采用现场可编程门阵列的城市空中交通无人机故障预测功能粗粒度 FLS 处理器

Hossam O. Ahmed,

工程与技术学院,

中东美国大学,

科威特。

摘要——下一代城市空中交通（UAM）系统需要考虑许多整体安全因素；解决这些问题，可能成为此类技术获得全球应用认可的关键。另一方面，要满足蓬勃发展的 UAM 系统数量指数级增长所带来的安全要求极其复杂，需要审慎考虑多种问题。这些无人航空系统（UAS）的关键目标之一，是能够同时支持数十万架先进无人机的起飞与控制。鉴于培训相应数量的专家飞行员并不现实，实现这一目标只能依靠全自主或半自主模式下的安全运行。根据近期的许多研究，飞行事故大多集中在飞行行程的最后三个阶段，即飞机行程中的初始进近、最后进近和着陆阶段。因此，本文提出一种新型分布式处理系统，以提高垂直和／或短距起降（V/STOL）无人机在关键阶段的安全性。该系统通过采用多种处理与控制算法实现，包括集成飞行规则单元（FRU）的开放式模糊逻辑系统（FLS）、FIR 滤波器以及新型故障预测处理单元。经过多种优化技术处理后，这种新型粗粒度自主着陆引导辅助系统（ALGAS3）处理架构得到优化，最高计算处理性能达到每秒 70.82 十亿次运算（GOPS）。此外，所提出的 ALGAS3系统展现出极低的动态热功耗（输入/输出和内核），仅为 145.4 mW，非常适合采用 INTEL 5CGXFC9D6F27C7 FPGA芯片的移动航空电子系统。

关键词—— 分布式系统、容错系统、并行电路、故障预测、寄存器传输级实现、城市空中交通、现场可编程门阵列、飞行规则、人工智能、模糊神经、神经形态、机器人技术、自动化。

I. 引言

为子孙后代实现可持续性，也取决于能否为当今面临的关键问题找到创新解决方案，例如流动人口迅速增长以及人口向城市集中迁移。尽管当前人口已给现有基础设施带来了不容忽视的压力，但未来预测显示，交通运输等最基本服务的质量还将进一步严重下降。因此，针对交通运输领域预期问题的创新解决方案研究，已成为一个非常活跃的发展方向。

提出的一项有前景的解决方案是城市空中交通（UAM）计划 [1-4]。城市空中交通提案普遍的一项思路，是建立定义明确的多层级空间网络，规划虚拟空中航线，从而在利用不足的空域中使用自主空中出租车无人机，以应对未来预计激增的交通运输需求。另一方面，要使这类技术值得信赖，仍面临巨大挑战。尤其重要的是，鉴于其可能得到更广泛的应用，这些技术方案必须比传统航空系统更加安全。因此，降低城市空中交通无人机的事故发生率是一项高度优先的任务 [5]。

将更大的挑战拆解为较小且可解决的问题，并结合当前的关键因素加以考量，有助于推动工作取得进展。首先，目前约有 53.85% 的飞行事故发生在一次飞行行程的最后三个阶段，即飞机的初始进近、最后进近和着陆阶段[6, 7]。其次，考虑到为每座城市数量如此庞大的城市空中交通无人机培训专家飞行员并不现实，城市空中交通技术的推广必然需要以半自主或全自主飞行系统为基础。第三，规划中的城市空中交通技术需要考虑到，这些行程的航线规划将动态分配，并且必须能够根据可能意外出现的各种因素和情境进行调整 [8]。

