

## 旋翼飞行机器人研究进展

谭建豪<sup>†</sup>, 王耀南, 王媛媛, 张艺巍, 王 楚, 陈谢沅澧

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 旋翼飞行机器人是面向空中自主作业需求, 将旋翼飞行器与多自由度机械臂相结合所提出的新型机器人. 该机器人作业过程中旋翼飞行器、机械臂与作业目标之间的动态相对运动以及与作业目标接触过程中未建模外力、力矩扰动使自主控制受到极大挑战. 本文将针对旋翼飞行机器人的结构演变及关键技术、作业机构集成技术进行综述. 从动力学建模及动力学特性分析、动态运动约束/力约束下的协调规划、非结构环境下的运动和作业控制、面向任务动态操作的环境感知、面向任务的实验系统构建与实验验证五个方面初步构建了旋翼飞行机器人自主作业理论体系.

**关键词:** 旋翼飞行机器人; 机械臂; 动力学建型; 协调规划; 运动与作业控制; 空中自主作业

**中图分类号:** TP242      **文献标识码:** A

## The research progress of the rotary-wing flight robot

TAN Jian-hao<sup>†</sup>, WANG Yao-nan, WANG Yuan-yuan,  
ZHANG Yi-wei, WANG Chu, CHEN Xie-yuan-li

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

**Abstract:** The rotary-wing flight robot is a new type of robot developed for aerial autonomous operations; it combines the rotary-wing flight aircraft with the multi-degrees-of-freedom manipulators. In the operation process of the robot, the following challenges are posed to the autonomous control: the dynamic relative motion of the rotary-wing flight aircraft, the manipulator and the operation object, and the unmodeled disturbance of external force and torque during contacting the operation object. In this paper, we give a brief review on the structure evolution, the key technology, and the operation mechanism integration technology of the rotary-wing flight robot. A preliminary theoretical framework in five aspects of the autonomous operation of the rotary-wing flight robot is built in this paper, which includes the dynamic modeling and dynamic property analysis, the coordinated planning under the dynamic motion constraints and the force constraints, the motion and operating control in unstructured environment, the environment perception of the task-oriented dynamic manipulation, the construction of the task-oriented experimental system and the experimental verification.

**Key words:** rotary-wings flight robot; manipulators; dynamic models; coordinated planning; motion and operation control; aerial autonomous operation

### 1 引言(Introduction)

地面移动机器人结合机械臂等主动式作业机构组成的作业型地面移动机器人系统在反恐防暴、救灾救援等多种场合已经得到了充分的验证应用和广泛的认可. 作业型地面移动机器人系统的巨大成功说明将传统机械臂(主动作业机构)的强大作业能力与移动机器人的自由移动能力相结合以扩展机器人技术应用范围的做法是非常有吸引力的. 这一思路引起了研究人员和用户的极大兴趣, 并在水下、深空以及其他移动机器人上得到了成功推广. 水下移动机器人与机械臂的结合可以完成深海采样、水下作业等任务; 深空

移动机器人与机械臂结合成为空间机械臂可以替代宇航员完成空间站的组装、维修等任务<sup>[1-2]</sup>. 这些应用均展现出了惊人的前景, 极大拓展了移动机器人的应用领域. 因此, 从完全单纯观测型到具有一定作业能力的主动作业型转变是当前移动机器人系统发展的一个总的趋势.

旋翼飞行机器人(又称无人旋翼飞行器或无人直升机)因具有三维空间中机动性强、具备悬停能力等特点, 可以代替人完成高危环境信息获取与作业等任务, 近年来得到了越来越多的关注. 旋翼飞行机器人目前的发展阶段与地面、水下、深空等移动机器人早

期发展阶段类似,尚处于移动平台自身自主控制的研究期,目前已取得了火灾探测、地震现场勘测、广域环境建模等信息获取型任务的成功示范应用<sup>[3-4]</sup>。随着机器人应用领域的扩展,人们更加期望旋翼飞行机器人能够对其所处的环境施加主动影响,在飞行机器人平台上加装作业机构,即机械臂,使其在三维复杂工作环境中具有主动作业能力,成为了一种很有实际意义的应用需求(图1所示)。



图 1 旋翼飞行机器人示意图

Fig. 1 Diagram of the rotary-wing flight robot

旋翼飞行机器人机械臂将人类手臂的能力延伸到了空中,具有广阔的应用前景,主要体现在:

1) 在广域无人科考(如南北极科考)及环境监测中,实现极端环境、极端条件下对感兴趣样品的采集或作业,提供一种不可替代的无人化装备,大大提升科考的效率和深度<sup>[5]</sup>;

2) 在特殊环境中辅助/代替人完成目前只能由人来完成的危险任务,如舰船补给过程中的船间物资空中调运<sup>[6]</sup>或高压输电线路强带电环境中的铺设、检修<sup>[7]</sup>等(如图2所示),从而提高工作效率、极大降低人员伤亡。



图 2 利用直升机进行舰船间物资补给及输电线路带电环境作业

Fig. 2 Using helicopters to resupply between ships and operate on the transmission line when charged

旋翼飞行机器人具有巨大的应用前景。但在空中非结构环境自主作业过程中,多自由度机械臂自身的复合自由度以及其所处的复杂扰动环境使旋翼飞行机器人同现有的具有作业能力的移动机器人系统相比,具有特殊的技术难点,而且这些难点并不能通过旋翼飞行器和机械臂各自建模、控制与规划方法的简单组合来解决。这些难点包括:

