

微型无人直升机技术 研究现状与展望

□ 淳于江民 张珩
中科院力学研究所

[摘要] 本文介绍了微型无人直升机的系统结构,并以四种典型的微型无人直升机系统为例,对比和分析了微型无人直升机系统的具体实现。从机载闭环控制算法和人机交互两个方面阐述微型无人直升机技术的研究现状。在此基础上,提出了微型无人直升机研究中亟待解决的问题,最后从信息控制角度,就微型无人直升机系统技术进一步发展中应当着重开展研究的四个前沿性技术提出了具体建议。

[关键词] 微型无人直升机;发展现状;闭环控制;人机交互

[Abstract] This paper introduces the system structure of small-size unmanned helicopter. With four typical small-size unmanned helicopter systems presented here, the realization of the system is compared and analyzed. From the control algorithm on board and human-machine interface aspects, the present status of the technology of the system is explicated. On the basis of this, the existing problems are proposed. From the aspect of information and control, four specific suggestions about the frontier of the technology of small-size unmanned helicopter in the development are putting forward.

[Keyword] small-size unmanned helicopter; present status; close-loop control; human-machine interface

0. 引言

由于直升机较固定翼飞机而言,具有悬停等灵活、机动的飞行性能,因此大多数研究机构选用直升机作为微小型无人机的研究平台,此外,微型无人直升机还被广泛用作空中机器人研究平台。同时源于这项技术在控制等领域的挑战性,因此微型无人直升机受到越来越多政府和研究机构的重视。目前美国、德国、瑞典、加拿大等国家均展开了微型无人直升机的研究。其中美国主要是在 DARPA、NASA、ARL 等政府机构以及洛克马丁等一些相关厂商的资助下,由众多研究机构开展微型无人直升机的研究计划。卡耐基—梅隆大学微型无人直升机已于 1998 年夏完成了 NASA 资助的对加拿大北极圈的部分地区进行高精度的地图绘制的项目计划。反观国内无人机的研究则集中于大型无人侦察机并进而研究无人战斗机,而对于微型无人直升机的研究较少。基于以上背景,在对国内外微型无人直升机研

究的广泛调研基础之上,本文侧重于从信息和控制的角度对当前微型无人直升机系统结构、技术发展现状、存在的问题及其发展趋势做了综述。

1. 微型无人直升机系统结构

图 1 所示为微型无人直升机系统结构图,整个系统结构包括:微型无人直升机本体及其载荷系统;飞行控制系统;数据通信系统。无人直升机的性能在很大程度上取决于它的飞行控制系统设计,这些性能包括各种飞行性能(包括起飞着陆性能和作业飞行性能),飞行安全可靠,飞行可监控性,系统可操作性和可维护性,以及人机接口任务设置友好性等。微型无人直升机的飞行控制系统通常可分为遥控及遥控—自主复合型两种。遥控型无人直升机用于视距范围内由地面控制人员操纵飞行;遥控—自主复合型无人直升机一般都用于视距外由地面飞行控制人员监控下进行作业飞行。

