

旋翼飞行机械臂研究综述^①

刘 超^{②*} 张广玉^{**} 熊安斌^{*}

(^{*}北京奇虎科技有限公司 北京 100015)

(^{**}中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)

摘 要 旋翼飞行机械臂是由旋翼无人机(多旋翼无人机或无人直升机)和多连杆机械臂组成的新型飞行机器人系统。该机器人系统结合了旋翼无人机的机动飞行、定点悬停和机械臂灵活作业的特性,能够完成飞行作业任务。旋翼无人机具有对外部干扰敏感的特性。旋翼飞行机械臂在飞行作业过程中会受到来自环境复杂的干扰,再加上系统间严重的耦合作用,使得旋翼飞行机械臂的研究存在诸多难点。本文全面分析与总结了近几年国内外发表的文献,对旋翼飞行机械臂系统设计、系统建模与控制、应用场景和作业方法等方面的主要研究成果进行了综述。

关键词 旋翼飞行机械臂;飞行作业;飞行控制;系统建模

0 引 言

近年来,随着电子制造、导航与控制等技术的不断成熟,旋翼无人机已经发展为具备一定自主飞行能力和环境适应能力的飞行平台。旋翼无人机除3维飞行运动能力外,还具备垂直起降、定点悬停、机动灵活等特性。结合不同的载荷设备,旋翼无人机已经成功地应用于航空拍摄、侦察监视、灾难现场搜救(水灾、地震)、地形测绘^[1]、大气污染检测、农林植保等领域。现阶段旋翼无人机的应用主要为旋翼无人机搭载不同的仪器或传感器,利用其机动灵活的飞行运动特性对环境或目标物进行全方位、高效率的监测。

在很多实际应用场景中,除了飞行运动能力外,人们还希望飞行机器人具备主动作业能力,像自然界中的鸟儿一样拥有后肢。这样飞行机器人就能帮助人们完成更多的任务,如危险环境中样品的采集、基础设施维护^[2]、灾难环境中设备的操作等任务。

因此,一种新的机器人系统逐渐成为飞行机器人领域的研究热点,即旋翼飞行机械臂^[3]。通常,旋翼飞行机械臂是由旋翼无人机(多旋翼无人机或无人直升机)和多连杆机械臂组成。这种新型飞行机器人结合了旋翼无人机的机动飞行、定点悬停和机械臂灵活作业的特性,具有广泛的应用前景。

这种由移动平台和机械臂所组成的机器人系统在地面移动机器人和水下机器人领域已经发展了多年。地面移动机械臂和水下机械臂在反恐防暴和水下矿产资源开采^[4]等领域内的成功应用,充分说明了这种同时具备移动能力和作业能力的机器人系统的应用价值。不仅如此,地面移动机械臂和水下机械臂的研究思路和方法对旋翼飞行机械臂的研究有很大的借鉴意义。但是,与地面移动机械臂和水下机械臂相比,旋翼飞行机械臂也面临着独特的问题:

(1)旋翼无人机系统的动力来源于螺旋桨高速旋转产生的空气动力,本身又具备欠驱动的特性,对外界扰动十分敏感。当其与机械臂相结合时,由于机械臂的质量占比较大,机械臂作业运动时产生的

① 国家自然科学基金(61703314)资助项目。
② 男,1981年生;研究领域:人工智能,机器人,大数据;联系人,E-mail: liuchao20180808@163.com
(收稿日期:2019-06-03)

力和力矩的扰动会严重影响其稳定飞行的精度,甚至在扰动过大的情况下会有失稳坠机的危险。

(2)旋翼飞行机械臂为浮动基座的机械臂系统,旋翼无人机的位置和姿态控制误差所造成的基座浮动会影响机械臂末端作业性能。旋翼无人机和机械臂之间这种相互耦合作用严重影响了旋翼飞行机械臂系统的平稳飞行和末端作业的性能。

旋翼无人机为 6 自由度运动刚体,当其与多连杆机械臂结合后,整个系统的状态维度大大增加,二者之间的相互耦合作用使得旋翼飞行机械臂在运动学和动力学层面都为复杂的高维度、非线性、强耦合的系统。再加上旋翼无人机欠驱动的特性和复杂的空气动力学使得旋翼飞行机械臂系统的飞行控制和末端控制变得较为困难。

旋翼飞行机械臂作为一个新型飞行机器人系统,其研究工作虽然在近几年刚刚兴起,但却吸引了大量国内外相关领域的学者。国内外对旋翼飞行机械臂的研究工作涵盖了旋翼飞行机械臂系统设计、动力学建模、运动控制以及应用场景探索。接下来本文将从飞行作业的前期探索、旋翼飞行机械臂系统设计、系统建模及控制等方面对国内外旋翼飞行机械臂的研究现状进行综述。

1 从飞行作业到飞行机械臂

在旋翼飞行机械臂的概念出现之前,关于旋翼无人机飞行作业的研究已经展开。早期飞行作业的研究主要是旋翼无人机安装简单的作业工具,如手爪^[5]、绳索^[6]、接触式传感器、剪刀等,如图 1 所示,这种旋翼无人机系统也被称之为作业型无人机。旋



图 1 早期的飞行作业

翼无人机结合作业工具可以完成简单抓取、吊装搬运、环境信息的接触式测量等任务。早期飞行作业研究主要集中在飞行作业应用场景探索、飞行作业过程中负载变化或环境接触对旋翼无人机动力学和飞行稳定性的影响及飞行作业任务规划上。

1.1 飞行抓取和搬运作业

在抓取和搬运作业方面,文献[5]提出把柔顺手爪安装在无人直升飞机上,这样无人机直升飞机能够在飞行过程中自主地完成对不同形状物体的抓取和搬运任务,如图 1(左)所示。文献[5]分析了负载物对无人直升机各个运动自由度上动力学和对系统 PID(proportional integral differential)控制器稳定性的影响,结果表明在抓取一定质量负载后,如果系统质心变化在一定范围内,姿态环的 PID 控制器能够保证抓取负载后无人直升飞机的稳定飞行。同样面向飞行抓取作业任务,文献[7]提出把带有弹簧和倒钩的简易装置安装在四旋翼无人机上,建立了抓取负载后系统动力学模型,在模型中引入系统质心变化量的参数用于表示负载对系统动力学的影响。文献[7]提出了基于迭代最小二乘的系统惯性参数的估计算法,用于实时估计抓取和放下负载时系统的惯性参数变化量。根据实时估计的惯性参数在控制器中补偿负载对系统飞行性能的影响,提高了整个抓取、运送和投放过程中四旋翼无人机飞行的稳定性。在此基础上,结合多机任务规划的算法,成功地用多个四旋翼无人机协作完成方形结构的搭建工作,该方形结构由磁性材料杆件组成^[8]。文献[9]针对四旋翼无人机抓取、运送和投放作业任务,提出了一种实时的时间最优轨迹规划算法。该算法结合四旋翼无人机的动力学约束和系统输入约束,利用庞特里亚金最大化原理(Pontryagin's maximum principle)求得,能够根据四旋翼无人机当前的状态和任务需求反馈实时规划所需要的轨迹,并应用多个四旋翼无人机完成建筑物模型的搭建任务,如图 2(a)所示。其规划出的轨迹不仅能够保证飞行运送过程的时间最优,而且在建筑物模块抓取和摆放的过程中保证竖直方向的冲击最小。