这些因素可能包括自然因素或人为因素，以及飞行器故障；这些情况可能需要立即采取紧急预防性控制措施。

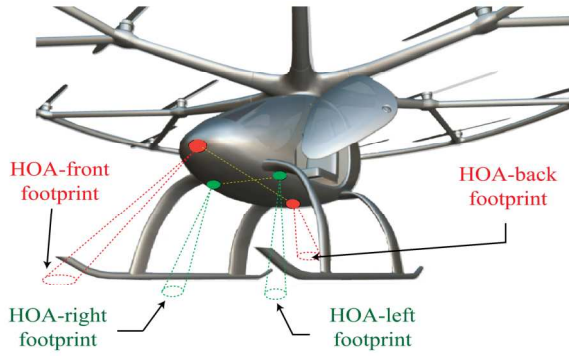


图1. 所提出的两对差分HOA单元星座示意图。

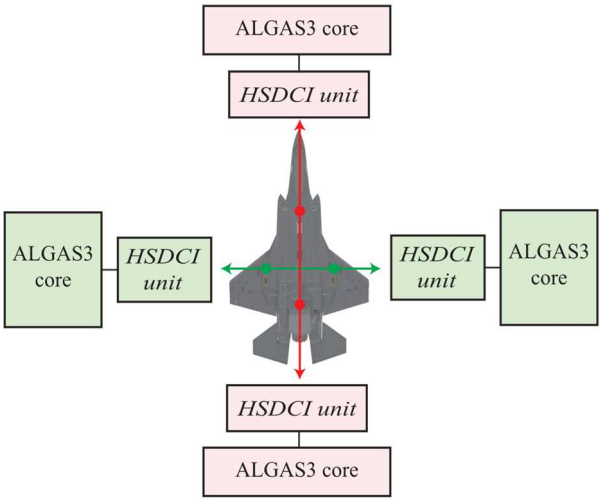


图 2. 所提出的完整 ALGAS3系统的分布式处理单元。

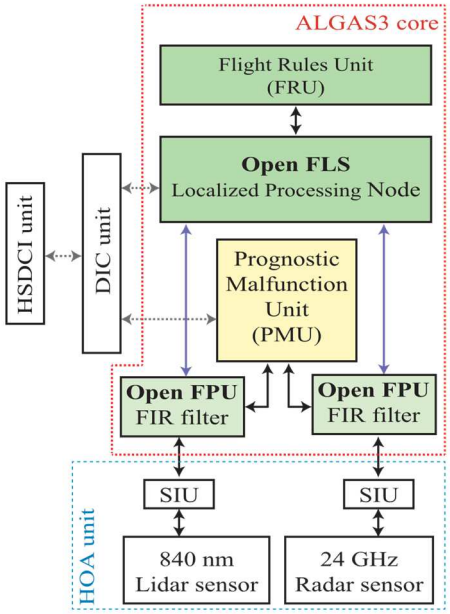


图3. 所提出的ALGAS3系统一个空间角的详细结构。

相关程序在本文中称为“飞行规则”。考虑到这些限制，有助于我们更清晰地认识如何提高此类城市空中交通无人机的安全性。此外，还应考虑到，这些空中出租车无人机大多将依赖垂直和／或短距起降（V/STOL）机制，这会增加系统中电子元件的复杂性，以确保达到预期的安全系数 [9]。随后，我们假设，持续推进的研究将通过采用机器学习（ML）、深度神经网络（DNN）、神经形态脉冲神经网络（SNN）及其他先进控制系统等高科技新方法，改善飞行大部分阶段的安全措施。然而，我们致力于增强行程着陆阶段的安全预防措施 [10]。

如图1所示，可通过开放式架构开发去中心化协同处理核心来实现这一构想：这些核心通过接收来自分布式混合式避障（HOA）传感节点的传感数据，控制无人机的自主着陆机制；这些传感节点部署在无人机底部。所提出的自主着陆引导辅助系统（ALGAS3）处理架构，为不同类型的航空器和自动化无人机提供实时解决方案，以避免着陆事故。所提出的ALGAS3处理单元依赖于粗粒度开放式架构

模糊逻辑系统（FLS）处理核心，以及可配置的飞行规则单元（FRU）。此外，假设还配备其他数字信号处理（DSP）单元，以增强所提出的故障预测功能，具体将在后续章节中说明。所提出的 ALGAS3 处理架构采用超高速集成电路硬件描述语言（VHDL）设计，并采用近似计算和其他若干优化技术，以改善动态功耗水平和计算速度表现。本文第二节回顾相关工作、类似研究及其贡献。第三节讨论用于提升所提出的 ALGAS3处理单元计算速度表现的各种架构元素和技术。第四节讨论所得结果。这些结果是在使用 Intel Quartus Prime工具对ALGAS3架构进行综合后获得的。

采用 INTEL Cyclone V 5CGXFC9D6F27C7 现场可编程门阵列实现的 ALGAS3 处理单元，其计算速度约为 69.89 每秒十亿次运算（GOPS）

