



带爪无人机自主控制技术新进展

段海滨^{*}, 王壮壮, 霍梦真, 孙永斌

北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 飞行器控制一体化技术重点实验室仿生自主飞行系统研究组, 北京 100083

^{*} E-mail: hbduan@buaa.edu.cn

收稿日期: 2023-06-30; 接受日期: 2023-08-28; 网络版发表日期: 2024-08-08

科技创新2030-“新一代人工智能”重大项目(编号: 2018AAA0100803)和国家自然科学基金项目(批准号: T2121003, 62350048, U20B2071, U1913602)资助

摘要 带爪无人机因同时具备作业机构的高精度操作能力和无人机的灵活机动性而被广泛关注. 随着带爪无人机应用需求的增加和能力边界的拓展, 国内外学者对其关键技术的研究日趋深入. 本文对带爪无人机的作业机构构型、建模和控制方面的代表性研究进展进行了讨论分析, 并分别从作业机构和无人机平台角度阐述了其演变历程, 将带爪无人机的建模方法分为整体建模法和独立建模法, 在自主控制方面归纳了目前所研究的经典控制及机器学习方法, 并分析了其优缺点. 讨论了带爪无人机自主控制的技术难点和痛点, 并对其未来发展方向进行了展望.

关键词 带爪无人机, 作业机构, 无人机平台, 动力学建模, 自主控制

1 引言

近年来, 无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)因其运动灵活、操作简单、可代替人类执行操作重复、高危险性、复杂且具有高精度要求的任务而被广泛应用于航拍、三维地图构建、电力巡检、环境侦察、喷洒农药、消防等空中任务场景, 但由于无人机本身结构的局限性, 使得无人机的应用场景大多不需要或很少需要与环境交互. 机械爪、机械臂等作业机构不仅具有高精度的操控能力, 且具有较强的环境交互能力, 但其应用大多是依附在固定或地面移动平台上. 因此, 将作业机构和无人机进行结构的融合, 可大大拓宽无人机的应用范围, 实现从传统的“看”到“做”的突破, 应

用到空中物流搬运、空中装配、空中维修、集群筑建等场景.

虽然作业机构与无人机的融合使无人机系统具备了精准操控能力, 但要求作业机构所依附的飞行平台必须具备较好的飞行品质, 如在插头插入插座任务中, 作业机构需要短时间地与插座进行接触, 若无人机无法保持位置与姿态的稳定, 该任务则会变得非常困难. 作业机构与无人机平台的耦合增加了无人机的控制难度. 作业机构的运动会使整个系统质心的改变, 从而改变整个带爪无人机系统的动力布局, 并使整个系统的惯性参数改变. 此外, 在进行作业的过程中不仅有作业机构的干扰和模型误差等内部干扰, 当系统与外界环境进行接触时, 还会有风以及作业机构与环境接

引用格式: 段海滨, 王壮壮, 霍梦真, 等. 带爪无人机自主控制技术新进展. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 1533–1548

Duan H B, Wang Z Z, Huo M Z, et al. New progresses in autonomous control technology for UAV with manipulator (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 1533–1548, doi: [10.1360/SST-2023-0213](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0213)

触产生接触力和力矩等外部干扰,这就要求所设计的控制器具有较强的鲁棒性. 作业机构与无人机的耦合性以及无人机本身的非线性、欠驱动等特点给带爪无人机系统建模和控制带来巨大挑战. 按照无人机在执行作业任务时与环境的耦合程度可将耦合分为如下三类^[1].

(1) 瞬时耦合: 在某些瞬间时刻与环境进行接触,产生接触力,如物块的拾取与放置瞬间.

(2) 松耦合: 在有限短的时间内与环境耦合,且有单个接触点,如钻孔与钉插入过程.

(3) 强耦合: 较长时间与环境进行耦合,可能会有多个接触点,如转动阀门^[2]或旋钮任务.

无人机自主控制分为单机自主(高可靠活着)、多机自主(高品质工作)和集群自主(集体使命高效工作)三个层面^[3]. 现有关于带爪无人机的研究多是针对空中抓取、搬运、空中维修等简单任务的单平台应用,且所使用的无人机平台以欠驱动的共平面多旋翼为主,不能满足日益复杂的任务和场景需求,即要求带爪无人机不仅具有较强的自治能力,且能在不确定性、受限环境中无人干预的情况下自主决策. 因此,新型的带爪无人机构型、建模、控制及智能化、集群化应用等方面有待于进一步研究. 本文回顾了带爪无人机自主控制技术的代表性新进展,并着重对带爪无人机的构型、建模和控制等方面的研究现状进行分析,在此基础上,对带爪无人机自主控制的关键技术难点进行了探讨,最后,对未来发展方向进行了展望.

2 带爪无人机构型研究现状

带爪无人机的构型包括作业机构和无人机平台两部分. 随着作业任务需求的复杂度和无人机工作环境不确定性的增加,其构型也逐渐发生演变. 在作业机构方面,早期的带爪无人机主要用于简单的抓取任务,因此设计的作业机构相对简单,主要包括自由度较低的夹爪、磁吸等结构. 为了满足复杂任务和高精度的作业要求,运动范围更广的多自由度机械臂被广泛应用在带爪无人机上,可完成插钉、维修等任务. 此外,作业机构的材料也由刚性材料向更轻量以及灵活度更高的柔性材料转变,功能复用的作业机构开始出现,生物启发对其构型的研究也逐渐增大. 在无人机平台方面,较早的无人机平台采用可遥控的直升机,但由于

平台稳定性、结构复杂度和成本等因素,具有垂直起降、定点悬停且操控简单的多旋翼无人机被广泛应用,为了克服其欠驱动的特点,其构型也由平面多旋翼无人机向运动自由度更高的全驱动多旋翼无人机演变. 下面将对作业机构与无人机平台两部分的演变过程进行分别介绍.

2.1 作业机构

作业机构的构型根据与无人机的连接方式可以分为直连式、牵引式、串联式和并联式四种. 直连式作业机构是将作业机构直接安装在无人机上,具有结构强度高的特点,适合强交互性的作业任务,但是由于缺乏对作业机构末端位置的调节结构,其控制精度完全取决于无人机电体的控制精度,大大降低了系统操作能力. 直连式作业机构主要有吸附式、夹取式和侵入式三种工作方式(如图1所示). 吸附式的作业机构通过电磁铁或永磁铁对目标物进行吸附,该工作模式下磁铁所能提供的吸力决定了其最大承载能力,且对被吸引目标的材料具有一定要求,永磁铁因不需要一直产生电流相对于电磁铁会节约一定的能量. 印度班加罗尔科学研究院Rajashekhar等人^[4]针对物体的抓取与放置任务,利用永磁铁设计了一种被动抓取器并设计了提供脉冲力击落物体的机构使物体可以主动与无人机机体分离. 夹取式的作业机构通过在物体的表面施加压力并根据所产生的摩擦力来抓取物体,抓取过程中对物块的大小、形状以及抓取材料的摩擦系数具有较高要求. 塞维利亚大学Real等人^[5]设计了一种同时带有吸附和夹取机构的作业机构,在筑墙任务中实现了对长方体砖块的抓取. 侵入式的作业机构通过尖锐的末端穿透物体表面,使物体表面发生形变,其更适用于没有附着点且易于穿透的物体,如泡沫、木材、织物等多孔或可变性材料. 宾夕法尼亚大学Mellinger等人^[6]设计了一种侵入式的抓取结构,通过将尖端侵入木板实现对模板的抓取,同时利用线性最小二乘法实现对有效载荷质量参数的估计以确定无人机是否已成功捡起或放置木板.

牵引式作业机构通过绳索将作业机构末端与无人机系统牵连(如图2所示),其优点是可以延长作业机构与无人机的距离,实现远距离的操作,但由于其连接材质的柔性,使得作业过程中的晃动加剧,降低了作业精度,仅适用于执行作业精度不高的搬运、灭火等任务.

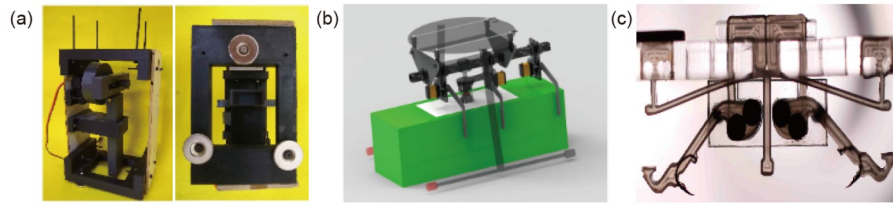


图 1 (网络版彩图)直连式作业机构. (a) 磁吸式^[4]; (b) 夹取式^[5]; (c) 侵入式^[6]

Figure 1 (Color online) Directly connected manipulator. (a) Magnetic suction type [4]. Copyright©2021, ACM. (b) Clamping type [5]. Copyright©2021, IEEE. (c) Invasive type [6]. Copyright©2011, IEEE.

