和处理此类复杂的问题。

所以,寻求深层次的有效数学工具对多源信息融合问题进行描述和处理势在必行。

1.1.2 多源信息融合的优势

与单传感器系统相比,多传感器系统主要具有如下优点:

- (1) 增强系统的生存能力——多个传感器的量测信息之间有一定的冗余度,当有若干传感器不能利用或受到干扰,或某个目标或事件不在覆盖范围时,一般总会有一种传感器可以提供信息;
- (2) 扩展空间覆盖范围——通过多个交叠覆盖的传感器作用区域,扩展了空间覆盖范围,因为一种传感器有可能探测到其他传感器探测不到的地方;
- (3) 扩展时间覆盖范围——用多个传感器的协同作用提高检测概率,因为某个传感器在某个时间段上可能探测到其他传感器在该时间段不能顾及的目标或事件;
- (4) 提高可信度——因为多种传感器对同一目标或事件加以确认,因而有可能提高可信度;
- (5) 降低信息的模糊度——多传感器的联合信息降低了目标或事件的不确定性;
- (6) 改进探测性能——对目标或事件的多种量测的有效融合,提高了探测的有效性;
- (7) 提高空间分辨率——多传感器的合成可以获得比任何单一传感器更高的分辨率;

(8) 增加了量测空间维数——系统不易受到敌方行动或自然现象的破坏,因而增加了量测空间维数;

(9) 成本低、质量轻、占空少——多个传感器的使用,使得对传感器的选择更加灵活和有效,因而可达到成本低、质量轻、占空少的目的。

1.1.3 应用领域

军事应用是多传感信息融合技术诞生的源泉,主要用于包括军事目标(舰艇、飞机、导弹等)的检测、定位、跟踪和识别。这些目标可以是静止的,也可以是运动的。具体应用包括海洋监视、空对空或地对空防御系统等。海洋监视系统包括潜艇、鱼雷、水下导弹等目标的检测、跟踪和识别,典型的传感器包括雷达、声纳、远红外、合成孔径雷达等。空对空或地对空防御系统的基本目标是检测、跟踪、识别敌方飞机、导弹等,典型的传感器包括雷达、ESM 接收机、远红外探测器、敌我识别传感器、电光成像传感器等。

近年来,多传感器融合系统也在民事应用领域得到了较快的发展,主要应用领域包括有:

1. 图像融合

图像融合是近年来图像工程中一个新兴的研究领域,它将信息融合技术应用于多源影像的复合中,用特定的算法将两个或多个不同影像合成起来生成新的图像。它通过综合运用不同空间分辨率、时间分辨率、波谱分辨率的图像,消除多传感器信息之间可能存在的冗余和矛盾,以增强影像中的信息透明度,改善解释的精度,提高可靠性及使用率,从而获得对目标更细致、准确与完整的描述与分析。图像融合既可以是基于同类传感器得到的图像,也可以是基于异类传感器得到的图像;既可以在像素级别上完成融合,也可以在特征级别或决策级别上完成融合。在医疗诊断中,应用图像融合技术将超声波成像、核磁共振成像和X-射线成像等多传感器数据进行融合处理,从而获得任何单一医学影像不能得到的结果,使得医生能够快速准确地做出诊断结果;或者利用二维切片重构三维图像,以达到生动逼真的效果。

2. 工业智能机器人

工业智能机器人主要对视频图像、声音、电磁等数据进行融合以完成推理,从而达到完成物料搬运、零件制造、检验和装配等工作的目的。

在复杂背景环境下,为了让机器人灵巧地完成抓取、触摸等操作,若仅靠单一传感器,在速度、精度、可靠性等方面都不大可能达到其工业要求。通过在机器人手爪上安装包括视觉传感器、触觉传感器、接近觉传感器、力或力矩传感器等多种传感器,并通过对这些多源信息的融合处理,机器人手爪可以快速、准确地完成指定操作。国外已经有代表性的机器人多传感手爪系统,如德国的舱内机器人 ROTEX 的智能手爪、日本 ETS-VII 精密机器人的三指灵巧手等。