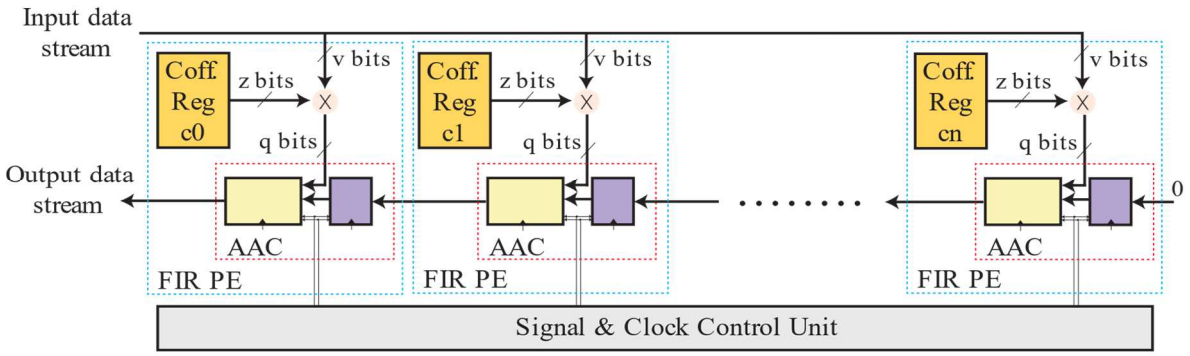


图 4. 所提出　　mo 的粗粒度架构框图

FIR滤波器粗粒度架构框图。

（现场可编程门阵列）芯片。此外，我们讨论了使所提出的 ALGAS3 系统实现超低动态热功耗（输入/输出和内核）131.96 mW 的编码技术。最后，在本文第五节中，我们给出结论并提出未来的研究工作。

II. 相关工作

下一代城市空中交通需要更复杂的电子系统，以符合飞行安全法规，例如美国联邦航空管理局（FAA） [11]，单一欧洲天空空中交通管理研究（SESAR）和下一代航空运输系统（NextGen）[12-14]。

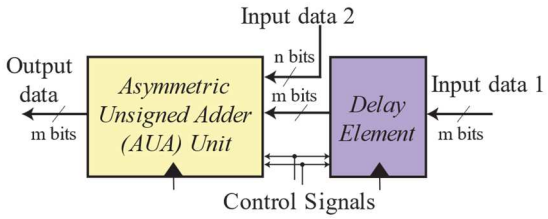


图5. 加法累加器（AAC）单元的框图。

已有许多有价值的研究成果和贡献，通过应用人工智能（如深度神经网络、神经形态系统和机器学习），以及采用先进的控制算法（如模糊逻辑系统（FLS） [15-18]），提出了针对这一问题的创新解决方案。与神经网络不同，模糊逻辑系统的优势在于能够针对不同条件下的不精确数据应用预先设定的规则，而无需针对每种潜在场景进行预训练。事实证明，FLS算法是解决城市空中交通相关各种问题的可靠方案。FLS可对城市空中交通领域作出重要贡献的方向包括自动驾驶仪动力学、视觉人体跟踪无人机系统等。然而，在不久的将来，利用FLS解决自主着陆和高度失效难题，可能会成为城市空中交通市场最迫切的需求

[19, 20]。

此外，依赖现场可编程门阵列（FPGA）这类可重构且功能强大的处理单元，可视为此类系统开发的基石，因为它能够适应各种可能需要的变化，例如飞行地形的变化。值得注意的是，飞行规则可以经过审查，并以人类可读的模糊规则格式进行编码，从而简化区域主管部门的治理，并根据不断变化的合规要求快速更新。一般而言，任何飞行控制系统的模糊规则都可以用模糊限定词（斜体）和逻辑语义（大写）表示，如下所示：

- IF（非着陆模式）AND IF（区域信标信号较弱）AND（方向为远离区域信标）THEN（进一步降低速度，发出范围限制错误信号）。
- 如果处于着陆模式，且光学传感器、uWave传感器和超宽带传感器均受到严重噪声干扰，则停止着陆模式，进入悬停模式，发出传感器错误信号，并启用手动控制。

