



罗琦¹ 王伟¹ 陆振宇¹ 姜海梅¹
张雨田¹ 苗国英¹ 夏俊荣¹ 王成刚¹

多旋翼无人机群自主探测 大气边界层气象要素的模式分析

摘要

深入研究大气边界层气象现象的发生、发展、消散机制,需要获取三维同步气象要素数据,而现有探测技术与手段难以提供。因此,提出利用多旋翼无人机群进行自主探测大气边界层气象要素的探测模式,并就探测模式的背景与意义、特点与优势、流程与可行性,以及需要进一步研究的相关科学问题进行了分析,认为多旋翼无人机群自主探测大气边界层气象要素的探测模式针对性、灵活性、机动性、可操作性强,并具有自主动态同步探测、自主智能追踪探测等功能。

关键词

多旋翼无人机;气象要素;自主协同探测;大气边界层

中图分类号 V249;P4

文献标志码 A

0 引言

大气边界层是指地球表面与自由大气之间,受下垫面影响最为直接的一层大气,其厚度一般为1~2 km,在地-气相互作用中起着“承上启下”的纽带作用。

从20世纪70年代美国率先开始研究气象无人机以来,澳大利亚、法国、中国等国家先后拥有了自主研制的气象无人机^[1],主要用于海洋、边远地区、战区和不利天气条件下的气象和环境侦查。由于此类无人机以远程监测和侦查为目的,故多采用燃油驱动的固定翼无人机或直升无人机。

进入21世纪以来,随着计算机、微电子、通信、信息、材料等科学技术的快速发展,直流驱动的小型多旋翼无人机发展迅速,不仅起降方便,还具有自主巡航、定点悬浮等功能,应用领域逐步扩大^[2]。由于该类无人机巡航速度慢、续航时间短,用单个多旋翼无人机进行气象探测,显然无法替代燃油驱动气象无人机的功能,但是若运用若干多旋翼无人机组成的机群对大气边界层的特定区域进行特定项目的探测,则具有燃油驱动无人机,包括现有的气象探测技术与手段无法比拟的优势。然而,至今国内外均未开展这种形式的气象探测业务,亦未见相关研究成果。

为此,本文提出并分析这种新的探测模式:探测范围是大气边界层内某特定区域;探测工具是由若干多旋翼无人机组成的机群;探测基本方式是使机群分布在大气边界层指定区域的空间网络节点上,以获取空间网络各节点(包括临近点)的温度、湿度、气压、风速风向等气象要素数据(图1)。

1 探测模式需求分析

2013年,我国中东部地区平均霾日数为1961年以来最多的一年。其中,北京、天津、江苏、安徽、浙江、河南、河北等地区,霾日数超过100 d^[3]。全国各地持续的严重灰霾污染问题成为今年全国两会备受关注的关键议题之一。在已经公布的31个省份2014年政府工作报告中,有29个省份(仅宁夏和西藏没有明确)提出治理大气污染,北京市首次将气溶胶细粒子(PM_{2.5})年均浓度的下降指标写入政府工作

收稿日期 2014-02-18

资助项目 国家自然科学基金(61174077)

作者简介

罗琦,男,博士,教授,研究方向为随机系统分析。l-q@nuist.edu.cn

¹ 南京信息工程大学 信息与控制学院,南京, 210044

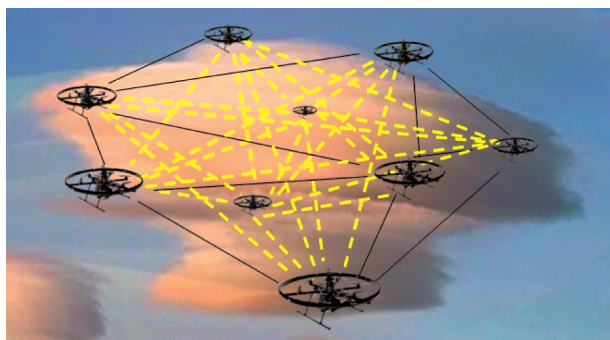


图1 多旋翼无人机群空间网络探测结构
Fig.1 Spatial network detection structure of the multi-rotor Unmanned Aerial Vehicles

报告.霾污染的综合治理已迫在眉睫.

