

本文引用格式: 葛金鹏.多无人平台协同应用的计算架构研究[J].自动化与信息工程,2022,43(6):7-12;19.

GE Jinpeng. Research on computing architecture of multi-unmanned platform collaborative application[J]. Automation & Information Engineering, 2022,43(6):7-12;19.

## 多无人平台协同应用的计算架构研究

葛金鹏

(广州海格通信集团股份有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** 随着传感器、人工智能、云计算、机器人等技术的发展和进步,多无人平台协同应用成为陆上无人系统发展的主要趋势。该文对多无人平台协同应用的计算架构进行了研究。首先,分析了多无人平台协同应用存在的计算问题,提出云边协同的思路;然后,基于云边协同技术的发展现状,结合多无人平台的智能化发展对计算能力的需求,初步设计多无人平台协同应用的计算架构;最后,在实验平台上搭建验证环境,实验结果表明该文提出的计算架构具有较强的实用性。

**关键词:** 多无人平台;协同应用;陆上无人系统;计算架构;云边协同

中图分类号: TP274+.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-2605(2022)06-0002-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2022.06.002

## Research on Computing Architecture of Multi-unmanned Platform Collaborative Application

GE Jinpeng

(Guangzhou Haige Communications Group Incorporated Company, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** With the development and progress of sensors, artificial intelligence, cloud computing, robots and other technologies, the collaborative application of multi-unmanned platform has become the main trend of the development of land unmanned system. This paper studies the computing architecture of multi-unmanned platform collaborative application. Firstly, the computing problems of multi-unmanned platform collaborative application are analyzed, and the idea of cloud edge collaboration is proposed; Then, based on the development status of cloud edge collaboration technology, combined with the demand for computing power from the intelligent development of multi-unmanned platform, a computing architecture for the collaborative application of multi-unmanned platform is preliminarily designed; Finally, a verification environment is built on the experimental platform, and the results show that the proposed computing architecture has strong practicability.

**Keywords:** multi-unmanned platform; collaborative application; land unmanned system; computing architecture; cloud edge collaboration

### 0 引言

近年来,随着传感器、人工智能、云计算、机器人等技术的发展和进步,各军事强国都在加快推进军事装备转型升级。同时,“多域战”“全域战”“马赛克作战”“算法中心战”等新作战概念的不断提出,也进一步推动了军事装备的转型升级。在新作战概念中,以无人车、无人机、机器人等为代表的异构或同

构多无人平台协同应用是陆上无人系统发展的一个主要趋势。

多无人平台协同应用的效果主要取决于陆上无人系统的自主能力,更高的自主能力可以缩短OODA(观察(observation)、判断(orientation)、决策(decision)、行动(action))环路,相对于敌方能够更快地获取战场情报,迅速地做出决策和行

动，进而先敌制胜。陆上无人系统的自主能力表现为多无人平台的行驶自主能力、任务自主能力、协同自主能力 3 个方面。这些自主能力都依赖于对大量数据的处理、分析和判断，从而使多无人平台具有类似人类的认知能力。以深度学习为代表的人工智能技术为多无人平台将客观繁杂的物理数据转化为类人认知提供了途径，但需要以充足的数据和强大的算力为基础。

由于异构多无人平台在作战场景、作战能力和成本等方面都存在差异和约束，使其搭载的传感器系统、计算控制系统的任务载荷也有较大的差异性且能力有限。特别是微小型多无人平台局限于计算和感知范围的不足，只能对周围环境进行有限感知。在缺少充足感知数据的情况下，即便是较大型的多无人平台也难以全面获取战场态势。因此，在未来强对抗环境下，针对多无人平台协同应用的自主能力提升需求，有必要研究一种合适的计算架构，既能利用多平台的多维度感知数据信息，又能利用大型无人平台或体系中有入平台的强大计算资源。

近年来，快速发展的云计算、云边协同等技术为计算架构设计提供了有效的解决思路。在战场环境下，基于战术网络设施，在作战单元内构建一个局部战术云、异构多无人平台，将感知获取的数据上传到云端进行计算，再通过云端获取需要的结果，不仅解决了微小型多无人平台算力不足的问题，还通过云端的信息融合处理和分发，扩大了单一无人平台的感知范围。