1) 旋翼飞行器与机械臂的结合使得系统动力学

具有复合多自由度、强耦合、强非线性等特点,因此,建模与协调控制较单纯的旋翼飞行器或机械臂困难;

2) 面向任务作业过程中旋翼飞行器、机械臂、作业目标相对运动,加之随机的环境扰动,使得旋翼飞行机器人作业中的旋翼飞行器与机械臂协调规划较单纯的旋翼飞行器或机械臂困难;

3) 机械臂与作业对象接触过程中两者之间的作用力/力矩及随机的外力/力矩扰动将使系统动力学模型呈献较多不确定结构和参数,因此亦对旋翼飞行机器人控制系统的鲁棒性提出了极大的挑战。

鉴于非结构环境下的自主控制一直是机器人学领域的研究热点和难点问题,针对旋翼飞行机器人关键科学问题的研究对移动机器人系统理论的完善具有重要的意义,同时对水下、深空作业型移动机器人系统的自主控制研究也有一定的借鉴意义。

## 2 旋翼飞行机器人国内外研究现状 (Domestic and foreign current research situation of the rotary-wing flight robot)

旋翼飞行机器人是近年来出现的一个新概念,可直接利用的研究成果相对较少。但其核心思想源于移动机器人系统结合主动作业机构以扩展移动机器人主动作业能力(如地面移动机器人、水下机器人等),相关研究在国内外都有不少成功的应用先例。下面将对旋翼飞行机器人研究中的关键问题,对国内外的相关研究工作进行综述。

### 2.1 旋翼飞行机器人的结构演变及关键技术 (Structural evolution and key technology of the rotary-wing flight robot)

#### 2.1.1 结构演变 (Structure evolution)

旋翼飞行机器人的结构演变大致经历了微型飞行器、固定翼无人机、扑翼式飞行器、旋翼飞行器这么几个阶段。下面对其各自的结构特点及飞行特性进行阐述。微型飞行器(micro air vehicle, MAV)是一种由无线电装备或者是由机载电脑进行控制,利用自身的动力装备产生空气动力抵消自身重力进行自主飞行的飞行器,MAV按照结构及飞行特点可分为固定翼式MAV、扑翼式MAV和旋翼式MAV<sup>[8-9]</sup>。

最早的固定翼无人机研究始于1914年爆发的第1次世界大战中。固定翼飞行器的优点是续航时间长、飞行效率高、载荷大,故多用于军事和运输。在过去的几十年里固定翼无人机开始向MAV方向发展,比如美国Aero Vironment公司研制的“Black Widow”,MLB公司研制的“Trochoid MAV”以及通用电器公司“Micro Star”,如图3所示。固定翼式MAV的缺点是起飞的时候必须要助跑,降落的时候必须要滑行,且固定翼MAV在空气动力学方面面临着不少技术问题。由于尺寸限制,固定翼MAV通常采用小展旋比机翼布

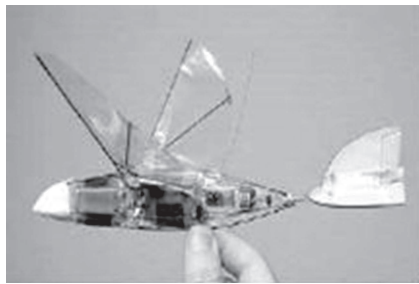
局, 升阻比较小, 升力面积也比较小, 所以很难提供足够的升力. 固定翼MAV的空气动力不太稳定, 其飞行状态可能始终都在随时间而变化, 因此固定翼MAV发展受到很大限制.

扑翼式飞行器, 是一种能像鸟那样煽动翅膀飞行的机器, 随着现代材料、动力、加工技术, 特别是微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 技术的进步, 现代扑翼式微型飞行器已经能够实现较好

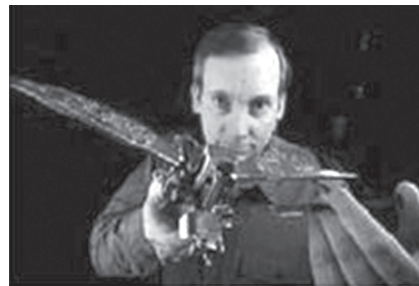
的飞行与控制. 较为成功的扑翼式MAV有: 美国加利福尼亚大学和Aero Vironment以及加州大学联合研制的“Micro Bat”扑翼式MAV, 美国佐治亚理工大学与英国剑桥大学及系统估计测试 (estimated test of systems, ETS) 试验中共同合作研制的仿昆虫MAV“Entomopte”, 美国斯坦福研究中心与多伦多大学共同研制的“Mentor”, 以及南京航空航天大学在2004年4月成功研制的国内第1架MAV, 如图4所示.



