

团体标准

T/ITS 0283-2024

基于组件化弹性 PNT 平台的无人集群协同 导航与控制框架

Framework for collaborative navigation and control of unmanned systems based on
Componentized resilient PNT platform

20**--**--**发布

2020--**--**实施

中国智能交通产业联盟 发布

中国智能交通产业联盟

目 次

前 言	II
引 言	III
基于组件化弹性 PNT 平台的无人集群协同导航与控制框架	1
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1 组件化 PNT 平台类	1
3.2 导航定位类	3
3.3 无人集群规划控制类	3
4 缩略语	5
5 技术架构	5
5.1 基于组件化弹性 PNT 平台的无人集群协同导航与控制框架	5
5.2 组件化弹性 PNT 平台	6
5.2.1 PNT 组件前端	6
5.2.2 信息融合后端以及协同导航与控制模块	6
6 功能要求	7
6.1 无人集群群内个体功能要求	7
6.1.1 弹性定位功能	7
6.1.2 自标定功能	8
6.2 集群功能	8
6.2.1 集群导航功能	8
6.2.2 集群控制功能	8
7 技术要求	9
7.1 组件化弹性 PNT 技术要求	9
7.1.1 组件化要求	9
7.1.2 弹性化要求	9
7.2 无人集群协同控制技术要求	9

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国智能交通产业联盟（C-ITS）提出并归口。

本文件主要起草单位：中山大学、武汉大学、上海交通大学、之江实验室、湖南大学、山东科技大学。

本文件起草人：成慧、耿江辉、王牌、侯治威、邹丹平、施航、徐莹、路晓庆、缪志强。

引 言

该团体标准建议旨在制定一套基于组件化弹性 PNT 平台的无人集群协同导航与控制框架协议，以实现无人集群的高效、可靠和安全导航控制。通过标准化基于组件化弹性 PNT 平台提供的定位导航信息的无人集群协同导航与控制框架协议，该标准将为基于组件化弹性 PNT 平台的无人集群协同导航与控制提供一套统一、规范的技术指导，从而促进组件化弹性 PNT 平台及无人集群技术的推广和应用。此外，该团体标准还将针对不同应用场景和需求，提供可扩展和可定制化的解决方案，以适应国防安全、应急救援、智能交通、区域测绘等领域的发展需求。

组件化弹性 PNT 模块采用标准化接口设计，支持多源 PNT 传感器的即插即用与动态重构，通过弹性计算与自适应融合增强系统抗干扰、抗欺骗能力，为无人集群提供高可靠、连续稳定的时空信息，是集群协同的基础支撑。无人集群协同导航与控制模块基于群内信息交互与分布式优化算法实现动态组网与自适应路径规划，通过鲁棒控制策略确保路径的精准跟踪，并在干扰条件下实现自主调整，提升无人集群在复杂环境下的任务适应性，是无人集群高效、安全完成任务的重要保障。

该框架具备完整性（覆盖从硬件平台至软件接口、从定位感知到规划控制的全栈、全流程设计）、开放扩展性（兼容任意异构 PNT 传感器与跨域无人平台，支持灵活组网与自适应任务适配）及高可靠性（在动态不确定环境中保持稳定运行），为无人集群的协同作业提供了一套可快速部署、安全可信的一体化解决方案。

中国智能交通产业联盟

基于组件化弹性 PNT 平台的无人集群协同导航与控制框架

1 范围

本文件规定了一套基于组件化弹性 PNT 平台的无人集群协同导航与控制框架，界定组件化弹性 PNT 平台、组件化 PNT 平台为无人集群系统提供导航定位信息、无人集群协同导航与控制的术语、定义、框架和协议。

本文件适用于组件化弹性 PNT 平台、基于组件化弹性 PNT 平台导航定位信息的无人集群协同导航与控制系统的的设计、研制、使用和维护以及相关技术的贸易及交流。

2 规范性引用文件

GB/T 9390—2017 国家标准《导航术语》 Terminology for navigation

GB/T41431—2022 国家标准《家用和类似用途服务机器人术语和分类》Household and similar service robots—Terminology and classification