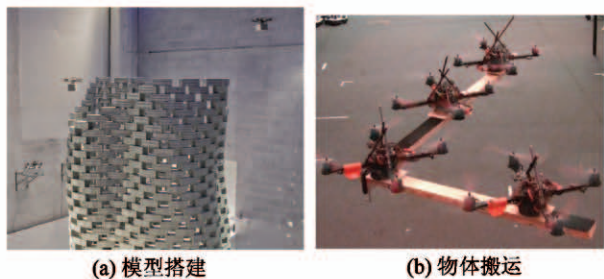


图2 多个四旋翼无人机协同作业

为了克服四旋翼无人机负载能力较小的缺陷,文献[10]提出了采用多个无人机协同搬运一个刚体,如图2(b)所示。由于多个四旋翼无人机在搬运同一个刚体时,四旋翼无人机通过刚体连接在一起,各个四旋翼无人机的动力学模型相互影响。因此文献[10]提出多机协同运送一个刚体联合动力学模型,结合四旋翼无人机驱动特性设计出集中式控制器,能够实现多机协同运送的过程中跟踪3D的轨迹。这种集中式多机协同控制器的特点是需要一个中央控制器给各个四旋翼无人机发送控制指令,需要实时的多机通信。因此,这种控制器在环境嘈杂的场景中难以应用。针对这一问题,文献[11]提出了一种分布式控制器用于多机协同搬运同一个刚体,该控制器只需要各个四旋翼无人机知道自己在所运送刚体坐标系中的位置及协同工作的四旋翼无人机的个数,各个四旋翼无人机之间不需要实时通讯就能够实现多机协同运送过程中跟踪3D的轨迹。该控制器在6自由度刚体几何控制的理论基础设计出来^[12],把搬运时所需要的力和力矩平均分配到每个四旋翼无人机上,能够保证整体系统的稳定性。

对于物体的搬运作业任务,除简易手爪外,还可把绳索安装在旋翼无人机进行吊装作业。采用绳索的优点在于作业结构简单,由于绳索只能受单向的拉力,所以采用多机协同吊装作业时各个旋翼无人机之间的动力学耦合较小。缺点是由于绳索为非主动型作业装置,在吊装作业过程中需要人工加装负载,并且运送过程中被吊装物体的自由摆动会影响系统的稳定飞行。

1.2 接触式飞行作业

除抓取和搬运作业任务外,在旋翼无人机上安

装简单的装置也可以用于接触式检测、表面清理、设备维护等接触式飞行作业任务。环境和旋翼无人机上所安装作业装置接触时,不仅会对旋翼无人机产生一个接触力,还在一定程度上限制了某些自由度的运动。而且接触作业任务中,除对作业工具位置精度外还对接触力有一定的要求,如表面清理任务,只有在一定接触力的前提下才能把表面清除干净。因此,在飞行接触式作业的研究中作业工具和环境接触的力位混合控制是国内外学者研究的重点。在四旋翼准静态模接触模式下,文献[13]提出了一种基于接触力估计的力位混合控制算法,能够实现在跟踪末端轨迹的同时跟踪接触力的期望值。由于旋翼无人机在自由飞行模式下和接触飞行模式下的动力学不同,为了保证控制性能需要针对不同飞行模式分别设计控制器。文献[14]提出一种基于混合模型预测控制(hybrid mode predictive control)的飞行接触式作业控制算法,该算法能够应用于不同飞行模式下,同时也能保证过渡过程的最优。该控制算法以末端的位置和接触力作为控制指标,能够实现位置轨迹跟踪的同时保持接触力不变,并成功地应用于飞行书写任务。由于多旋翼无人机为欠驱动系统,其旋翼产生的升力始终平行于机体的竖直轴线,为了控制多旋翼无人机位置,需要使其姿态向某个指定方向倾斜,使得升力在倾斜方向产生一个分力,即俯仰角和横滚角作为位置控制的虚拟输入^[15]。这种特性使得旋翼无人机要不断调整姿态角,以实现自身的位置控制。对于接触作业任务,姿态角的调整会影响作业工具末端的位置精度。而且作业装置末端距离机体坐标原点较远时这种影响更大,因此需要考虑作业工具末端的运动特性。针对这一问题,文献[16]对四旋翼和杆状作业工具末端建立动力学模型。采用被动分解(passive decomposition)将其动力学分解成沿作业平面的法向运动和切平面运动的模型,分别在法向方向上进行末端接触力控制,在切平面方向进行末端位置控制,实现了对末端的力位混合控制。

从以上研究可以看出,这种旋翼无人机安装简单的作业工具平台,可以完成一些作业任务,其作业过程主要借助于旋翼无人机移动完成。由于旋翼无

人机为欠驱动系统,只有3轴的位置和航向角为可控的输出量,姿态角为不可控的状态量,飞行时姿态角会不断地调节,这就严重影响作业工具末端的作业性能。再加上旋翼无人机的空气动力容易受环境的影响,这都使得其本身位置控制的精度较低。因此,旋翼无人机上安装作业工作的平台,由于可控自由度少和控制精度低的限制,使得其只能完成特定的简单作业任务,对于较为复杂的精细化作业任务难以完成。为了飞行作业的需求,需要在旋翼无人机上安装自由度多、控制精度高、作业能力强的多连杆机械臂以弥补旋翼无人机可控自由度少和控制精度低的缺陷。这样旋翼飞行机械臂,一种具备通用和自主飞行作业潜力的平台,成为了该领域研究的新热点。

2 旋翼飞行机械臂系统设计

对于旋翼飞行机械臂这一新的机器人系统,国内外在其系统设计上的研究可以大致分为2种类型,一种是面向不同的应用场景中的作业任务设计相应的旋翼飞行机械臂系统,另一种是面向旋翼无人机的负载能力和欠驱动等缺陷设计改良机械臂或旋翼无人机以提升旋翼飞行机械臂的性能。