图3 Black Widow, Trochoid MAV和Micro Star  
Fig. 3 Black Widow, Trochoid MAV and Micro Star



(a) Micro Bat



(b) Entomopte



(c) Mentor



(d) 南京航空航天大学扑翼式MAV

图4 扑翼式MAV

Fig. 4 Flapping-wing MAV

扑翼式MAV的缺点在于气动效率低、动力及机构要求高、材料要求高、有效载荷小. 以气动问题为例, 微小型扑翼属于低雷诺数、非定常过程, 如今仍无法完全了解扑翼扑动过程中的流动模型和准确气动动力变化, 也没有完善的分析方法可以用于扑翼气动动力计算, 相关研究主要依赖试验. 故扑翼式扑翼式微型飞行器距实用仍有一定差距, 无法广泛应用于实际.

旋翼式MAV的发展相比于以上两种飞行器较为

缓慢. 早期由于多旋翼飞行器飞控理论还不成熟加上多旋翼的待控参数多, 控制系统复杂等技术原因致使早期的多旋翼飞行器无法现在高空长时间飞行. 但是旋翼式MAV相较于以上两种飞行器有着更加优越的性能, 例如旋翼式MAV能够适应各种各样的环境, 能做到垂直起降、空中悬停、侧飞、倒飞、翻滚等, 保持飞行姿态能力强、偏航转向更为灵活. 近年来, 随着新型材料的使用、微处理技术的进步、传感器工艺的提高、动力装置的改善, 旋翼式MAV

取得了快速的发展, 现已广泛应用于各种领域。

微型四旋翼飞行器(quadrotor MAV)是旋翼式 MAV 的一种, 属于非共轴式碟形飞行器<sup>[10]</sup>。与单旋翼式 MAV 相比, 四旋翼飞行器不必通过改变螺旋桨倾角调整姿态, 而是通过 4 个旋翼转速的调整来进行姿态变换; 由于旋翼数增加, 负重量也随之变大; 其 4 个旋翼分布对称, 从而抵消各自产生的反扭力矩, 因此不需要添置尾桨。与其他多旋翼式 MAV 相比, 四旋翼飞行器具有成本低, 结构简单, 易于操作和维护; 4 个旋翼分布对称, 有更强的机动能力; 悬停稳定性更佳, 更适合在复杂环境内进行侦察监视等任务, 具有很好的应用前景。

### 2.1.2 关键技术(Key technology)

旋翼飞行机器人建模、控制、规划理论与技术已渐趋成熟。下面对旋翼飞行机器人的一些最新研究成果进行综述。

#### 1) 建模方法。

旋翼飞行机器人所携带的主动作业机构可以看作是旋翼飞行机器人系统的一类负载, 而负载会对旋翼飞行机器人系统的飞行性能产生影响(尤其是微小型旋翼飞行机器人系统)。关于负载对旋翼飞行机器人系统的影响有不少研究成果可供借鉴, 这些负载通常可以分为两类: 悬吊负载(即通过绳索悬挂负载飞行)和非悬吊负载(即固定在旋翼机上的负载)。文献[11–15]研究了悬吊负载对旋翼机动力学特性的影响, 并讨论了在悬吊负载的影响下旋翼机的飞行稳定性及其相应的控制方案。文献[16]中, 作者对悬吊负载下旋翼机的机动飞行特性进行了研究。文献[17]中, 王德荣等人研究了在悬吊重物时旋翼机系统的飘摆问题, 并重点分析了飘摆产生的基本条件及原因, 以及悬挂点位置、吊索长度、外挂物形状等对旋翼机和悬吊物耦合运动的影响。文献[18–20]则对旋翼机装载非悬吊负载时的飞行动力学模型进行了研究, 并以此为基础分析了非悬挂负载对直升机系统的飞行品质的影响。综上, 重心的位置、惯性矩、和空气动力学参数等是与旋翼飞行机器人系统飞行特性紧密相关的重要参数, 在加装主动作业机构时要充分考虑其构型及结构参数等引起的旋翼飞行机器人系统模型的变化, 及其对飞行稳定性及可控性的影响, 并将其降到最小。

#### 2) 控制与规划方法。

为了保证旋翼飞行机器人系统能够在主动作业机构运动时保持稳定的飞行状态, 需要对旋翼飞行机械臂系统的协调规划和控制问题进行研究。关于旋翼飞行机器人系统与其他机构的协调规划问题, 可供借鉴的资料不多, 其中比较有代表性的是特拉

华大学(University of Delaware)的Agrawal等人的研究成果。此项研究的主要任务是研究旋翼飞行机器人系统装载一个绳索悬挂机器人用来搬运重物时的协调问题<sup>[21–28]</sup>。在实践中对主动作业机构与旋翼飞行机器人系统的协调控制方法的研究虽然很少, 但通过调研带有负载的旋翼机自主控制的相关研究, 人们仍然可以得到一些启发。佐治亚理工学院的学者Prasad等人<sup>[29]</sup>提出了一种基于神经网络的直接自适应控制方法, 可以通过逆变换来实现非线性控制。Calise和Rysdyk<sup>[30]</sup>通过在内环中引入自适应控制方法来解决姿态动力学中的跟踪问题, 也取得很好的效果。另外, 对于自适应控制器在飞行包络线边界受执行机构位置和速度饱和限制的问题, Johnson和Calise<sup>[31]</sup>将伪控制限制(pseudo control hedging, PCH)控制方法引入参考模型, 阻止自适应机制将该系统特性作为模型跟踪误差进行调整, 有效解决输入饱和的问题。黄文明等人<sup>[32]</sup>采用基于神经网络的非线性系统反馈线性化控制方法, 进行旋翼机机动飞行仿真。Moakes和Beet<sup>[33]</sup>中提出一种使用径向基础函数网络的自适应控制方法, 对直升机在环境变化时进行在线训练提高其适应能力。该项目组在前期的研究工作中将加速度反馈控制方法推广到旋翼飞行机器人系统的鲁棒控制中去, 利用加速度信号中富含不确定性信息的原理获得了一种具有较强鲁棒性的旋翼飞行机器人系统鲁棒控制方法<sup>[34]</sup>。上述规划与控制方法或者对于特定的模型不确定性参数具有一定的鲁棒性/自适应性, 或者对于单纯的外界干扰具有一定的不确定性。但是, 由于空气动力学模型的不确定性是深入到模型结构的不确定性, 因此这些方法即使对于单旋翼飞行机器人系统的自主控制仍然难以取得较好的控制性能。