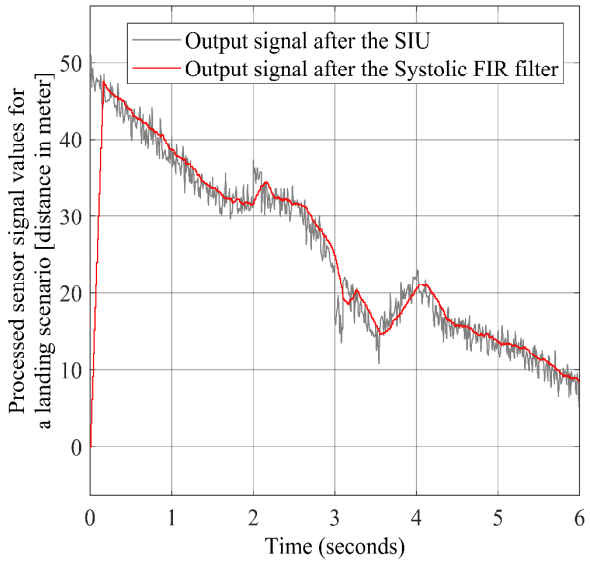


图 6. 无人机着陆阶段下降高度场景下脉动式FIR滤波器的 MATLAB 验证。

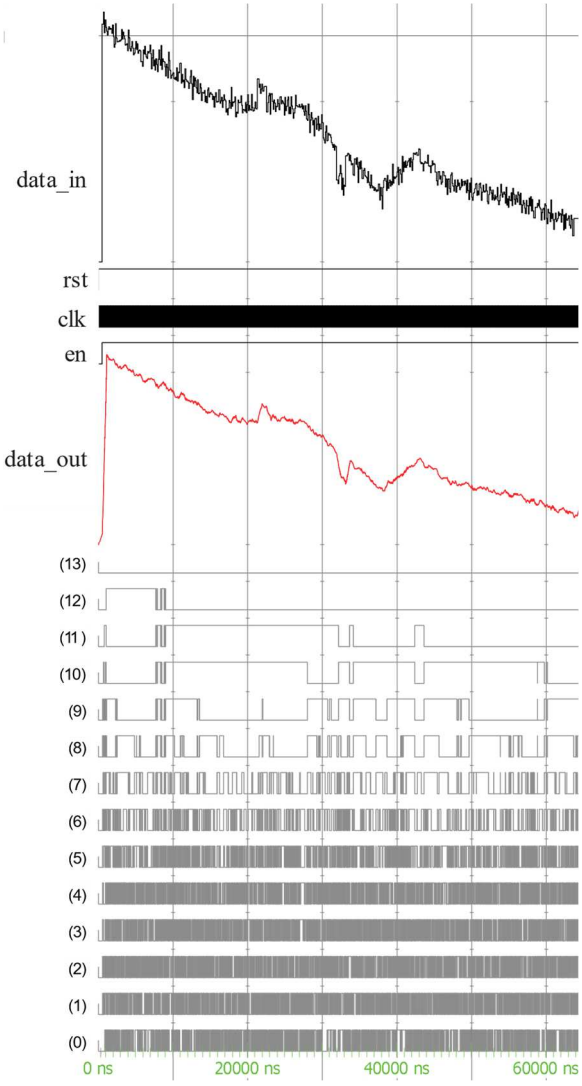


图7. 无人机着陆阶段下降高度场景下脉动式FIR滤波器的Questa仿真验证。

III. 拟议的ALGAS3处理单元

本文的主要贡献在于提高V/STOL出租无人机自主着陆阶段的安全系数。为此，可以构建一个自主系统，通过四个相互独立的HOA单元持续测量并处理空中出租车无人机与着陆区域之间的距离，从而确保着陆流程稳定；再利用所提出的ALGAS3系统处理这些汇总数据。如图2所示，所提出的ALGAS3系统是一种分布式协同处理系统，由四个ALGAS3处理核组成。每两个空间位置相对的ALGAS3处理核构成一个差分处理对，通过持续进行双重确认，确保无人机相对两侧测得的距离相互匹配且处于可接受的预设裕度内，从而提高安全系数。