2.1 面向应用的旋翼飞行机械臂系统设计

在灾难救援场景中,面向管道阀门的关闭作业任务,文献[17]设计了一种具有双臂的旋翼飞行机械臂系统,能用双臂抱住管道的阀门进行旋转。面向目标物捕获的作业任务,文献[18]设计了由四旋翼无人机和单自由度机械臂组成的旋翼飞行机械臂系统,能够机动地抓取静止目标物。面向环境信息的接触式测量作业任务,文献[19]设计了一种有四旋翼无人机和并联机械臂组成的旋翼飞行机械臂系统,传感器安装在并联机械臂末端,可多方位对环境表面进行检查。文献[20]设计了一种由交叉双桨直升机和7自由度轻质工业机械臂组成的旋翼飞行机械臂系统,如图3(a)所示,并集成了视觉系统,能够拔出固定在地面上的长杆,在室外环境中通过视觉引导对目标物进行自主抓取作业。面向表面清理作业任务,文献[21]设计了由多旋翼无人机并联机

械臂组成的旋翼飞行机械臂系统,如图3(b)所示,可完成管道和桥梁钢架机构的表面清理作业任务。面向桥梁和隧道顶部的裂纹检测任务,文献[22]设计了机械臂安装在多旋翼顶部的旋翼飞行机械臂系统,如图3(c)所示。文献[23]设计了具有双臂轻质机械臂的旋翼飞行机械臂系统,每个机械臂带有5个自由度,2个机械臂可以协作完成抓取等作业任务,如图3(d)所示。面向不同的工业应用场景,欧盟支持了几个大型的旋翼飞行机械臂项目,如面向飞行机械臂多机合作完成组装或搬运任务的项目ARCAS (aerial robotics cooperative assembly system)^[24];面向工业监测和维护,多臂飞行机械臂项目AEROARMS^[25];面向高危作业任务,如风电力设施维护等,为人类在此类作业任务中提供助手的飞行机械臂项目AROWORKS^[2]。现阶段大多数欧洲机构关于旋翼飞行机械臂的研究都受到了这些项目的支持,成为了该领域内研究的主要贡献者。



图3 不同类型旋翼飞行机械臂系统

2.2 面向性能提升的旋翼飞行机械臂系统设计

旋翼飞行机械臂是面向飞行作业而设计的机器人系统,作业时系统往往处于飞行状态,其作业能力受到旋翼飞行机器人负载的限制,因此减轻整体系统的质量显得尤为重要。为了大幅度减轻系统的质量,文献[26]设计了专门轻质机械臂系统,该机械臂的连杆部分有碳纤维杆构型组成,在较小质量的同时保证了刚度,如图4(a)所示。文献[27]设计

了可以连接多个旋翼无人机的机械臂系统,靠多个旋翼无人机联合提高整个飞行负载能力进而提高系统的作业能力。

在作业过程中机械臂的运动会影响系统质心的变化,而机械臂对旋翼无人机的飞行稳定性的影响与系统质心偏向系统中轴的位置正相关^[28]。利用这一特性,为了减轻机械臂运动时对系统飞行稳定性的影响,文献[29]设计了带有并联机械臂的旋翼飞行机械臂系统,其机械臂的精巧对称结构设计能够在作业运动时使系统的质心变化保持最小,以减小机械臂的扰动,如图4(b)所示。由于驱动电机的质量在机械臂中所占比重较大,文献[30]还设计出驱动器分布在机械臂底部的机械臂,这样该机械臂的质心主要集中在底部,可以减小运动时质心的变化,如图4(c)所示。旋翼无人机多为欠驱动非线性系统,系统的稳定飞行控制难度大,同时具有级联结构,也使得其位置环响应慢,这一特性使得旋翼无人机抵抗扰动力的能力较弱。旋翼飞行机械臂在悬停作业时,机械臂运动产生的扰动使得旋翼无人机产生位置浮动,进而影响系统的作业性能。为此,文献[31]设计了旋翼平面分布互相不平行全驱动的多旋翼无人机组成的旋翼飞行机械臂系统,如图4(d)所示,以提高作业时整个系统的悬停能力。



图4 新型机械臂和新型旋翼无人机

3 旋翼飞行机械臂建模和控制方法

按照控制的思路可以把现有关于旋翼飞行机械臂在建模和控制的研究分为2类。其中,第1类研究的思路是把旋翼飞行机械臂看作一个整体系统,以包含旋翼无人机和机械臂状态的动力系统作为被控对象,并试图设计一个控制器同时稳定旋翼无人机和机械臂的所有状态,该研究思路可以称之为为一体式控制策略。第2类研究的思路是把旋翼飞行机械臂看作2个相互影响的机器人系统,并为旋翼无人机和机械臂各设计一个控制器,同时考虑二者的耦合作用,以实现旋翼无人机的稳定飞行控制和机械臂末端的控制,该研究思路可以称之为分离式控制策略。

3.1 基于一体式控制策略的旋翼飞行机械臂建模和控制方法

旋翼飞行机械臂的动力学模型可以分为刚体动力学模型和空气动力学模型2部分,其中,刚体动力学模型用于描述旋翼无人机本体和机械臂各个连杆的运动特性,为系统模型的主体。旋翼飞行机械臂系统的各个刚体在3维空间中的运动可用浮动基座的多连杆刚体的运动表示。关于浮动基座的多连杆刚体动力学建模的研究在空间机械臂领域最早出现,空间机械臂兴起于20世纪80年代,作为典型的浮动基座的多连杆刚体系统,其在动力学建模方面的研究较为成熟,对于此类复杂的动刚体系统的动力学建模多采用欧拉-拉格朗方程。因此,在考虑重力的影响之后可以采用欧拉-拉格朗方程对旋翼飞行机械臂进行刚体动力学建模。通过该方法建立的动力学模型状态空间中包含旋翼无人机的位置、姿态和机械臂关节角,旋翼无人机和机械臂状态量之间存在复杂的非线性耦合。因此,旋翼飞行机械臂的刚体动力学模型为超高维度和复杂的非线性系统。基于一体式控制策略的旋翼飞行机械臂控制的研究往往在该类复杂的非线性模型的基础上展开,把旋翼飞行机械臂整体的刚体动力系统看作一个被控对象,设计一个控制器同时稳定旋翼无人机和机械臂的状态。

在现阶段已经发表的研究中,基于一体式控制策略进行控制器设计时采用的控制算法包括 LQR^[32]、反步控制(back-stepping)^[33]、反馈线性化(feedback linearize)^[34]、自适应控制(adaptive)^[35]和模型预测控制(MPC)^[36,37]。