## 1 云边协同发展现状

云计算擅长对全局性、非实时、长周期的大数据进行处理与分析，可在长周期维护、业务决策支撑等领域发挥优势。边缘计算更适用于对局部性、实时、短周期的数据进行处理与分析，能更好地支撑本地业务的实时智能化决策与执行<sup>[1]</sup>。因此，云计算与边缘计算具有互补协同的关系，通过云边协同可以更好地满足需求场景的匹配，从而扩大云计算和边缘计算的应用价值。

在民用领域，华为技术有限公司在 2018 全联接大会（HC2018）上发布的智能边缘平台（intelligent edge fabric, IEF）明确地提出了边缘与云协同的一体化服务概念<sup>[2]</sup>。IEF 满足了客户对边缘计算资源的远程管控、数据处理、分析决策等智能化的需求，其模型如图 1 所示。

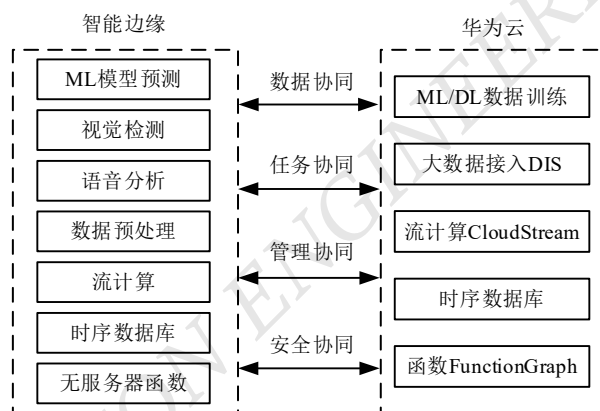


图 1 IEF 模型

2019 年，中国信息通信研究院依托云计算开源产业联盟，联合业界专家，编写了《云计算与边缘计算协同九大应用场景》白皮书<sup>[3]</sup>，对云边协同典型的应用场景进行了梳理和展示。2021 年，中国信息通信研究院依托云边协同产业方阵和云计算开源产业联盟，联合产业多方专家，撰写了《云边协同关键技术态势研究报告》<sup>[4]</sup>，旨在梳理云边协同关键技术点的发展态势。

在军用领域，美国空军于 2013 年率先将“云概念”引入作战领域，并于 2016 年正式发布了“作战云”的概念<sup>[5]</sup>。作战云被定义为用于战场内进行数据分发和信息共享的总体网络，每个授权用户、平台或节点能透明地贡献和接收重要信息，并且能够在整个军事行动范畴中利用它<sup>[5]</sup>。根据其设想，在未来的多域作战中，从海、陆、空、天、电等多领域终端节点获取的数据，都会汇总到作战云上，再利用人工智能技术进行控制计算，并将计算结果下发到战场的边缘计算节点，指导前线人员进行决策并采取行动。

2017 年，随着多域作战、全域作战概念的发展，针对各军种“烟囱式”云基础设施难以管理的问题，

美国国防部重新统一部署云计算的 IaaS 基础设施—联合企业防御基础设施 (joint enterprise defense infrastructure, JEDI) [6]。为应对战争网络带宽受限和干扰的情况, JEDI 不仅包括位于中央的作战云系统, 还包括位于作战现场的边缘服务器。

## 2 多无人平台计算能力需求

多无人平台智能化的基础是利用各种计算设备对传感器采集的数据、友邻获取的数据、本地存储的数据进行有效处理。以深度学习为代表的智能化数据处理方法, 提升了数据的利用效果, 但对计算硬件的能力要求也急剧提高。具体来说, 计算硬件的能力要求主要取决于多无人平台的智能化水平需求、执行任务的能力和计算方法等。本文从平台、功能、技术 3 个维度对多无人平台协同应用的计算能力需求进行简要分析, 为后续多无人平台协同应用的计算架构设计提供依据。

### 2.1 平台维度的计算需求分析

多无人平台根据行走机构的不同可分为无人车、无人机、机器人等种类, 也可以根据吨位分为重型、中型、轻型、小型、微型等类型。各种多无人平台虽然结构、形态、能力各异, 但从智能化的角度来看, 其需求基本是一致的, 都需要在没有人员介入的情况下, 知道自身当前的位置信息、目的地的位置信息和如何到达目的地。多无人平台智能化的计算需求主要包括定位、环境感知和行动规划等 3 个方面。