20世纪末期,文献[4-5]就明确指出大气边界层的气象条件对霾的形成、分布、维持与消散起着决定作用.

由于实际地表下垫面的非均匀性(特别是城市化速度加快,高楼林立)和大气边界层过程的多尺度性及湍流运动的复杂性,使得边界层内的气象要素和污染物浓度分布通常表现为明显的非均匀性.因此对大气边界层气象要素实施空间网络化同步观测,对于充分认识霾污染的综合特征,为预防、治理霾污染提供最优决策依据具有重要的科学意义.

但是,目前这方面的观测实验和研究工作主要基于多点同步的地基观测辅以风廓线雷达、系留气艇探空等观测手段^[6-7],无法就边界层内某一特定的气象现象进行针对性观测,一些重要的非均匀边界层气象现象(如城市霾污染三维结构特征、城市热岛环流、城市冠层悬浮逆温和急流、热内边界层、海陆风等)的物理过程、结构和图像尚不清晰.为了研究较大尺度的非均匀性(下垫面的热力、动力性质的不均匀)对局地气候环境影响,综合多种观测手段的空间网络立体同步观测势在必行.

实际上,大气边界层气象要素空间网络化同步观测的实现,对于大气边界层动力、热力结构、城市污染物浓度分布的多尺度三维结构、局地突发性大气污染应急及评估、城市群多尺度热岛强迫环流、海陆环流、数值模式中边界层过程参数化等研究与应用均有着深远的理论意义与广阔的应用前景.

2 探测模式优势分析

本文根据大气边界层气象研究对气象要素数据的需求,在充分利用多旋翼无人机自主巡航、定点悬

浮性能的基础上,结合可研发出的协同探测、追踪探测、自主避障等功能,初步设计了多旋翼无人机群自主探测大气边界层气象要素业务流程(如图2所示),随着研究与试验的深入,将逐步完善.

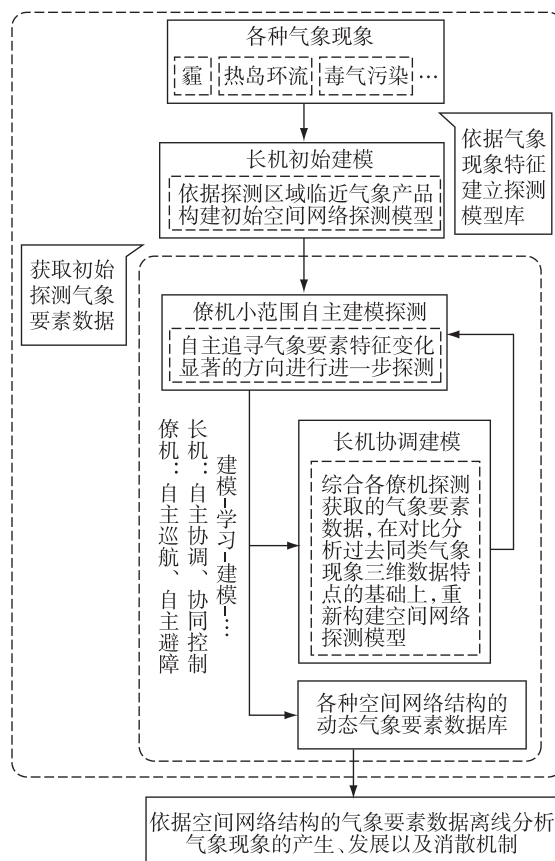


图2 多旋翼无人机自主探测大气边界层气象要素模式流程
Fig.2 Flow chart for autonomously detecting the meteorological elements of atmospheric boundary layer by the multi-rotor Unmanned Aerial Vehicles

从图2可以看出,该探测模式主要特点是观测的针对性强、具有智能追踪探测和空间网络结构的同步观测等功能.目前的探测技术与手段通常是单点、单线观测(铁塔观测是点测,系留气艇、风廓线雷达等是垂直向线测,无人遥测飞机是横向线测),无法获取完整的三维同步的气象要素数据,难以充分满足当前大气边界层理论研究与业务应用的需求.