表1 四种典型微型无人直升机的技术性能

	Stanford	Georgia	Rose-Hulman	IMCAS
飞行平台	无线遥控直升机; 5 马力双缸发动机, 配装力矩陀螺减小偏航, 载荷能力 11.25kg	Yamaha R-MAX, 自重 58kg; 载荷能力 30kg	无线遥控直升机, 型号不详	JR Ergo-60 型, 1.5 马力双缸发动机; 自重 15kg; 载荷能力 2kg
机载模块	2 个 GPS 接收机, 通过 DGPS 差分和地面辅助, 获得 12 个状态参数; 1 个转速计用于主翼反馈; 2 套视频彩色相机及发射机; 1 个 Pentium 486 处理板	1 个 DGPS 接收机; 1 个航向磁强计; 3 轴惯性姿态角速度测量单元; 1 套声纳+雷达高度计获取高度信息; 1 套相机; 1 个 PIIPC 处理板+无线网卡	1 个 DGPS 接收机; 1 个航向磁强计; 1 个主翼转速计; 1 个角速度传感器; 3 套加速度传感器; 1 套相机; 1 个 PIIPC 处理板+无线网卡	3 轴角速度磁传感器; 3 轴角速度和加速度惯性测量单元; 1 套彩色视频相机+大功率视频发射机; 1 块自行研发的多处理板; 1 个 GSM 制式 Modem
控制模块	内环: LQ 控制; 外环: 由地面产生期望输入	内环由惯性单元直接实现状态反馈控制; 外环通过地面 Kalman 滤波提供飞行信息; 附加一个 Neural 单元防止过激励行为	直接外环路 Fuzzy 伺服控制	内环: PI 控制; 外环: 由地面产生期望输入
数据链路	无线 Ethernet, 带宽 9600bps	11Mbps 无线 Ethernet 网	11Mbps 无线 Ethernet 网	通过地面 PSTN 电话网络和 GSM 制式移动网络, 可以实现全球范围的 P-TO-P 无线连接, 数据率为 9600bps
地面支持	2 台视频接收机; 1 台 486PC 计算机	具有 8 个 RS-232C 串行口的 PC 计算机, 含有视频处理板	1 个地面 PC 计算机; 2 个遥控发射机, 一个用于飞行伺服另一个用于紧急关闭发动机	1 个着陆场视频视频无线监视相机; 1 台含 2 道视频处理板+1 个 Modem 的接口计算机, 可以通过该台计算机实现移动操作支持, 同时还可嵌入到遥操作中心进行控制。
系统任务	自动盘旋, 自动着陆	无人操作飞行; 识别建筑物及其入口	预制航向点无人干预飞行	实现有人地面遥支持下的随意飞行

飞行控制系统的机上部分包括：三轴姿态稳定与控制系统，发动机转速稳定和升力控制系统，自主飞行控制和指挥系统，飞行轨迹和导航控制系统，起飞与精确着陆（舰）飞控系统，及飞行安全控制系统。飞行控制系统的地面部分包括：飞行操纵和指令系统，飞行监控及显示系统，飞行定位系统，飞行自动指令系统。机上、地面飞控系统通过无线数据通讯系统耦合为一个整体系统。下面就以Stanford大学、Georgia理工大学、Rose-Hulman理工学院和中国科学院力学研究所（IMCAS）四个微型无人直升机系统（具体性能见表1）为例，通过对各方面的性能比较和

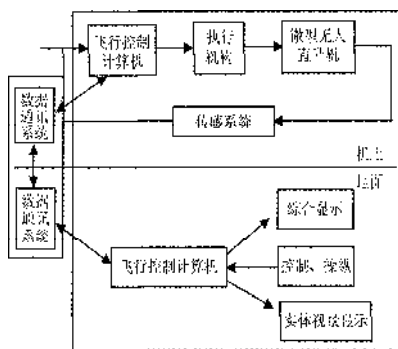


图1 微型无人直升机系统机械简图

分析，来说明微型无人直升机系统的具体实现。

2. 微型无人直升机技术的研究现状

微型无人直升机技术涉及隐身技术、新材料技术、微电子技术、计算机与信息处理、通信和网络、控制、辨识、估计、人工智能等多领域理论和技术方法。限于篇幅本文不能一一述及。鉴于微型无人直升机的性能在很大程度上取决于它的飞行控制系统设计，所以这里仅就机载闭环控制算法和人机交互两个方面来阐述当前微型无人直升机技术研究现状。