对于军用装备来说, 定位技术需要重点解决卫星拒止条件下的定位问题。目前主要的解决方法是通过地图匹配、即时定位与地图构建 (simultaneous localization and mapping, SLAM) 等技术进行自主定位。该方法的核心是对激光雷达、相机等传感器获取的点云、视觉信息进行融合处理。激光点云、视觉信息是环境感知的主要数据源。但在军用领域, 环境感知的重点是目标和可行驶区域的识别、障碍检测等。行动规划主要包括全局地图的路径规划和周边环境信息的局部行为规划。一般情况下, 全局路径规划可以在远程有人控制端或平台出发前进行预规划, 在任

务过程中根据态势变化再进行动态调整; 局部行为规划需要多无人平台根据周围环境信息进行实时调整。

### 2.2 功能维度的计算需求分析

多无人平台根据能力和配置的不同, 可以执行侦察、打击、引导、运输、排爆等战场任务。从计算需求的角度来看, 这些任务需要较高的算力主要体现在 2 个方面: 1) 面对复杂的战场环境以及各种伪装技术, 目标检测、识别和跟踪需要融合多种侦察数据进行分析处理; 2) 多无人平台根据实时态势和自身装备状况, 准确、迅速地进行自主决策是一个非常复杂的过程, 尤其在多无人平台协同应用时, 决策的失误或延迟可能会导致严重的后果。

### 2.3 技术维度的计算需求分析

人工智能技术是多无人平台智能化的核心技术, 其 3 个核心要素是算法、算力和数据。其中, 算力是影响算法执行速度的关键因素; 数据是影响算法应用准确性的关键因素。反过来说, 在同样的能力要求和运行环境下, 算法在一定程度上决定了计算能力的需求。本文对多无人平台环境感知的典型目标检测算法的计算能力需求进行简单分析, 为计算架构的设计提供数据支撑。

YOLOv4 是多无人平台环境感知的典型目标检测算法, 其在 COCO 数据集上取得了最高 43.5% 的平均准确率。3 种不同的主干网络在同样的输入图像分辨率 (512×512 像素) 下的模型计算量对比如表 1 所示。

表 1 目标检测识别算力对比

| 主干模型            | 模型参数量/<br>MB | 模型推理<br>计算量/<br>BFLOPs | 模型训练<br>计算量/<br>BFLOPs |
|-----------------|--------------|------------------------|------------------------|
| CSPResNext50    | 20.6         | 31                     | 97.8                   |
| CSPDarknet53    | 27.6         | 52                     | 156.2                  |
| EfficientNet-B3 | 12.0         | 11                     | 36.4                   |

由表 1 可知, 即使采用相对轻量化的 EfficientNet-B3 网络, 推理计算量也达到了 11 BFLOPs, 训练计算量达到了 36.4 BFLOPs, 这对终端算力提出了较

高的要求。

用于可行驶区域识别的典型语义分割模型的算力对比如表 2 所示（输入图像分辨率同样为 512×512 像素）。

表 2 语义分割模型算力对比

| 语义分割模型  | 模型参数量/<br>MB | 模型推理计算量/GFLOPs | 模型训练计算量/<br>GFLOPs |
|---------|--------------|----------------|--------------------|
| SegNet  | 29.50        | 286.0          | 809.2              |
| ENet    | 0.37         | 3.8            | 12.3               |
| FRRN    | 24.80        | 235.0          | 709.1              |
| ICNet   | 26.50        | 28.3           | 72.4               |
| ERFNet  | 2.10         | 21.0           | 67.9               |
| CGNet   | 0.50         | 6.0            | 21.1               |
| BiSeNet | 5.80         | 14.8           | 46.7               |

由表 2 可知，模型训练计算量远远大于推理计算量，这使模型的终端训练变得非常困难。

### 3 多无人平台协同应用的计算架构设计

多平台协同或集群作战是近年来无人作战领域的研究热点，但总体上还处于起步阶段，尚未有成熟的装备。目前，多无人平台信息处理方式主要有 2 种：

1) 分布式计算方式，依靠节点自身设备进行计算和决策，基于一致性控制算法进行分布式协同作战，包括领航-跟随、避障等<sup>[7-8]</sup>；2) 集中式计算方式，利用 1 个中心节点进行集中规划和控制，各节点按规划路径行动。分布式计算方式的优点是实时性高，各节点能够快速感知周围环境，做出响应；缺点是没有统一的处理中心，数据综合处理需要较大的通信带宽，且决策过程较为复杂，对多无人平台有较高的计算能力需求。集中式计算方式的优点是决策过程相对简单，对多无人平台的计算能力要求较低；缺点是自主能力较弱，面对突发状况，多无人平台难以快速反应，各节点必须在距离中心节点有限的范围内行动。集中式计算方式因中心易暴露、反应速度慢，且在集群的环境感知需求提升时，对通信带宽的占用会更高，所以

