**内河航运自动化的感知融合系统研究**

陈冬杰

中国船舶科学研究中心

摘要：主要研究了实现内河航运自动化的重要组成部分，船舶的感知融合系统。通过对感知融合系统的国内研究现状和实现难点的分析，提出了采用激光雷达、毫米波雷达和摄像头为主要感知设备的融合系统架构，并给出系统上位机和下位机软件的应实现的功能。针对感知融合系统需要解决的时间同步和设备空间标定问题，本文采用了xenomai软件上的clock\_gettime函数功能实现了不同感知设备的时间同步，然后从对应的传感器坐标与世界坐标计算得到转换参数，获取传感器设备与世界坐标之间的转换关系，从而实现了不同感知设备的空间标定。

关键词：内河航运自动化；感知融合；时间同步；空间标定

**1 引言**

我国目前在内河航运自动化方面取得了显著成就，已全面掌握自动化码头设计建造、装备制造、系统集成、运营管理全链条关键技术。自主研发了自动化集装箱码头“大脑”——生产管理系统（TOS系统）和设备控制系统（ECS系统）并实现了推广应用。此外，纯电池、LNG动力等清洁能源船舶加快投运，长江经济带船舶和港口污染防治长效机制不断健全，初步实现船舶污染物来源可溯、去向可寻。同时，江苏等地在推动智慧航运发展方面走在前列，通过建设“智汇江海”大数据管理平台等举措，实现了信息共享和资源综合利用，为推进海事治理体系和治理能力现代化提供了有力支撑。

综上所述，内河航运的自动化是航运行业发展的重要趋势，它将在提高船舶操作的安全性、效率和可靠性以及满足环保要求等方面发挥重要作用。随着科技的不断进步和航运行业的持续发展，内河航运的自动化水平将不断提升，而感知设备及感知方案作为船舶自动化的眼睛，其识别的准确度关系着航运的安全，尤为重要。

**2 内河航运自动化对感知设备的要求**

内河航运自动化对感知设备的要求主要体现在以下几个方面：

（1）高精度与实时性

高精度：感知设备需要能够准确、可靠地获取船舶及航道环境的相关信息，如船舶位置、速度、航向、航道水深、水流速度、风向风速等。这些数据的精度直接影响到自动化系统的决策和控制效果。

实时性：感知设备必须能够实时或接近实时地传输数据，以确保自动化系统能够迅速响应航道环境的变化，及时调整船舶的航行状态。

（2）稳定性与可靠性

稳定性：感知设备在恶劣的航运环境中（如大风、大浪、高温、高湿等）需要保持稳定的性能，不受外界因素的干扰，确保数据的连续性和准确性。

可靠性：设备应具备高可靠性，减少故障率和维修时间，避免因设备故障导致的数据中断或错误，从而保障航运安全。

（3）多源融合与智能化

多源融合：内河航运自动化系统往往需要多种感知设备的协同工作，因此感知设备应具备良好的数据融合能力，能够将不同来源的数据进行有效整合，提高系统的综合感知能力。

智能化：随着人工智能技术的发展，感知设备应具备初步的智能化功能，如自动识别、自动分类、自动预警等，以减轻人工负担，提高航运效率。

（4）通信与互联

通信能力：感知设备应具备良好的通信能力，能够与支持自动化系统的各种通信协议和接口进行无缝连接，确保数据的顺畅传输。

互联性：设备应能够与其他航运基础设施（如港口、航道、船闸等）实现互联互通，形成完整的航运信息网络，为航运自动化提供全面的数据支持。

**3 感知融合系统**

**3.1感知对象**

内河航运中主要的感知对象就是障碍物与航道，利用激光雷达、摄像头等传感器，识别航道内的障碍物（如暗礁、浅滩、沉船等）和航道标识（如浮标、航标等），确保船舶在航道内安全航行。

**3.2系统架构**



**图1 感知融合方案的系统架构**

系统架构如上图所示，主要感知设备采用激光雷达、毫米波雷达和摄像头，系统包括两大部分，下位机软件系统和上位机软件系统。下位机软件系统运行在嵌入式核心开发板上，上位机软件系统运行在工控机上，两者之间要进行实时信息交互。

**3.3系统功能**

融合感知端侧系统的下位机软件功能说明如下：

（1）下位机软件通过通信接口实时接收激光雷达信息，毫米波雷达信息和摄像头信息，并实现数据实时解析。

（2）实现设备内部所有传感器之间的时间同步，给传感器数据打上精确的时间戳。

（3）在传感器发生偏移的情况下能够实时纠偏。

（4）与上位机进行实时数据交互。

融合感知端侧系统上位机软件功能说明如下：

（1）实现数据采集功能，可命令传感器开始采集数据，并按规定的格式进行存储，提供数据采集信息打印功能。

（2）实现数据传输调试功能，可调节并显示数据传输速率，选择数据传输接口类型，提示数据传输开始与结束。

（3）实现设备管理功能，包括远程参数配置管理，如更改设备的IP、采样频率、内部传感器参数；设备接入管理，如设备的动态接入与配置信息的动态加载；设备工作状态的监控管理。