2.1 机载自闭环控制算法

微型无人直升机控制包括飞行轨迹控制和飞行

姿态控制。一般来说，其轨迹控制又是通过姿态控制来实现的。因此，姿态镇定是微型无人直升机飞行控制系统设计的核心问题。直升机是不稳定、时变、非线性、高阶和强耦合的多入多出控制系统。设计直升机飞控系统要考虑到飞行包线、飞行模态和通道等概念。不同飞行包线下，直升机本身特性不断变化。譬如，直升机悬停、前飞等状态的特性就有显著差异，因此很难建立统一的、精确的数学模型。此外，对于不同的飞行模态需要设计不同的控制器结构和调整增益参数。建模误差、周围外界因素引入的扰动以及传感器噪声都会影响控制品质，因此良好的直升机飞行控制器就必须具有鲁棒性和自适应性。直升机飞行状态最终就是通过操纵面通道控制来实现。对于直升机控制来说一般有4个操纵通道：俯仰通道、横滚通道、偏航通道、高度通道。因此解耦控制也在直升机飞行控制设计中扮演着十分重要的角色。总之，完整的直升机飞行控制器设计可以表述为：设计全飞行包线下能实现不同飞行模态的鲁棒自适应解耦控制器。目前已有的控制算法可分为两大类：基于模型的控制方法和非基于模型的控制方法。

2.1.1 基于模型控制

目前，非线性系统控制规律设计的理论和方法还不成熟。所以，一般是将直升机的非线性动力学模型在悬停状态或者慢速前飞状态下线性化，从而得到近似的线性化模型。基于得到的线性化模型利用线性控制理论设计控制器。考虑到算法的可靠性和计算复杂度等原因，实际的微型无人直升机控制系统大多采用经典PID控制。例如德克萨斯大学奥斯汀分校微型无人直升机系统，底层控制是由两个PID控制器组成，内环PID控制器使直升机保持期望姿态和高度，外环PID控制器

接收经度、纬度和高度输入，输出姿态期望值，作为内环的输入，从而完成对直升机的控制。此外，MIMO 理论也被应用，如瑞士联邦技术研究所设计了基于线性二次型控制的全状态反馈控制器。为进一步提高系统鲁棒性，在控制器的设计方面采用了和分析等理论设计控制器。如加州伯克利分校利用分析设计鲁棒线性多变量控制器。

2.1.2 非基于模型控制

非基于模型的控制方法主要包括遗传算法、模糊控制与神经网络控制。其优点是通过对飞行学习获得系统模型，从而避开了动力学建模的复杂问题，具有自适应能力。如南加州大学洛杉矶分校结合了4种控制方法：基于行为控制、模糊控制、神经网络控制、示例学习。采用基于行为的控制方式，模糊控制器实现底层控制，当控制性能不满足要求时，转由飞行员操作，并通过神经网络在线学习这些数据来调整模糊控制器的参数，以此提高系统的鲁棒性和自适应能力。佐治亚理工大学采用基于神经网络的自适应控制。其中内环用于控制姿态，外环用于飞行路线控制。Sugeno 等于 1995 年利用模糊控制设计控制器，结合专家知识和飞行数据来产生和调整模糊控制规则及其参数。Phillips 等于 1996 年结合遗传算法和模糊控制设计直升机的控制器，其中遗传算法用于产生模糊控制规则。

也有学者将基于模型和非基于模型的控制方法结合设计控制器。如加州伯克利分校结合分析理论、遗传算法调参的模糊控制以及非线性跟踪控制3种控制方法来设计控制器，并由高层飞行管理系统根据当前的飞行模态切换这3类控制器。

2.2 人机交互系统

相对于机载闭环控制系统而言，人机交互系统则可以看作是将人置于控制系统回路的一个遥操作大闭环控制系统。目前在微型无人直升机的人

机交互系统设计上有两种模式：1. 无人干预完成任务（强调无人自主飞行）2. 在线有人干预（强调人机结合完成复杂任务）。

3.2.1 无人干预

因为过于强调飞行的无人干预程度，因此大多数的研究机构致力于实现完全无人干预的飞行研究。根据地面控制中心和机载控制器在飞行过程中的任务分配情况不同，又可以细分为以下两种：

(1) 地面控制中心在直升机自主飞行中不承担控制运算以及输出控制量。这样飞行平台和地面控制中心一般就需要完成4项任务：

- a. 下传实时飞行参数
- b. 上传地面GPS接收器获取的位置信息，或者飞行计划航向点的位置信息
- c. 在线修改控制器的设定参数（例如PID参数）
- d. 显示飞行过程中传回的图像信息（一般有两种方式，用无线视频发射器下传图像信息，然后地面用无线视频接收机接收信息并显示，或者是通过无线以太网传输。）

