

基于传感器融合的海上目标检测综述^{*}

李永国^{1,2} 徐彩银^{* ,1,2} 汤璇^{1,2} 李祥燕^{1,2}

(1. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306;

2. 上海海洋可再生能源工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 目标检测技术是一种基于目标几何和统计特征的图像分割。我国海洋领域广阔、海洋资源丰富,开展海上目标检测研究意义深远。基于传感器融合的海上目标检测方法是监视海运交通、维护海洋权益的一种高效手段。本文首先给出传感器融合检测的研究意义和该领域存在的挑战,然后梳理归纳了三种传感器融合方法,包括:多雷达融合检测方法、多相机融合检测方法和相机雷达融合检测方法;接着给出这几种融合方法在不同场景下的检测效果,并介绍了这几种融合方法存在的局限性;同时展望了传感器融合在海上目标检测的未来发展方向,如检测信息传输在海上抗干扰能力的提升、多目标检测性能的优化,以及将深度学习应用在传感器融合检测等。

关键词: 海上目标检测;融合方法;多相机融合;多雷达融合;相机雷达融合

DOI: 10. 16507/j. issn. 1006 - 6055. 2022. 07. 005

A Survey of Marine Target Detection Based on Sensor Fusion^{*}

LI Yongguo^{1,2} XU Caiyin^{* ,1,2} TANG Xuan^{1,2} LI Xiangyan^{1,2}

(1. School of Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Marine Renewable Energy Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306, China)

Abstract: Object detection technology is an image segmentation based on objects' geometric and statistical features. My country has a vast marine field and rich marine resources, and it is of far-reaching significance to carry out research on marine target detection. The marine target detection method based on sensor fusion efficiently monitors marine traffic and maintains marine rights and interests. This paper first presents the research significance of sensor fusion detection and the challenges in this field and then summarizes three sensor fusion methods, including the multi-radar fusion detection method, multi-camera fusion detection method, and camera-radar fusion detection method; The detection effects of these fusion methods in different scenarios are introduced, and the limitations of these fusion methods are introduced. At the same time, the future development direction of sensor fusion in marine target detection prospected, Such as the improvement of the anti-interference ability of detection information transmission at sea, the optimization of multi-target detection performance, and the application of deep learning in sensor fusion detection.

Keywords: Maritime Target Detection; Fusion Method; Multi-Camera Fusion; Multi-Radar fusion; Camera-Radar Fusion

目标检测技术被广泛应用于计算机视觉领域 驾驶^[3]、人脸识别^[4]等。本文主要关注海上目标
中^[1],如无人船舶的海上目标检测^[2]、无人车自动 检测技术,海上目标检测技术是实现无人货船远

^{*} 国家自然科学基金面上项目“基于磁流体发电原理的海洋可再生能源利用中的基础问题研究”(51876114),上海市科学技术委员会资助项目“上海海洋可再生能源工程技术研究中心”(19DZ2254800)

^{**} E-mail:2239470634@qq.com;Tel:17355061884

洋运输^[5]、无人舰艇海上巡航^[6]、无人船舶水环境监测^[7]的基础条件之一。

海上目标检测技术多借助于不同类型的传感器功能实现其目的,单一传感器的海上目标检测结果误判率较高,通过对不同类型的传感器进行耦合可以显著提高检测系统海上目标检测的精准率。基于传感器融合的海上目标检测方法可以归纳为以下三种:1)多雷达融合的海上目标检测方法,2)多相机(视觉传感器)融合的海上目标检测方法,3)相机雷达融合的海上目标检测方法。其中多雷达融合的检测方法包括:多激光雷达融合检测^[8,9],激光雷达与毫米波雷达融合检测^[10-12];多相机融合的检测方法^[13]主要根据相机数量的多少,以及相机位置的布置进行融合检测^[14,15];相机雷达的融合检测方法主要根据融合方式的不同对目标进行检测^[16-18]。

本文首先分析了海上目标检测方法面临的问题与挑战,接着详细介绍了多雷达融合、多相机融合以及相机雷达融合三种基于传感器融合的海上目标检测方法,比较分析了这几种方法优势及其局限性,深入分析了传感器融合技术存在一些发展性问题,并探讨其未来的发展趋势。

1 海上目标检测方法的问题与挑战

海上目标检测是实现无人船舶作业的基础前提,当前已有的海上目标检测方法存在一些问题与挑战,主要有以下两个方面。

1) 海上环境的复杂性

海上环境复杂多变,其一是海水所产生的光反射和自然环境中的云雾屏蔽不利于视觉传感器采集到清晰的图像^[19],影响了检测设备对感兴趣目标所进行的判别决策。二是海水自身运动的多变性以及海水与周围环境相互影响所形成的干扰

物理磁场使得对海上的一些小目标或特殊目标检测困难^[20],同时复杂的气象条件会干扰海天线检测对海空区域的划分,从而进一步增加在目标检测感兴趣区域外的噪声干扰。

2) 海上检测目标的抓取

对海上目标进行检测需要平台前期对目标信息的平稳获取,一方面海上目标由于自身的运动或者由于海水推动影响了自身的姿态,从而进一步影响传感器获取完整的目标信息,另一方面是传感器所在平台的波动影响信息稳定的获取^[21]。