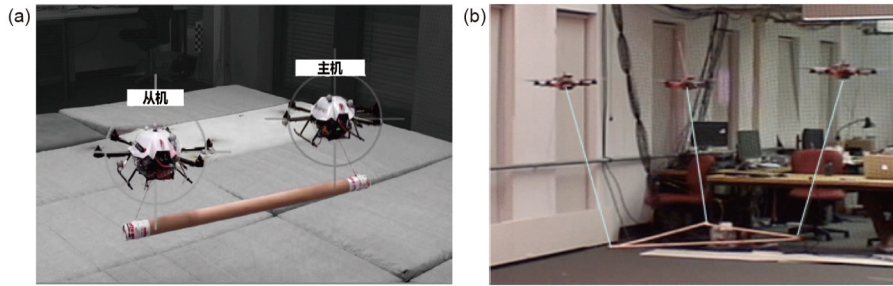


图 2 (网络版彩图)牵引式作业机构. (a) 运输^[7]; (b) 悬挂^[8]

Figure 2 (Color online) Traction manipulator. (a) Transportation [7]. Copyright©2017, IEEE. (b) Hang [8]. Copyright©2013, IEEE.

苏黎世联邦理工学院Tagliabue等人^[7]针对两个六轴飞行器协同搬运笨重物体的问题, 基于主从范式的生物启发协作策略提出了一种基于被动力控制的策略, 用于使用微型飞行器进行协作式物体运输. 其中, 主站的任务是提升有效载荷并将其拉向所需方向. 宾夕法尼亚大学Jiang和Kumar^[8]针对三个带有电缆的空中机器人悬挂有效载荷的协同运输问题, 提出了一种基于透析消除的高效解析算法, 以解决逆运动学问题.

随着任务复杂度增加和作业精度要求的提高, 低自由度的作业机构不能满足任务需求. 串联式作业机构由串联机械臂与无人机结合而成(如图3所示), 具有自由度高以及末端可操纵空间大的优点, 适应于对操纵精度和灵活度有较高要求的场景(如空中抓取、插钉子等). 但由于机械臂与无人机之间的耦合作用会对无人机的控制产生干扰, 要求控制算法必须具有一定的鲁棒性. 天津大学Wang等人^[9]和中国科学院沈阳自动化研究所Zhang等人^[10]分别采用平面3自由度机械臂和7自由度机械臂与无人机串联, 实现了圆柱形物体的抓取.

并联式作业机构将无人机和并联机械臂相结合(如图4所示), 具有比串联式作业机构末端响应速度更

快、操作精度更高的优点, 但其工作空间有限, 不如串联式作业机构灵活, 常用在写字、拧螺钉、喷涂打印、定点修复等场景. 英国帝国理工学院空中机器人实验室Zhang等人^[11]将并联式动态自调整三角形机械手与无人机集成在一起, 实现了在人类监督下进行自主三维打印任务, 并将制造精度提高到5 mm. 英国帝国理工学院空中机器人实验室Stephens等人^[12]提出了一种由并联机械臂和传统欠驱动多旋翼无人机组成的新型空中系统, 利用导纳控制策略, 并对机械手执行器施加扭矩限制, 使两个子系统(机械臂系统和无人机系



图 3 (网络版彩图)串联式作业机构^[9]

Figure 3 (Color online) Inseries manipulator [9]. Copyright©2020, IEEE.

统)能够独立地适应外部干扰,并在与作业表面相互作用时提高整体系统性能. 英国帝国理工学院Hamaza和Kovac^[13]提出了一种由一个五杆并联机械臂和一个附加可以绕点旋转的主动关节组成的混合系统,使得机械臂可以到达全方位的工作空间,增强了系统的多功能性和完成任务能力. Chermprayong等人^[14]提出了一种集成式空中机器人系统的控制架构,该系统集成了并联轻型Delta机械手,并利用基于运动学的方法使其能够补偿由于风或飞行精度低而导致的四旋翼飞行器平台的波动.

此外,还有一些学者进行了在同一架无人机上安装多个机械臂的研究(如图5所示),多个机械臂的安装使带爪无人机的应用范围进一步扩大,但是增加机械臂数量会引入多个伺服电机,从而增加整个系统的重量,对负载能力有限的无人机产生较大影响. 萨格勒布大学Orsag等人^[1]、塞维利亚大学González-Morgado等人^[15]、季华实验室Yang等人^[16]和德雷塞尔大学Korpela等人^[17]分别针对抓取/放置任务和转动阀门任务,设计了串联式双臂结构的作业机构,实现了强耦合下的运动控制.

为了在增加机械臂数量的同时尽量减小系统的总重量,功能复用型的作业机构被提出,即设计的作业机构不仅具有精确的操纵能力,且可以起到起落架的作用(如图6所示),从而省去了原本起落架的重量. 日本滋贺立命馆大学Paul等人^[18]针对降落点未知、地面的移动或不稳定的场景,设计和使用三臂空中机械手系统实现了无人机平台自动保持水平,以确保从倾斜平台安全起飞. 日本滋贺立命馆大学的Yamada等人^[19]设计了一种利用三臂机械臂防止意外撞击的狭窄空间飞行方法,将两个手臂水平撑开作为螺旋桨的可调整大小的保护(当靠近障碍物时,机械臂起到支撑作用,避免碰撞),同时令第三个手臂用于一些操作任务. 复旦大学的Liu等人^[20]基于鹰爪的特点,设计了仅依靠一个电机就可以同时转动三个旋转关节的类鹰爪多指机器人系统,所设计的多指机器人系统可以抓取目标物体或栖息在圆柱体上,且能够作为起落架在不平坦的地形上着陆.

目前大多数机械臂均为多自由度刚性连杆结构,存在载荷能力、不确定性处理和运动灵巧性等方面的限制. 现有的带爪无人机在空间受限和混乱的环境中

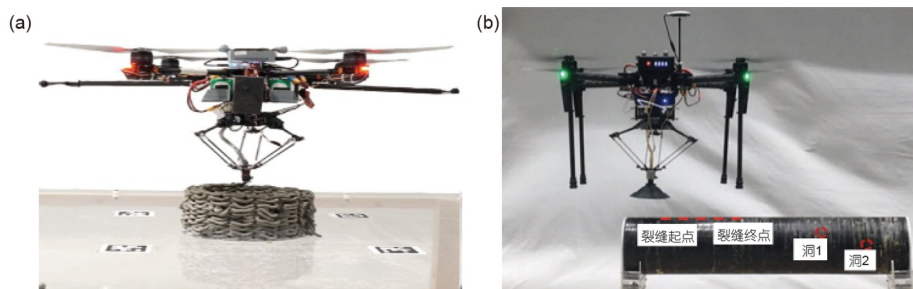


图4 (网络版彩图) 并联式作业机构. (a) 增材制造^[11]; (b) 管道维修^[14]

Figure 4 (Color online) Parallel manipulator. (a) Additive manufacturing [11]. Copyright©2022, Nature. (b) Pipeline maintenance [14]. Copyright©2019, IEEE.

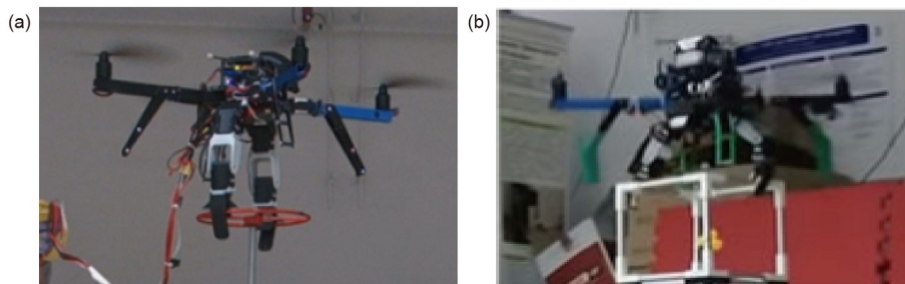


图5 (网络版彩图) 双臂作业机构. (a) 旋转阀门^[17]; (b) 搬运物体^[17]

Figure 5 (Color online) Two-arm manipulator. (a) Rotary valve [17]; (b) moving objects [17]. Copyright©2014, IEEE.