另外,将由 CCD 彩色摄像机获取的 2D 彩色图像及由激光测距成像雷达获取的 3D 距离图像进行融合,可以大大提高移动的机器人对环境的认知和理解能力,并且可以有效地提高对障碍物检测的可靠性与精度。

3. 遥感

遥感在军事和民事领域都有相当广泛的应用,可用于监测天气变化、矿产资源分布、农作物收成等。多传感信息融合在遥感领域中的应用,主要是通过高空间分辨率全色图像和低光谱分辨率图像的融合,得到高空间分辨率和高光谱分辨率的图像,融合多波段和多时段的遥感图像可以提高分类的准确性。

例如,由于 SAR 遥感图像与可见光遥感图像获取地物波谱特征信息的波段范围及方式不同,将这两种表征地物不同波谱特征的信息源有机地融合起来,可以充分利用不同传感器所具有的互补信息,从而更充分地揭示地物的全面特征。SAR 图像与可见光图像的融合在矿物勘探、资源检测等领域有着广泛的应用前景。

4. 刑侦

多传感数据融合技术在刑侦中的应用,主要是利用红外、微波等传感设备进行隐匿武器检查、毒品检查等。将人体的各种生物特征如人脸、指纹、声音、虹膜等进行适当的融合,能大幅度提高对人的身份识别与认证能力,这对提高安全保卫能力是非常重要的。

5. 故障诊断

在工业监控应用中,每个传感器基于检测统计量,可以提炼出有关系统故障的特征信息(故障表征)。在故障诊断处理单元,利用这些故障特征信息,并按照多种故障诊断方法对被诊断的对象做出是否有故障发生的推断。而融合中心则基于一定的准则进行融合处理,最终得出对象是否存在故障的决策。

另外,智能交通系统(ITS)采用多传感数据融合技术,可实现无人驾驶交通工具的自主道路识别、速度控制以及定位等。

美国是最早应用信息融合技术的国家,而且具有很高的技术水平。20 世纪 80 年代以来,美国相继研究开发了利用信息融合技术进行目标跟踪、目标识别、态势评估及威胁评估的各种军用系统,用于空中拦截、军事指挥等目的。这些系统后来都不同程度地发挥了作用,特别是在最近的几次战争中都发挥了重要作用。美国陆军计划将在下一代坦克中采用数据融合技术,信息获取主要依靠热像仪和毫米波雷达两种传感器。美国得克萨斯仪器公司则研究将红外热像与微光图像融合,以提高夜战能力。有关的理论研究工作也得到了美国国家科学基金会的积极支持,制定标准和协议的工作也正在美国进行。俄罗斯研制的米-28 新型战斗直升机,便使用了多传感信息融合技术,融合了来自雷达、红外、电视摄像机、航空仪表、夜视仪等传感器的信息,构成了数据融合系统。英国正在研制多平台、多传感器的数据融合系统,还在一类通用组件热像仪的基础上,研制了双波段成像辐射计,并进而研制了高性能数字式前视红外、双波段“模拟”前视红外和双波段数字式前视红外系统。

1.2 信息融合系统的模型和结构

1.2.1 功能模型

关于数据融合的功能模型历史上曾出现过不同的观点,但由 JDL 数据融合组首先提出,其后几经修改面向数据融合结果的模型如图 1-2-1 所示,正为越来越多的实际系统所采

用。构建 JDL 数据融合模型的目的是促进系统管理人员、理论研究者、设计人员、评估人员相互之间更好地沟通和理解,从而使得整个系统的设计、开发和实施过程得以高效顺利地进行。其他的功能模型还包括由 Dasarathy^[6]提出的 I/O 功能模型、E. Waltz 提出的支持指挥和控制的融合模型,以及 Bedworth^[7]的“omnibus”处理模型等,这里不再详述。