2 多传感器融合的海上目标检测方法

2.1 多雷达融合检测方法

2.1.1 多雷达融合系统

雷达是目标检测技术中的重要传感器之一,雷达按照频段可分为激光雷达、毫米波雷达、微波雷达和超视距雷达^[22]。利用多个雷达构建的雷达融合感知系统对船舶的自主避障以及海上目标检测有着重要意义。Lin等^[23]针对无人艇水面感知技术的综合提升,提出利用两个激光雷达构建雷达融合系统对动态对象进行检测跟踪避障,其跟踪误差小于10%,较单个激光雷达传感器检测精准率提高了8%。Stateczny等^[24]针对无人水面车辆能够自主避障,提出将激光雷达与毫米波雷达融合的检测方法,能够有效识别出水环境中可能遇到船舶以及其他漂浮物。

多激光雷达融合感知系统可由4G固态雷达和普通激光雷达构建而成。4G固态雷达主要是扫描无人船周围的环境,4G固态激光雷达由于不存在旋转的机械结构,该装置的激光探测水平和垂直视角都是通过电子方式实现的,因此具有体积小,重量轻等特点,适合远距离的目标探索以及环境感知。普通激光雷达主要用于无人船航行过

程中对目标的探索检测,可以实现全方位的扫描,能在增加线数的情况下,实现更高精度和分辨率的建模效果,主要用于近距离的目标搜索^[25],缺点是尺寸比较大、调试复杂。

通过雷达传感器进行目标采集是雷达融合感知系统识别检测目标的基础。对于激光雷达设备在开机前需要进行自检诊断,如果设备无异常状况,则设备正常启动,系统即可实时采集无人船周围的雷达图像数据,并对相应的数据进行收集^[27]。

图 1 中,1 为雷达天线,负责完成信号的发射与接收并判断其探测方向的;2 为装置的线缆,用于传输数据;3 为电源,负责确保各设备的正常运作;4 为雷达接收机,负责对回波信号进行处理、置换;5 为网线,用于网络内部传给信息;6 为工控机,负责对设备得到的信息汇总处理并进行决策。多雷达数据采集处理如图 2 所示。

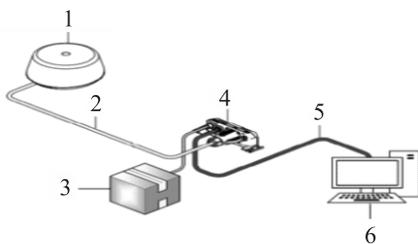


图 1 多激光雷达设备连接图^[26]

Fig. 1 Connection Diagram of Multiple Lidar Devices^[26]

2.1.1.2 图像处理及目标检测

通过对采集到的雷达图像进行图像预处理和深度处理来获得置信度更高的目标信息。在图像预处理中,主要对图像进行裁剪、灰度化、二值化、几何校正等处理;在图像深度处理过程中,通过对图像进行滤波去噪和图像分割,常见的滤波方法如中值滤波、均值滤波、高斯滤波等。对图像进行一定程度的处理,有助于进一步提取障碍物信息,更好的对目标进行识别判定^[28,29]。图 3 是雷达图像处理流程图。

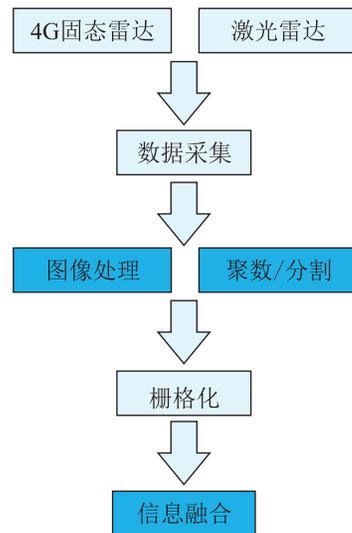


图 2 多雷达数据采集处理流程

Fig. 2 Multi-radar Data Acquisition and Processing Flow

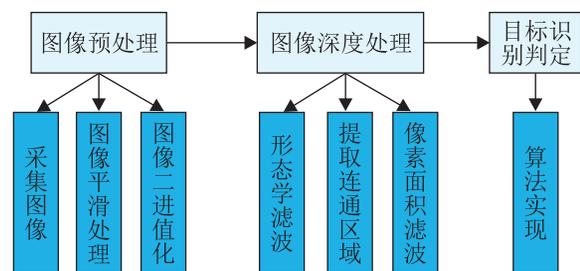


图 3 雷达图像处理流程图

Fig. 3 Flow Chart of Radar Image Processing

雷达图像处理部分被包含于雷达融合感知系统中,雷达融合感知系统可以对周围海上目标进行比较完整的检索比对。该系统在探测可探测范围内不同位置的目标时,受到海上自然天气的影响较小,同时雷达设备具有一定强度的穿透能力,具备良好的海上作业能力。Nguyen 等^[30]针对不同雷达对地面目标的检测提出了一种 3D 雷达系统建模,该模型不仅有助于揭示波在观察区域的传播机制,在探测隐蔽位置的海上目标也有许多潜在的优势。Li 等^[31]针对复杂的电磁环境下检测高速运动雷达中的微弱小目标提出了一种新方法;该方法通过多个雷达融合图像序列的预处理