难以进行空中操作或与物体交互, 考虑到灵活性、安全性和轻量化等因素, 连续柔性机械臂在带爪无人机系统中取代传统的刚性机械臂是可能的. 麻省理工学院Fishman和Carlone^[21]研究了由四旋翼和肌腱驱动的软夹持器组成的柔性机动臂(如图7(a)所示), 充分利用柔性结构的顺应性, 验证了即使在定位和初始条件不准确的条件下, 无人机平台仍能可靠地抓取未知物体. 犹他州立大学Ghadiok等人^[22]设计了一个欠驱动被动柔性机械手, 用于在不确定情况下有效抓取, 实现自主室内空中抓取毛绒玩具. 香港大学Peng等人^[23]将一个轻量级的肌腱驱动连续机械臂^[24]与四旋翼无人机巧妙地耦合在一起, 利用基于张力的闭环控制方法, 在控制连续柔性臂的形状时避免了肌腱松弛. 美国格罗宁根大学Roderick等人^[25]利用关于鸟类如何起飞、着陆和抓取的发现, 受自然界中游隼的启发, 开发了一种仿鸟机械爪(如图7(b)所示), 它可以使无人机动态地栖息在复杂的表面上, 并抓取不规则的物体, 实现了带爪无人机降落并栖息在森林的树上, 可以进行环境检测等任务.

2.2 无人机平台

遥控的直升机最先被作为作业机构的稳定平台(图8). 德国航空宇航中心Kondak等人^[26]和美国耶鲁大学Pounds等人^[27]将机械爪安装在直升机的底部, 实现了水平和竖直目标的抓取. 但由于直升机的机动性差、响应速度较慢、体积大等缺点, 很多研究者将作业机构载体转向了具有定点悬停、垂直起降、操控简单、体积小等特点的多旋翼无人机.

中国运载火箭技术研究院研发中心Chen等人^[28]利用四旋翼无人机搭载2自由度机械臂实现运输任务. 首尔大学Lee等人^[29]基于四旋翼平台设计了可以开启铰链门的空中机械手(图9).

现有的多旋翼无人机平台多是采用共平面多旋翼无人机, 无人机在机体系 X 和 Y 方向的运动是通过改变其姿态角度实现, 这种结构的多旋翼无人机是欠驱动且平移运动和旋转运动是耦合的, 一定程度上限制了多旋翼无人机的机动性和可控性, 使得平台无法对任意的轨迹和方向进行跟踪, 无法产生任意方向的扭矩和力, 基于该平台设计的带爪无人机不能在狭小空

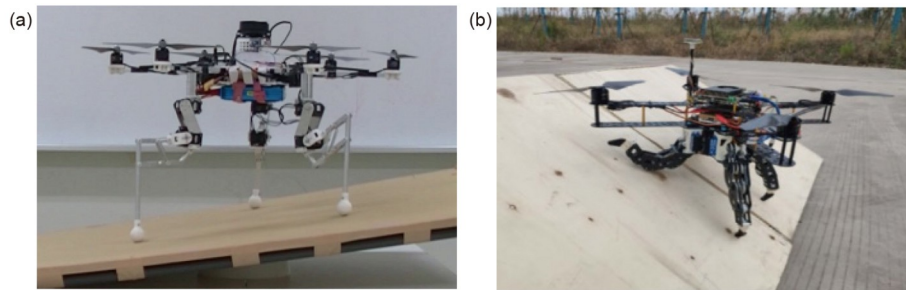


图 6 (网络版彩图)功能复用作业机构. (a) 三臂作业机构^[18], (b) 四臂作业机构^[20]

Figure 6 (Color online) Functional reuse manipulator. (a) Three-arm operating mechanism [18]. Copyright©2021, IEEE. (b) Four-arm operating mechanism [20]. Copyright©2021, Elsevier.

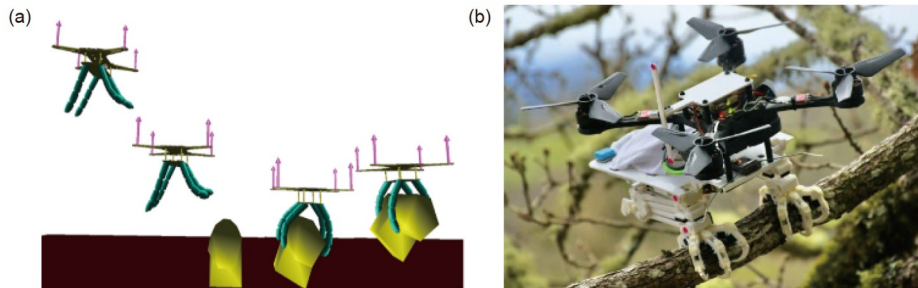


图 7 (网络版彩图)生物启发作业机构. (a) 肌腱柔性作业机构^[21], (b) 仿鸟爪作业机构^[25]

Figure 7 (Color online) Bio-inspired manipulator. (a) Tendon flexible operating mechanism [21]. Copyright©2021, IEEE. (b) Imitation bird claw operation mechanism [25]. Copyright©2021, Science.



图 8 (网络版彩图)直升机抓取^[27]

Figure 8 (Color online) Helicopter grabbing^[27]. Copyright©2021, IEEE.

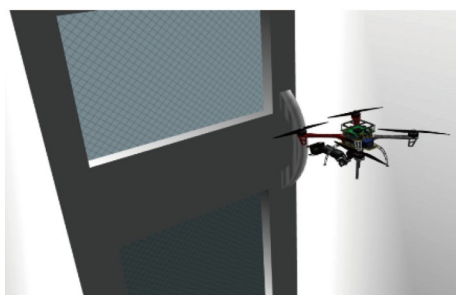


图 9 (网络版彩图)四旋翼开铰链门^[29]

Figure 9 (Color online) Quadrotor open hinged doors^[29]. Copyright©2019, IEEE.

间和受限空间中进行操作。因此,设计全驱动的多旋翼无人机平台成为研究的热点。实现多旋翼的全驱动有两种方式,第一种是通过使用多个面向且方位固定的电机实现多旋翼无人机高自由度的运动驱动(如图10(a)所示)。这种方法通过增加电机的数目使系统获得更大的负载能力和更高的鲁棒性能,但是一定程度上也会出现内力的抵消,降低了动力效率。东北电力大学Ma等人^[30]设计了一种新型全驱动飞行平台,在一般四旋翼布局的基础上再放置4个竖直方向的旋翼,令无人机具有独立横向和纵向控制,可以在不牺牲姿态精度的情况下实现平台的全向移动,且增加的竖直方向的旋翼能在一定程度上抵消阵风扰动的影响。第二种是采用电机倾斜结构(如图10(b)和(c)所示),即每个电机引入一或两个伺服电机,使其电机具有一定的倾斜能力,从而增加整个平台的自由度,实现平台的全方位驱动。美国新泽西理工学院Ding和Lu^[31]设计了电机倾斜结构,在机臂上安装两个伺服电机,构成一个“H”字形的多旋翼无人机结构,增加了带爪无人机的自由

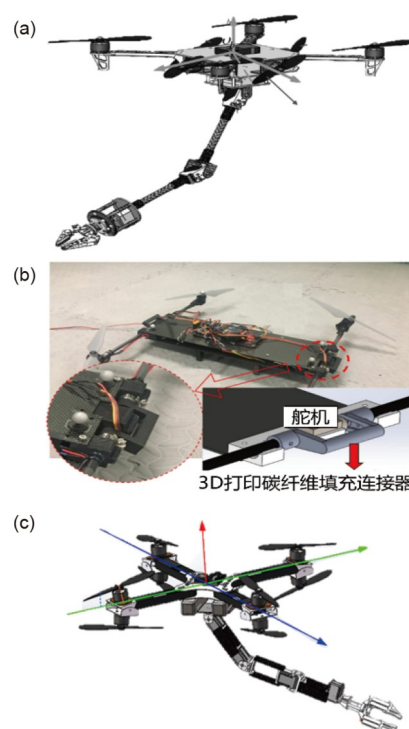


图 10 (网络版彩图)全驱动多旋翼平台。(a) 电机方向固定^[30]; (b) 电机方向可倾斜—机臂转动^[31]; (c) 电机方向可倾斜—电机转动^[34]

Figure 10 (Color online) Full-drive multi-rotor platform. (a) Fixed motor direction^[30]. Copyright©2022, Elsevier. (b) Motor direction tiltable—arm rotation^[31]. Copyright©2022, IEEE. (c) Motor direction tiltable—motor rotation^[34]. Copyright©2021, Springer.