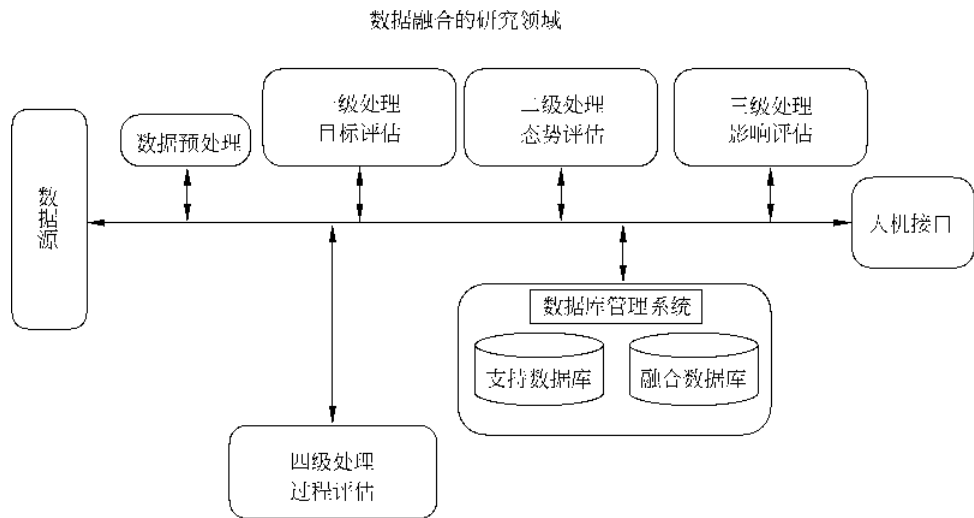


图 1-2-1 JDL 数据融合模型

在该处理模型中,包括以下几种处理过程。

第一级处理的是所谓目标评估(object assessment),如图 1-2-2 所示,主要功能包括数据配准、数据关联、目标位置和运动学参数估计,以及属性参数估计、身份估计等,其结果为更高级别的融合过程提供辅助决策信息。

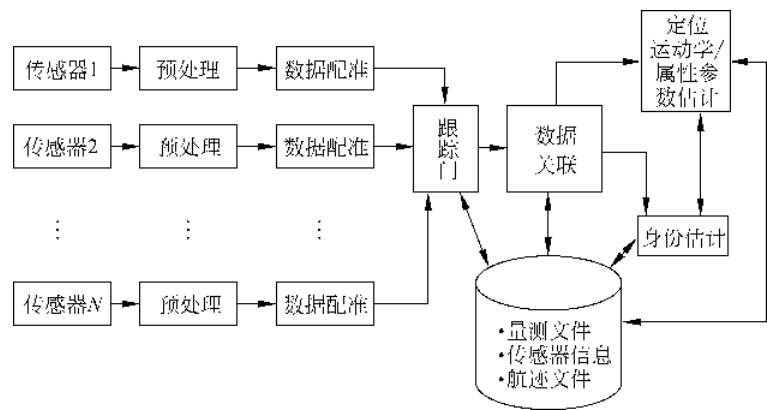


图 1-2-2 一级处理中的对象评估模型

所谓数据配准,就是将时域上不同步,空域上属于不同坐标系的多源观测数据进行时空对准,从而将多源数据纳入一个统一的参考框架中,为数据融合的后期工作做铺垫。数据关联主要处理分类和组合等问题,将隶属于同一数据源的数据集组合在一起。跟踪用以实现对运动实体的运动参数估计。身份估计处理的是实体属性信息的表征与描述。

此级别的处理属于数值计算过程,其中位置估计通常以最优估计技术(线性估计技术、非线性估计技术)为基础,而身份估计一般以参数匹配技术或模式识别技术为基础,从比较简单的技术(如多数表决法)到更复杂的统计方法(Bayes 方法、D-S 证据理论等)。