其中,LQR 为线性控制器,在其被设计时需要系统对系统进行线性化处理,文献[32]对旋翼飞行机械臂模型在平衡点线性化处理,并设计了 LQR 全状态反馈控制器。在对无人直升机和单自由度机械臂系统中的仿真实验表明,该控制器能够在系统状态平衡点附近同时调节无人直升机和机械臂的状态,对外部扰动有一定的鲁棒性。但是,平衡点线性化为局部线性化的方法,当系统的状态偏离平衡点过大时不能保证系统的稳定性。

反比控制算法是具有级联特性系统(cascade system)控制器设计时的常用方法。旋翼无人机的欠驱动系统,其在水平面的位置的移动是通过调整姿态来实现的,其姿态为位置环的输入,所以旋翼无人机的动力学具备级联的特性。利用这一特性,文献[33]提出了把旋翼飞行机械臂的动力学模型解耦为基座平动动力学和机械臂末端动力学,其中机械臂末端动力学中包含旋翼无人机的旋转动力学,在此基础上利用反比控制算法设计了控制器。在对四旋翼无人机和 2 自由度机械臂组成的系统仿真实验中实现了同时跟踪四旋翼无人机位置和机械臂末端位置轨迹。文献[34]则利用反馈线性化的方法把机械臂末端动力学中的旋翼无人机角速度和关节角速度进行线性化处理,再利用线性级联控制系统控制器设计的方法设计出具有稳定特性的调节器,在对无人直升机和 7 自由度机械臂组成的系统仿真实验中实现了任意状态方向上对外部扰动的调节。

自适应控制可以利用理论模型和观测的系统状态来估计出模型中不确定的参数和扰动。在旋翼飞行机械臂执行自主搬运任务时,其负载的质量往往是未知的,在负载质量变化过大的情况下旋翼飞行机械臂的控制性能会受到很大的影响。针对这一问题,文献[35]设计的自适应控制器能够估计所搬运负载的重量,同时保证系统有较好的轨迹跟踪性能。面向旋翼飞行机械臂对目标物的拾取任务(pick

and place)时,不同作业模态具有不确定性,如负载变化或接触时外部扰动。为了提高系统对模型中不确定参数和外部扰动的鲁棒性,在对四旋翼无人机和 3 自由度机械臂组成的系统仿真实验中能够实现末端的轨迹跟踪,结合阻抗控制后在接触不同刚度的环境时能够保证系统的稳定性。

模型预测控制是利用理论模型预测系统在未来一段时间内的状态,根据预测状态和性能指标函数计算控制率,以实现未来一段时间内性能指标函数达到最优。在下一个控制周期滚动预测的时间,重新计算保证下一个预测时段的最优,因此模型预测控制又称滚动时域优化。文献[36]提出了非线性模型预测控制,以实现机械臂末端 3D 位置轨迹跟踪时系统性能最优。同时利用系统的自由度冗余特性,在性能指标函数中添加系统质心变化量的指标可以减小系统质心的变化量,以减小旋翼无人机和机械臂之间的耦合力,提高整体系统的稳定性。针对旋翼飞行机械臂抓取任务,文献[37]提出了模型预测控制器,用于旋翼飞行机械臂末端位置环的控制,模型预测控制器计算出旋翼无人机和机械臂各个关节角的位置运动轨迹,再由底层的 PID 控制进行跟踪,能够在机械臂大范围运动抓取作业时保证系统的稳定性。

旋翼飞行机械臂系统的超高维度、强耦合和非线性特性,使得基于一体式控制策略研究虽然可以充分考虑系统各状态间的耦合,从理论上证明整体系统的稳定性,但是该类研究在理论上有很大的难度。由于控制器的设计依赖于整体的动力学模型,在控制器实现时还需要机械臂的动力学参数,并且设计出的控制器往往十分复杂,计算量较大。因此,基于一体式控制策略的研究具有重要的理论研究价值,在计算资源有限的实际旋翼飞行机械臂系统中实现起来较为困难。与之相比,采用分离式控制策略的算法在实际系统应用时较为简单,因此,在旋翼飞行机械臂建模和控制的研究中,基于分离式控制策略的研究结果也被大量发表。

3.2 基于分离式控制策略旋翼飞行机械臂建模和控制方法

基于分离式控制策略的研究,在旋翼无人机控

制器设计时,把机械臂的运动作为旋翼无人机的外部扰动力/力矩处理,即考虑机械臂对旋翼无人机在动力学层面的耦合作用,通过鲁棒控制或扰动补偿的方法消除耦合作用的影响。由于大多数飞行作业任务可在系统悬停飞行、机械臂低速运动状态下完成,此时旋翼无人机对机械臂的动力学层面的耦合较小。在机械臂控制器设计时把旋翼无人机看作浮动的基座,其悬浮运动直接影响机械臂末端的位置和姿态,即只考虑旋翼无人机对其在运动学层面的耦合,在机械臂末端控制的位置环考虑旋翼飞行器机械臂整体运动学,通过逆运动学的方法消除耦合作用的影响。

旋翼飞行器机械臂为冗余自由度机器人系统,即自由度大于6,所以在旋翼飞行器机械臂末端的期望值给定的情况下,其在状态空间的运动分布存在多解。因此,除末端的跟踪任务外,飞行器机械臂多余的自由度可以用于满足多任务约束。机械臂末端的控制除采用逆运动学的方法消除旋翼无人机作为基座的姿态和位置浮动对机械臂末端位置的影响外,机械臂末端速度环控制可采用基于零空间 NSB (null space based) 任务分级控制方法,在完成末端跟踪任务的同时可以实现别的优化指标,如机械臂运动使得系统质心变化量最小等^[38],这样就能减小机械臂的扰动对旋翼无人机控制性的影响。在具体任务的过程中还可实现障碍物避碰^[39]。文献[39]采用 NSB 的任务分级控制策略,通过视觉引导,四旋翼无人机和4自由度机械臂组成的系统自主地飞向目标物完成抓取作业,同时在执行任务的过程中实现障碍物避碰。

旋翼无人机的稳定飞行控制是旋翼飞行器机械臂能够安全执行作业任务的保证,基于分离式控制策略的研究中旋翼无人机的控制处于主导地位。现有成熟的提高旋翼无人机抗扰动控制的方法很多,如自抗扰控制^[40-44]等。除了提高旋翼无人机控制器的鲁棒性能外,此类研究重点为机械臂对旋翼无人机耦合作用的建模及扰动力/力矩估计。