度,从而提高了整体的机动性,同时精确求解了推力优化问题,在实现所需的机构力矩的同时,最大限度地降低了功耗,有效地解决了驱动中的冗余问题。德国德累斯顿技术大学Schuster等人^[32]通过在电机下方安装伺服电机,设计了全驱动倾转旋翼平台,并使用导纳控制获得恒定接触力实现了空中旋紧操作。立命馆亚洲太平洋大学的Paul等人^[33]利用辅助作动器维持转子的轴向设计了一种可倾机身的多旋翼,可以使机械手末端到达无人机周围的任意方向,且旋翼的推力保持直立,从而在机体倾斜时也能保持无人机的最大有效载荷。东北电力大学Ma等人^[34]在四旋翼无人机机臂的末端采用可以使电机具有较大倾角的结构,通过控制电机和螺旋桨的转向,在机体坐标系的X和Y方向上提供推进力矩和力矩,从而实现了无人机平台的全向驱动。

塞维利亚大学的Nekoo等人^[35]为扑翼机设计了一

个仅有79.8 g的机械臂,将其放置在扑翼机的头部并展开在翅膀上(图11),且通过调整扑翼机的腿来平衡整个机体的重心,实现了采摘叶片的操作.扑翼机相较于多旋翼具有更长的续航能力,目前针对扑翼飞行器机器人操纵能力研究较少,其有限的承载能力是必须考虑的因素之一.

除了单架无人机平台的应用研究,多无人机协同平台的应用研究也取得诸多成果,尤其是在协同运输领域.西北工业大学智能机器人研究中心Zhang等人^[36]提出了一种新的四旋翼无人机网络合作运输系统,在4架四旋翼无人机利用柔性网协同搬运未知物体场景中,将每个四旋翼无人机的动力学模型简化为二阶系统,柔性网被认为是一个连续的质量弹簧模型,所有四旋翼无人机都被视为虚拟二阶个体领导者的追随者,并给出了虚拟领导者路径(运输路径)生成的一般方法.文献^[37~41]利用两架带臂旋翼无人机实现了对杆状物体的搬运任务.宾夕法尼亚大学的Lindsey等人^[42]研究了一个使用四旋翼底部的夹具能够拾取、运输和组装结构元件无人机集群,实现了特殊立方结构(2.5-D桁架状结构,没有悬垂和孔)的组装.英国帝国理工学院空中机器人实验室Zhang等人^[11]采用多个不同功能的无人机实现了空中增材制造任务,其中建筑无人机用于沉积建筑材料,扫描无人机用于监测打印进度和打印质量(图12).



图 11 (网络版彩图)扑翼机户外飞行^[35]

Figure 11 (Color online) E-Flap outdoor flight ^[35]. Copyright©2022, IEEE.

3 带爪无人机动力学建模

目前带爪无人机的建模方法可以分为整体建模法和独立建模法两种.整体建模法将作业机构和无人机看成一个整体,通过分析外部环境对整个系统的作用进行整体建模.德雷塞尔大学Korpela等人^[17]针对双机械臂转动阀门场景,考虑到双机械臂与阀门的接触力和力矩作用,建立系统质心位移和惯性特性随机机械臂关节角和环境接触力和力矩的关系得到了整体的系统模型.中国运载火箭技术研发中心Chen等人^[28]对于航空运输任务,将四旋翼无人机和机械臂视为一个组合系统,考虑载荷对系统的影响,先利用欧拉方程分别

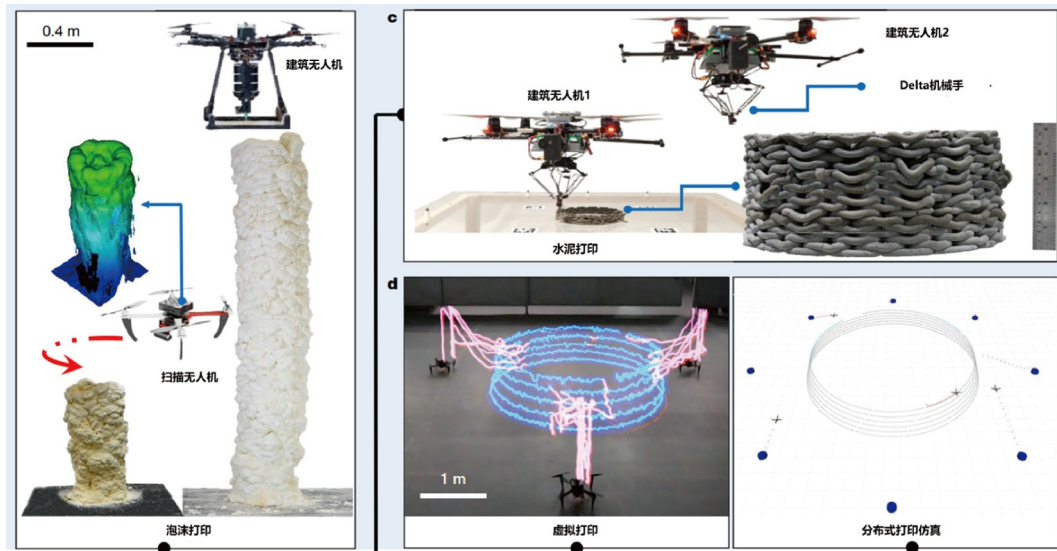


图 12 (网络版彩图)协同建筑打印^[11]

Figure 12 (Color online) Collaborative building printing ^[11]. Copyright©2022, Nature.

建立无人机和机械臂的运动学和动力学模型, 然后利用拉格朗日方程从能量的角度建立了四旋翼-机械臂集成系统的动力学模型. 卢森堡大学Kremer等人^[43]将四元数参数化无奇点与拉格朗日法的简单性结合起来, 提出了一种带臂无人机动力学建模的混合方法, 建立了无奇点、耦合的系统动力学模型. 辛辛那提大学Barawkar等人^[44]对于重心连续时变的无人机, 通过对重心的位置及其速度进行估计, 建立了时变重心的四旋翼无人机动力学模型. 相反, 独立建模法则将作业机构与无人机视为两个独立的系统, 通过分别分析两者的受力以及将作业机构对无人机的力和力矩作用看作对无人机系统的外部干扰. 萨格勒布大学Orsag等人^[45]着重对牛顿-欧拉递归算法建立带爪无人机的动力学模型进行了详细介绍. 突尼斯理工大学Bennaceur和Azouz^[46]对于载重无人机引起的机械臂变形现象, 考虑弹性变形、刚体运动以及系统内部的耦合作用, 利用拉格朗日和欧拉方程建立了柔性四旋翼飞行器的动力学模型. 首尔大学Lee等人^[29]在机械手开启铰链门的场景中, 考虑带臂无人机与可移动结构的相互作用力, 利用拉格朗日方程推导了航空机械臂与铰链门之间的耦合动力学方程. 华南理工大学Mo等人^[47]考虑了外部扰动与机械臂重力产生的力矩, 并将机械臂重力所产生的力矩线性参数化, 施加到四旋翼姿态动力学模型中, 将姿态控制问题转化为标准的稳定问题. 巴黎高等理工学院Alvarez-Muñoz等人^[48]实现了利用龙伯格状态观测器(Luenberger state observers, LSO)和扩展卡尔曼滤波器(extended Kalman filter, EKF)两种观测器估计关节角位置与速度, 并根据估计的关节角信息利用拉格朗日方程计算出机械臂产生的力矩. 中国科学院沈阳自动化研究所Zhang等人^[49]将机械臂系统看成质量分布变化的系统, 并用线性卡尔曼滤波器估计机械臂对无人机的力和力矩, 将其视为对无人机的扰动, 建立了带臂无人机系统的动力学模型. 中国科学院大学Zhang等人^[50]对耦合引起的变惯性参数模型线性化, 并通过输入可分配性策略来衰减机械臂引起的扰动, 并将其进行前馈补偿, 建立了带爪无人机的模型. 总的来说, 整体建模法得到的模型比较精确, 但由于作业机构与无人机存在强耦合很难进行控制器的设计, 独立建模法相对简单且通过对无人机和机械臂分别控制便可实现整个带爪无人机系统的控制, 但在一定程度上牺牲了模型的精确性. 因此, 在对带爪无

人机进行建模和控制器设计时, 应综合考虑模型的精确性和设计的便利性.