业内研究相对较少。本文在分析以上 2 种主要方式的基础上，结合云边协同的思路，从方式综合的角度，考虑多无人平台协同应用的计算架构设计。

#### 3.1 架构考虑因素

根据平台智能与任务智能的计算需求，多无人平台协同应用的计算架构的设计思路主要从信息特征、信息传输能力和信息处理能力 3 个方面进行考虑。

##### 3.1.1 信息特征

信息特征主要是指时效性信息和非时效性信息、全局信息和局部信息、持续性信息和突发性信息等。不同的信息类型对处理时延、支撑信息的需求不一样，如行进过程中的障碍信息、接敌过程中的威胁信息等需要实时认知，进而快速决策，处理时延必须尽量短；而作战过程中的任务重分配、路径重规划、情报综合等，需要结合全局态势进行综合评估，可以接受较长的处理时延。

##### 3.1.2 信息传输能力

信息传输能力主要是指通信网络性能。战术通信网络需要综合考虑传输带宽、传输时延、抗干扰能力、安全保密等方面的需求。目前，陆上无人系统的无线通信网络带宽一般在 20 Mb/s 以内<sup>[9]</sup>，用于环境感知的视频信息、激光点云等单个传感器的数据一般都在 2 Mb/s 以上。在同一通信网络内显然无法支撑大规模多无人平台环境感知数据的传输，同时处理时延也难以被接受。

##### 3.1.3 信息处理能力

信息处理能力主要是指计算设备的算力、能耗等约束条件。陆上无人系统形态、能力各异，同时又有装备防护能力和价值方面的约束，配置的计算设备和感知设备具有较大的差异。架构设计需要考虑异构多无人平台协同应用时信息处理能力的差异，且具有互操作性，以保证异构多无人平台的高效协同。

#### 3.2 总体设计思路

多无人平台协同应用的计算架构为分布式架构，如图 2 所示。

图2 多无人平台协同应用的计算架构

多无人平台协同应用的计算架构具有可扩展性、可用性和安全性，其核心是以灵活、不耦合的方式实现新功能，并适应异构多无人平台能力的变化。该架构由边缘计算节点和云计算节点组成。其中，边缘计算节点是指末端执行实际作战任务的多无人平台节点，还包括部分承担云计算任务的节点；云计算节点主要是指部署较强计算能力的有人平台和无人平台节点。

边缘计算节点主要包括数据计算/分析模块、决策控制模块、行动控制模块、接入适配层等。数据计算/分析模块基于节点自身的传感器配置和计算能力,实现本节点感知数据的计算分析,形成本节点的环境认知。决策控制模块根据计算分析的环境和目标结果,快速进行避障、任务调整等动作,并将本节点处理后的特征数据或难以判断的信息发送给云计算节点作进一步分析。行动控制模块实现多无人平台的机构控制。接入适配层实现互操作协议,按需订阅云节点信息和发送数据到云节点。对于不具备自主分析计算能

力的边缘节点，也可以基于适配接口，直接将数据发送给云计算节点进行分析计算。

云计算节点主要包括异构平台适配层、数据计算/分析模块、异构平台管理模块、数据库抽象层模块、中间件、可视化呈现服务模块、感知/探测服务模块、任务相关服务模块等。异构平台适配层实现云计算节点与异构多无人平台的多样化数据类型和信息交互。数据计算/分析模块有 2 方面的计算能力需求：一是陆上无人系统多源、多域数据的融合计算；二是边缘节点的辅助计算，因此需要具备资源虚拟化和并行计算的能力。异构平台管理模块需要在统一的架构下实现对异构多无人平台的各种特定管理能力。中间件允许使用发布-订阅机制进行不同子模块和服务之间的交互和信息交换，该组件能够解耦各模块和服务的所有信息交互。感知/探测服务、可视化呈现服务等模块可根据陆上无人系统的任务需求在统一的架构内进行扩展设计。