（4）实现传感设备的空间标定，支持传感设备与世界坐标之间的关系转换，包括摄像头、毫米波雷达和激光雷达传感设备。

（5）实现感知融合处理，包括激光雷达感知、毫米波雷达感知、视觉感知、单点多传感器融合感知，以及航道边设备的多点感知结果的融合。

本方案如图1所示的下位机和上位机所示的模块（或具有同等作用的相关模块），分别对应运行在嵌入式核心开发板上的下位机软件系统，运行在工控机上的上位机软件系统。下位机软件系统以激光雷达、毫米波雷达和摄像头信号作为输入，上位机软件系统以检测的目标物状态作为输出，并提供可视化界面，上、下位机之间通过客户服务器的方式进行实时的信息交互。

**3.4时间同步**

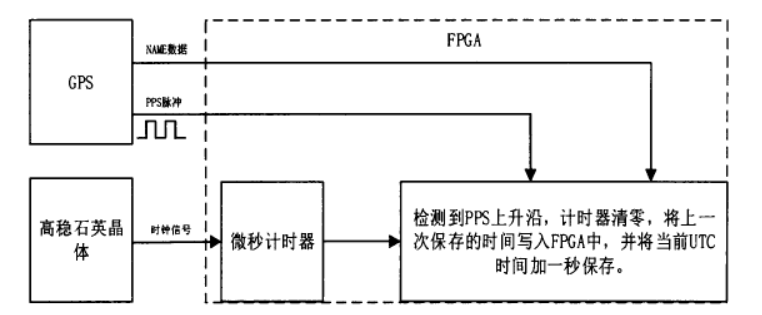
（1）软件概述

嵌入式系统和传感器时间同步软件主要运行于下位机，主要对各个传感器采集后传输至下位机上的数据打上时间戳，时间戳的获取可采用如xenomai上的clock\_gettime(CLOCK\_MONOTONIC)，该函数返回一个单调时钟值，单调时钟值保证时间总是向前，而不会出现时钟回拨现象。另外，对于自带时间戳的传感器，可根据gps的pps输出进行时间同步。对于由下位机打时间戳的传感器数据，只需保证下位机时钟源精度，之后可根据传感器内部延迟和传输延迟对时间戳进行补偿，实现时间一致性。

（2）软件设计

1) 时钟源精度

软件获取的时间戳精度取决于作为时钟源的石英振荡器的精度，要达到微秒级同步精度要求石英振荡器的精度低于微秒级。那么目前普通计算机中偏移为200ppm（百万分之一）的时钟是不能满足要求的，因为每过30秒，其可能出现的最大偏差为6毫秒，故要满足微秒级精度，时钟源需特别定制，该方式采用以FPGA为主控芯片，利用高稳石英晶体为同步控制系统提供工作时钟，高稳石英晶体的输出时钟信号被FPGA中的锁相环捕捉，FPGA将对信号进行累加作为系统的参考时钟，同时抓捕GPS输出的PPS脉冲信号上升沿作为绝对整秒的开始，在连续接收到两个PPS脉冲时，将上一PPS对应时间加一秒进行授时，同时清零FPGA内部累加计数器，保证FPGA内部秒脉冲与GPS的PPS秒脉冲的信号边沿对齐，从而实现两者之间时间统一，建立高精度的时间基准。具体过程如下图所示



**图2 高精度时钟源实现方法**

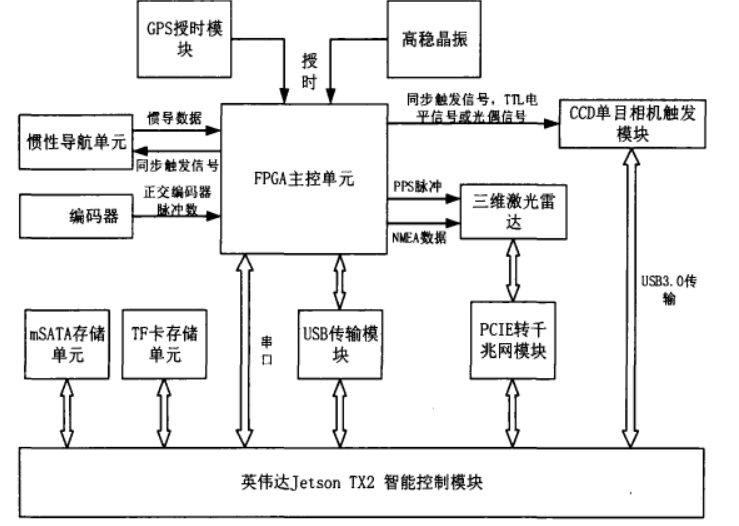
2) 时钟获取

在以（1）方式保证时钟源精度后，可通过调用实时操作系统的单调时钟函数如xenomai上的clock\_gettime(CLOCK\_MONOTONIC)，链接为https://xenomai.org/documentation/xenomai-3/html/xeno3prm/

group\_\_cobalt\_\_api\_\_time.html#ga10b73e75d375e5c244e32ea46be775bf，来获取精确时间以减小误差。