这些ALGAS3核心之间的通信和数据交换通过高速差分通信接口（HSDCI）单元进行。图3展示了拟议的ALGAS3系统中一个空间处理角的详细结构。每个ALGAS3处理角由四个主要子部分组成：HOA单元、ALGAS3处理核、HSDCI和差分倾角控制（DIC）单元。然而，本文仅关注ALGAS3处理核。总体而言，HOA单元负责通过传感器接口单元（SIU）采集短程24 GHz雷达传感器和840 nm激光雷达传感器的数据。选择这两种不同的传感器执行相同的距离测量任务，不仅是为了提高测得距离的可靠性，也是为了通过应用频谱分离概念来增强安全性。因此，如果其中一个带宽遭受频谱攻击，ALGAS3系统可以优先采用另一个传感器的读数。

表 I.　本文中单个FIR模块和单个故障预测单元的计算性能总结。

	单个FIR模块 ***in*** 本文	单个故障预测单元 ***in*** 本文
FPGA器件 ***name***	INTEL 5CGXFC9D6F27C7	
嵌入式 FPGA 的数字信号处理器资源使用量	None	
动态核心和输入/输出总计热功耗	16.45 毫瓦	11.44 毫瓦
外部存储器使用量或 ***BRAM***	None	
最高频率	253.1 兆赫	431.03 兆赫
逻辑单元数量	155 个自适应逻辑模块	46 个自适应逻辑模块
每个单元的特殊功能	15 个抽头	固定窗口大小（16 采样点)

ALGAS3内核由两个脉动移动平均有限脉冲响应滤波器组成，用于在后续阶段处理之前，去除HOA单元中两个传感器传感数据里的噪声。每个FIR滤波器有15个抽头。所提出的FIR滤波器由一个加法累加器（AAC）和系数存储单元级组成，如图4和图5所示。提出这种FIR滤波器粗粒度架构的原因，是使其与其他处理模块保持一致，从而提升下一版ALGAS3的计算速度，相关内容将在后续论文中详述。两个脉动式FIR滤波器的输出信号被送至局部脉动FLS处理节点和预测性故障单元（PMU）。局部脉动FLS处理节点负责融合两路传感数据，并向执行器控制单元发送输出信号，以便无人机在着陆任务期间调整自身的高度位置。

表II.　所提出的ALGAS3系统与类似系统之间的比较。

	The 所提出的ALGAS3 ***in*** 本文	***The*** 提出的ALGAS2 在 *[8]* 中	***The*** 提出的ALGAS1 在 *[9]* 中	***The*** 提出的 ***FLS*** 在 *[21]* 中
FPGA 设备 ***name***	INTEL 5CGXFC9D6F27C7			
FLS 中的引擎这些系统	4 脉动式基本核心 + 独立操作	4 脉动式基本核心 + 独立操作	5 脉动式基于 core	3 脉动式基于 core
DSP 单元	2 个 FIR滤波器（15 个抽头）	None		
故障预测故障功能	每个 ALGAS3 unit	None		
总计动态内核与 I/O 热功耗耗散	145.4 mW	146.4 mW	178.12 mW	58.56 mW
外部存储器使用量	None			
最高频率	276.63 MHz	279.25 MHz	266.03 MHz	270.86 MHz
FLS 清晰输入分辨率	变量（11 位、10 位）			
逻辑单元数量元素	4,544 ALMs	3,488 ALMs	4,304 ALMs	2,578 ALMs
最大值 ***Giga*** 运算每秒（每秒十亿次运算）	70.82 GOPS	21.22 GOPS	25.273 GOPS	14.36 GOPS

FRU负责根据评估IF-THEN-ELSE规则条件的结果来控制Open FLS。有关该FLS单元结构、仿真和分析的更多详情，请参见[21-23]。PMU是ALGAS3内核中的一种新型处理单元，可预测

无人机执行着陆任务期间，传感读数质量是否会显著下降。简单来说，它读取两个传感器的传感信息，并在16个采样点的特定时间帧内监测这两个信号之间的差异。根据这一过程的结果，该模块可直接提示飞行员应采取哪些紧急预防措施。这些措施用于指示其中一个传感器是否无法提供与另一个传感器相比合理的预测数据，或者是否有针对某个传感器带宽的蓄意黑客攻击（网络攻击）。