早期的研究主要是提高旋翼无人机的鲁棒性能以保证旋翼飞行器机械臂作业时系统的飞行稳定性,但是这种不直接考虑机械臂扰动力/力矩的大小、单

纯提高旋翼无人机控制性能鲁棒性的方法,在简单的作业场景中能够使用,而当机械臂扰动力/力矩过大时旋翼无人机的稳定飞行性能就不能满足作业的需求^[45]。如文献[45]旋翼无人机用 PID 控制器,在执行简单的物体抓取时能满足需求,当机械臂运动使系统质心变化较大时旋翼无人机的位置控制误差较大。为此,需要对机械臂的耦合作用进行建模和扰动力/力矩估计,在旋翼无人机控制中补偿耦合作用的影响,以保证控制器能够满足更多的应用需求。关于机械臂对旋翼无人机耦合作用和扰动力/力矩估计的研究可以分为3类。

(1) 作为相互作用力/力矩直接测量

在旋翼无人机和机械臂之间安装力/力矩传感器可直接测量到二者相互作用力/力矩^[46],即耦合力/力矩,这样就能把系统直接解耦成2个子系统。文献[46]把力/力矩传感器安装在直升机和单自由度机械臂之间以测量二者间的耦合力/力矩,同时在直升机的控制设计时补偿耦合力/力矩以提高直升机的悬停性能,能够完成在室外环境中对目标物的抓取作业任务。这种补偿相互作用力/力矩的测量值方法相比于简单的 PID,旋翼无人机的稳定飞行性能有明显的提升,算法也较为简单。其缺点在于力/力矩传感器价格昂贵,且精度和量程有限,实际系统的振动也使力/力矩的测量精度难以保证。

(2) 作为外部扰动在线估计

机械臂的耦合力/力矩作为旋翼无人机系统的外部扰动力/力矩,在旋翼无人机系统控制时可以根据旋翼无人机的状态对其进行观测估计。基于该思路的研究采用的算法主要为基于扰动观测器的控制 (DoB-based)^[47]。文献[47]提出了一种基于扰动观测器的控制器用于旋翼无人机的控制,其中扰动观测器用来估计机械臂运动对旋翼无人机的扰动力/力矩,在四旋翼无人机和4自由度机械臂组成的系统中的实验结果表明,在机械臂不断运动的情况下,四旋翼无人机基于扰动观测器的控制和单纯的反比控制相比其位置轨迹跟踪性能更好。此类研究相比于只提高旋翼无人机控制鲁棒性的方法,虽然在旋翼飞行器机械臂飞行控制性能上有较大的提高,但是其在耦合力/力矩估计时仅用到了旋翼无人机的状

态信息,未能利用机械臂的运动状态信息,使得其对扰力/力矩的估计不够充分,对飞行控制性能的增强效果比较有限。

(3)作为旋翼无人机动力学中惯性参数变化量机械臂运动时会引起旋翼飞行机械臂整体系统质量分布的变化,即引起质心和转动惯量的变化。因此,如果把机械臂的运动表示为系统惯性参数的变化量,对旋翼无人机建模和控制时可以把其看作一个惯性参数可以变化的特殊飞行平台,在其动力学中引入惯性参数变化量以表示机械臂运动对旋翼无人机动力学的影响,其中惯性参数的变化量可由机械臂的关节角状态根据机械臂运动学模型实时估计获得。针对惯性参数变化的旋翼无人机动系统进行控制器的设计可以提高机械臂作业运动时系统的稳定飞行性能。

关于质量分布变化对旋翼无人机动力学影响的工作在以吊装为应用场景的研究中出现。旋翼飞行机械臂早期的研究也通过质心的位置分析系统的飞行稳定性能。旋翼无人机控制时通过重心补偿方法来减小机械臂扰动的影响是一个比较简单有效的方法^[48]。文献[48]把系统质心的位置作为旋翼动力学模型中的变化参数,在此基础上设计了反步控制器,通过重心补偿的方法提升四旋翼无人机和 4 自由度机械臂组成的旋翼飞行机械臂位置飞行轨迹精度。文献[49]把机械臂运动时质心的偏移量作为旋翼无人机的力矩扰动,并通过机械臂的状态和各个连杆的质量估计扰动力矩的大小,结合旋翼无人机姿态环基于四元素的控制方法保证了系统飞行姿态控制的全局稳定性。文献[50]在旋翼无人机动力学模型中引入质心和转动惯量的变化量并在此基础上设计了变参数积分反步控制器(variable parameter integral back-stepping),在四旋翼无人机和 3 自由度机械臂组成的飞行机械臂系统实验中表现出比 PID 更好的姿态和位置控制性能^[50]。该方法同时应用于由无人直升机和 7 自由度机械臂组成的系统中,也表现出较好的性能^[51]。

该类研究在对旋翼无人机动力学模型时通过系统惯性参数变化量来表示机械臂对其耦合作业,建模和控制器设计比较简单且容易应用于实际系统。

虽然该类研究在对耦合作用建模时同时利用了旋翼无人机和机械臂各关节角的状态信息,但是,质心和转动惯量变化量中只包含机械臂关节角,而不包含关节角速度和角加速度,即只包含在静力学层面机械臂对旋翼无人机的影响。在机械臂运动速度较低时可以用该类建模和控制方法有效消除机械臂耦合作用的影响。当机械臂运动具有比较高的角速度和角加速度时,其机械臂连杆上各个质点的加速度和科氏加速度对旋翼无人机动力学的影响则不可忽略,因此,该类研究只适用于机械臂运动较小的工作状态下。

从以上研究可以看出,基于分离式控制策略关于旋翼飞行机械臂飞行控制研究的优点在于,算法简单更容易应用于实际系统。缺点在于,现有的研究中关于耦合作用建模和扰动力/力矩估计,只能部分地估计机械臂对旋翼无人机的扰动力/力矩。

4 旋翼飞行机械臂作业方法

旋翼飞行机械臂虽然具有潜在的通用作业能力,但是,面向不同的应用场景,在其执行不同的作业任务时,系统的工作模式和作业方法各有不同。针对旋翼飞行机械臂作业方法的研究主要包括长期接触式作业^[52-59]、复杂环境约束情况下作业^[60-65]和多机协同作业^[66-70]等。