GB/T17159—2009 国家标准《大地测量术语》 Geodetic terms

GB/T38152—2019 国家标准《无人驾驶航空器系统术语》 Terminology for unmanned aircraft system

GB/T 39267—2020 国家标准《北斗卫星导航术语》Terminology for BeiDou navigation satellite system (BDS)

T/CESA 1192—2022 团体标准《信息技术无人集群术语》

3 术语和定义

GB/T9390—2017、GB/T41431—2022、GB/T17159—2009、GB/T38152—2019、GB/T39267—2020、T/CESA 1192—2022界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 组件化 PNT 平台类

3.1.1

定位 positioning

利用测量信息确定用户位置的过程和技术。

[来源：GB/T 39267—2020, 2.1]

3.1.2

导航 navigation

引导各种载体（飞机、船舶、车辆等）和人员从一个位置点到另一个位置点的过程和技术。

[来源：GB/T 39267—2020, 2.1]

3.1.3

授时 timing

传递标准时间的过程和技术。

[来源：GB/T 39267—2020, 2.1]

3.1.4

定位、导航与授时 positioning, navigation and timing (PNT)

定位、导航与授时通常一起使用，以启用全球卫星导航系统等服务。

3.1.5

组件化 PNT componentized PNT

通过标准化软硬件接口实现模块化的 PNT 架构，其核心特征为 PNT 组件前端观测建模与信息融合后端弹性融合的解耦设计，具备即插即用、无缝重构及开放扩展能力。

3.1.6

PNT 组件前端 PNT component front-end

包含传感器元件、数据传输接口、边缘计算芯片及观测预处理算法，对实现 PNT 功能所需的自然或人造信息进行采集和预处理的模块。

3.1.7

标准化观测建模 standardized observation modeling

为 PNT 组件前端建立标准化函数模型与随机模型。

3.1.8

信息融合后端 information fusion back-end

包含数据传输接口、信息融合芯片及信息融合算法，对所有采集的信息进行信息融合，并输出定位、导航与授时信息的模块。

3.1.9

弹性 PNT resilient PNT

具备抗干扰与快速恢复能力的 PNT 系统技术体系。在信号拒止、干扰或欺骗等异常环境下，可通过替代、增强或容错机制维持服务；当威胁消除后，能自主恢复至正常状态，确保 PNT 服务的高可用性、连续性和完好性。

3.1.10

组件化弹性 PNT 平台 componentized and resilient PNT platform

具备即插即用、无缝重构及开放扩展的组件化能力、以及抗干扰与快速恢复能力的 PNT 系统，包括 PNT 组件前端（3.1.6）与信息融合后端（3.1.8）。

3.1.11

动态重构 dynamic reconfiguration

在系统运行过程中根据环境变化，实时自适应调整参与信息融合的 PNT 组件的组成、PNT 组件的参数配置以及信息融合策略，以实现复杂场景下弹性 PNT 的技术方法。

3.2 导航定位类

3.2.1

组合导航 integrated navigation

把两种或两种以上不同的导航设备以适当的方式组合在一起，利用其性能的互补特性，以获得比单独使用任意单个系统更高的导航性能的一种导航方法。

[来源：GB/T 9390—2017, 8. 1]

3.2.2

时间同步 time synchronization

将两个或多个独立时钟系统通过特定技术手段建立统一时间基准的过程。通过协调各系统的时间偏差和频率差异，实现纳秒至微秒级的时间对齐精度，从而满足数据融合、协同作业等应用的时序一致性要求。

3.2.3

外参标定 extrinsic calibration

确定多传感器系统间空间变换关系的技术过程。通过建立不同传感器坐标系之间的旋转矩阵和平移向量，实现数据的空间对齐。

3.2.4

地图构建 mapping

利用环境中几何和可探测的特征、地标和障碍建立环境地图来描述环境。

[来源：GB/T 12643—2013, 7. 6]

