这是发表于《2024年欧洲多智能体系统会议》论文集中的手稿的开放获取作者存档版本。

arXiv:2601.00465v1 [cs.RO] 1 Jan 2026

由低功耗自主智能体控制的纳米卫星太空碎片清除

Dennis Christmann[1][0009−0007−6038−1510]、Juan F. Gutierrez[1][0000−0001−8509−8075]、Sthiti Padhi[1][0009−0005−9453−4488]、Patrick Plörer[2][0009−0005−0800−5302]、Aditya Takur[2][0000−0002−6166−1449]、Simona Silvestri[2][0009−0008−1440−8994] 和 Andres Gomez[1][0000−0002−5825−3567]

[1] 数据技术研究所，布伦瑞克工业大学，德国 {d.christmann, gutierrezgomez, s.padhi, gomez}@ida.ing.tu-bs.de[2] 航天系统研究所，布伦瑞克工业大学，德国 {firstname.lastname}@tu-braunschweig.de

摘要。 太空碎片是太空旅行中日益严重的问题。如今，已有许多老旧且不再运行的航天器和碎片在地球轨道上运行，它们既威胁卫星的安全运行，也危及太空旅行。小型纳米卫星集群可以通过自主将碎片安全地送入地球大气层，使其脱离轨道，从而解决这一问题。本研究基于近年来部署于资源受限平台的自主智能体所取得的进展，展示了一种初步的简化方案，说明如何实现此类智能自主纳米卫星集群。我们在无线微控制器上实现了自主智能体软件，并在专用测试平台上开展实验，以验证该方案的可行性及其整体能源效率。

关键词： 自主智能体 · 低功耗嵌入式系统 · 多智能体系统。

1 引言

物联网设备通常由超低功耗处理器构成，其感知、处理和通信能力有限。当前，人们正投入大量研究，持续从硬件和软件两个层面提升其能效与自主性。近期，单个自主的信念-愿望-意图（BDI）智能体取得了进展，使其能够部署在微型微控制器上 [4], ，为物联网设备带来了更高水平的本地决策自主性。进一步的研究甚至证明，通过采用经过精细调优的无线协议 [3]，构建节能多智能体系统是可行的。

使用商用现成微控制器开发高能效多智能体系统的能力，在包括太空物联网在内的不同领域具有广泛的潜在应用。在本次演示中，我们展示了近期在用于太空碎片清除的低功耗自主智能体方面的开发成果。当前研究表明，太空碎片的数量正在增加，例如退役卫星或

©2024 作者与 Springer。此版本为作者稿件，发布于此供您个人使用。请勿再分发。最终版本发表于《欧洲多智能体系统会议论文集》（EUMAS 2024）。

废弃的火箭级，其数量已增长到必须开展专门的离轨任务的程度 [1]。根据这些碎片物体的大小，可能需要由一群较小的卫星使物体停止翻滚，并将其安全地降低。我们设计了一个由两个BDI智能体组成的多智能体系统，这两个智能体使用OpenThread（一种低功耗无线通信协议）进行通信，以同步推动太空碎片物体。我们将自主智能体部署在低功耗无线微控制器上，并将其安装在一个名为自由飞行器（FF）的纳米卫星模型内部。在实验中，我们将FF置于专用气浮试验台上，以进行自主机动动作。

2 系统概述

我们的系统由两架自由飞行器和另一架充当太空碎片的纳米卫星模型（图 2b）组成，它们在近距离操作与空间态势感知实验室（ELISSA） [5] 测试平台上滑行。此外，系统使用一块 nF52840-DK 作为母舰服务器，并由一个nRF52840加密狗充当基站，从而构成图 1 所示的网络。

ELISSA 测试平台利用主动气浮台模拟航天器在轨运行时的失重状态和接触动力学。如图 2a 所示，该测试平台主要由四个部分组成：气动机械子系统、运动捕捉子系统、任务控制子系统和自由飞行器。

气动机械子系统将气体输送至气浮台，在其表面形成气垫，使自由飞行器能够在三个自由度上近乎无摩擦地运动。运动捕捉子系统向（集中式）任务控制子系统提供高精度三维定位数据，后者可向自由飞行器发送无线指令。自由飞行器采用纳米卫星模型的 3D打印主体结构，如图 3a 所示。其尺寸为 22 cm $\times$ 22 cm $\times$ 26 cm，可用于安装 8 个带螺旋桨的电机、多个印刷电路板（PCBs）以及一块锂聚合物电池。模型顶部还设有一个额外结构，可用于安装各种有效载荷。