4 带爪无人机自主飞行控制

带爪无人机的控制包括无人机平台的控制和作业机构的控制两部分, 控制思路主要有两种. 第一种是将无人机平台和作业机构进行分开控制, 先通过控制无人机平台到达作业机构的工作空间内, 然后令无人机平台保持悬停并控制作业机构实现目标的抓取等操作, 或者先令作业机构与目标保持接触, 通过控制无人机平台的运动实现阀门旋紧、开启铰链门等任务. 该种控制方法在执行任务过程中由于无人机平台和作业机构中一方保持静止而相对较简单, 且可通过无人机的悬停抵抗接触力产生的干扰, 也是大多数研究所采用的方法. 但是该方法适用于理想化的作业过程, 实际过程中无人机平台或作业机构保持静止很难. 第二种是同时控制无人机平台和作业机构, 实现动态的作业过程. 由于无人机平台的运动, 使得作业机构处于一个非惯性系中, 其速度位置与无人机平台产生耦合, 作业机构的控制难度大大增加, 需要在对无人机进行运动轨迹规划的同时, 不断调整作业机构的位置和姿态. 西南科技大学的Zhou等人^[51]针对不同形状、不同姿态物体的抓取困难问题, 根据抓取过程中机械手角度范围和机械手离地面距离的约束, 改进了6自由度GraspNet抓取评估策略, 生成了机械臂的有效抓取姿态, 实现了对碗状、瓶状物体的抓取, 但没有考虑物体堆积或障碍物遮挡等更为复杂的场景. 宾夕法尼亚大学Thomas等人^[52]从敏捷、快速移动的鸟类获得灵感, 通过模拟鹰抓捕猎物的过程, 利用视觉信息设计了用于图像空间轨迹跟踪的非线性视觉控制器, 实现了对静态目标的动态抓取(图13).

目前主流的带爪无人机控制方法有传统比例-积分-微分(proportional-integral-differential, PID)控制、反步(back stepping, BS)控制、自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)、智能控制等. 香港大学Salih等人^[53]利用PID实现了四旋翼无人机的垂直起降, 日本千叶大学Uchida等人^[54]设计了自适应PID控制器实现了带臂无人机的姿态控制. 传统PID控制虽然原理较简单, 但初始误差大易造成超调, 且在实际系统中很难获得原信号的微分信号, 同时将控制率



图 13 (网络版彩图)动态抓取过程^[52]

Figure 13 (Color online) Dynamic grasping process ^[52]. Copyright©2022, IEEE.

进行线性组合不一定能取得很好的效果, 尤其面对带臂无人机这种具有强干扰和强耦合特点的系统往往不具有较好的控制性能. 中国科学院数学与系统研究院 Han^[55]针对PID的缺点提出了ADRC控制, 通过设计跟踪微分器为原信号安排“过渡过程”并提取输入信号的微分, 利用扩张状态观测器观测系统的干扰并对其补偿, 并设计非线性误差反馈控制率, 增强了控制器的控制性能和抗干扰能力. 墨西哥国家理工学院Rodríguez-Abreo等人^[56]设计了反步控制器实现带臂无人机的控制, 并与PID对比验证了所设计控制器的抗干扰能力和较好的控制性能. 反步控制对于模型较为简单的系统, 设计精确, 但随着模型阶数的增大设计过程变得繁琐. 南开大学Chai等人^[57]对于带臂无人机在执行任务过程中的模型误差和过程噪声影响, 提出了一种基于主动建模的控制方案, 并利用无迹卡尔曼滤波估计机械臂的重力和运动引起的模型误差并设计补偿控制器对模型误差进行补偿. 西湖大学Cao等人^[58]利用可在线训练的自适应神经网络估计机械臂的动态耦合, 并对动态耦合进行实时补偿实现了带臂无人机的运动控制. 湖南大学Liang等人^[59]针对未知干扰操作的无人机的自主控制问题, 将无人机与外部环境之间的耦合力作为对整个系统的扰动, 设计了一种自适应律来估计带爪无人机系统的不确定性和干扰参数, 提出了一种利用预定性能知识的自适应预定性能控制方法, 实现了真实环境下的安全操作. 印度喀拉拉邦大学Chandra和Lal^[60]考虑悬浮载荷导致系统的摆动建立动态耦合模型, 并设计了高阶滑模控制器, 解决了传统滑模控制器会产生震荡的问题. 滑模控制虽然抗干扰能力强, 响应快, 但是对系统模型具有较高的要求, 实际

应用比较困难. 东北电力大学Ma等人^[34]设计了以自抗扰控制器为位置环和以反步控制器为姿态环的串联控制器, 并加入补偿器来补偿机械手对系统的影响, 实现了精确的位置控制. 天津大学Wang等人^[3]针对外部环境及机械臂对无人机产生的干扰, 设计了动态重心补偿的自抗扰控制器, 提高了系统的抗干扰能力. 连续型机械臂(图14)存在严重的肌腱松弛问题, 且通常动作缓慢. 香港大学自适应机器人实验室的Peng等人^[61]开发了基于惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)的运动学模型, 以获得外部载荷下末端执行器的精确位姿, 设计了鲁棒闭环运动学控制器, 通过施加在肌腱上的扭矩反馈, 实现快速变形控制, 解决变载荷和肌腱松弛问题.

带爪无人机的系统参数要求以及复杂的动力学模型阻碍了其在实际环境中的应用, 人工智能可以通过机器学习和深度学习等技术, 自主地学习和优化模型,

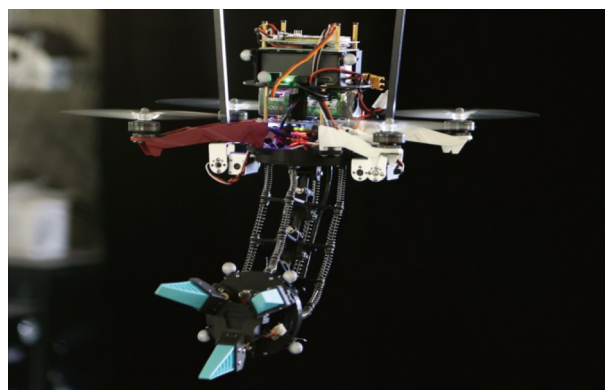


图 14 (网络版彩图)连续型机械臂^[61]

Figure 14 (Color online) Continuum manipulator ^[61]. Copyright©2023, IEEE.

提高模型的精度和效果。台湾成功大学的Liu和Huang^[62]针对耦合动力学模型的复杂性和参数的不确定性,提出了一种基于自适应鲁棒技术和强化学习方法的四旋翼机械臂位置跟踪控制解耦方法,利用深度确定性策略梯度(deep deterministic policy gradient, DDPG)算法控制机械臂,使其遵循期望轨迹的同时对四旋翼动力学的影响最小,采用鲁棒控制器对DDPG算法得到的交互力/力矩余量进行补偿,保证了系统的稳定性和跟踪性能。湖南大学的Zhang等人^[63]针对带爪无人机在不同环境下的切换操作引起的动态差异的控制稳定性进行研究,提出了一种力/位置混合控制策略,在自由飞行阶段采用基于干扰观测器的自适应滑模控制方法,在接触操作阶段采用自适应阻抗力控制方法,并设计自适应估计方法对机载机械手进行接触力估计,在姿态环的控制中采用鲁棒自适应控制策略,补偿接触运行阶段产生的转矩扰动。成都大学的Li等人^[64]提出了一种基于人工智能(AI)算法的自动平衡控制方法,利用人工智能算法检测无人机在飞行和降落过程中参数的变化,同时可以提高无人机平衡稳定性检测的精度,进一步完成基于飞行平衡控制的自动平衡控制。由于处理系统动力学需要大量的计算量,基于模型的控制器在实际的实时应用中存在不足,多伦多城市大学的Ghorbani等人^[65]提出了一种基于神经网络的控制方法来取代基于模型的控制方法,控制过程采用了深度神经网络学习算法,以减轻基于模型的规划和控制方法带来的高计算负担,基于模型的控制器数据被用于构建监督学习控制器的数据集,最终实现了机械臂在最短的时间内以最少的能量到达固定和运动物体。胡志明市大学的Nguyen等人^[66]将事后经验回放与深度确定性策略梯度算法相结合,提出了一种基于深度强化学习的六自由度机器人运动导航算法,事后经验回放减少了操作实际系统时的训练时间和风险。普雷图黄金联邦大学的Campos等人^[67]将深度确定性策略梯度(DDPG)和近端策略优化(proximal policy optimization, PPO)两种强化学习算法用于6自由度(6-DoF)机械臂的姿态和位置控制。利用真实环境进行学习的代价是巨大的,因此基于学习的方法需要先在虚拟环境中进行训练,使得系统具备一定的稳定和自主操作能力后,再在实际的物理环境中进行进一步的训练与应用,而第一步的关键在于是否能搭建一个与真实世界相近的虚拟环境。