和动态规划,对帧累积后的候选轨迹进行多阶段假设检验,提高了感知系统对小而暗目标的检测性能,且耗时缩短了 16.7 s。但雷达融合系统也存在不足,由于无线电信号在空中自由传播并返回,这一过程导致雷达需要更多的时间来锁定一个物体;其次雷达的波束范围很广,且不是针对特定目标的,这意味着在通过雷达融合系统得到海上感兴趣目标的处理过程极为复杂;最后通过对多雷达的使用尚不能完全克服极端恶劣天气的影响,也会受到多种物体和介质的干扰。

2.2 多相机融合的检测方法

相较于雷达,相机的配套硬件研发技术成熟,且成本较为低廉。相机的测距技术属于被动测距技术,不需要向被检测物体发射其信号,可以节省检测时间。不同于雷达所获得目标形状的特征轮廓,相机可以收集不同目标的特征纹理信息,易于可视化检测,符合人类感知习惯。

由于相机不具备固体穿透能力,因此单一相机在对目标进行检测识别时存在一定的死角,只能通过局部特征信息来判断物体的种类,从而会导致误判的产生。通过对多个相机位置布置,可得到超广角的检测,能够很好的克服单一相机获取信息不完整所产生的误判。Rofallski 等^[32]针对人工珊瑚礁的观察与检测开发了一种三相机融合检测系统,该系统通过对目标进行摄影测量和分析目标的运动结构对获得的数据进行处理,克服了相机水下穿透能力弱、单相机采集信息不全面的缺点,实现对水下物体信息较完整的采集。Rao 等^[33]为提高特定目标的检测精度设计了一种多相机协同方式的海面运动目标视觉检测与跟踪系统;该系统能够很好的处理被跟踪目标的突然变化而导致的视频图像模糊或跳动以及目标消失在海浪中的频繁变化,提高了视觉目标的检测精度和视

觉跟踪提高的连续性和可靠性。但不同相机中目标之间对应的数据关联问题需要通过相机联合校准来解决,实现这一校准过程仍然是一个比较繁琐的过程,其次多相机在海上多变的自然环境下,仍然不能很好的消除因环境而产生的误差,最后在相机融合过程中如何确定不同相机的收发时间,和不同相机产生的数据关联问题的处理方式仍然影响着多相机融合系统的作业。Kulathunga 等^[34]针对数据关联、相机校准、目标检测等问题设计了一种融合系统平台,该平台能够很好的完成多相机融合过程,但实现方式依旧复杂,图 4 是该检测方法的具体实现流程。Khan 等^[35]针对多相机校准,目标检测通过使用模糊逻辑的融合算法来提高目标检测的鲁棒性,该方法在参数选择上仍有较大难度。

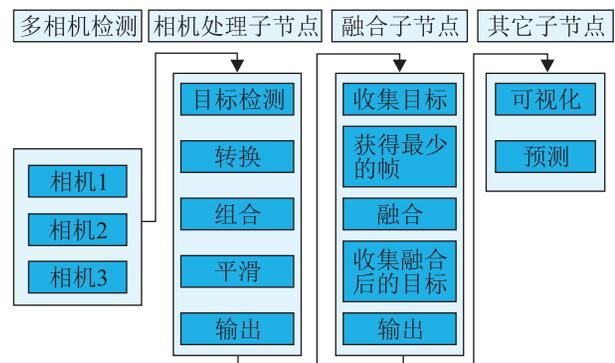


图 4 多相机融合系统^[34]

Fig.4 Multi-camera Fusion System^[34]

2.3 雷达相机的融合检测方法

多相机融合检测和多雷达融合检测都有着各自的局限性,将相机与雷达这两种传感器进行耦合可以克服多雷达检测过程中对物体的颜色和纹理信息的获取缺陷,也可以克服多相机在云雾等不利天气下难以正常作业的情况。

2.3.1 基于雷达与相机融合的优势

表 1 为两种传感器性能的综合比对,表 2 为传感器融合的综合比对,表 3 为具体的几种代表

方法分析。可以直观地发现雷达与相机的融合方法整体效果要优于多相机与多雷达融合方法。

表 1 传感器综合对比

Tab. 1 Comprehensive Comparison of Sensors

传感器指标	雷达	相机
成本(元)	5000 ~ 200000	1000 ~ 20000
探测距离(m)	50 ~ 200	0.5 ~ 200
探测角度(°)	15 ~ 360	10 ~ 120
障碍物探测	好	中
物体识别	中	好
探测距离	好	中
轮廓精度	好	好
弱光表现	好	差
成熟度	差	好
抗恶劣天气	好	差