(2) 地面控制中心完成部分的控制运算，并要向飞行平台上传控制输出量（这种做法主要是利用地面控制中心完成复杂的控制算法，来减轻机载控制器的运算量，也能减轻机载的负荷，当前的机载器处理器已经开始采用486甚至更高主频的微处理器。）相对于第一情况，在天地信息交互中增加了上传控制输出量。

2.2.2 有人干预

由于受到无人概念的局限，在设计无人机控制系统时偏向于完全无人干预的设计，但在飞行过程中地面控制人员获得了大量的视频和飞行参数等有用信息，完全可以通过设计良好的人机接口，构成人在回路的大闭环控制系统，那么就可以利用这些有用的飞行信息参与控制，以使系统更好的完成

特定的任务。以及完成单纯依靠无人自主飞行所不能实现的复杂任务。当然也可实现无人干预的飞行。中科院力学所微型无人直升机系统通过遥操作视频图像跟踪系统传回现场直升机视频信息,同时利用虚拟现实技术实现飞行姿态数据的可视化。操作人员根据上述信息操纵直升机飞行完成复杂任务。

此外无人系统为了安全原因目前都可以允许在紧急情况下切换到无线遥控器控制。有的系统会有两个遥控器和机载接收器,其中的一套作为冗余。此外还有的系统会有一个遥控器直接可以关闭直升机油门,进一步提高系统的安全性。

3. 微型无人直升机发展中亟待解决的问题

1) 飞行器的设计:目前开展微型无人直升机的研究都是基于商用的遥控模型直升机,根据系统需要进行改装。通过飞行器的设计可以研究和改善直升机的平衡特性、稳定性和操纵性,研制出适应不同飞行任务需要的不同型号微型无人直升机。

2) 高效电池的设计:满足机载电子设备对大容量、高能量密度、长寿命电池的需要

3) 电磁防护技术:使机载电子设备不受电磁干扰的影响。

4) 大范围、可靠的数据传输:满足人机超视距、快速、安全的信息交互

5) 面向无线传输的图像压缩算法:视频信息是无人机主要的下行信息,保证良好图像质量的高压缩率算法可以大大减小所需无线传输的带宽。

6) 动力学建模:直升机是一个多体系统,旋翼、机体、升力面等的运动耦合、惯性耦合、结构耦合和气动耦合,以及非定常、非线性特性,给直升机飞行动力学建模带来很多困难。控制系统的设计需求与直升机建模的复杂性密切相关。控制系统要求越高(频带越高,要求越高),对模型的精

度也越高。此外,建立的动力学模型还要适合于控制器的设计。

7) 多机的协调合作:研究多无人机协同编队飞行,建立信息共享平台,执行复杂任务。

8) 基于视觉的导航:视频信息是飞行过程获取的非常重要的外界信息,在动态的环境中,基于视觉的导航可以提高飞机自主飞行能力,增强系统安全性。

9) 无人机控制:微型无人直升机是非定常、强耦合、强非线性系统,因此需要研究有效的解耦、鲁棒、自适应控制算法。

10) 大时延遥操作:由于地面控制站和机载控制器之间通讯时延,因此需要研究大时延情况下,实现遥操作的平稳性和连续性。

4. 微型无人直升机技术发展展望

虽然许多国家或研究机构都将微型无人直升机视为战略性技术而投入巨大资源开展研发,但就目前的现状而言,其性能与人类的期望本身仍然存在着巨大的差距。许多关键技术仍然亟待突破和发展,如需要通过材料技术的发展来建造更轻、更强的本体结构,需要通过新的原理提供航时更长、容量更高的高密度能源,需要通过新的突破来装备具有更大推动比,更抗疲劳的高效发动机等技术。除此之外,从信息和控制角度作者建议应当着重开展以下4项前沿性关键技术研究。