IV. 结果

为验证所提出的设计，我们将该系统分为两部分。第一部分与 FLS单元有关，正如第 III 节所述，该部分已在 [20-22] 中经过明确验证和分析。第二部分与新提出的处理模块有关，该模块已添加到 ALGAS3处理核中，包括 PMU 和脉动式移动平均FIR滤波器，如图 3 所示。脉动式FIR滤波器设计的验证分为两个阶段。首先，我们假设无人机在着陆阶段高度逐渐下降，并使用 MATLAB 对设计进行验证，如图 6 所示。随后，将来自 MATLAB 的相同信号作为输入信号，用 Questa 仿真工具对脉动式FIR滤波器设计的 VHDL 版本进行仿真。如图 7 所示，与预期假设相比，我们获得了非常令人满意的结果。PMU 的验证采用了不同的方法：我们使用 Questa仿真工具对该模块的 VHDL 版本进行仿真，并将仿真结果与目标数学模型及所假设的条件进行比较。

所取得的结果与预期高度吻合。为全面了解ALGAS3系统的整体性能，我们使用INTEL Quartus Prime工具对整个系统进行了综合。为了更好地理解所提出的ALGAS3架构中新引入的计算单元，表I详细说明了单个FIR模块和单个PMU的计算性能。与所提出的ALGAS3架构中的其他所有模块类似，FIR和PMU均不依赖外部存储器使用量或FPGA芯片上的块RAM。我们进行了大量逻辑优化，以减少在FPGA器件上实现FIR和PMU所需的自适应逻辑模块（ALM）资源，如表I所示。

因此，FIR模块和PMU模块的动态功耗均较低，分别为16.45 mW和11.44 mW。如表II所示，添加到ALGAS3系统中的额外功能使其从INTEL 5CGXFC9D6F27C7现场可编程门阵列芯片的逻辑资源中使用了总计4,336个自适应逻辑模块。与之前的ALGAS2系统相比，逻辑资源增加了约24.31%，这是合理的，因为其计算速度性能分别提升至ALGAS2系统和ALGAS1系统的3.3倍和2.77倍。此外，采用不同优化技术的策略使系统在添加故障预测功能和飞行规则单元（FRU）等新功能的同时，取得了这些令人瞩目的结果。所提出的ALGAS3系统中所有处理元件的设计均已使用VHDL在门级和RTL级完成。

此外，整个ALGAS3系统架构均经过优化，所有总线均采用我们所谓的“按需”位宽；脉动式FIR滤波器的设计在图4和图5中对此进行了简要说明。这还有助于我们将ALGAS3系统的总动态热功耗（输入/输出和内核）降低至仅131.96 mW。此外，本文之所以聚焦于动态功耗，是因为相关信息具有重要意义，未来可用于与其他类似的基于ASIC的系统进行比较；这是因为基于FPGA的设计所体现的是每个芯片的全部静态功耗，而不是所实现系统的静态功耗。此外，表II展示了更多为保护ALGAS3系统免受任何形式的故障注入攻击而考虑的有趣特性：通过消除与任何类型外部存储器交换数据的需求，仅使用块RAM存储系数。

V. 结论

本文为ALGAS3系统引入了一项新的故障预测功能和一个开放式FLS处理内核，提供灵活性和透明的治理能力。我们认为，鉴于美国联邦航空管理局、SESAR和NextGen针对城市空中交通快速演进的指导方针及安全措施，这些功能对于空中出租车无人机自主着陆期间实现更安全的航空出行至关重要。ALGAS3系统提出了一种通用的信息物理系统（CPS-5）架构，可提高空中出租车无人机在着陆操作期间的安全性。当前对ALGAS3架构所作的修改，将为未来版本的该架构实现更切实的处理性能奠定基础。