在这项聚焦于资源受限设备自主性的工作中，我们既不使用动作捕捉系统，也不使用任务控制子系统。相反，

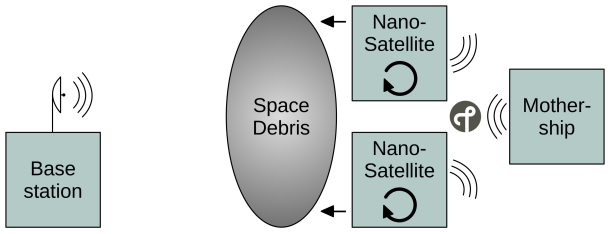
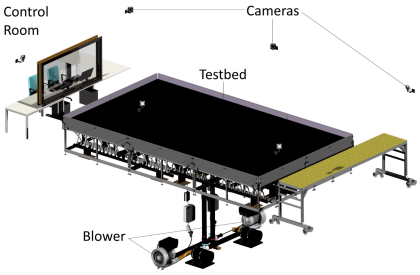
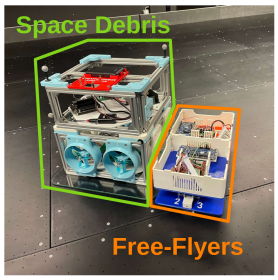


图 1：简化的太空碎片清除应用。基站向母舰服务器广播一项任务。两个低功耗自主智能体通过服务器同步，以同步推送的方式使碎片脱离轨道。



(a) 测试平台的整体布局。

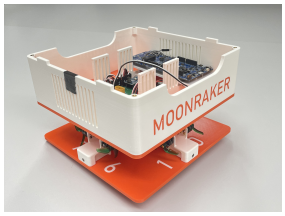


(b) 两个自由飞行器将太空碎片推开。

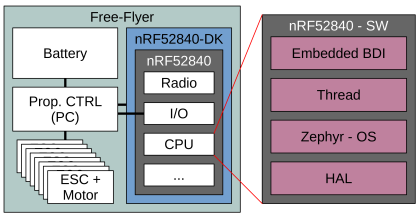
图 2：ELISSA 测试平台允许名为自由飞行器（FF）的卫星模型漂浮在气垫上。自主智能体负责执行机动动作。

推理和决策由安装在自由飞行器上的低功耗微控制器所运行的自主智能体负责。

左侧的图 3b 以框图形式展示了自由飞行器的相关硬件组件。它由八个安装了螺旋桨的电机驱动。每个电机均由电子调速器（ESC）供电，而电子调速器由推进控制器（PC）控制并供电。为整个自由飞行器供电的电池连接至推进控制器。搭载 nRF52840 微控制器的 nRF52840-DK 也连接至推进控制器，负责自主智能控制。nRF52840 微控制器向推进控制器发送运动指令，与受限应用协议服务器通信，并包含一个用于自主交互的嵌入式 BDI 智能体[3]。



(a) 自由飞行器内装有硬件。



(b) 软硬件架构

图3：自由飞行器（自由飞行器）漂浮在 ELISSA 测试平台上。机载软件实现了自主智能体，这些智能体通过无线方式通信。

[3] 代码和视频可在此处获取：
https://git.rz.tu-bs.de/ida/rosy/public/publication-repos/eumas-2024-demo-paper

图 3b 右侧展示了实现自主智能控制所需的相关软件组件。我们使用 Zephyr 实时操作系统，它提供了许多相关功能，例如低功耗运行、OpenThread 无线协议、多线程等。低功耗自主智能体之间的无线通信通过母舰的受限应用协议服务器间接进行。嵌入式 BDI 框架 [2] 作为 Zephyr 应用程序运行，用于解释 AgentSpeak 代码（参见代码清单 1.1 和 1.2），并利用受限应用协议库接收和发送信息。

```
1  ! 任务_搜索。
2
3  +! 任务      - 搜索
4  <-  监听_;          ! ! 实现。
5
6  +! 实现：新建       - 任务
7  <- 宣布_执行_任务。
8
9  +! 实现：否         - 任务
10 <-! ! 任务_搜索。
```

清单 1.1：主代理代码

```
1  ! 任务_搜索。
2
3  +! 任务      - 搜索
4  <-  监听_服务器;       ! ! 实现。
5
6  +! 实现：新         - 任务
7  <- 执行_任务。
8
9  +! 实现：无         - 任务
10 <-! ! 任务搜索。
```