除了采用常规的鲁棒/自适应控制策略外, 人们还可以借鉴自由飘浮空间机器人的控制方法。自由飘浮空间机器人系统是由一个不受控的载体和一个主动作业机构组成的机器人系统。对于运动规划问题, 主要是针对系统的非完整约束特性进行研究, 包括Nader等人提出的神经网络方法<sup>[35]</sup>、丁希伦等人采用的Lyapunov函数方法<sup>[36]</sup>、Torres等人提出的增强干扰图方法<sup>[37]</sup>等等。而对于跟踪控制, 包括Yoshida的广义雅可比矩阵法<sup>[38]</sup>、Parlaktuna的自适应控制方法<sup>[39]</sup>等都被用于解决自由飘浮空间机器人系统的跟踪控制问题。但是, 上述方法一般是将机器人这一载体和作业机构作为一个整体来考虑, 这在旋翼飞行机械臂系统上难以执行(由于旋翼飞行机器人系统本身需要复杂的控制方法来实现其稳定飞行)。

### 2.2 旋翼飞行器作业机构集成技术(Operation mechanism integration technology of the rotary-wing flight robot)

通过移动平台安装机械臂系统的研究可以发现,在不同的移动平台上加装机臂系统的研究方法具有类似的地方;但在不同的环境介质中,系统本体受到的环境介质施加的动力学特性有很大的不同,直接影响到控制算法的设计和系统本体机构的设计.旋翼飞行器系统由于是欠驱动系统,系统各部分耦合性极强,在近地面工作时地面效应对系统的影响较大,因此对主动操作机械臂的相关研究与其他机器人相比具有特殊性,是目前各类机器人中尚未具备主动作业能力的系统之一.尽管如此,在旋翼飞行器系统上加装简单机械臂从而实现微小型主动作业飞行机器人的概念已经被国外几个机构初步验证.德雷克赛尔大学自主系统实验室<sup>[40]</sup>设计并实现了旋翼飞行器自主追踪、负载提取、小车部署的任务.通过挂载在吊架下的钩子对提取系统的能力进行了测试,吊架的运动速度仿照飞机飞行时的真实速度(如图5所示).

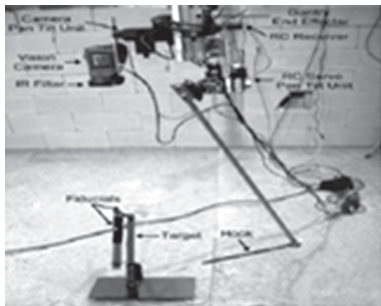


图5 货物提取原型

Fig. 5 Cargo extraction prototype

德国蒂宾根生物控制研究所<sup>[41]</sup>针对一个四旋翼飞机主要研究了在一定时间段内对任意两种状态之间的轨迹进行规划,并且在仿真环境下实现了对运动目标的抓取,但均未开展演示实验(如图6所示).



图6 移动手臂对运动物体的抓取

Fig. 6 Grasping the moving object with the moving manipulator

从目前公开发表的基于旋翼飞行器机器人主动抓取的论文来看,耶鲁大学的Paul Pounds研究小组<sup>[42]</sup>开发的耶鲁空中作业平台实现了实物抓取作业.借助安装在平台上的柔顺抓取手臂系统,它既能实现落地后抓取也能实现悬停时抓取.其采用欠驱动、顺从机械手抓取物体,避免了抓取时对位置精度的严格要求,同时避免了接触物体时接触力对飞机本体稳定性的影响(如图7所示).



图7 耶鲁大学Yale Aerial Manipulator系统

Fig. 7 System of Yale Aerial Manipulator of Yale University

此外,法国贡比涅技术大学(如图8所示)、德国宇航中心(如图9所示)等研究机构也开展了物体简单抓取的研究.