3.2.5

状态估计 state estimation

根据可获取的量测数据估算动态系统内部状态的方法。在PNT应用中，内部状态通常包括载体的速度、位置、姿态等参数。

3.3 无人集群规划控制类

3.3.1

无人系统 Unmanned system

在无人操作且有人监控情况下完成特定任务的系统。

示例：无人系统可以是移动的或固定的，包括无人地面设备、无人空中设备、无人水下设备、无人水面设备和其他使用智能传感器技术无人操作的设备及相关系统。

[来源：T/CESA 1192—2022, 3. 1. 1]

3.3.2

无人集群[系统] unmanned swarm [system]

一组共同自主、协调、鲁棒地完成特定任务的无人系统。

[来源：T/CESA 1192—2022, 3. 1. 3]

3.3.1.1

同构[无人]集群[系统] Homogeneous unmanned swarm [system]

具有相同属性的无人系统（3.3.1）组成的无人集群[系统]（3.3.2）。

[来源：T/CESA 1192—2022, 3.1.3.2]

3.3.1.2

异构[无人]集群[系统] heterogeneous unmanned swarm [system]

具有不同属性的无人系统（3.3.1）组成的无人集群[系统]（3.3.2）。

[来源：T/CESA 1192—2022, 3.1.3.1]

3.3.3

协同 cooperation

多无人系统（3.3.1）基于信息、资源以及责任的共享机制合力规划、实施和评估，共同完成某一任务的方式。

[来源：T/CESA 1192—2022, 3.1.5]

3.3.4

协同导航 cooperative navigation

利用信息交互与共享，根据导航任务与多无人系统（3.3.1）的状态信息，通过设计合适的协同导航方法，生成多无人系统（3.3.1）的期望状态信息（位置、速度、姿态和队形）。

3.3.5

协同控制 cooperative control

利用信息交互与共享，通过设计合适的局部控制策略以合理的方式协同行动，共同完成特定任务的模式。

[来源：T/CESA 1192—2022, 3.3.1]

3.3.6

编队控制 formation control

通过集群内信息共享和通信，设计适当的控制策略，使得无人集群在运动过程中以预定的几何构型，即无人集群内部各个个体之间维持既定的相对距离的控制方法。

3.3.7

一致性控制 consensus control

通过信息交互和局部控制规则，使无人集群[系统]（3.3.2）中所有无人系统（3.3.1）的状态随时间逐渐趋于一致，从而完成特定任务的模式。

[来源：T/CESA 1192—2022, 3.3.3]

3.3.8

集群控制模块 cluster control module

负责实现无人集群（3.3.1）的协同控制（3.3.2）、编队控制（3.3.3）和速度一致性控制（3.3.4）等的软/硬件模块，可以分布式地装配在集群内的各无人系统上，包括机载电脑和

控制板等核心硬件部件,集成了集群控制(3.3.2)、编队控制(3.3.3)和速度一致性控制(3.3.4)等核心控制方法。

3.3.9

集群控制模块输入 input of the cluster control module

集群控制模块(3.3.5)的输入信号,支持集群控制模块(3.3.5)正常工作。包括“组件化PNT平台协同导航定位模块”提供的集群内各无人系统当前的位置、姿态与速度信息,以及通过集群内信息共享方式获得的邻近个体的当前位置、姿态、速度信息。

3.3.10

集群控制模块输出 output of the cluster control module

集群控制模块(3.3.4)的输出信号,包括集群内各无人系统的参考/期望位姿、速度或加速度等信息。

3.3.11

协同规划 cooperative planning

利用信息交互和共享,通过设计合适的协同路径规划方法,规划无人集群从初始状态到达目标状态的安全避碰路径,避免群内各无人系统之间的碰撞以及各无人系统与外部障碍物的碰撞。