关于接触式飞行作业的研究在前一小节作业型无人机综述中已经提到,主要研究的问题集中在接触作业模式下系统的稳定飞行和末端接触力/位控制。相比作业型无人机旋翼飞行机械臂可通过旋翼无人机和机械臂协同控制的方法满足接触式作业性能的要求,文献[55,56]在旋翼飞行机械臂中采用具有柔性关节的轻质结合和阻抗控制不仅实现了接触作业时系统的稳定飞行控制和末端的接触力控制,还能保证系统接触环境过程的柔顺性。文献[54]在旋翼无人机控制器中采用基于无源性的控制器在机械臂末端控制器中采用机体空间的柔顺阻抗控制,在仿真环境中实现了无人直升机和 7 自由度机械臂系统与环境接触式直升机位置控制和末端的接触力控制。

旋翼飞行机械臂在复杂环境中作业时,除了较好的飞行性控制和末端控制性能外,自身还应该具备环境中障碍物的躲避性能,即能保证旋翼无人机和机械臂不和环境发生碰撞的情况下完成作业任务。针对旋翼飞行机械臂在受限作业环境中的规划问题,文献[61]提出基于有序二次型(sequential quadratic programming)轨迹规划方法,该方法为飞行机械臂在受限作业环境中规划最局部最优的运动轨迹,在完成的同时避免碰撞。文献[62]结合RRT算法^[71]提出了一种分层轨迹规划算法,首先是采用RRT算法规划出任务空间旋翼飞行机械臂执行任务所需要经过的点,再结合系统的运动学和动力学约束生成旋翼飞行机械臂能够构造的状态规划,以用于旋翼飞行机械臂完成受限空间内的物体表面清理作业任务,如图5所示。文献[63]证明了

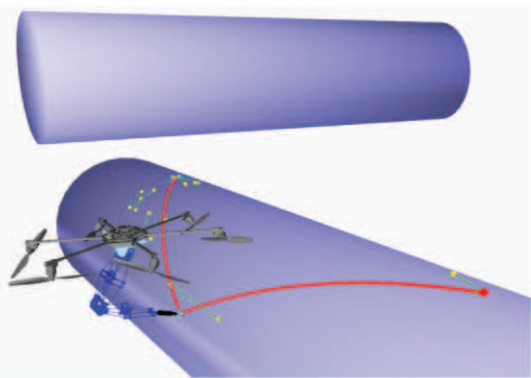


图5 受限空间内的物体表面清理作业^[56]

旋翼飞行机械臂系的动力系统关于旋翼无人机位置、航向以及机械臂末端为微分光滑系统(differential flatness),这一特性是基于多项式模型的轨迹可以被系统很好地跟踪,结合环境约束碰撞的指标函数,可用二次型规划的方法求解出旋翼飞行机械臂的作业轨迹,并成功应用于四旋翼无人机和3自由度机械臂组成系统中执行约束环境中的目标物快速搬运任务。针对复杂工业场景中的长杆的搬运任务,文献[60]结合能量和时间最优的指标与RRT*算法提出了一种旋翼飞行机械臂搬砖作业的运动规划方法,并成功应用于有四旋翼无人和双机械臂组成的系统中执行长杆的搬运作业任务。实验结果

表明,该方法能同时使得旋翼飞行机械臂和长杆在穿过复杂的环境时不与环境碰撞。

与作业型飞行机器人相同,飞行机械臂多机协同作业主要是为了克服系统负载能力较弱的缺点,因此,多机协同作业主要是应用于目标物自主搬运任务。与作业型无人机不同,旋翼飞行机械臂有更强的作业能力和自由度,所以,在多机协同搬运目标物时,可使目标物按照所需的轨迹运动,可在复杂环境中完成作业任务。文献[70]为旋翼飞行机械臂多机协同搬运作业,提出了一种分层协同控制结构。该结构分为3层,第1层为目标物行为设计,用于计算目标物完成期望的运动所需要的外力和力矩;第2层为协同作用力最优分配,即把目标物所需的外力和力矩分配到每个旋翼飞行机械臂上,使其能够协同完整任务;第3层为旋翼飞行机械臂独立控制,通过分别控制每个旋翼飞行机械臂末端的位置,得到其所需要作用在目标物上的力的期望值。最后,3个旋翼飞行机械臂协同搬运目标物的仿真实验表明,目标物能够以较小的误差跟踪其运动的期望值。针对旋翼飞行机械臂协同柔顺作业,文献[69]提出了多机协同阻抗控制策略,主要包含2个阻抗控制器。一个用于限制被操作目标物 and 环境的接触力,称之为外部阻抗控制器;另一个用于限制机械臂末端和被操作目标物的接触力,称之为内部阻抗控制器。首先,通过外部阻抗控制器把被操作目标物的期望运动轨迹和期望外部环境接触力转化为目标物的参考运动,参考运动能够收敛到期望运动轨迹。并利用协同作业过程中旋翼飞行机械臂和目标所组成的杆体封闭链的约束,把参考运动转化为各个机械臂末端的期望运动轨迹。最后利用内部阻抗控制器,跟踪机械臂末端期望轨迹的同时限制机械臂末端和被操作目标物的接触力。文献[68]利用多机协同搬运目标物时封闭链的联合动力学,为每个旋翼飞行机械臂设计了增量式的滑模控制器(augmented adaptive sliding),并用RRT*和DMP(dynamic movement primitive)规划在有障碍物环境中协作搬运长杆目标物的运动轨迹,如图6所示,保证在运送的过程中不与障碍物发生碰撞。

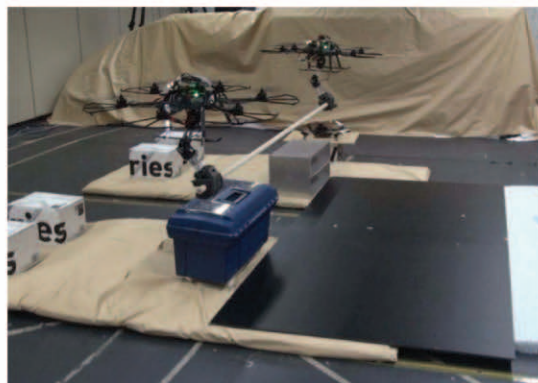


图6 障碍物环境中多机协作搬运^[68]

5 结论与展望

由于具备较强的作业功能,能够满足各种飞行任务的需求,旋翼飞行机械臂已经成为了飞行作业领域研究的主要对象。由于飞行作业应用场景各不相同,面向不同的作业任务设计飞行机械臂系统是旋翼飞行机械臂系统设计的主要思路。由于旋翼无人机负载能力较弱及扰动敏感等特性,使得现有旋翼无人机和机械臂相结合的旋翼飞行机械臂的稳定飞行和末端作业性能较差。因此,在旋翼飞行机械臂设计上,适用于飞行作业的旋翼无人机和机械臂的设计逐渐成为了新的研究重点。旋翼无人机和机械臂之间在运动学和动力学层面存在严重的耦合作用,使得旋翼飞行机械臂的稳定飞行控制和末端控制都变得较为困难。旋翼飞行机械臂系统的建模和控制是研究的核心内容,决定着系统的性能和实际应用的成败。