图8 法国贡比涅技术大学iMAV系统

Fig. 8 System of iMAV of University of Technology of Compiègne of France



图9 德国宇航中心的前期实验

Fig. 9 Previous experiments in the spaceport of German

不难发现,目前这些系统只是在旋翼飞行器上增加手爪或简单的单自由度机械臂来验证整个概念的基本可行性,而对其自主控制问题的深入研究正是这些研究机构未来的研究重点,且已经逐渐成为了旋翼飞行机器人研究领域的一个新热点.但到目前为止,系统性、理论性的研究成果尚未出现.在国外研究取得初步进展的同时,国内也逐渐意识到了本研究的重要性.中国航空工业集团于2013年举办国际无人飞行器大奖赛,以运动中舰船间的空中补给为应用背景,在旋翼组的竞技类比赛中设置了相关比赛任务,要求旋翼飞行机器人在两个移动平台之间自主定位并抓取运输物资、自主定位并码放运输物资,以任务完成精准度与完成时间作为考核指标(如图10所示).比赛吸引了来自新加坡国立大学、清华大学、北京航空航天大学 and 南京航空航天大学等国内外众多旋翼飞行机器人研究团队参加.由于比赛技术难度过大,在比赛过程中,只有中国科学院沈阳自动化研究所的旋翼飞行机器人成功抓取全部4个物资并完成投放作业,并以总分第1名获得冠军.

该比赛任务的设置说明了国内对旋翼飞行器人主动作业任务研究与应用的重视,但同时比赛结果也突出了国内在该方面研究的严重不足,概念性的研究还未系统开展,迫切需要建立多自由度旋翼飞行机械臂研究体系,与国际相关研究同步发展.

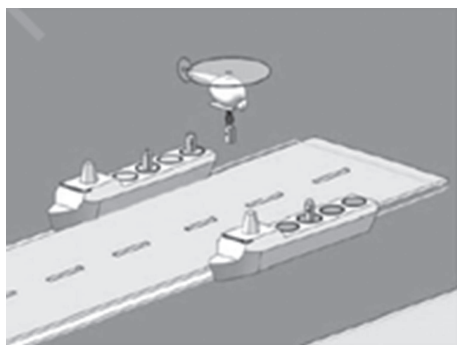


图 10 国际无人飞行器大奖赛任务示意图

Fig. 10 Task diagram of the international unmanned aerial vehicle grand prix

### 3 旋翼飞行机器人自主作业理论体系构建 (Construction of the autonomous operation theory system of the rotary-wing flight robot)

以提升旋翼飞行机器人在非结构环境中的自主作业能力为目标,本文尝试从建模、规划、控制、感知、实验验证5个方面建立旋翼飞行机器人自主作业理论体系.其理论框架包括:

- 1) 动力学建模及动力学特性分析;
- 2) 动态运动约束、力约束下的协调规划;
- 3) 非结构环境下的运动和作业控制;
- 4) 面向任务动态操作的环境感知;
- 5) 面向任务的实验系统构建与实验验证.

#### 3.1 动力学建模及动力学特性分析 (Dynamic modeling and dynamic property analysis)

旋翼飞行机器人的动力学复杂性主要体现在旋翼飞行器与多自由度机械臂相对运动所产生的耦合力/力矩,该耦合特性严重制约了旋翼飞行机器人所能达到的控制性能,而旋翼飞行器特有的动力学/运动学特性又进一步增加了这种耦合的不确定性和复杂性,为此需要首先对机械臂的动力学特性进行深入研究.

1) 耦合动力学建模与分析:分析旋翼飞行器和多自由度机械臂之间的耦合动力学特性,以及机械臂与作业环境接触产生的接触力/力矩对机械臂动力学模型参数和结构的影响,构建旋翼飞行机器人整体动力学模型,尤其要重点研究耦合动力学特性模型.

2) 基于在线估计的实时建模方法:由于控制系统设计严重依赖于动力学模型,动力学模型的精确程度直接决定了最终系统控制性能.旋翼飞行机器人旋翼部分空气动力学异常复杂,无法建立准确的数学模型来描述在风扰等外界扰动下动力学参数的变化;旋翼飞行器与机械臂耦合力/力矩与飞行状态和作业状态直接相关,加之作业过程中与作业环境存在接触,耦合力/力矩不确定性严重.针对机械臂与旋翼飞行器之间的耦合力/力矩以及空气动力学的精准建模与在线参数估计对控制系统设计就变得尤为重要.

#### 3.2 动态运动约束、力约束下的协调规划 (Coordinated planning under the dynamic motion constraint and the force constraint)

当旋翼飞行器与机械臂的相对剧烈运动使得旋翼飞行机器人超出其所承受的飞行包线范围时将会导致严重后果,这就要求二者之间的相对运动幅度必须控制在合理范围之内.但这种合理范围还与旋翼飞行机器人的运动模态紧密相关:自由飞行模态下旋翼飞行器与机械臂的协调运动规划为作业前期做系统构型和姿态准备;在接近作业目标时,由于旋翼飞行器、机械臂以及目标存在相对运动,需要针对目标随机运动过程进行动态规划;在与作业目标接触过程中需要研究旋翼飞行机器人的耦合协调规划<sup>[43]</sup>.

1) 自由飞行模式下的协调运动规划方法: 自由飞行模式下的运动规划问题主要研究在耦合作用下旋翼飞行机器人的安全运动轨迹优化生成方法.

2) 面向目标运动不确定的动态规划方法: 在接近作业目标时, 由于作业目标、机械臂以及旋翼飞行器均存在相对运动, 本研究主要针对目标随机运动过程进行旋翼飞行器与机械臂的动态协调规划, 以使臂的末端与目标处于可作业条件.

3) 接触飞行模式下的协调运动规划方法: 重点研究与作业目标接触作业时接触力和几何约束下的旋翼飞行机器人协调运动轨迹优化生成方法, 保证其在整个接触作业过程中的安全性.