3.3.12

高动态自组网 highly dynamic ad hoc

无人系统(3.3.1)通过高弹性网络体系架构和路由协议,实现高效信息交互和任务协同的自组网。

[来源: T/CESA 1192—2022, 3.4.1]

4 缩略语

PNT: 定位导航与授时(Positioning, Navigation and Timing)

GNSS: 全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System)

5 技术架构

5.1 基于组件化弹性 PNT 平台的无人集群协同导航与控制框架

基于组件化弹性PNT平台的无人集群协同导航与控制框架见图1。组件化弹性PNT平台搭载于群内各无人系统上,为无人系统提供导航定位信息;PNT平台和无人系统之间通过硬件接口完成硬件连接,通过标准化协议完成信息交互。群内各无人系统遵循群内通信标准化协议,通过无线通信接口完成群内无人系统之间的互相通信。

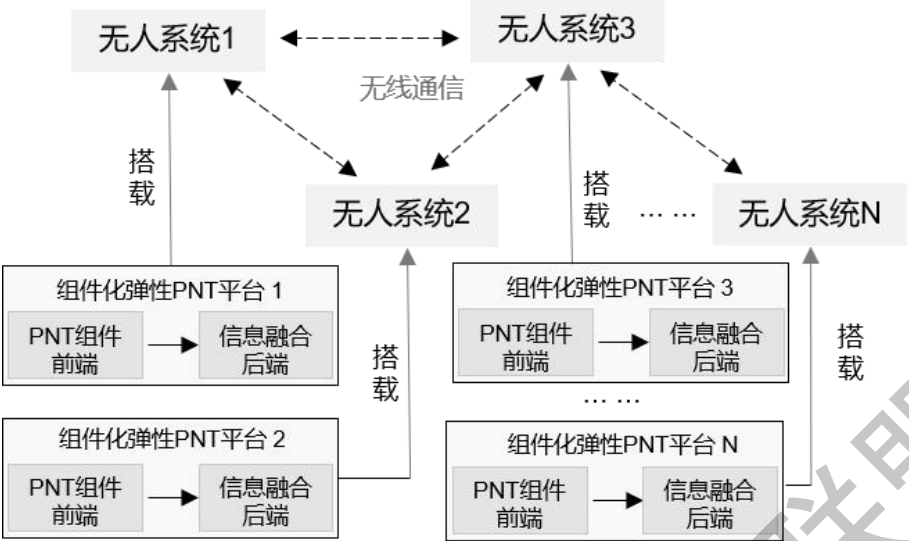


图1 基于组件化弹性PNT平台的无人集群协同导航与控制框架

5.2 组件化弹性 PNT 平台

组件化弹性PNT平台包括PNT组件前端与信息融合后端。

5.2.1 PNT 组件前端

PNT 组件前端包含传感器元件、数据传输接口、边缘计算芯片及观测预处理算法，PNT 组件前端对所需的自然或人造信息进行采集，随后对多传感器数据进行观测组件化建模，将计算处理后的观测建模信息传递给信息融合后端。PNT 组件前端的类型和数量根据具体载体设置，无需预先配置、支持即插即用。