VI. 致谢

衷心感谢 IEEE CAS/DSASC 成员 David Wyatt 在本研究项目完成过程中提供的技术支持和协助。

参考文献

[1] M. Rimjha、S. Hotle、A. Trani 和 n. Hinze，“空域限制对城市空中交通计算机需求潜力的影响”，载于《综合通信、导航与监视会议》（ICNS），美国，2022年：IEEE。[2] N. Schimpf、H. Li、E. Knoblock 和 R. Apaza，“国家空域通信需求的联邦学习方法”，发表于《综合通信、导航与监视会议》（ICNS），美国，2022年。[3] S. Bharadwaj、S. Carr、N. Neogi 和 u. Topcu，“城市空中交通空中交通管理的分散式控制综合”，IEEE网络系统控制汇刊，第8卷，第2期，2021年。[4] A. P. Cohen、S. A. Shaheen 和 E. M. Farrar，“城市空中交通：历史、生态系统、市场潜力与挑战”，IEEE智能交通系统汇刊，第22卷，第9期，2021年。[5] V. Bulusu、E. B. Onat、R. Sengupta、P. Yedavalli 和 J. Macfarlane，“城市空中交通的交通需求分析方法”，IEEE智能交通系统汇刊，第22卷，第9期，2021年。[6] 路透社，“中国波音客机坠毁山区，机上132人，暂无幸存者迹象”，中国，2022年。[7] 空中客车，“商业航空事故统计分析（1958—2021年）”，载于《安全出版物》，2021年。[8] H. O. Ahmed，“基于现场可编程门阵列的垂直/短距起降自主着陆引导辅助系统隔离式FLS处理内核”，载于《综合通信、导航与监视》（ICNS），美国，2021年：IEEE。

[9] H. O. Ahmed，“面向城市空中交通（UAM）飞行器、基于脉动式模糊逻辑系统的25.3每秒十亿次运算自主着陆引导辅助系统”，载于综合通信、导航与监视会议（ICNS），美国（线上），2020年：IEEE。[10] X. Yang 和 P. Wei，“采用计算引导与避碰技术的城市空中交通自主自由飞行运行”，IEEE智能交通系统汇刊，第22卷，第9期，2021年。[11] F. A. Administration。（2022年）。美国联邦航空管理局城市空中交通与先进空中交通。网址：https://www.faa.gov/uas/advanced_operations/urban_air_mobili ty [12] A. Rohan、M. Rabah 和 S.-H. Kim，“基于卷积神经网络的 Parrot AR Drone 2 实时目标检测与跟踪”，《IEEE Access》，第7卷，2019年。[13] B. Thomas 等，“利用人工智能增强Astro2020科学优先级排序”，载于职业现状APC征集；天文学与天体物理学十年调查，美国，2019年：美国国家科学院。[14] D. Palossi、A. Loquercio、F. Conti、E. Flamand、D. Scaramuzza 和 L. Benini，“面向自主纳米无人机的64毫瓦深度神经网络视觉导航引擎”，《IEEE物联网杂志》，第6卷，第5期，2019年。[15] F. Santoso、M. A. Garratt、S. G. Anavatti 和 I. Petersen，“用于四旋翼无人机动力学的鲁棒混合非线性控制系统”，《IEEE系统、人和控制论汇刊：系统》，2018年。[16] F. Santoso、M. A. Garratt 和 S. G. Anavatti，“用于四旋翼无人飞行器轨迹跟踪的混合PD模糊控制器与PD控制器：自动驾驶仪设计与实时飞行测试，《IEEE系统、人和控制论汇刊：系统》，第1-13页，2019年。

[17] P. Tylkin等，《通过紧凑可视化神经电路策略实现可解释自主飞行》，《IEEE机器人与自动化快报》，第7卷第2期，第3265-3272页，2022年。

[18] S. H. Alsamhi等，《Beyond 5G智能环境中的无人机边缘智能：区块链与联邦学习的协同》，《IEEE绿色通信与网络汇刊》，第6卷第1期，2022年。

[19] Y. Wang、X. Wang、S. Zhao和L. Shen，《固定翼无人飞行器高度的双层模糊控制器》，载于第37届中国控制会议（CCC），中国，2018年：IEEE。

[20] M. M. Ferdaus、M. Pratama、S. G. Anavatti和M. Garratt，《一种基于通用自演化神经模糊控制器的高性能六旋翼飞行器高度控制系统》，载于IEEE系统、人类与控制论国际会议（SMC），日本，2018年：IEEE。

[21] H. O. Ahmed，《基于现场可编程门阵列的仓库机器人 FLS 避碰信息物理系统》，载于第六届可信系统及其应用国际会议（DSA），中国，2020年：IEEE。

[22] H. O. Ahmed，《基于现场可编程门阵列的脉动式激光雷达模糊逻辑系统及边境监测》，载于第二届世界通信工程研讨会（WSCE 2019），日本，2019年 IEEE。

[23] H. O. Ahmed，《基于现场可编程门阵列、功耗为 17.16 每秒十亿次运算\W 的可持续 FLS 无线传感器网络监控系统》，载于综合通信、导航与监视（ICNS），美国（线上），2021年：IEEE。