### 3.3 非结构环境下的运动和作业控制(Motion and operating control under unstructured environment)

旋翼飞行机器人的控制难点在于旋翼飞行器与机械臂之间耦合特性的复杂性和相对运动的动态性, 这就需要研究能够处理动态耦合扰动的协调控制方法.

1) 耦合与不确定因素下的协调运动控制方法: 考虑旋翼飞行器与机械臂的内部不确定耦合动力学因素和外部不确定干扰因素的综合影响, 研究旋翼飞行机器人的稳定控制及协调跟踪控制方法.

2) 接触作业时的协调柔顺性控制方法: 研究接触作业模式下旋翼飞行机器人的柔顺控制方法, 提高旋翼飞行机器人对具有持续性外力或固定几何约束作业任务的适应能力, 保证其与外界环境接触过程中的安全性.

### 3.4 面向任务动态操作的环境感知(Environment perception of the task-oriented dynamic manipulation)

常规机器人的测量系统及作业目标固连于静态或准静态的平台, 相对位姿基本固定. 由于旋翼飞行器自身不稳定性以及空气扰动等因素, 作业目标、机械臂以及旋翼飞行器三者始终处于相对运动状态, 固连于旋翼飞行机器人的多测量系统相对位姿实时变化, 使得机械臂与作业目标相对位姿的预测、作业环境感知变得异常困难.

1) 作业目标相对位姿估计: 作业过程中由于机械臂与旋翼飞行器处于运动状态, 且机械臂还拥有独立的运动自由度, 测量系统相对位姿实时变化, 无法通过常规方法进行机械臂末端与作业目标相对位姿的测量, 需要多源传感器通过坐标系匹配及信息融合来准确估计和预测机械臂末端与目标相对位姿.

2) 作业环境三维重建: 操作过程需要在对作业目标相对位姿估计的基础上, 融合多源测量数据建立作业环境的三维信息, 得到三维环境约束与作业目标完整信息, 实现安全精准的作业.

### 3.5 面向任务的实验系统构建与实验验证(Construction of the task-oriented experimental system and the experimental verification)

以现有的旋翼飞行器为基础平台, 设计并实现旋翼飞行机器人实验样机. 通过地面模拟实验、飞行模拟实验、面向任务的作业实验等手段, 验证理论研究成果的有效性和实用性.

1) 旋翼飞行机器人地面实验系统构建与实验验证: 在地面构建实验装置, 将机械臂固定于摇摆台, 传感器分别安装于机械臂和摇摆台, 通过摇摆台模拟旋翼飞行器运动, 可以实现在地面模拟机械臂在动基座下的随动及主动控制, 开展建模与分析、动态环境感知、控制与规划方法研究和验证工作.

2) 旋翼飞行机器人飞行实验系统构建与实验验证: 在完成机械臂地面实验验证的基础上, 集成构建可进行飞行实验验证的平台, 利用该平台初步开展目标的定位、回收、抓取等动作, 为面向任务的实验奠定基础.

3) 复杂环境中目标的采样与回收实验验证: 旋翼飞行机器人通过卫星及惯性定位系统自主飞行到达采样区域上方(自由飞行模式下的控制与规划方法), 逐渐接近采样点并确定采样目标(动态操作的环境感知方法), 在视觉等其他传感器配合下进行钻孔、取样及回收(接触模式下的控制与规划方法).

4) 特殊环境下目标的操作作业实验验证: 旋翼飞行机器人通过卫星及惯性定位系统自主飞行到达作业目标上方(自由飞行模式下的控制与规划方法), 逐渐接近作业区域并确定作业位置(动态操作的环境感知方法), 在视觉等其他传感器配合下进行作业目标识别、抓取动作(接触模式下的控制与规划方法).

## 4 结论(Conclusions)

综上所述, 在当前“利用主动作业机构扩展移动机器人系统功能”的大的研究趋势下, 对将旋翼飞行器与机械臂相结合的旋翼飞行机器人的研究存在广阔的应用前景. 由于旋翼飞行机器人的特殊运动机理使得旋翼飞行机器人的自主控制问题对控制理论提出新的挑战. 要使旋翼飞行机器人具备非结构环境自主作业能力, 必须要解决以下三方面科学问题:

1) 旋翼飞行器与机械臂耦合动力学特性建模与分析问题;

- 2) 面向任务作业的三维动态环境感知问题;  
3) 非结构作业环境不确定扰动作用下的协调控制问题.