在本文的架构中，云计算、边缘计算更多的是中

心和端的概念，并没有严格按照民用领域的云计算技术架构论述，实际实现时也不需要实现云计算的全部技术。基于这种思路，可将计算架构进一步扩充。因为多无人平台上各种传感器设备本身就具备一定的计算分析能力，所以传感器和车载计算控制器之间也存在中心与端的概念，形成边缘的“云”架构，称为“车云”。多无人平台协同应用的计算架构可以扩展为“（传感器）边缘节点-车云-局域云”的3层架构，如图3所示，也可以根据其规模进一步扩展，这种架构将为互操作性协议设计带来更大的挑战。

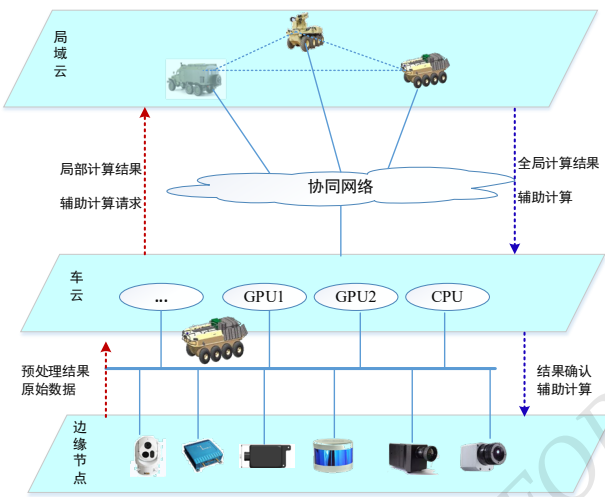


图3 多无人平台协同多层云边架构示意图

#### 4 实验验证

为了验证多无人平台协同应用的计算架构的可行性，在实验室搭建了1台服务器+3个边缘节点的验证环境，加载运行协同计算软件，配置如表3所示。

表3 验证环境配置

| 节点   | 型号                  | 主要配置                                                            |
|------|---------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 云节点  | 华为 MDC300           | 4 个昇腾 310+1 个鲲鹏 920S+1 个 TC397；64TOPs（INT8）                     |
| 边缘节点 | 瑞芯微 RK3399          | 双 Cortex-A72+四 Cortex-A53 大小核架构；主频最高 1.8 GHz，GPU 算力约 100 GFLOPs |
| 网络环境 | TP-LINK TL-SG1016DT | 千兆，16 口                                                         |

3 个边缘节点分别输入模拟视频，运行基于 YOLOv4 框架的目标检测识别软件。云节点通过局域网络与边缘节点互联，接收边缘节点协同计算请求。手动控制各边缘节点的计算策略（本地计算或协同计算），记录网络流量和检测频率，如表4所示。

表4 实验数据记录

| 计算方式       | 网络流量        | 检测频率/Hz |
|------------|-------------|---------|
| 本地计算       | <50 kb/s    | 5~7     |
| 云节点计算（1 路） | 平均 1.8 Mb/s | 30~32   |
| 云节点计算（2 路） | 平均 3.9 Mb/s | 19~22   |
| 云节点计算（3 路） | 平均 6.1 Mb/s | 15~16   |

由表4实验结果可知：边缘节点本地计算时，目标检测更新频率小于7Hz；云节点计算时，单路视频检测频率达到30Hz以上，3路视频同时检测时，检测频率约为15Hz，可见该架构在提升边缘节点感知效率和反应时间的同时，还可以通过增加融合模型，进一步提升多节点协同效率。

需要指出的是，实验采用的网络环境为室内有线网络，可为协同信息提供充足的传输带宽，而无线网络环境一般难以达到同等条件。因此，在实际应用时，需要根据实际网络条件进行前端预处理、弹性信息交互，以降低协同计算的传输带宽需求，提高鲁棒性。

#### 5 结语

本文对多无人平台协同应用的计算架构进行了设计分析，战场环境下的云边计算架构相对民用领域有着更为复杂的对抗环境和现实物理设施限制。实现可靠、可用的多无人系统战术云边协同计算架构，还需要突破多方面的关键技术，包括低时延、高带宽的自组织通信网络技术、适用于战场对抗环境的动态云基础设施技术、异构无人平台协同互操作技术、多域多源信息的统一表征技术以及更加轻量化的云服务技术等。

（下转第19页）