5.2.2 信息融合后端以及协同导航与控制模块

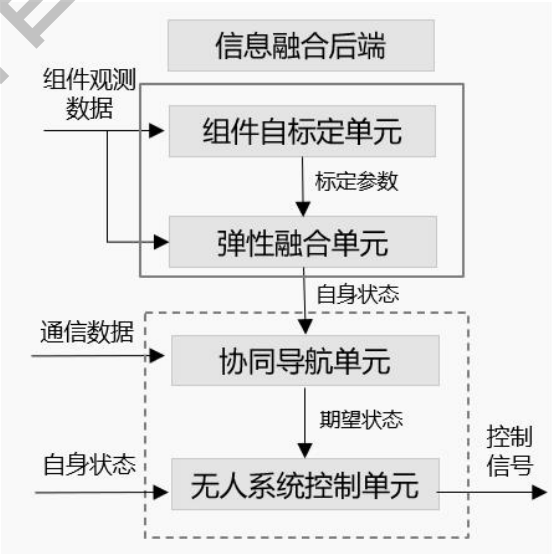


图2 信息融合后端架构以及协同导航与控制模块

图2为信息融合后端架构以及协同导航与控制模块，信息融合后端为无人集群协同导航与控制模块提供精确、可靠、连续、一致的无人系统自身状态信息（速度/位置/姿态等）。

5.2.2.1 信息融合后端

信息融合后端包括组件自标定单元与弹性融合单元：

a) 组件自标定单元。组件自标定单元根据组件前端预处理后的组件观测数据完成PNT组件之间的时空参数标定；

b) 弹性融合单元。通过对组件自标定单元提供的时空标定信息与PNT组件前端提供的组件观测数据，进行弹性融合，弹性融合单元输出无人系统的位置、速度与姿态估计值。

5.2.2.2 无人集群协同导航与控制模块

无人集群协同导航与控制模块包括协同导航单元和无人系统控制单元：

a) 协同导航单元。协同导航单元接收信息融合后端“弹性融合单元”计算的无人系统自身状态信息，并通过无线通信获得群内其他无人系统的状态信息，根据导航任务和无人集群的实时状态信息，生成集群的期望状态信息（位置、速度、姿态和队形）；

b) 无人系统控制单元。无人系统控制单元根据期望状态信息与当前状态信息计算控制量，控制无人系统的运动，使无人系统跟随期望的轨迹行进，进而使整个无人集群完成期望任务。

6 功能要求

6.1 无人集群群内个体功能要求

6.1.1 弹性定位功能

弹性定位功能是对群内个体多源融合定位模块的要求，即在复杂、可能会收到干扰的环境下保证通过多源融合完成弹性定位，为协同导航模块提供精确、可靠、连续、一致的载体自身状态（速度/位置/姿态等）信息，应包含以下功能：

- a) 应提供姿态、速度、位置等多维高频输出；
- b) 应支持多种PNT传感器接入能力，并提供标准化的数据接口协议和时间同步机制以确保多源数据融合的一致性和实时性；
- c) 应具备在典型场景（如室内/室外、开阔/遮挡、室内外穿越）下多源PNT信息的自适应融合能力，在复杂环境下保证连续可靠的状态输出；
- d) 应具备在线动态性能评估功能，通过实时计算系统完好性风险指标，为上层应用导航控制与任务规划模块提供可靠性定量评估依据；

- e) 应具备基于嵌入式平台的实时多任务调度与处理能力,确保多源数据融合与导航解算任务在受限算力条件下仍可高效运行。

6.1.2 自标定功能

自主标定功能是对群内个体传感器自标定模块的要求,无人系统可以自主完成标定以获取PNT组件中的传感器和导航坐标系之间的时空参数是实现多源组件即插即用的必要条件,具体而言,应包含以下功能:

- a) 应支持平台所搭载的PNT传感器(如GNSS、视觉、激光雷达等)与参考惯导坐标系之间的空间关系自主标定,包括平移和旋转参数;
- b) 应兼容主流传感器协议(如ROS/ROS2等),并支持组件化平台盲插新传感器情况下的自主标定,方便系统的扩展与升级;
- c) 应支持在无工标靶的自然场景特征下,进行多传感器空间关系标定,确保能够适应实际复杂的应用场景;
- d) 应具备动态环境下的参数自适应能力,能够应对传感器因震动、碰撞等原因造成的微小安装位置偏移,支持在线重标定与参数补偿,确保系统长期稳定运行;

6.2 集群功能

6.2.1 集群导航功能

无人集群应具备如下导航功能:

- a) 应具备信息交互、信息共享的能力,能以感知、通信、通感一体等方式,实现群内无人系统之间的信息交互或信息共享;
- b) 应具备全局路径规划能力,考虑地形、障碍物、任务目标、能源限制等因素,在任务开始前,为无人集群从起始区域到目标区域的最优路径;
- c) 应具备协同导航能力,能采用集中式或分布式调度的方式,实现集群的队形形成或队形变换;
- d) 应具备任务驱动导航功能,能根据具体任务动态调整无人集群系统的导航行为,实现群内无人系统的路径再规划。