### 参考文献(References):

- [1] LIANG B, XU Y, BERGERMAN M, et al. Dynamically equivalent manipulator for space manipulator system [C] // *Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Grenoble: IEEE, 1997: 2765 – 2770.
- [2] FROM P J, PETERSEN K Y, GRAVDAHL J T. Singularity-free dynamic equations of spacecraft-manipulator systems [J]. *Acta Astronautica*, 2011, 69(11/12): 1057 – 1065.
- [3] 刘亢, 尚红. 地震救援机器人在芦山7.0级地震中的应用 [J]. 城市与减灾, 2013, 5(5): 26 – 28.  
(LIU Kang, SHANG Hong. Application of earthquake rescue robot in Lushan Ms7.0 earthquake [J]. *City and Disaster Reduction*, 2013, 5(5): 26 – 28.)
- [4] 谭民, 王硕. 机器人技术研究进展 [J]. 自动化学报, 2013, 39(7): 963 – 972.  
(TAN Min, WANG Shuo. Research progress on robotics [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(7): 963 – 972.)
- [5] 谢涛, 刘锐, 胡秋红, 等. 基于无人机遥感技术的环境监测研究进展 [J]. 环境科技, 2013, 26(4): 55 – 60.  
(XIE Tao, LIU Rui, HU QiuHong, et al. A critical review on unmanned aerial vehicle remote sensing technology in the field of environmental monitoring [J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 26(4): 55 – 60.)
- [6] 王晓林. 美国海军海上补给装备发展趋势研究 [J]. 物流技术, 2007, 26(6): 127 – 128.  
(WANG Xiaolin. Research on the trend of replenishing equipment of US navy [J]. *Logistics Technology*, 2007, 26(6): 127 – 128.)
- [7] 林韩, 林朝辉, 汤明文, 等. 电力输电线路无人直升机巡视的应用 [J]. 华东电力, 2011, 39(10): 1657 – 1660.  
(LIN Han, LIN ZhaoHui, TANG Mingwen, et al. Application of unmanned helicopter patrol to power transmission line [J]. *East China Electric Power*, 2011, 39(10): 1657 – 1660.)
- [8] 陈国栋, 贾培发, 刘艳, 等. 微型飞行器的研究与发展 [J]. 机器人技术与应用, 2006, 37(2): 34 – 44.  
(CHEN Guodong, JIA Peifa, LIU Yan, et al. Study and development of micro air vehicle [J]. *Robot Technique and Application*, 2006, 37(2): 34 – 44.)
- [9] 陈向坚. 微型飞行器姿态的智能控制方法研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2012.  
(CHEN Xiangjian. *Intelligent control method research for attitude control of MAV* [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2012.)
- [10] 聂博文, 马宏绪, 王剑, 等. 微小型四旋翼飞行器的研究现状与关键技术 [J]. 电光与控制, 2007, 14(6): 113 – 117.  
(NIE Bowen, MA Hongxu, WANG Jian, et al. Study on actualities and critical technologies of micro/mini quadrotor [J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, 14(6): 113 – 117.)
- [11] KHATOON S, SHAHID M, IBRAHEEM, et al. Dynamic modeling and stabilization of quadrotor using PID controller [C] // *2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics*. New Delhi: IEEE, 2014: 746 – 750.
- [12] 李俊, 李运堂. 四旋翼飞行器的动力学建模及PID控制 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(1): 114 – 117.  
(LI Jun, LI Yuntang. Modeling and PID control for a quadrotor [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*, 2012, 31(1): 114 – 117.)
- [13] LUCASSEN L R, STERK F J. Dynamic stability analysis of a hovering helicopter with a sliding load [J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 1965, 10(2): 6 – 12.
- [14] DUKES T A. Maneuvering heavy sling loads near hover, Part I: damping the pendulous motion [J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 1973, 18(2): 2 – 11.
- [15] DUKES T A. Maneuvering heavy sling loads near hover, Part II: some elementary maneuvers [J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 1973, 18(3): 17 – 22.
- [16] FUSATO D, GUGLIERI G, CELI R. Flight dynamics of an articulated rotor helicopter with an external slung load [J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 2001, 46(1): 3 – 13.
- [17] 王德荣, 桑雨生. 直升机外挂飞行中的飘摆问题 [J]. 飞行力学, 1996, 14(4): 78 – 83.  
(WANG Derong, SANG Yusheng. Lateral oscillation of helicopter with sling goods during flying [J]. *Flight Dynamics*, 1996, 14(4): 78 – 83.)
- [18] 郭广利, 高正, 孙传伟, 等. 直升机前飞吊挂飞行动力学响应分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(10): 1088 – 1091.  
(GUO Guangli, GAO Zheng, SUN Chuanwei, et al. Control response character of the rotorcraft with slung load in forward flight [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(10): 1088 – 1091.)
- [19] 孙传伟, 徐进. 带大载荷吊挂直升机悬停纵向操纵性分析 [J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(4): 421 – 426.  
(SUN Chuanwei, XU Jin. Logitudinal control characteristic analysis of heavy slung-load helicopter [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2005, 37(4): 421 – 426.)
- [20] 夏良. 武器外挂和发射对直升机稳定性及运动参数的影响分析 [J]. 飞行力学, 1990, 25(3): 33 – 41.  
(XIA Liang. Analysis the effect of carrying and launching weapon on the stability and motion parameter of helicopter [J]. *Flight Dynamics*, 1990, 25(3): 33 – 41.)
- [21] 张波, 祝小平, 周洲, 等. 输入有约束时的飞翼布局无人机姿态控制 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(6): 725 – 733.  
(ZHANG Bo, ZHU Xiaoping, ZHOU Zhou, et al. Attitude control for fly wing unmanned aerial vehicle with input constraints [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(6): 725 – 733.)
- [22] 易先军, 周敏, 谢亚奇. 四旋翼飞行器控制系统的设计与实现 [J]. 武汉工程大学学报, 2014, 36(11): 59 – 62.  
(YI Xianjun, ZHOU Min, XIE Yaqi. Design and implementation of quadrotor aircraft's control system [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2014, 36(11): 59 – 62.)
- [23] 朱玮. 基于视觉的四旋翼飞行器目标识别及跟踪 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.  
(ZHU Wei. *Quad-rotor aircraft target recognition and tracking based on vision* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.)
- [24] 路飞飞. 四旋翼直升机姿态控制系统的自适应容错控制算法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.  
(LU Feifei. *Research on adaptive fault-tolerant control design for a quad-rotor attitude system* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.)
- [25] 国倩倩. 微型四旋翼飞行器控制系统设计及控制方法研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2013.  
(GUO Qianqian. *Study on design and control method for mini-quadrotor UAV control system* [D]. Jilin: Jilin University, 2013.)
- [26] 宋自立. 四旋翼飞行器机器人增稳控制方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
(SONG Zili. *Research on stability augmentation control method for quadrotor flying robot* [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.)