参考文献

- [1] Niethammer U, James M R, Rothmund S, et al. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: evaluation and results[J]. *Engineering Geology*, 2012, 128: 2-11
- [2] AEROWORKS. Collaborative Aerial Workers[EB/OL]. <http://www.aeroworks2020.eu/>; AEROWORKS, 2019
- [3] Ding X L, Guo P, Xu K, et al. A review of aerial manipulation of small-scale rotorcraft unmanned robotic systems[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(1): 200-214
- [4] Youakim D, Ridao P. Motion planning survey for auto-

- mous mobile manipulators underwater manipulator case study[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 107: 20-44
- [5] Pounds P E I, Bersak D R, Dollar A M. Grasping from the air: hovering capture and load stability[C] // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, 2011: 2491-2498
- [6] Bernard M, Kondak K. Generic slung load transportation system using small size helicopters[C] // 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 2009: 3258-3264
- [7] Mellinger D, Lindsey Q, Shomin M, et al. Design, modeling, estimation and control for aerial grasping and manipulation[C] // 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, USA, 2011: 2668-2673
- [8] Durrant-Whyte H, Roy N, Abbeel P, et al. Construction of Cubic Structures with Quadrotor Teams[M]. Boston: MIT Press, 2011: 177-184
- [9] Augugliaro F, Lupashin S, Hamer M, et al. The flight assembled architecture installation: cooperative construction with flying machines[J]. *IEEE Control Systems*, 2014, 34(4): 46-64
- [10] Mellinger D, Shomin M, Michael N, et al. Cooperative Grasping and Transport Using Multiple Quadrotors[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013: 545-558
- [11] Wang Z, Singh S, Pavone M, et al. Cooperative object transport in 3D with multiple quadrotors using no peer communication[C] // 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Brisbane, Australia, 2018: 1064-1071
- [12] Lee T, Leok M, McClamroch N H. Geometric tracking control of a quadrotor UAV on SE(3)[C] // 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Atlanta, USA, 2010: 5420-5425
- [13] Bellens S, Schutter J D, Bruyninckx H. A hybrid pose / wrench control framework for quadrotor helicopters[C] // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul, USA, 2012: 2269-2274
- [14] Darivianakis G, Alexis K, Burri M, et al. Hybrid predictive control for aerial robotic physical interaction towards inspection operations[C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Hong Kong, China, 2014: 53-58
- [15] Kendoul F, Fantoni I, Lozano R. Asymptotic stability of hierarchical inner-outer loop-based flight controllers[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2008, 41(2): 1741-1746
- [16] Nguyen H N, Ha C, Lee D. Mechanics, control and in-

- ternal dynamics of quadrotor tool operation[J]. *Automatica*, 2015, 61: 289-301
- [17] Orsag M, Korpela C, Bogdan S, et al. Dexterous aerial robots——mobile manipulation using unmanned aerial systems[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(6): 1453-1466
- [18] Thomas J, Loianno G, Polin J, et al. Toward autonomous avian-inspired grasping for micro aerial vehicles[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2014, 9(2): 1-27
- [19] Fumagalli M, Naldi R, Macchelli A, et al. Developing an aerial manipulator prototype: physical interaction with the environment[J]. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 2014, 21(3): 41-50
- [20] Laiacker M, Huber F, Kondak K. High accuracy visual servoing for aerial manipulation using a 7 degrees of freedom industrial manipulator[C] // 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Daejeon, Korea, 2016:1631-1636
- [21] Ollero A, Heredia G, Franchi A, et al. The AEROARMS project: aerial robots with advanced manipulation capabilities for inspection and maintenance[J]. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 2018, 25(4): 12-23
- [22] Jimenez-Cano A E, Braga J, Heredia G, et al. Aerial manipulator for structure inspection by contact from the underside[C] // 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg, Germany, 2015: 1879-1884
- [23] Suarez A, Jimenez-Cano A E, Vega V M, et al. Design of a lightweight dual arm system for aerial manipulation[J]. *Mechatronics*, 2018, 50: 30-44
- [24] ARCAS. ARCAS Project[EB/OL]. <http://www.arcas-project.eu/>; ARCAS, 2018
- [25] AEROARMS. AEROARMS[EB/OL]. <https://aeroarms-project.eu/AEROARMS>, 2011
- [26] Tognon M, Yüksel B, Buondonno G, et al. Dynamic decentralized control for protocentric aerial manipulators[C] // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Marina Bay, Singapore, 2017: 6375-6380
- [27] Nguyen H N, Park S, Park J, et al. A novel robotic platform for aerial manipulation using quadrotors as rotating thrust generators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34(2): 353-369
- [28] Kondak K, Huber F, Schwarzbach M, et al. Aerial manipulation robot composed of an autonomous helicopter and a 7 degrees of freedom industrial manipulator[C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Hong Kong, China, 2014: 2107-2112
- [29] Kamel M, Alexis K, Siegwart R. Design and modeling of dexterous aerial manipulator[C] // 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Daejeon, Korea, 2016: 4870-4876
- [30] Bellicoso C D, Buonocore L R, Lippiello V, et al. Design, modeling and control of a 5-DoF light-weight robot arm for aerial manipulation[C] // 2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Torremolinos, Spain, 2015: 853-858
- [31] Ryll M, Muscio G, Pierri F, et al. 6D physical interaction with a fully actuated aerial robot[C] // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Marina Bay, Singapore, 2017: 5190-5195
- [32] Yang B, He Y, Han J, et al. Rotor-flying manipulator: modeling, analysis, and control[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014: 1-13
- [33] Yang H, Lee D. Dynamics and control of quadrotor with robotic manipulator[C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Hong Kong, China, 2014: 5544-5549
- [34] Kim J, Kondak K, Ott C. A stabilizing controller for regulation of UAV with manipulator[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(3): 1719-1726
- [35] Lee H, Kim H J. Estimation, control, and planning for autonomous aerial transportation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(4): 3369-3379
- [36] Lunni D, Santamaria-Navarro A, Rossi R, et al. Nonlinear model predictive control for aerial manipulation[C] // 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Miami, USA, 2017: 87-93
- [37] Garimella G, Kobilarov M. Towards model-predictive control for aerial pick-and-place[C] // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle, USA, 2015: 4692-4697
- [38] Ruggiero F, Trujillo M A, Cano R, et al. A multilayer control for multirotor UAVs equipped with a servo robot arm[C] // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle, USA, 2015: 4014-4020
- [39] Santamaria-Navarro A, Grosch P, Lippiello V, et al. Uncalibrated visual servo for unmanned aerial manipulation[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(4): 1610-1621
- [40] 马娅婕, 刘国庆, 卢少武. 基于前馈 PID 和 LADRC 串级控制的四旋翼导航方法[J]. 高技术通讯, 2019, 29(2): 164-174
- [41] 戴启浩, 马国梁. 四旋翼飞行器的自抗扰控制方法研究[J]. 计算技术与自动化, 2017, 36(2): 46-50