4.1 状态测量与控制技术

这是机器人研究领域中的一个普适性内容。但对于无人直升机来说,它则显得更为关键。从需要测量的状态来看,最突出的要素是微型无人直升机飞行过程中的位置信息和姿态信息。由于无人机在某一项任务的飞行中,有可能从空旷的空间进入诸如隧道或房屋等室内环境,所以,简单地借助于GPS技术解决的可能性不大。惯性技

术对于这个问题的解决可能是一个途径。但由于微型化后发散性方面的制约,可能还须采取辅助的手段。其中磁测方式可能会有所帮助。在IMCAS系统中,就曾采用三轴的磁测技术获得了无人机的姿态角信息。但对于位置信息而言,目前还无法找到更有效的方法。或许,在任务区域附近通过布撒若干自身位置精准的时标发射器,构成局域GPS信息,有可能取得进展。

与状态测量相比,对无人机的控制也是一个很值得研究的问题。一方面无论怎样设计,无人机飞行中的12个状态变量都会呈现出强耦合,同时面临的干扰和期望状态的变化又都很大。这就要求机上的控制环路更快、适应性更强,从而也对这类特定非线性系统的有效算法提出挑战。

4.2 导航与制导技术

这是与前一个关键技术既有联系又有区别的研究方向。要使无人机可靠飞行并顺利执行任务,一般就需要在设计一个自动控制的内环系统的同时,增加一个能够直接介入的操作大回路。这对于导航来说必须要给出可以分别为无人机本体的机上处理器和人的直观感觉各自都容易理解的飞行信息,从而分别地适用于自动反馈的内环和供人决策的外环。在这个意义理解上,非参数化的状态信息对给人虚拟驾驶过程中导航更为便捷,例如视频图像等。但可惜的是,目前关于无人机的研究中还仅仅将视频信息用来提供任务目标的信息获取。所以,如果能够将这些视频信息进行适当处理,就完全可以提供出远优于由传感器所提供的导航数据。可以设想通过双目甚至更多的视频图像流的相关计算,将能够在为操作人员导航的同时实现制导和反馈控制的目的。当然这会同样带来实时算法和机上处理能力的
新问题。

4.3 多无人机协同编队飞行技术

多无人机协同编队飞行技术提出,是与目前的综合技术水平和它需要执行更具难度的使命紧密关联。它的脆弱性、高风险性和载荷能力的局限性都决定了随着应用的不断扩展和使用要求的不断提高,人们选择通过多个无人机协作来执行任务是一个必然的途径。借助于载人航空飞行的经验和空间飞行器的编队飞行理论,可以预想无人机实现编队的最基本形式。这既需要预先规划,也需要自主保安,同时还需要当意外情况发生时能够动态调整。所以,有关编队飞行的概念在认识上还有待进一步的深化,特别是相应的编队飞行的设计理论框架还远未建立。因此,开展这方面的研究将是一项具有深远的意义。

4.4 地面遥控操作的技术

一般来说,在无人机系统中,研究者都会尽最大的努力提高其自主性能,但到目前为止的大多实际飞行却都表明了人的在线介入的极端重要性。所以,遥控操作技术是无人机系统中不可缺少的组成部分。这其中,首要的问题就是人—无人机之间信息的透明性,增加决策支持信息的冗余和最大程度地减少人—机回路响应时延,同样是值得研究的关键要素,此外,具有多人共享的远程化、高可靠的地面支持系统将是一个主要的设计内容。特别需要指出的是,针对多人共享前提下的多无人机飞行的地面支持技术,将是一个非常具有前沿性的研究方向。

5. 结束语

微小型无人直升机适用于危险和单调的环境下工作。在军事和民用领域都具有广阔的应用前景。如今,它已成为倍受关注的重要研究方向。这种关注一方面源于应用需求的拉动;另一方面,源于这项技术的挑战性。随着相关技术的进步,必将大大推动它的跨越和发展。

参考文献 共 34 篇(略)