清单 1.2：从代理代码

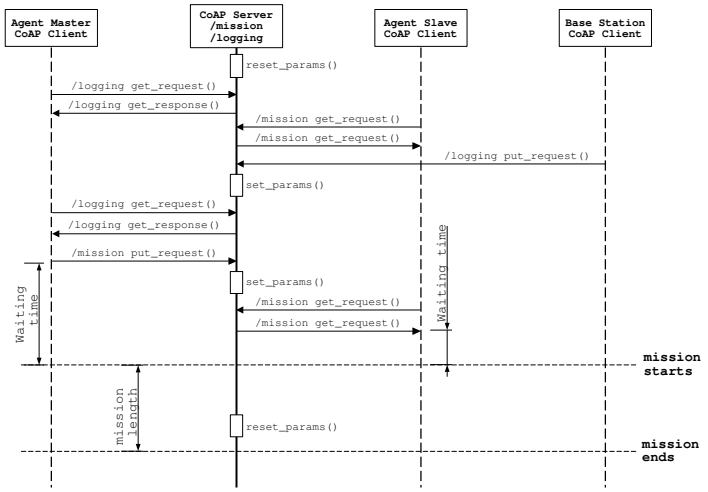


图 4：使用受限应用协议进行代理间同步的时序图。基站向充当服务器的母舰报告一项任务。主代理收到任务后，会将其安排在未来执行，并向从代理发送包含任务信息的消息。

该网络采用 Thread 路由协议和 CoAP 应用层协议，由一台服务器和三个客户端（主客户端、从客户端、基站）组成。

两个服务器资源 /logging 和 /mission 分别管理自由飞行器的电机转速和任务时长。基站通过 PUT 请求向服务器注册这些参数，主客户端通过 GET 获取这些参数。主客户端向 /mission 注册任务开始时间，从客户端则轮询获取这些参数。尽管主客户端和从客户端的等待时间不同，服务器仍会同步任务，并在任务完成后重置参数，以便重复执行。

3 演示

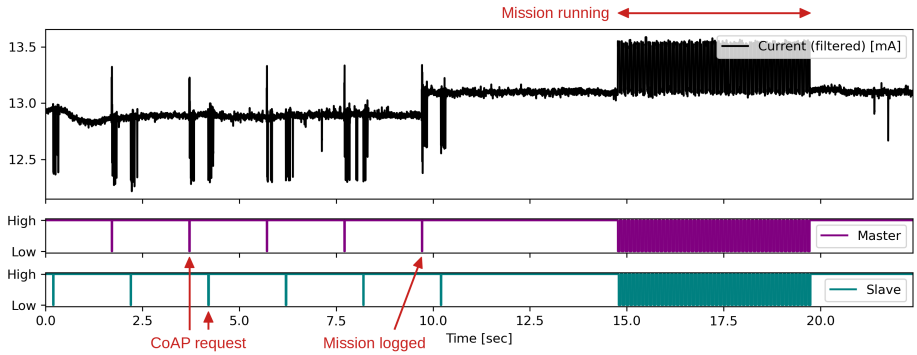


图5：任务开始前、执行期间及结束后主代理的滤波电流测量值。下方曲线显示了 CoAP 请求和同步的智能体动作。

我们使用 NRF 功耗分析仪测量了智能体动作（即 CoAP 请求）的能耗。每项动作至少重复执行 210 次。主代理执行的第一个动作，监听_gs，涉及一个 70 字节的 GET 请求，平均消耗 $271\,\mu$J，完成耗时 14.7 ms。主代理执行的宣告_执行_任务 动作涉及一个 78 字节的 PUT 请求，平均消耗 $294\,\mu$J，持续 14.7 ms。同样，从代理的动作监听_服务器涉及一个 70 字节的 GET 请求，消耗 $276\,\mu$J，持续 14.9 ms。根据图5所示的时序图测得，智能体执行任务的同步误差约为 21.2 ms。电流曲线显示了主代理的能耗，并经过数字四阶巴特沃斯低通滤波器滤波，采样频率为 500 Hz。这里通过智能体电路板上 LED 的闪烁来表示任务 。

本研究展示了多智能体系统在太空碎片清除应用中的运行。智能体能够使用 CoAP/Thread 无线协议进行高效通信。未来的工作将扩展智能体的能力，包括定位感知以及针对更复杂机动动作的精细电机控制。

参考文献

1. Braun, V., Lüpken, A., Flegel, S., Gelhaus, J., Möckel, M., Kebschull, C., Wiedemann, C., Vörsmann, P.: 多个优先目标的主动碎片清除。《太空研究进展》**51**(9), 1638–1648 (2013) 2. Santos, M.M.d.: 嵌入式系统中的 BDI智能体导向编程。硕士论文, 圣卡塔琳娜联邦大学 (2022) 3. Vachtsevanou, D., William, J., dos Santos, M.M., De Brito, M., Hübner, J.F., Mayer, S., Gomez, A.: 将自主智能体嵌入低功耗无线传感器网络。载于：智能体与多智能体系统实际应用国际会议论文集。第375–387页。Springer (2023) 4. William, J., Santos, M.M.d., de Brito, M., Hübner, J.F., Vachtsevanou, D., Gomez, A.: 利用自主智能体提升低功耗传感器的智能。载于：第20届ACM嵌入式网络传感器系统会议论文集。第994–999页 (2022) 5. Yang, J., Khedar, Y., Ben-Larbi, M.K., Backhaus, J., Lampert, A., Bestmann, U., Stoll, E.: 使用编队飞行多旋翼飞行器的分布式基于传感器的测量系统的概念与可行性评估。《大气》**12**(7), 874 (2021)