2.3.2 基于雷达与相机融合的目标检测技术

雷达与相机的联合检测使用随着各自传感器技术的不断发展已愈趋向于成熟。在 1991 年,丰田首次推出倒车摄像头,这是最直观的传感器,因

为它就像我们的眼睛一样工作。经过 10 年的备用辅助使用后,汽车摄像头在 2010 年代经历了重大改进,被应用于车道保持和车道居中辅助。随着该领域的不断发展,可以发现视觉传感器设备

表 2 传感器融合方法对比

Tab. 2 Comparison of Sensor Fusion Methods

检测方法	成本	系统架构难易度	检测广度 ^[36-38]	检测精度 ^[39]
雷达 - 雷达	昂贵	困难	不能显示纹理特征颜色	拥有良好的检测准确率
相机 - 相机	较昂贵	较困难	可以解决部分光源缺少的环境检测广度,但不能完全克服	根据不同相机类型搭配可以有有限的提升在恶劣天气下检测准确率
雷达 - 相机	较昂贵	困难	可以显示纹理特征颜色信息,在光源缺失下仍然有好的检测广度	拥有比较优秀的检测准确率,能够良好的克服自然环境影响

表 3 几种代表方法分析

Tab. 3 Analysis of Several Representative Methods

代表方法	适用场景	平均检测精准率(%)	优缺点	未来发展方向
MODT 感知方法 ^[8]	城市道路目标	87.80	所提出的架构具有更好的目标检测竞争力,但所花费的时间是常规方法的两倍	精简框架,提高运行效率
多个 3D 雷达感知方法 ^[9]	少许动态的地面目标	98.77	实际应用场景中,对于动态目标具有较低的误判率,未针对复杂环境下进行融合检测	针对复杂场景应用优化方案
概率数据关联融合算法 ^[13]	任意的环境下	88.70	拥有比较优秀的检测精准率,但是融合架构搭建困难,成本高昂	简化融合算法流程降低传感器数量。
CenterFusion 方法 ^[15]	对陆地交通出行工具进行检测	51.04	是一次尝试,在不同距离,角度都有基于以往检测效果和检测效率的提升,但是检测平均精准度仍然需要提高	对检测的平均精准度提高
摄影测量传感方法 ^[32]	测量海下人工鱼礁	97.50	针对特定的场景有着较好的信噪比	丰富使用场景效果
RoDNet 深度目标检测系统 ^[40]	各种驾驶场景	86.00	该系统鲁棒性高,精准率高,需要强大的运算能力支持	对于轻量型的架构进一步研发
基于概率关联的传感器融合方法 ^[41]	海上目标追踪	96.60	有着很好的海天检测能力、可靠的目标检测能力以及抗干扰能力	商业化的实际运用

成本愈来愈低。同样的,由于相机与人眼的相似性,人们对采集到的图像在目标检测追踪任务中易于被人们所判断,因此相机被广泛运用于人工智能领域,但它与人眼的相似性也使其在暴风雪,海上浓雾天气等极端恶劣天气条件下导致的信息采集失常。而雷达与视觉传感器相比较,则可以很好的克服在恶劣天气下的影响^[1]。雷达(无线电探测与测距)最早是二战之前发明的,自那时起就被广泛用于精确跟踪飞机和船只的位置、速度和方向。它于1999年由梅赛德斯-奔驰引入汽车,以支持其自适应速度功能,随着雷达技术的更新迭代,在搜索,监视和识别目标中均具有良好的工作能力且能够克服恶劣天气下的影响^[25]。但获取的目标的特征纹理信息与视觉传感器存在巨大差距。基于此,对雷达与相机的融合,可以在不同的融合框架下发挥雷达和视觉传感器的优势,如数据级、特征级、决策级等其它融合框架融合来弥补它们传感器自身的不足之处,但这也需要在融合系统的底层对两个传感器进行时间和空间信息的融合^[43,44],并需要克服融合存在的其它问题,下一章给出了解决传感器融合存在的问题的一些国内外具体研究方法。

学者许大光^[42]通过使用决策级信息融合方法对雷达相机融合。决策级融合是数据融合的最高层次,该融合方法是根据不同的传感器所获得的识别结果,通过制定相应的融合规则,将两个传感器获得的障碍物信息进行融合计算并生成实验信息表,对存在的问题及相应的参数进行的不断调优化,生成最终模型,并利用该模型进行识别目标。信息融合方法的模型图如图5所示。