- [42] 杨立本,章卫国,黄得刚. 基于 ADRC 姿态解耦的四旋翼飞行器鲁棒轨迹跟踪[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(6):1026-1033
- [43] 牛洪芳,吴怀宇,陈洋. 基于反步法的四旋翼飞行器滑动模态控制[J]. 高技术通讯, 2015, 25(12):1083-1091
- [44] 刘峤,吴怀宇,陈洋. 基于反步法与参考模型的四旋翼飞行器自适应滑动模态控制[J]. 高技术通讯, 2018, 28(7):63-72
- [45] Kannan S, Olivares-Mendez M A, Voos H. Modeling and control of aerial manipulation vehicle with visual sensor [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, 46(30): 303-309
- [46] 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[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, 10(2): 145
- [47] Kim S, Choi S, Kim H, et al. Robust control of an equipment-added multirotor using disturbance observer [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 26(4):1524-1531
- [48] 钟杭,王耀南,李玲,等. 旋翼飞行机械臂建模及动态重心补偿控制[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(3): 311-320
- [49] Alvarez-Munoz J U, Marchand N, Guerrero-Castellanos J F, et al. Nonlinear control of a nano-hexacopter carrying a manipulator arm [C] // 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg, Germany, 2015: 4016-4021
- [50] Jimenez-Cano A E, Martin J, Heredia G, et al. Control of an aerial robot with multi-link arm for assembly tasks [C] // 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, Germany, 2013: 4916-4921
- [51] Jimenez-Cano A, Heredia G, Bejar M, et al. Modelling and control of an aerial manipulator consisting of an autonomous helicopter equipped with a multi-link robotic arm[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 230(10): 1860-1870
- [52] Kruse L, Bradley J. A hybrid, actively compliant manipulator/gripper for aerial manipulation with a multicopter [C] // 2018 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), Philadelphia, USA, 2018: 1-8
- [53] Lippiello V, Fontanelli G A, Ruggiero F. Image-based visual-impedance control of a dual-arm aerial manipulator [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(3): 1856-1863
- [54] Kim M J, Balachandran R, Stefano M D, et al. Passive compliance control of aerial manipulators [C] // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, 2018: 4177-4184
- [55] Suarez A, Heredia G, Ollero A. Physical-virtual impedance control in ultralight weight and compliant dual-arm aerial manipulators[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(3): 2553-2560
- [56] Suarez A, Sanchez-Cuevas P, Fernandez M, et al. Lightweight and compliant long reach aerial manipulator for inspection operations [C] // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, 2018: 6746-6752
- [57] Hamaza S, Georgilas I, Richardson T. Towards an adaptive-compliance aerial manipulator for contact-based interaction[C] // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, 2018: 1-9
- [58] Meng X, He Y, Li Q, et al. Contact force control of an aerial manipulator in pressing an emergency switch process [C] // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, 2018: 2107-2113
- [59] Meng X, He Y, Wang Q, et al. Force-sensorless contact force control of an aerial manipulator system [C] // 2018 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), Kandima, Maldives, 2018: 595-600
- [60] Caballero A, Suarez A, Real F, et al. First experimental results on motion planning for transportation in aerial long-reach manipulators with two arms[C] // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, 2018: 8471-8477
- [61] Caballero A, Bejar M, Rodriguez-Castaño A, et al. Motion planning with dynamics awareness for long reach manipulation in aerial robotic systems with two arms[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2018, 15(3): 1-16
- [62] Rossi R, Santamaria-Navarro A, Andrade-Cetto J, et al. Trajectory generation for unmanned aerial manipulators through quadratic programming[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(2): 389-396
- [63] Tognon M, Cataldi E, Chavez H A T, et al. Control-aware motion planning for task-constrained aerial manipulation[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(3): 2478-2484
- [64] Seo H, Kim S, Kim H J. Locally optimal trajectory plan-

- ning for aerial manipulation in constrained environments [C] // 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, Canada, 2017: 1719-1724
- [65] Kim H, Lee H, Choi S, et al. Motion planning with movement primitives for cooperative aerial transportation in obstacle environment [C] // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Marina Bay, Singapore, 2017: 2328-2334
- [66] Lee H, Kim H J. Constraint-based cooperative control of multiple aerial manipulators for handling an unknown payload [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(6): 2780-2790
- [67] Kim S, Seo H, Shin J, et al. Cooperative aerial manipulation using multirotors with multi-DOF robotic arms [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(2): 702-713
- [68] Lee H, Kim H, Kim H J. Planning and control for collision-free cooperative aerial transportation [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15(1): 189-201
- [69] Caccavale F, Giglio G, Muscio G, et al. Cooperative impedance control for multiple UAVs with a robotic arm [C] // 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg, Germany, 2015: 2366-2371
- [70] Yang H, Lee D. Hierarchical cooperative control framework of multiple quadrotor-manipulator systems [C] // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle, USA, 2015: 4656-4662
- [71] Kuffner J J, LaValle S M. RRT-connect: an efficient approach to single-query path planning [C] // Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, USA, 2000: 995-1001

Review of researches on aerial manipulator

Liu Chao*, Zhang Guangyu**, Xiong Anbin*

(* Beijing Qihu Technology Co. Ltd., Beijing 100015)

(** State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract

Aerial manipulator is a new type of aerial robot and is typically composed of a rotorcraft (e. g., multi-rotor or helicopter) unmanned aerial vehicle (UAV) and a multi-link robotic arm. So, the aerial manipulator has the characteristics of maneuvering and hovering flight as rotorcraft UAV and flexible operation as robotic arm. The UAV is sensitive to external disturbance. Aerial manipulator will be effected by complex disturbed from environment in the process of flight operation, and coupling between the UAV and the robotic arm is strong, which makes the research of aerial manipulator have many difficulties. This work will comprehensively analyze and summarize the literature in recent years, and summarize the main research results in the system design, system modeling and control, application scenarios and operation methods of the aerial manipulator.

Key words: aerial manipulator, aerial manipulation, flight control, system model