第二级处理的是所谓态势评估(situation assessment)问题,是对整个态势的抽象和评定。其中,态势抽象就是根据不完整的数据集构造一个综合的态势表示,从而产生实体之间一个相互联系的解释。而态势评定则关系到对产生观测数据和事件态势的表示和理解。态势评定的输入包括事件检测、状态估计以及为态势评定所生成的一组假设等。态势评定的输出在理论上是所考虑的各种假设的条件概率。在军事领域,态势评估是指评价实体之间的相互关系,包括敌我双方兵力结构和使用特点,是对战场上战斗力量分配情况的评价过程。

第三级处理的是所谓影响评估(impact assessment)问题,它将当前态势映射到未来,对参与者设想或预测行为的影响进行评估。在军事领域即指威胁估计(threat assessment),是一种多层视图处理过程,用以解释对武器效能的估计,以及有效地扼制敌人进攻的风险程度。此外,威胁估计还包括通过汇集技术和军事条令数据库中的数据,对我军要害部位受敌人攻击时的脆弱性做出估计,以及对作战事件出现的程度和可能性进行估计,并对敌方作战企图给出指示和告警。

目前,对第二、三级别的融合处理研究主要集中于**基于知识**的方法,例如基于规则的黑板模型系统等。但对此领域的研究远未成熟,虽然有很多的原型可供借鉴,却少有真正鲁棒且可操作的系统。如何建立一个可变的规则库以表征有关态势评估和影响评估的相关知识,是该领域极具挑战意义的研究课题。当前,出现了基于模糊逻辑和混合结构的研究方法,它将原有黑板模型的概念扩展到面向等级化和多时尺度的概念,可望对态势评估和影响评估领域的研究起到有力的推动作用。

第四级处理的是所谓过程评估(process assessment)问题,它是一个更高级的处理阶段。通过建立一定的优化指标,对整个融合过程进行实时监控与评价,从而实现多传感器自适应信息获取和处理,以及资源的最优分配,以支持特定的任务目标,并最终提高整个实时系统的性能。对该级别融合处理研究的困难,主要集中在如何对系统特定任务目标以及限制条件进行建模和优化,以平衡有限的系统资源,如计算机的运算能力以及通信带宽等。当前,利用效用理论来开发系统性能及效率模型,以及利用基于知识的方法来开发基于上下文环境的近似推理是研究的重点。

需要特别强调的是,实际系统的功能划分不尽相同,需要根据实际情况来决定。

1.2.2 数据融合的级别

此外,按照融合系统中数据抽象的层次,融合可划分为三个级别:数据级融合、特征级融合以及决策级融合。各个级别融合处理的结构分别如图 1-2-3、图 1-2-4 和图 1-2-5 所示。