3 传感器融合的检测方法对比

通过对多传感器融合的海上目标检测技术已

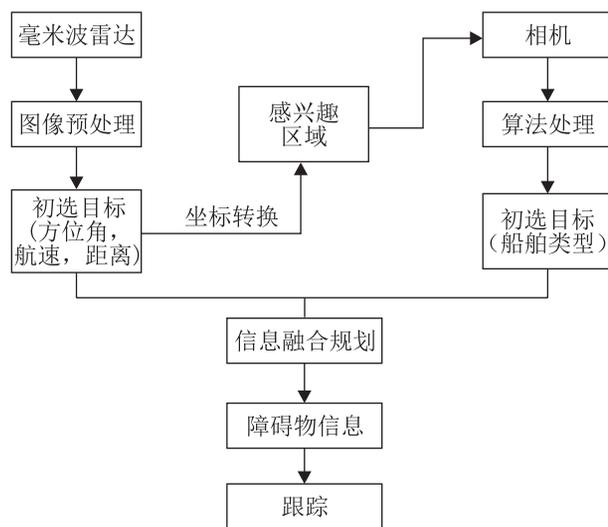


图5 信息融合原理图^[42]

Fig. 5 Schematic Diagram of Information Fusion^[42]

经有了比较成熟的几种方案。以下着重介绍多雷达融合和相机雷达融合方法。Jungwook等^[45]介绍了一种航海雷达与激光雷达的信息融合方案,目标检测流程图如图6所示。它使用了航海脉冲雷达(Furuno FAR-2117)和3D激光雷达(Velody HDL-32E),在800米内均能有效进行目标检测,但该方案实施的成本高昂、数据流处理复杂,时间同步与空间同步融合方法复杂难以灵活使用,不适合大部分研究者的继续深入探索,也不适合中小企业的实际应用。

D. Hermann等^[46]提出了一种雷达和相机的传感器融合策略,进一步补充了专用的滤波和统计方法以获得高机动性和快速规划船的海上行动的稳健效果。如图7所示,通过利用摄像头作为辅助传感器对船舶的位置和姿态滤波器进行鲁棒化处理,一种基于视觉的水平检测被利用来提供额外的横摇和俯仰角测量,并利用计算机视觉临时跟踪雷达视野外的障碍物,在障碍物进入两传感器视野内进行信息融合。全尺寸海试表明,使用雷达和计算机视觉传感器融合的方法对障碍物

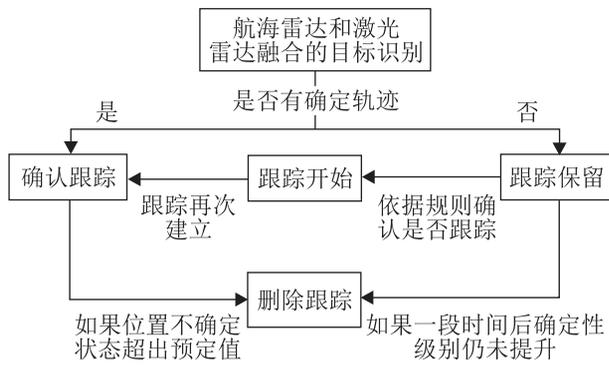


图 6 目标检测流程图

Fig. 6 Flowchart of Target Detection

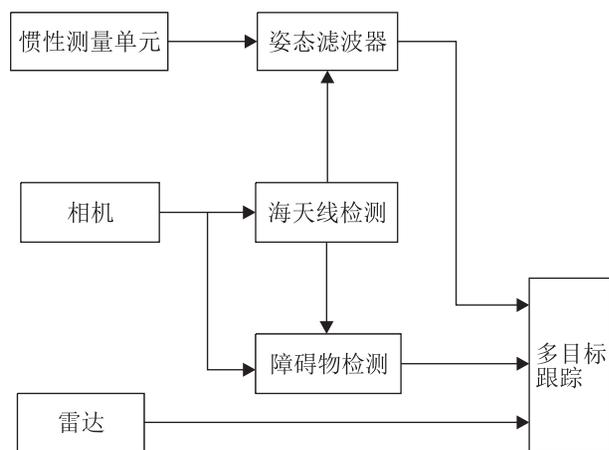


图 7 融合算法流程图

Fig. 7 Flow Chart of Fusion Algorithm

目标进行跟踪,性能得到显著提高,融合的有效检测范围在 175 米内,但与单目标检测的精准率差距悬殊,仍有很大的研究空间。

在 2017 年,国内上海交通大学的王贺升团队^[47]提出了一种基于雷达和单相机的融合系统,用于探测识别湖泊中的船舶。该方法在两个传感器上进行了并行评估,采用了一种协同技术实现激光雷达和单目相机的信息集成。如图 8 所示,利用雷达与相机分别采集信息对雷达采集处理后的图像平面与相机进行时空同步,判断雷达检测到图像是否能够与支持向量机(Support Vector Machine, SVM)分类器和视觉显著性检测结果重叠,如果检测结果一致,确定候选容器为目标容

器,否则雷达和相机将再次连续检测 10 帧,投影到图像平面的雷达目标与 SVM 分类器进行比对,如果不少于 5 帧内视觉检测结果相吻合,则也可确定目标为待跟踪目标。如果以上两种结果均不存在,则需要对下一帧的图像进行判断。同时在该方法中,对目标验证之后采用了卡尔曼滤波对目标进行跟踪,在视觉检测中采用了在线跟踪。实验结果表明,该方法在船舶检测和分类中有着较高的检测率,精准率可达 95.68%。但是该系统的有效检测距离是 20 米,导致两个传感器对周围环境监测的利用率低,是需要待改进的缺陷。