5 关键技术难点分析

5.1 带爪无人机自主控制难点探讨

尽管带爪无人机的自主控制技术研究已经取得较多成果,但大多数研究还只是针对单体的建模、控制和简单应用的研究,目前带爪无人机的智能水平还处在高可靠“活着”的阶段,在实际应用中仍存在诸多难点和挑战有待解决:

(1) 精准建模与验模

能否精确搭建带爪无人机的模型是实现精准控制的关键,带爪无人机在空中作业过程中不仅要考虑系统内部耦合以及模型不确定性误差带来的干扰,更要考虑与环境进行交互产生的接触干扰与非接触干扰,如风扰动、接触瞬间干扰、撞地干扰和持续过程干扰等。现有研究多是在一种或两种干扰下进行带爪无人机建模,模型的精准性直接影响到所设计控制器的实际控制效果,因此对复杂作业环境下的带爪无人机进行精准建模很有必要。此外,如何验证所建的带爪无人机动力学和运动学模型的精准性、可靠性和鲁棒性一直是一个严峻的技术挑战。整体建模法虽然可以得到更为精确的模型,但由于系统内部的强耦合作用,其控制器的设计难度会随模型复杂度大大增加,因此采用独立建模法先通过牛顿-欧拉法或拉格朗日法对无人机和机械爪分开建模,将二者之间的耦合作为一种干扰,通过设计观测器对其观测并将干扰在控制器中补偿是一种可行的办法。

(2) 视觉智能感知

智能感知是实现智能化的重要基础,高动态、高精度、快速度、大视场的复杂场景主动感知是制约视觉智能感知在国民经济和国防装备重要领域中广泛应用的关键之一。无人机在室外环境下识别目标会面临反光、过曝、杂乱背景、视场遮挡等干扰,且无人机在空中也无法保持完全静止,会导致视觉传感器产生剧烈震动。因此,如何在带爪无人机的机载平台上实现快速检测和精准识别并提取到目标信息一直是一个挑战性难题。目前的目标检测算法大多是基于颜色、形状等特征已知且规则的合作目标进行检测,对目标信息未知非合作不规则的目标检测和识别研究较少。自然界中的动物尤其鹰的视觉系统具有灵敏度高、视场大、探测距离远以及识别精度高等优点,仿生视觉技术从生物视觉系统的机理出发,具有快速准确处理

视觉信息的能力^[68], 其中典型的如对比度感应机制、视觉注意、显著性检测、交叉抑制等生物视觉机理的应用将会提高视觉感知的准确度和精确度。

(3) 室外带爪无人机精确导航与定位

要想达到精确的定位和位置控制, 首先要获取高精度的位置信息。传统的位置获取方式主要通过全球定位系统(global positioning system, GPS), 虽然通过差分全球定位系统(differential global position system, DGPS)可获得较高精度的位置, 但在存在遮挡、多路径等干扰情况下获得的位置误差对于精准作业要求不可忽略。此外, 在具有挑战性的复杂作业场景中往往会面临没有GPS的情况, 这就要求无人机具有在GPS拒止环境仍具备精确的定位与导航能力。昆士兰科技大学Ng等人^[69]在室内没有GPS的情况下完成了抓取实验, 但由于没有视觉伺服形式的机械手控制器反馈回路, 其抓取成功率较低且没有考虑风和漂移等自然因素对空中抓取的影响。有些研究采用动捕系统进行高精度定位, 但该方法受场地约束。此外, 一些新定位方法如特定标识(apriltag等)参考定位、即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)或者伪基站等方法, 均具有一定局限性, 如何在室外复杂任务环境下实现带爪无人机的精准位置控制, 是至今没有很好突破的“卡脖子”关键核心技术难题。多传感器融合定位是提高定位精度和容错的重要途径之一, 原鸽归巢行为中的“三态假设”可以被很好地借鉴, 即在不同的环境中切换不同的定位手段, 如采用GPS、惯导、激光雷达、视觉等多种相对和绝对定位方式, 并根据实际作业环境合理地选用。

(4) 复杂环境适应性控制

在带爪无人机实际工作时, 无人机需面临杂乱、密集且有障碍物的不确定和高动态环境(如丛林、草木等)。复杂环境对无人机的感知和识别能力具有更高的要求, 且大部分环境不能满足无人机的起飞降落条件, 要求无人机需要有较强的环境适应控制能力, 特别是在对抗任务场景下, 带爪无人机复杂环境适应性控制是一项使其执行任务能力倍增的技术。带爪无人机执行任务过程中, 不可避免要频繁地切换作业机构的工作状态(如物块抓取、保持、放置等), 模态之间的转换一般具有非线性、非凸性等特点。当模态之间的差别较大时, 要求控制器能够平滑且安全地进行模态切换, 传统控制方法的控制能力有限, 需要设计更

鲁棒的模态切换策略, 而基于机器学习的控制方法可以在仿真中根据设定的控制指标参数学习到效果最佳的控制输出, 此外还可以应对突发情况, 实现自主的控制, 从而使带爪无人机执行复杂任务的边界更大、用途更广、效率更高。

5.2 未来研究展望

精准作业机构与无人机平台的结合拓宽了带爪无人机的应用空间, 从最新研究和应用成果来看, 带爪无人机的作业过程通常需要人工监督和干预^[70], 带爪无人机的构型及智能化、集群化应用技术研究仍然有很大拓展空间。今后, 对于带爪无人机平台及其应用的部分研究可从如下方面进一步开展。

(1) 全驱动智能自主无人机飞行平台

欠驱动的带爪无人机飞行平台不能满足复杂操作任务中的位置和姿态控制要求, 因此研究具有更高自由度的全驱动带爪无人机飞行平台具有重要意义。但增加平台自由度的同时, 需考虑增加伺服电机带来的重量影响, 避免推力和力矩抵消以及驱动冗余问题, 如何设计一种长航时、高机动性且工作效率高的带爪无人机飞行平台是下一步研究的重点。此外要求飞行平台具有可拓展性的特点, 如方便拆卸和更换不同作业机构以满足不同任务需求。

(2) 柔性功能复用型作业机构

现有作业机构多采用高自由度刚性连杆结构, 具有负载能力、运动灵活度的限制, 且在处理不规则物体时具有较差抓取效果, 在空间受限和混乱环境中难以进行空中操作。而柔性机械臂由于关节的连续性, 具有灵活操纵、轻量化且可以自适应物体表面的优点, 在带爪无人机系统中用连续柔性机械臂取代传统刚性机械臂是可能的。此外, 可以设计具有拓展功能作业机构, 实现从传统单一任务场景到多任务场景的运用, 如替代无人机平台的起落架以减小整个平台的重量和作为支撑起到桨保护罩的作用。

(3) 同构/异构全自主集群协同

静态和已知环境中的作业任务可通过开发人员计划的逻辑来实现, 但在动态环境中是不可行的, 要求无人机具备自主决策能力, 能够根据场景和任务要求, 制定合适的飞行路径和动作策略, 以实现高效的任务执行。带爪无人机的研究多是对单平台的控制和应用, 但单平台的功能有限且效率低下, 随着更复杂、工作

量更庞大的应用场景出现, 单个或者单一功能的带爪无人机已不能满足工作需要. 相对于单系统, 多系统具有在时间和空间上可以更好地实现资源合理分配, 不会被某一个系统功能强弱限制, 通过多个系统之间协调配合可完成更加复杂和更高难度的任务等特点. 因此, 可以通过构建同构/协同异构平台, 如携带不同功能作业机构、搭建不同机型的无人机集群平台或增加地面车辆以及海上船只, 实现全自主、立体化异构协同作业, 提高任务完成能力和效率, 同时需考虑任务分配、避碰等问题. 自然界中的生物群体通过个体间自主决策和简单信息交互, 经过演化, 使整个群体从宏观上涌现出自组织性、协作性、稳定性及对环境的适应性, 将自然界中的狼群、蚁群、蜂群、鸽群等生物群体的行为机制应用在带爪无人机机群平台的研究中, 将是一条构建具有“平台简单、高度协调、完全自主、群智汇聚”特点的集群系统的可行途径^[71].