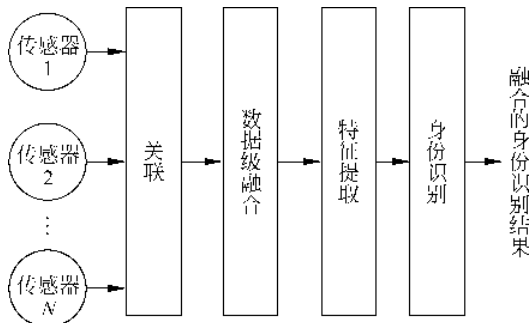


图 1-2-3 数据级融合

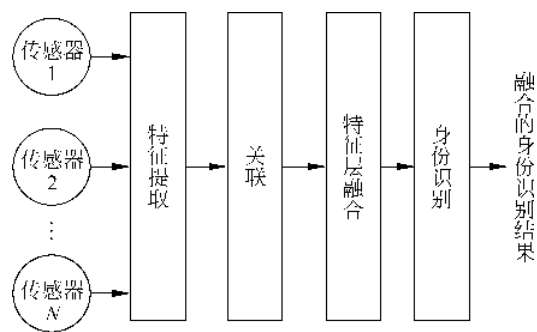


图 1-2-4 特征级融合

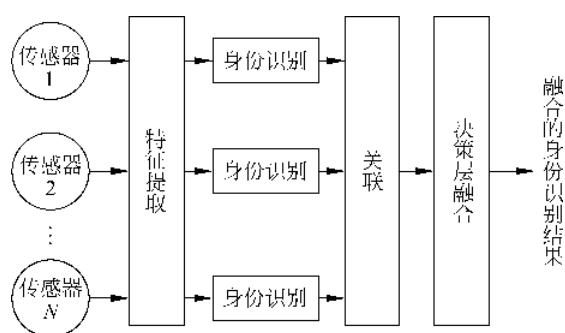


图 1-2-5 决策级融合

1. 数据级融合

数据级融合是最低层次的融合，直接对传感器的观测数据进行融合处理，然后基于融合后的结果进行特征提取和判断决策。这种融合处理方法的主要优点是：只有较少数据量的损失，并能提供其他融合层次所不能提供的其他细微信息，所以精度最高。它的局限性包括：

- (1) 所要处理的传感器数据量大，故处理代价高，处理时间长，实时性差；
- (2) 这种融合是在信息的最低层进行的，传感器信息的不确定性、不完全性和不稳定性要求在融合时有较高的纠错处理能力；
- (3) 它要求传感器是同类的，即提供对同一观测对象同类观测数据；
- (4) 数据通信量大，抗干扰能力差。

此级别的数据融合用于多源图像复合、图像分析和理解以及同类雷达波形的直接合成等。

2. 特征级融合

特征级融合属于中间层次的融合，先由每个传感器抽象出自己的特征向量(可以是目标的边缘、方向和速度等信息)，融合中心完成的是特征向量的融合处理。一般来说，提取的特征信息应是数据信息的充分表示量或充分统计量。其优点在于实现了可观的数据压缩，降低对通信带宽的要求，有利于实时处理，但由于损失了一部分有用信息，使得融合性能有所降低。

特征级融合可划分为目标状态信息融合和目标特征信息融合两大类。其中目标状态信息融合主要用于多传感器目标跟踪领域,融合处理首先对多传感数据进行数据处理,以完成数据校准,然后进行数据相关和状态估计。具体数学方法包括卡尔曼滤波理论、联合概率数据关联、多假设法、交互式多模型法和序贯处理理论。目标特征信息融合实际属于模式识别问题,常见的数学方法有参量模板法、特征压缩和聚类方法、人工神经网络、K 阶最近邻法等。

3. 决策级融合

决策级融合是一种高层次的融合,先由每个传感器基于自己的数据作出决策,然后在融合中心完成的是局部决策的融合处理。决策级融合是三级融合的最终结果,是直接针对具体决策目标的,融合结果直接影响决策水平。这种处理方法数据损失量最大,因而相对来说精度最低,但其具有通信量小,抗干扰能力强,对传感器依赖小,不要求是同质传感器,融合中心处理代价低等优点。常见算法有 Bayes 推断、专家系统、D-S 证据推理、模糊集理论等。

特征级和决策级的融合不要求多传感器是同类的。另外,由于不同融合级别的融合算法各有利弊,所以为了提高信息融合技术的速度和精度,需要开发高效的局部传感器处理策略以及优化融合中心的融合规则。

1.2.3 通用处理结构

在整个融合处理流程中,依照实现融合处理的场合不同,研究人员提出了通用处理结构的概念。Heistrand 描述了三种处理结构,分别是集中式结构、分布式结构以及混合式结构,如图 1-2-6、图 1-2-7 和图 1-2-8 所示。不同处理结构针对不同的加工对象。集中式结构加工的是传感器的原始数据;分布式结构加工的是经过预处理的局部数据;而混合式结构加工的既有原始数据,又有预处理过的数据。如前所述,目前文献中仅对信息融合功能模型中第一级即目标评估的研究较为成熟,故本节仅介绍此级别融合的通用处理结构。