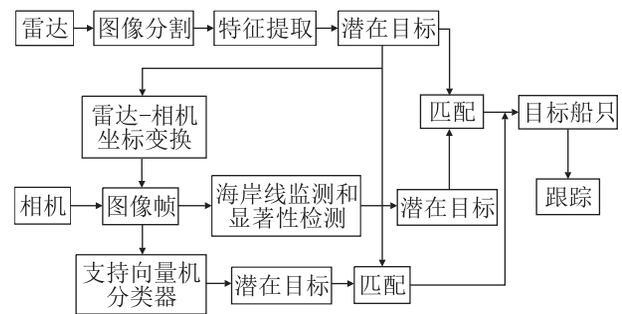


图 8 融合算法流程框图^[47]

Fig. 8 Flow Chart of Fusion Algorithm^[47]

关于车载传感器融合技术则比船载融合技术的起源要早,相对应的方案也更加成熟。车载传感器融合的目前有两条主流路线。第一路线是以摄像头为核心的传感器融合技术;微软、百度、特斯拉、美团、滴滴等公司都是基于此方案进行的相关研发。摄像头可以获取车辆周围的画面数据,通过对画面数据的分析和处理,作出有效的应对。优点是成本低廉,缺点则是因为实际环境的三维变换不同于简单的二维环境,因此,这一技术显得不太成熟。第二路线是以激光雷达、毫米波雷达,并以摄像头为核心的传感器融合技术;如华为等。为了实现对车辆周边路况更好更准确的判断,很多公司开始引入毫米波和激光等技术,配合不同硬件进行分析和判断。提高了感知能力的同

时,增加了硬件的实现成本,同时技术的复杂度也明显提升。同时国内外研究学者也为解决传感器融合检测而产生的问题提供了一些新的研究思路:国内学者高洁等^[48]针对设备感知能力的提高,提出的 PRRPN 方法很好的克服传感器关联而衍生的问题并有效的提高了目标检测能力;国外学者 Park 等^[49]针对不同类型传感器数据产生的误差问题提出了一种基于融合的车辆识别方法,该方法能够有效消除相机与雷达收集数据过程中的误差; Mendez 等^[50]针对传感器融合系统克服恶劣天气和传感器自身问题通过提出边缘计算张量处理单元设备作为硬件支持并对传感器多级融合模型进行网络边缘优化来提升融合的整体效果。总的来说。传感器融合效果和方法正愈发成熟。

可以发现,无论是车载传感器融合技术还是船载融合技术,都是通过异构传感器来扑捕获目标的各种物理属性并通过传感器融合方式的积极应用以实现目标检测的一致性。但让这些不同的系统实时相互通信是极具挑战的,不同传感器的数据流在许多方面彼此不同,例如时间分辨率、数据格式和几何对齐,为了使后续的感知算法利用多模态传感器提供数据的多样性的优势,数据流需要在空间、几何和时间上对齐。而实现这些对齐是复杂的,也就从根本上导致了传感器融合的难度。

4 总结与展望

本文首先给出了海上目标检测方法的问题与挑战,接着对实现海上目标检测方法的进行了梳理归纳,介绍了多雷达检测方法、多相机检测方法以及相机雷达检测方法,并详细说明了这几种方法存在的不足。同时给出了相机雷达融合方法略优于前两种方法的结论,接着着重介绍了多雷达

融合方法与相机雷达融合方法实现方式的异同,指出了传感器融合技术存在一些发展性问题并对全文进行总结。

目标检测一直是各个研究领域的热点问题,而海上目标检测是实现诸多海洋装置设备功能的关键性技术。但海上目标检测技术在实际应用中仍存在一些缺陷,本文认为未来海上目标检测技术有以下几个方面:一是信号处理水平的发展,海上杂波繁多,需要对这些掺杂在信号中的噪声进行有效抑制消除;二是多目标检测的发展,当前国内外的学者的研究大多是对有限种类的目标进行检测追踪,实际场景中则是多目标出现,对多目标检测数据关联性大,计算量庞大还未找到实用的解决方法;三是将深度学习运用到海上目标检测的智能处理,尽管已有将深度学习运用在海上目标检测中,但实现方法复杂,效果仍不理想等问题。最后也相信海上目标检测技术定能在海洋领域中实现突破。

参考文献

- [1] ZOU Xinrui. A Review of Object Detection Techniques [C]. 2019 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA). IEEE, 2019:251-254.
- [2] MU Xiangwei, LIN Yingxia, LIU Jiachen, et al. Surface Navigation Target Detection and Recognition Based on SSD [C]. 2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE). IEEE, 2019:649-653.
- [3] CHEN Xiaolong, CHEN Weishi, RAO Yunhua, et al. Progress and Prospects of Radar Target Detection and Recognition Technology for Flying Birds and Unmanned Aerial Vehicles [J]. Journal of Radars, 2020, 9(5):803-827.