6.2.2 集群控制功能

无人集群应具备如下控制功能:

- a) 应具备时间同步能力,确保群内无人系统对指令响应和动作执行的时间偏差最小化;
- b) 应具备队形保持能力,能控制无人集群按照指定队形移动;
- c) 应具备聚集与解散的能力,能实现集群的快速组织与编队运动;

- d) 应具备路径跟踪能力，能使集群精确跟随期望的规划路径；
- e) 应具备自适应控制与学习能力，能根据反馈更新优化控制策略，具有适应动态环境能力。

7—技术要求

7.1 组件化弹性 PNT 技术要求

7.1.1 组件化要求

组件化PNT平台要求具备以下技术特性：

- a) 前后分离：PNT组件前端与信息融合后端应支持独立升级与维护；
- b) 盲插即用：平台不预设接入传感器的类型、数据格式或处理逻辑。PNT组件前端和信息融合后端应具有统一的标准硬件接口，通过标准化数据交互协议实现盲插即用。新增PNT传感器时，信息融合后端无需改动即可自动适配；
- c) 开放扩展：标准化通信协议需具备前瞻兼容性，支持新型PNT传感器的无缝接入；
- d) 无缝重构：PNT平台不依赖特定中心传感器，且不对传感器在线状态作预设，任意传感器离线时，PNT平台应仍保有输出能力。当信息融合后端实时检测到某前端传感器故障时，可自主切换输入源或降级运行，此时PNT平台仍需具有输出能力以保证输出连续性。

7.1.2 弹性化要求

在动态变化的复杂环境条件下，弹性 PNT 平台维持既定功能性能应具备如下能力：

- a) 抵抗能力：对非典型PNT误差及服务中断的主动防御能力，如具备多层级异常检测机制，建立输入数据校验体系，实现威胁前置拦截功能。
- b) 响应能力：对已检测的非典型错误或异常做出适当反应的能力，如多级告警上报机制、故障隔离与遏制系统，威胁扩散及阻断功能。
- c) 恢复能力：从非典型误差中快速恢复到满足用户性能指标要求的能力。如备用资源自动切换机制，性能退化补偿算法，环境适应性重配置功能。

7.2 无人集群协同控制技术要求

无人集群的协同控制要求是指在多台无人系统（如无人机、无人车、无人艇等）组成的集群中，利用群内个体之间的信息交互与共享，通过设计控制策略，使集群协同行动，共同

实现集群的控制目标。无人集群控制技术特征与要求体现了其区别于单体无人系统控制的系统性、智能性与协同性，主要包括：

- a) 实时协同的能力：集群控制系统能根据集群状态与环境变化，快速调整群体行为，例如通过协同控制群内成员之间的相对位置，实现集群的队形保持或队形变换；
- b) 分布式控制能力：面对恶意攻击、个体失效等情况时，集群控制系统需保证无人集群系统最小性能下降；
- c) 协同避障能力：集群能根据群体感知信息进行协同避障，避免群内无人系统之间、无人系统与场景中障碍物的碰撞，确保安全、机动的群体运动；
- d) 自适应与动态重构能力：集群控制系统能根据任务场景调整控制策略，实现动态协同控制、快速队形调整；
- e) 跨域协同能力：具有异构兼容性，能支持由不同属性无人系统组成的集群；
- f) 学习和迭代能力：能在仿真和实地中通过迭代提升无人集群系统的性能。

中国智能交通产业联盟
标准

基于组件化弹性 PNT 平台的无人集群协同导航与控制框架

T/ITS 0283-2024

北京市海淀区西土城路 8 号（100088）

中国智能交通产业联盟印刷

网址：<http://www.c-its.org.cn>

2025 年 1 月第一版 2025 年 1 月第一次印刷