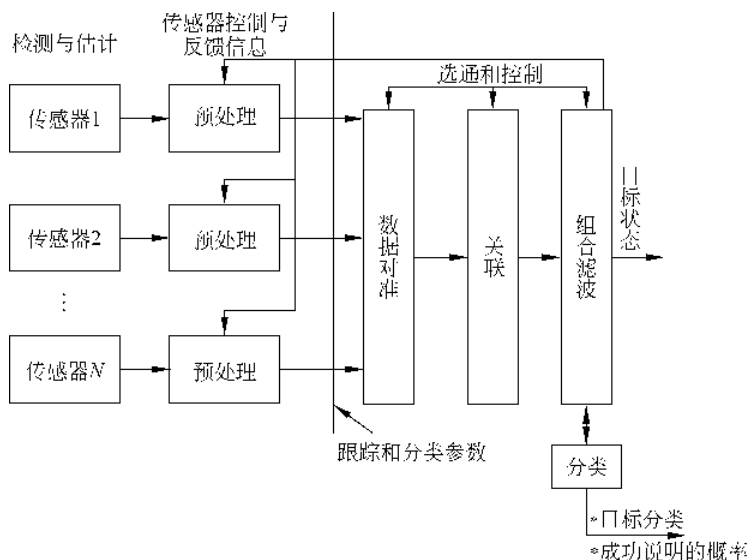


图 1-2-6 集中式融合系统结构

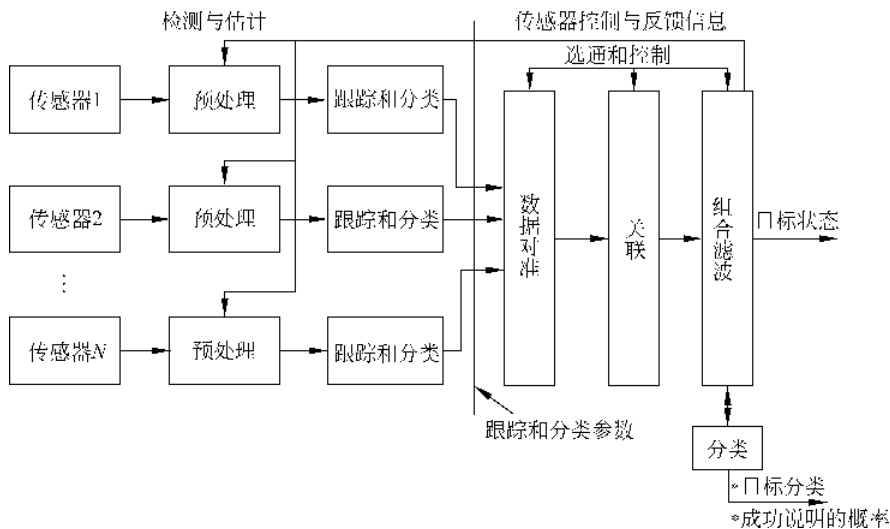


图 1-2-7 分布式融合系统结构

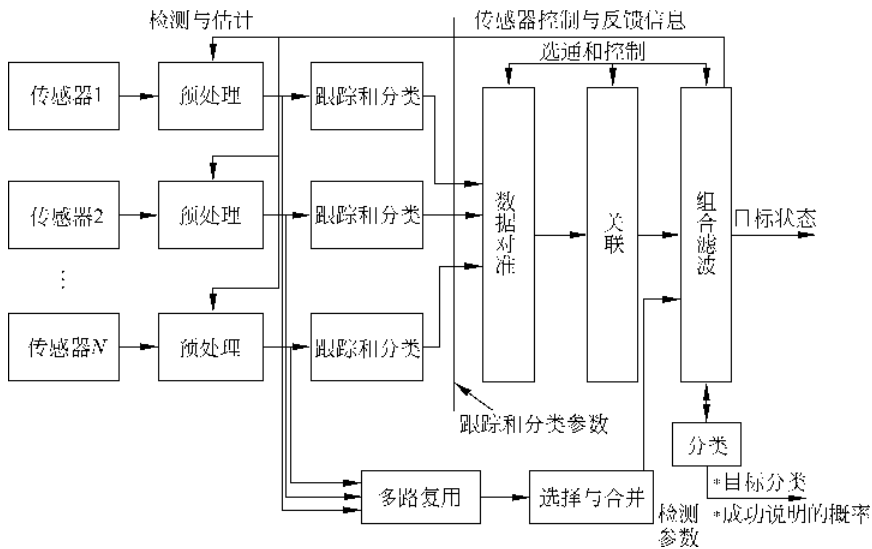


图 1-2-8 混合式融合系统结构

在集中式系统结构中,各个传感器录取的检测报告直接被送到融合中心,在那里进行数据对准、点迹相关、数据互联、航迹滤波、预测与综合跟踪。这种结构特点是信息损失小,对系统通信要求较高,融合中心计算负担重,系统的生存能力也较差。

分布式结构与集中式结构的区别在于,每个传感器的检测报告在进入融合中心以前,先由它自己的数据处理器产生局部多目标跟踪航迹,然后把处理后的信息送至融合中心,融合中心根据各结点的航迹数据完成航迹关联和航迹融合,形成全局估计。相对于集中式系统,此类系统具有造价低、可靠性高、通信量小等特点。

混合式融合系统同时传输检测报告和经过局部结点处理后的航迹信息,它保留了上述两类系统的优点,但在通信和计算上要付出较昂贵的代价。但是,此类系统也有上述两类系

统难以比拟的优势,在实际场合往往采用此类结构。

1.3 多源信息融合的主要技术和方法

信息融合作为对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算法为信息融合技术奠定了不可或缺的理论基础。但同时我们也看到,近年来出现的一些新的基于统计推断、人工智能以及信息论的新方法,正成为推动信息融合技术向前发展的重要力量。以下扼要介绍这些技术手段。

1. 信号处理与估计理论方法