- [4] LI Lixiang, MU Xiaohui, LI Siying, et al. A Review of Face Recognition Technology [J]. IEEE Access, 2020, 8:139110-139120.
- [5] SZELANGIEWICZ T, ŻELAZNY K. Unmanned Ships-maritime Transport of the 21st Century [J]. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, 2020, 64(136):14-21
- [6] HU Xinming, FU Huaichun, WU Xiang. Research on Technology of Sea Emergency Rescue Based on Unmanned Surface Vehicle [C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020, 1575(1): 012097.
- [7] CHENSKY D A, AISUEV B B, CHENSKY A G, et al. Water Environment Monitoring with an Autonomous Unmanned Surface Vessel [C]. Journal of Physics:Conference Series. IOP Publishing, 2021, 1728(1):012002-012008.
- [8] SUALEH M, KIM G W. Dynamic Multi-lidar Based Multiple Object Detection and Tracking [J]. Sensors, 2019, 19(6):1474-1480.
- [9] TASDELEN E A, SEZER V. Comparison and Application of Multiple 3D LIDAR Fusion Methods for Object Detection and Tracking [C]. 2020 5th International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE). IEEE, 2020:64-69.
- [10] KANNO A, TAKAOKA R, OTANI S, et al. Handheld Millimeter-wave Radar and Lidar Systems Using an IMU Device [C]. Passive and Active Millimeter-wave Imaging XXII. International Society for Optics and Photonics, 2019, 10994:1099407-1099415.
- [11] DANG Xiangwei, QIN Fei, BU Xiangxi, et al. A Robust Perception Algorithm Based on a Radar and LiDAR for Intelligent Driving [J]. Journal of Radars, 2021, 10(4):622-631.
- [12] ZHANG Yingchao, MA Zhaoyou, HAN Wen, et al. Intelligent Traffic Detection with Millimeter-wave Radar and Camera [C]. International Conference on Intelligent Traffic Systems and Smart City (ITSSC 2021). SPIE, 2022, 12165:633-639.
- [13] XIONG Hui, YU Dameng, LIU Jinxin, et al. Fast and Robust Approaches for Lane Detection Using Multi-camera Fusion in Complex Scenes [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2020, 14(12):1582-1593.
- [14] SAURAV S, SAINI R, SINGH S. A Dual-stream Fused Neural Network for Fall Detection in Multi-camera and 360° Videos [J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34(2):1455-1482.
- [15] FENG Qi, WANG Tianjiang, LIU Fang, et al. Research on Multi-camera Information Fusion Method for Intelligent Perception [J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(12):15003-15026.
- [16] MAJUMDER U K, BLASCH E P, GARREN D, et al. Deep Learning for Radar and Communications Automatic Target Recognition [M]. California, USA: Artech House, 2020:147-157.
- [17] WANG Zhanglin, MIAO Xianhan, HUANG Zhen, et al. Research of Target Detection and Classification Techniques Using Millimeter-wave Radar and Vision Sensors [J]. Remote Sensing, 2021, 13(6):1064-1069.
- [18] WANG Zhangjing, WU Yu, NIU Qingqing. Multi-sensor Fusion in Automated Driving: A Survey [J]. IEEE Access, 2019, 8:2847-2868.
- [19] LI Ronghui, WU Jinshan, CAO L. Ship Target Detection of Unmanned Surface Vehicle Base on Efficientdet [J]. Systems Science & Control Engineering, 2021:1-8.
- [20] 蒋永馨, 袁群哲, 邵承永, 等. 海上远景小目标检测方法的研究 [J]. 光电工程, 2011, 38(10): 46-50.
- [21] ZHANG Kun, LUO Yasong, LIU Zhong. Overview of Research on Marine Target Recognition [C]. 2nd International Conference on Computer Vision,