- [27] SHURBEVSKI A, HIROSUE N, NAGAMOCHI H. Optimization techniques for robot path planning [J]. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2014, 231(12): 111 – 120.
- [28] OH S R, RYU J C, AGRAWAL S K. Dynamics and control of a helicopter carrying a payload using a cable-suspended robot [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2005, 128(5): 1113 – 1121.
- [29] LEITNER J, CALISE A, PRASAD J V R. Analysis of adaptive neural networks for helicopter flight control [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1997, 27(5): 973 – 979.
- [30] CALISE A J, RYSDYK R T. Nonlinear adaptive flight control using neural networks [J]. *IEEE Control System Magazine*, 1998, 18(6): 14 – 25.
- [31] JOHNSON E N, CALISE A J. *Pseudo-control hedging: a new method for adaptive control* [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2000.
- [32] 黄文明, 徐锦法, 高正. 直升机神经网络反馈线性化飞行控制 [J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(4): 351 – 354.  
(HUANG Wenming, XU Jinfa, GAO Zheng. Flight control of helicopter by feedback linearization based on neural networks [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2001, 33(4): 351 – 354.)
- [33] MOAKES P A, BEET S W. Adaptive control using radial basis function networks [C] // *International Conference on Control*. Coventry: IET, 1994, 2: 1453 – 1457.
- [34] HE Y, HAN J. Acceleration feedback enhanced  $H_\infty$  disturbance attenuation control for a class of nonlinear underactuated vehicle systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(5): 558 – 564.
- [35] NADER S. A nodal link perceptron network with applications to control of a nonholonomic system [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1995, 6(6): 1516 – 1523.
- [36] 丁希伦, 站强, 解玉文. 自由漂浮的空间机器人系统的动力学奇异特性分析及其运动规划 [J]. 航空学报, 2001, 5(22): 474 – 477.  
(DING Xilun, ZHAN Qiang, XIE Yuwen. Dynamic singularity analysis and motion planning of free-floating space robot systems [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2001, 5(22): 474 – 477.)
- [37] TORTOPIDIS I, PAPADOPOULOS E. Point-to-point planning: methodologies for underactuated space robots [C] // *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Orlando: IEEE, 2006: 3861 – 3866.
- [38] YOSHIDA K, KURAZUME R, UMETANI Y. Torque optimization control in space robots with a redundant arm [C] // *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS '91*. Osaka: IEEE, 1991, 3: 1647 – 1652.
- [39] PARLAKTUNA O, OZKAN M. Adaptive control of free-floating space robots in Cartesian coordinates [J]. *Advanced Robotics*, 2004, 18(9): 943 – 959.
- [40] KUNTZ N R, OH P Y. Towards autonomous cargo deployment and retrieval by an unmanned aerial vehicle using visual servoing [C] // *ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Brooklyn, New York: ASME, 2008(2): 841 – 849.
- [41] SPICA R, FRANCHI A, ORIOLO G, et al. Aerial grasping of a moving target with a quadrotor UAV [C] // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Vilamoura: IEEE, 2012: 65 – 78.
- [42] POUNDS P E I, DANIEL R B, DOLLAR A M. Grasping from the air: Hovering and capture load stability [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai: IEEE, 2011: 2491 – 2498.
- [43] 刘伟, 郑征, 蔡开元. 未知复杂环境中的无人机平滑飞行路径规划 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(11): 1403 – 1412.  
(LIU Wei, ZHENG Zheng, CAI Kaiyuan. Smooth path planning for unmanned aerial vehicles in unknown complex environments [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(11): 1403 – 1412.)

#### 作者简介:

**谭建豪** (1962–), 男, 教授, 硕士生导师, 目前研究方向为人工智能与机器人系统、模式识别与自然计算、数据挖掘与系统辨识等, E-mail: tanjianhao96@sina.com.cn;

**王耀南** (1957–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能控制理论与智能机器人系统、图像识别理论与机器视觉应用、先进制造装备智能化控制技术等, E-mail: yaonan@hnu.cn;

**王媛媛** (1991–), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为机器人环境感知与地图创建, E-mail: 1054634023@qq.com;

**张艺巍** (1990–), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为机器人路径规划与运动控制, E-mail: 925813290@qq.com;

**王楚** (1994–), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为旋翼式飞行机器人的飞行路径规划, E-mail: 258995297@qq.com;

**陈谢沅澧** (1992–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为面向任务的旋翼飞行机械臂动态操作控制, E-mail: 449305207@qq.com.