(4) 面向更加具体任务和应用场景

单无人机的应用场景有限, 未来全自主集群的带爪无人机的应用场景将会得到大幅扩展. 在民用领域中可以用于物流或零售业货物的搬运与分拣, 农作物的农药喷洒与采摘, 高中环境设备的检测维修或建筑

材料的搬运, 救援救灾中的灾难调查、物资投递与障碍物清除等; 在军事领域中可以用来收集战场情报并执行侦察任务, 作为通信中继提供安全的通信通道, 将血液、药品甚至器官等医疗用品运送到传统手段难以到达的地区, 搜索和救援受伤人员以及装备打击武器如(手雷、炸药)精确打击摧毁重要目标和据点, 在核生化环境中进入不安全区域关闭安全阀门并收集样本等.

6 结束语

本文对带爪无人机的构型、建模和控制技术研究进展进行了阐述和分析, 探讨了带爪无人机自主控制的技术难点, 并对未来带爪无人机的研究方向进行了展望, 对带爪无人机自主控制技术的深入研究和能力提升具有一定借鉴意义.

目前带爪无人机自主控制技术研究仍处于起步阶段, 自主能力较低, 其精确操控能力和灵活机动性为未来广阔的应用空间带来无限可能, 可在救援、勘测、农业、建筑、物流等诸多军民领域中发挥重要作用.

参考文献

- 1 Orsag M, Korpela C, Bogdan S, et al. Dexterous aerial robots-mobile manipulation using unmanned aerial systems. *IEEE Trans Robot*, 2017, 33: 1453–1466
- 2 Nguyen H, Alexis K. Forceful aerial manipulation based on an aerial robotic chain: Hybrid modeling and control. *IEEE Robot Autom Lett*, 2021, 6: 3711–3719
- 3 Wang M, Qi J, Kang J, et al. Rotorcraft aerial manipulator control based on improved ADRC. In: Proceedings of the 39th Chinese Control Conference (CCC). Shenyang: IEEE, 2020. 6744–6749
- 4 Rajashekhar V S, Vibha M R, Kaushik D, et al. A robust aerial gripper for passive grasping and impulsive release using scotch yoke mechanism. In: Proceedings of the Advances in Robotics—5th International Conference of the Robotics Society (AIR2021). New York: Association for Computing Machinery, 2021. 1–7
- 5 Real F, Castano A R, Torres-Gonzalez A, et al. Experimental evaluation of a team of multiple unmanned aerial vehicles for cooperative construction. *IEEE Access*, 2021, 9: 6817–6835
- 6 Mellinger D, Lindsey Q, Shomin M, et al. Design, modeling, estimation and control for aerial grasping and manipulation. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Francisco: IEEE, 2011. 2668–2673
- 7 Tagliabue A, Kamel M, Verling S, et al. Collaborative transportation using MAVs via passive force control. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore: IEEE, 2017. 5766–5773
- 8 Jiang Q, Kumar V. The inverse kinematics of cooperative transport with multiple aerial robots. *IEEE Trans Robot*, 2013, 29: 136–145
- 9 Wang M, Qi J, Kang J, et al. Rotorcraft aerial manipulator control based on improved ADRC. In: Proceedings of the 39th Chinese Control Conference (CCC). Shenyang: IEEE, 2020. 6744–6749
- 10 Zhang G Y, He Y Q, Dai B, et al. Towards grasping task: System and control of an aerial manipulator (in Chinese). *Robot*, 2019, 41: 19–29 [张广

玉, 何玉庆, 代波, 等. 面向抓取作业的飞行机械臂系统及其控制. 机器人, 2019, 41: 19–29]

- 11 Zhang K, Chermprayong P, Xiao F, et al. Aerial additive manufacturing with multiple autonomous robots. *Nature*, 2022, 609: 709–717
- 12 Stephens B, Orr L, Kocer B B, et al. An aerial parallel manipulator with shared compliance. *IEEE Robot Autom Lett*, 2022, 7: 11902–11909
- 13 Hamaza S, Kovac M. Omni-drone: On the design of a novel aerial manipulator with omni-directional workspace. In: Proceedings of the 17th International Conference on Ubiquitous Robots (UR). Kyoto: IEEE, 2020. 153–158
- 14 Chermprayong P, Zhang K, Xiao F, et al. An Integrated delta manipulator for aerial repair: A new aerial robotic system. *IEEE Robot Automat Mag*, 2019, 26: 54–66
- 15 González-Morgado A, Álvarez-Cía C, Heredia G, et al. Control and stability of an aerial manipulator depending on the inertial parameters. In: Proceedings of the Fifth Iberian Robotics Conference. Switzerland: Springer, 2022. 90–101
- 16 Yang P, Wang H, Liu Z, et al. Structural design and simulation analysis of lightweight and compliant dual-arm manipulator for aerial manipulation. In: Proceedings of the 4th International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence. New York: Association for Computing, 2023. 95–100
- 17 Korpela C, Orsag M, Oh P. Towards valve turning using a dual-arm aerial manipulator. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago: IEEE, 2014. 3411–3416
- 18 Paul H, Miyazaki R, Kominami T, et al. Adaptively leveling a UAV with three-arm aerial manipulator system on shifting ground. In: Proceedings of the 2021 Aerial Robotic Systems Physically Interacting with the Environment (AIRPHARO). Biograd na Moru: IEEE, 2021. 1–4
- 19 Yamada T, Tsuji T, Paul H, et al. Exploration of UAV rope handling and flight in narrow space strategies, using a three-arm aerial manipulator system. In: Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Sapporo: IEEE, 2022. 677–682
- 20 Liu J, Zhang D, Wu C W, et al. A multi-finger robot system for adaptive landing gear and aerial manipulation. *Rob Auton Syst*, 2021, 146: 103878
- 21 Fishman J, Carlone L. Control and trajectory optimization for soft aerial manipulation. In: Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2021. 1–17
- 22 Ghadiok V, Goldin J, Ren W. Autonomous indoor aerial gripping using a quadrotor. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Francisco: IEEE, 2011. 4645–4651
- 23 Peng R, Wang Z H, Lu P. AeCoM: An aerial continuum manipulator with precise kinematic modeling for variable loading and tendon-slacking prevention. arXiv: [2110.14180](https://arxiv.org/abs/2110.14180),
- 24 Samadikhoshkho Z, Ghorbani S, Janabi-Sharifi F. Modeling and control of aerial continuum manipulation systems: A flying continuum robot paradigm. *IEEE Access*, 2020, 8: 176883–176894
- 25 Roderick W R T, Cutkosky M R, Lentink D. Bird-inspired dynamic grasping and perching in arboreal environments. *Sci Robot*, 2021, 6: 7562
- 26 Kondak K, Krieger K, Albu-Schaeffer A, et al. Closed-loop behavior of an autonomous helicopter equipped with a robotic arm for aerial manipulation tasks. *Int J Adv Robotic Syst*, 2013, 10: 145
- 27 Pounds P E I, Bersak D R, Dollar A M. Practical aerial grasping of unstructured objects. In: Proceedings of the IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications. Woburn: IEEE, 2011. 99–104
- 28 Chen Y, Zhang X, Gu C, et al. Control for aerial transportation using a quadrotor with a multi-DOF manipulator. In: Proceedings of the 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). Changsha: IEEE, 2017. 916–920
- 29 Lee D, Jang D, Seo H, et al. Model predictive control for an aerial manipulator opening a hinged door. In: Proceedings of the 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Jeju: IEEE, 2019. 986–991
- 30 Ma L, Yan Y M, Li Z W, et al. Neural-embedded learning control for fully-actuated flying platform of aerial manipulation system. *Neurocomputing*, 2022, 482: 212–223
- 31 Ding C, Lu L. A tilting-rotor unmanned aerial vehicle for enhanced aerial locomotion and manipulation capabilities: Design, control, and applications. *IEEE ASME Trans Mechatron*, 2020, 26: 2237–2248
- 32 Schuster M, Bernstein D, Reck P, et al. Automated aerial screwing with a fully actuated aerial manipulator. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Kyoto: IEEE, 2022. 3340–3347
- 33 Paul H, Martinez R R, Sumtheeprasit B, et al. A tiltairframe multirotor UAV designed for omnidirectional aerial manipulation. In: Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Seattle: IEEE, 2023. 460–465