- Image, and Deep Learning. SPIE, 2021, 11911: 273-282.
- [22] ZHENG Le, LOPS M, ELDAR Y C, et al. Radar and communication Coexistence: An overview: A Review of Recent Methods [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2019, 36(5):85-99.
- [23] LIN Jiaying, KOCH L, KUROWSKI M, et al. Environment Perception and Object Tracking for Autonomous Vehicles in A Harbor Scenario [C]. 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2020:1-6.
- [24] STATECZNY A, KAZIMIERSKI W, GRONSKA-SLEDZ D, et al. The Empirical Application of Automotive 3D Radar Sensor for Target Detection for an Autonomous Surface Vehicle'S Navigation [J]. Remote Sensing, 2019, 11(10):1156-1164.
- [25] FENG Zhiyong, FANG Zixi, WEI Zhiqin, et al. Joint Radar and Communication: A Survey [J]. China Communications, 2020, 17(1):1-27.
- [26] 余必秀. 基于多传感器的内河无人测量船航行环境感知系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2018.
- [27] 庄佳园, 徐玉如, 万磊, 等. 基于雷达图像的水面无人艇目标检测技术[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012(2):129-135.
- [28] 庄加兴, 焦依, 殷非. 毫米波雷达与激光雷达在无人船上的应用[J]. 船舶工程, 2019, 41(11): 79-82.
- [29] 李文强. 海面无人船视觉环境感知系统研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2019, 6:5-17.
- [30] NGUYEN M N T. Modeling Ka-band Radar System to Characterize the EM Wave Propagation Properties in the Application of Target Detection [C]. 2021 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE). IEEE, 2021: 129-132.
- [31] LI Chun. Dim Target Detection of High Speed Moving Radar in Complex Electromagnetic Environment [C]. International Conference on High Performance Computing and Communication (HPCCE 2021). SPIE, 2022, 12162:37-41.
- [32] ROFALLSKI R, THOLEN C, HELMHOLZ P, et al. Measuring Artificial Reefs using a Multi-camera System for Unmanned Underwater Vehicles [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences- ISPRS Archives, 2020, 43(B2):999-1008.
- [33] RAO Jinhui, XU Kai, CHEN Jinbo, et al. Sea-Surface Target Visual Tracking with a Multi-camera Cooperation Approach [J]. Sensors, 2022, 22(2): 693-703.
- [34] KULATHUNGA G, BUYVAL A, KLIMCHIK A. Multi-camera Fusion in Apollo Software Distribution [J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(8):49-54.
- [35] KHAN M N, AL H M, ANWAR S. Improving the Robustness of Object Detection Through a Multi-camera-based Fusion Algorithm Using Fuzzy Logic [J]. Frontiers in Artificial Intelligence, 2021, 4: 638591-638603.
- [36] HOTH J, BANYS P, SIEGERT G, et al. Performance Analysis of a Simulated Distributed Multi-radar System for Target Detection [C]. 2017 18th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2017:1-10.
- [37] 张鹏, 宋一凡, 宗立波, 等. 3D目标检测进展综述[J]. 计算机科学, 2020, 47(4):94-102.
- [38] DROZD A L, KASPEROVICH I, CARROLL C E, et al. Employing Frequency and Antenna Spatial Diversity for Improved, Non-emi Limited Multi-radar Target Detection and Tracking [C]. 2006 International Waveform Diversity & Design Conference. IEEE, 2006:1-8.
- [39] KIT. The KITTI Vision Benchmark Suite [EB/OL]. [2022-02-07]. http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/eval_object.php.

- [40] WANG Yizhou, JIANG Zhongyu, LI Yudong, et al. RODNet: A Real-time Radar Object Detection Network Cross-supervised by Camera-radar Fused Object 3D Localization [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2021, 15(4): 954-967.
- [41] DEFILIPPO M, SACARNY M, ROBINETTE P. Robo Whaler: A Robotic Vessel for Marine Autonomy and Dataset Collection [C]. OCEANS 2021: San Diego-Porto. IEEE, 2021: 1-7.
- [42] 许大光. 基于信息融合的无人船艇目标检测技术[D]. 厦门: 集美大学, 2020.
- [43] 高宗江, 张英俊, 孙培廷, 等. 无人驾驶船舶研究综述[J]. 大连海事大学学报, 2017(2): 1-7.
- [44] 张胜男. 基于多传感器的无人船环境感知研究[D]. 海口: 海南大学, 2018.
- [45] HAN J, KIM J, SON N S. Persistent Automatic Tracking of Multiple Surface Vessels by Fusing Radar and Lidar [C]. Oceans. IEEE, 2017: 1-5.
- [46] HERMANN D, GALEAZZI R, ANDERSEN J C, et al. Smart Sensor based Obstacle Detection for High-speed Unmanned Surface Vehicle [J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48(16): 190-197.
- [47] ZHANG Xiangli, WANG Heshen, CHENG Weidong. Vessel Detection and Classification Fusing Radar and Vision Data [C]. 2017 Seventh International Conference on Information Science and Technology (ICIST). IEEE, 2017: 474-479.
- [48] 高洁, 朱元, 陆科. 基于雷达和相机融合的目标检测方法[J]. 计算机应用, 2021, 41(11): 3242.
- [49] PARK M Y, LEE S K, SHIN D J. A Vehicle Recognition Method based on Radar and Camera Fusion in an Autonomous Driving Environment [J]. International Journal of Advanced Smart Convergence, 2021, 10(4): 263-272.
- [50] MENDEZ J, MOLINA M, RODRIGUEZ N, et al. Camera-LiDAR Multi-level Sensor Fusion for Target Detection at the Network Edge [J]. Sensors, 2021, 21(12): 3992-3997.

作者贡献说明

李永国: 设计文章框架, 确定文章主题;

徐彩银: 撰写文章初稿, 修改文章;

汤璇: 整理资料并分析;

李祥燕: 修改稿件格式。

作者简介



徐彩银: 在读硕士研究生; 主要研究方向: 多传感器融合、图像识别、机器视觉。