3) 传感器时间同步

传感器时间同步方式如下图3所示，在实现gps的pps和高稳晶振进行ns级计时后，由于传感器间距离很短，故只要保证在传输时延低于微秒级的前提下，选用具有硬触发接口的传感器，根据传感器自身的采集频率，记录触发时间，即可实现传感器间的微秒级时间同步。



**图3 传感器时间同步实现方法**

**3.5设备空间标定**

设备空间标定主要实现传感器设备坐标与世界坐标之间的关系转换，即该软件提供友好交互界面，用于用户输入和管理传感器坐标和世界坐标，以方便获取和查看各传感器设备坐标到世界坐标的标定参数。

（1）设计框架

设备标定软件的处理流程如图所示。处理步骤如下：

1) 确定待标定传感器

不同传感器的标定计算方法不一样，得到的标定参数也不相同，因此首先要确定待标定的传感器再进行下一步操作。

2) 输入坐标数据

获取传感器设备与世界坐标之间的转换关系，通常是从对应的传感器坐标与世界坐标计算得到转换参数。因此输入坐标务必确保传感器坐标与世界坐标一一对应。

3) 计算标定参数和标定误差

在所有坐标输入结束后，软件可以根据一一对应的坐标组，自动计算相应的标定参数并显示；除此之外，软件也能通过得到的标定参数，自动计算此次标定误差以供参考。

（2）功能设计

设备空间标定软件界面如图4所示。界面左侧为参数输入部分，用户需要选择标定设备和输入坐标；界面右侧为参数管理与显示模块，用户可以查看和管理输入的参数，最终得到的结果将在标定结果面板显示。整个界面可由四个面板组成：标定设备面板，坐标输入面板，管理面板，标定结果面板。



**图4 设备空间标定软件模拟界面**

1) 标定设备面板

位于界面的左上位置，在该面板选择需要标定的传感器设备，当前支持的传感器有摄像头、激光雷达和毫米波雷达。在该面板选择的传感器，将显示在“管理面板”中的“标定设备”状态栏，以显示当前标定的传感器类型。

2) 坐标输入面板

位于界面的左下位置，在该面板输入传感器坐标和世界坐标。本软件支持单个坐标的输入，也可支持批量坐标导入。在坐标输入面板的“传感器坐标”输入框中输入传感器坐标值，单击“确定”按钮，若坐标输入正确，则输入的坐标将添加显示在“管理面板”中的“传感器坐标”显示栏中；世界坐标的输入同理。单击“导入传感器坐标”按钮，可支持导入excel文件，批量导入的坐标将添加显示在“管理面板”中的“传感器坐标”显示栏中；世界坐标的批量导入同理。若坐标输入错误，则错误类型将显示在该面板中的日志显示栏。

3) 管理面板

位于界面的右上位置，在该面板可以查看和管理输入的参数。在“标定设备面板”中选择的传感器将在该面板中的“标定设备”状态栏中显示，以显示当前标定的传感器类型。另外，所有在“坐标输入面板”正确输入的坐标都将分别在“传感器坐标”和“世界坐标”显示栏中显示，用户可以查看当前输入的所有有效坐标信息。同时用户可以选中不需要的坐标，单击“删除坐标”按钮删除，也可以单击“导出坐标”，将当前输入的所有有效坐标导出成excel文件保存。所有坐标输入完成后，单击“计算”按钮，即可自动计算标定参数和标定误差，结果将在“标定结果面板”中显示。

4) 标定结果面板

位于界面的右下位置，在该面板显示此次标定结果的参数和标定误差，以供用户参考。

**4 结论**

本文针对感知融合系统软件设计中时间同步和设备空间标定两个难点问题，在现有软件和技术的基础上给出了相应的解决方法，为多个感知设备之间的同步融合给出了行之有效的软件设计方法。

参考文献

1. Nan Zhixiong, Peng Jizhi, Jiang Jingjing, etc. A joint object detection and semantic segmentation model with cross-attention and inner-attention mechanisms[J]. Neurocomputing, 2021.
2. Ning Li, Xin Lv, Shoukun Xu, etc. An Improved Water Surface Images Segmentation Algorithm Based on the Otsu Method[J]. Journal of Circuits System and Computers, 2020.
3. 石兵华, 王晨, 郭佳等. 智能船舶航行场景复杂度感知方法研究[J]. 中国海洋大学学报，2023,53(09): 147-153.
4. 任静, 胡晓轩, 孔宁等. 船舶智能感知车间的网络构建及系统应用[J]. 造船技术, 2022, 50(06): 76-83.
5. 孙旭, 郑凯, 公丕永等. 智能船舶航行态势感知技术现状[J], 船舶工程, 2022, 44 (04): 14-25.
6. 甘兴旺, 魏汉迪, 肖龙飞等. 基于视觉的船舶环境感知数据融合算法研究[J]. 中国造船, 2021, 62 (02): 201-210.

作者简介**:** 陈冬杰，男，1992年11月生，工程师，控制科学与工程专业，从事工作方向：船舶电气设计、网络化控制系统设计。