- 34 Ma L, Yan Y M, Li Z W, et al. A novel aerial manipulator system compensation control based on ADRC and backstepping. *Sci Rep*, 2021, 11: 22324
- 35 Nekoo S R, Feliu-Talegon D, Acosta J A, et al. A 79.7g manipulator prototype for e-flap robot: A plucking-leaf application. *IEEE Access*, 2022, 10: 65300–65308
- 36 Zhang X, Zhang F, Huang P, et al. Distributed control for cooperative transportation in presence of unknown disturbance. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR). Irkutsk: IEEE, 2019. 772–777
- 37 Wu P X, Hung H A, Yang C C, et al. Cooperative transportation of drones without inter-agent communication. In: Proceedings of the American Control Conference (ACC). Denver: IEEE, 2020. 677–682
- 38 Gkountas K, Tzes A. Leader/follower force control of aerial manipulators. *IEEE Access*, 2021, 9: 17584–17595
- 39 Lee H, Kim H, Kim W, et al. An integrated framework for cooperative aerial manipulators in unknown environments. *IEEE Robot Autom Lett*, 2018, 3: 2307–2314
- 40 Kim S, Seo H, Shin J, et al. Cooperative aerial manipulation using multirotors with multi-dof robotic arms. *IEEE ASME Trans Mechatron*, 2018, 23: 702–713
- 41 Caccavale F, Giglio G, Muscio G, et al. Cooperative impedance control for multiple UAVs with a robotic arm. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg: IEEE, 2015. 2366–2371
- 42 Lindsey Q, Mellinger D, Kumar V. Construction of Cubic Structures with Quadrotor Teams. Massachusetts: MIT Press, 2012. 177–184
- 43 Kremer P, Sanchez-Lopez J L, Voos H. A hybrid modelling approach for aerial manipulators. *J Intell Robot Syst*, 2022, 105: 74
- 44 Barawkar S, Kumar M, Bolender M. Adaptive control of a UAV with continuously time varying center of gravity. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, 55: 270–275
- 45 Orsag M, Korpela C, Oh P, et al. Aerial Manipulator Dynamics. Aerial Manipulation. Cham: Springer, 2017. 123–163
- 46 Bennaceur S, Azouz N. Modelling and control of a quadrotor with flexible arms. *Alexandria Eng J*, 2023, 65: 209–231
- 47 Mo R, Cai H, Dai S L. Unit quaternion based attitude control of an aerial manipulator. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, 52: 190–194
- 48 Alvarez-Muñoz J U, Escareno J, Marchand N, et al. Quaternion modeling and observer-based torque compensation of an aerial manipulator. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, 51: 543–548
- 49 Zhang G, He Y, Dai B, et al. Robust control of an aerial manipulator based on a variable inertia parameters model. *IEEE Trans Ind Electron*, 2023, 67: 9515–9525
- 50 Zhang G, He Y, Gu F, et al. Varying inertial parameters model based robust control for an aerial manipulator. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Qingdao: IEEE, 2016. 696–701
- 51 Zhou Z Y, Chu H Y, Zhang X Q, et al. Grasp pose estimation for aerial manipulator based on improved 6-DOF GraspNet. In: Proceedings of the 5th International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (PRAI). Chengdu: IEEE, 2022. 550–555
- 52 Thomas J, Loianno G, Sreenath K, et al. Toward image based visual servoing for aerial grasping and perching. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong: IEEE, 2014. 2113–2118
- 53 Salih A L, Moghavvemi M, Mohamed H A F, et al. Flight PID controller design for a UAV quadrotor. *J Sci Res Essay*, 2010, 5: 3660–3667
- 54 Uchida K, Uchiyama K, Masuda K. Attitude control of UAV with manipulator using adaptive PID. In: Proceedings of the Australian & New Zealand Control Conference (ANZCC). Gold Coast: IEEE, 2022. 144–149
- 55 Han J. From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Trans Ind Electron*, 2009, 56: 900–906
- 56 Rodríguez-Abreo O, Ornelas-Rodríguez F J, Ramírez-Pedraza A, et al. Backstepping control for a UAV-manipulator tuned by Cuckoo Search algorithm. *Rob Auton Syst*, 2022, 147: 103910
- 57 Chai Y, Liang X, Han J. Active modeling based control for aerial manipulator systems. In: Proceedings of the 27th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). Shanghai: IEEE, 2021. 588–593
- 58 Cao H Z, Wu Y, Wang L X. Adaptive NN motion control and predictive coordinate planning for aerial manipulators. *Aerosp Sci Technol*, 2022, 126: 107607
- 59 Liang J, Chen Y, Wu Y, et al. Adaptive prescribed performance control of unmanned aerial manipulator with disturbances. *IEEE Trans Automat Sci Eng*, 2023, 20: 1804–1814
- 60 Chandra A, Lal P P S. Higher order sliding mode controller for a quadrotor UAV with a suspended load. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, 55: 610–615
- 61 Peng R, Wang Z, Lu P. AeCoM: An aerial continuum manipulator with IMU-based kinematic modeling and tendon-slacking prevention. *IEEE*

[Trans Syst Man Cybern Syst](#), 2023, 53: 4740–4752

- 62 Liu Y C, Huang C Y. DDPG-based adaptive robust tracking control for aerial manipulators with decoupling approach. [IEEE Trans Cybern](#), 2022, 52: 8258–8271
- 63 Zhang Z, Chen Y, Wu Y, et al. Hybrid force/position control for switchable unmanned aerial manipulator between free flight and contact operation. [IEEE Trans Automat Sci Eng](#), 2023, doi: [10.1109/TASE.2023.3294254](#)
- 64 Li Q L, Xing D, Ilyas M A, et al. Autonomous balance control method of unmanned aerial vehicle with manipulator based on artificial intelligence algorithm. [Soft Comput](#), 2023, doi: [10.1007/s00500-023-08485-2](#)
- 65 Ghorbani S, Samadikhoshkho Z, Janabi-Sharifi F. Dual-arm aerial continuum manipulation systems: Modeling, pre-grasp planning, and control. [Nonlinear Dyn](#), 2023, 111: 7339–7355
- 66 Nguyen L H, Dao M K, Hua H Q B, et al. Motion navigation algorithm based on deep reinforcement learning for manipulators. In: Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Electronic Communications, Internet of Things and Big Data (ICEIB). Taichung: IEEE, 2023. 537–541
- 67 Campos F R, Fidêncio A X, Domingues J, et al. Application of reinforcement learning to the orientation and position control of A 6 degrees of freedom robotic manipulator. In: Proceedings of the 2022 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2022 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2022 Workshop on Robotics in Education (WRE). São Bernardo do Campo: IEEE, 2022. 1–6
- 68 Duan H B, Deng Y M, Wang X H. Biological Eagle-eye Vision and Its Applications (in Chinese). Beijing: Science Press, 2021 [段海滨, 邓亦敏, 王晓华. 仿鹰眼视觉及应用. 北京: 科学出版社, 2021]
- 69 Ng M, Vanegas F, Morton K, et al. Design and flight test of an aerial manipulator for applications in GPS-denied environments. In: Proceedings of the International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Dubrovnik: IEEE, 2022. 20–29
- 70 Organization of Institute of Science and Technology, Beihang University. Young Top Talents Say Navigation and Control (in Chinese). Beijing: Posts and Telecom Press, 2023 [北京航空航天大学科学技术研究院组. 青年拔尖人才说导航与控制. 北京: 人民邮电出版社, 2023]
- 71 Duan H B, Qiu H X. Unmanned Aerial Vehicle Swarm Autonomous Control Based on Swarm Intelligence (in Chinese). Beijing: Science Press, 2018 [段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制. 北京: 科学出版社, 2018]

New progresses in autonomous control technology for UAV with manipulator

DUAN HaiBin, WANG ZhuangZhuang, HUO MengZhen & SUN YongBin

Bio-inspired Autonomous Flight Systems (BAFS) Research Group, Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University (BUAA), Beijing 100083, China

Unmanned aerial vehicle (UAV) with manipulator has garnered significant attention due to its exceptional precision and maneuverability. With the increasing application demand and the expansion of capability boundary of UAV with manipulator, researchers worldwide have been conducting in-depth studies on its key technologies. This paper analyzes the latest representative progress in the configuration, modeling and control of UAV with manipulator and introduces its evolution process about the manipulator and the UAV platform, respectively. Then, the modeling approaches of UAV with manipulator are divided into the centralized approach and the decentralized approach. The classical control and machine learning methods studied at present are summarized in terms of autonomous control and evaluated for their respective advantages and disadvantages. Finally, the technical difficulties and pain points in the autonomous control technology for UAV with manipulator are concluded and the future research direction is prospected.

Unmanned aerial vehicle (UAV) with manipulator, manipulator configuration, UAV platform, dynamic modeling, flight control

doi: [10.1360/SST-2023-0213](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0213)