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^[8,9]、加权平均、最小二乘、Kalman 滤波等线性估计技术,以及扩展 Kalman 滤波(EKF), Gauss 和滤波(GSF)^[10]等非线性估计技术等。近年来,越来越多的学者致力于 UKF^[11]滤波,基于随机采样技术的粒子滤波^[12,13]和 Markov 链 Monte Carlo(MCMC)^[14,15]等非线性估计技术的研究,并取得了很多有价值的研究成果。

期望极大化(EM)算法^[16,17]为求解在具有不完全观测数据情况下的参数估计与融合问题,提供了一个全新的思路。

另外,通过建立一定的优化指标,可以借助最优化方法来获得参数的最优估计,典型算法有极小化风险法^[18]以及极小化能量法^[19]等。

2. 统计推断方法

统计推断方法包括经典推理、Bayes 推理、证据推理^[20,21]、随机集(random set)^[22,23]理论以及支持向量机理论等。

3. 信息论方法

信息论方法运用优化信息度量的手段融合多源数据,从而获得问题的有效解决。典型算法有熵方法^[24,25]、最小描述长度方法^[26,27](MDL)等。

4. 决策论方法

决策论方法^[28,29]往往应用于高级别的决策融合。Fitzgerald 在参考文献 30 中,借助决策论方法融合可见光、红外以及毫米波雷达数据用于报警分析。

5. 人工智能方法(artificial intelligence method)

人工智能方法包括模糊逻辑、神经网络、遗传算法、基于规则的推理以及专家系统^[31]、逻辑模板法^[32]、品质因数法(FOM)等,在信息融合领域的运用也取得了一定的成果。

6. 几何方法

几何方法通过充分探讨环境以及传感器模型的几何属性来达到多传感信息融合的目的。文献 33 中通过对不确定椭球体体积进行极小化的几何方法完成对多传感数据的融合