如果运用多旋翼无人机群对大气边界层气象要素进行协同探测,不但可以增加局地气象现象平面与空间气象要素数据密度,还可以依据目标探测对象(如城市热岛的三维结构)的气象要素特征不断调整机群空间网络结构进行协同探测与追踪探

测,获取不同空间位置的气象要素数据,是一种动态的空间网络同步气象要素探测理念.显然,这一探测技术与方式是现有气象探测技术与手段的重要补充.

3 探测模式可行性分析

近年来,多旋翼无人机技术发展迅速,已经在灾后救援、交通运输、城市管理、精细农业等领域投入使用^[8-14].根据大气边界层的高度范围与气象要素的探测需求,具有以下特点与功能的多旋翼无人机均满足所述探测要求.

1) 机型特征:翼展 $<1.5\text{ m}$,重量 $6\sim 12\text{ kg}$,有效载荷 $>3\text{ kg}$.

2) 动态性能:巡航速度 $0\sim 3\text{ m/s}$ (直流驱动即可),续航时长 $>1\text{ h}$,飞行高度(离地面) $\geq 3\text{ km}$,可定点悬停,稳定性能好(复位能力强),定位误差经度方向 $<2\text{ m}$ 、纬度方向 $<2\text{ m}$ 、海拔高度 $<5\text{ m}$,自主起飞,自主定点降落.

3) 搭载设备:自带计算机(CPU $>2.0\text{ G}$,内存 $>4\text{ M}$,内嵌实时系统)、GPS(经纬度测量误差 $<\pm 1.5\text{ m}$,高度 $<\pm 5\text{ m}$,更新频率 $>4\text{ Hz}$)、激光测距扫描仪(更新频率 $>100\text{ Hz}$,可测距离 $>30\text{ m}$)、相机、气象传感器(风、温、湿、压等)、无线通信设备(有效距离 $>5\text{ km}$).

4) 系统性能:自主性、协调性、灵活性、容错性.

例如,本文作者之一王伟教授,从2005年开始研究多旋翼无人机,2012年创办了“南京傲翼伟滕自动化科技有限公司”,最新研制的Awing-LA型六旋翼无人机(图3)具有定点悬浮、稳定性能好(复位能力强)、自主巡航、自主定点起降、容错性等功能.



图3 Awing-LA型六旋翼无人机

Fig. 3 The six-rotor Unmanned Aerial Vehicle of Model Awing-LA

关于无人机群的编队控制、任务分配、路径规划、通信延迟、空中避障等已有许多相关研究成

果^[15-30].研究方法包括PID控制、神经网络控制、自适应控制、模糊控制等^[31-43].

4 探测模式挑战性问题

多旋翼无人机虽然有成本低、飞行灵活、空中定点悬停、起降方便等特点,但实施多旋翼无人机群自主探测大气边界层气象要素模式,还是面临如下基本问题:探测数据的质量控制、合理减轻机载负荷、机群自主协同作业以及探测平台的开发等.

1963年,美国气象学家洛仑兹^[44]发表了“确定性的非周期流”一文,通过“蝴蝶效应”说明了初始气象数据的质量是提高数值预报准确性的重要因素.因此,实施多旋翼无人机群自主探测大气边界层气象要素业务,对其探测数据质量的控制至关重要.而使用多旋翼无人机探测气象要素时,影响探测数据质量的关键环节有4个:

1) 空间网络探测结构是否科学,关系到所获空间网络各节点气象要素数据的有效率;

2) 传感器与定位仪自身的精度误差,直接造成探测数据误差;

3) 多旋翼无人机处于巡航或者定点悬停状态时是否稳定,关系到数据的精确度;

4) 多旋翼无人机电机运转形成的高频噪声,影响传感器探测数据的精度.

减轻机载负荷无非是尽可能选取质量轻的机载设备,因此,需要研究如何辅以不增加质量的技术与方法,弥补机载设备性能上的不足.比如,不能选取精度很高的GPS,这就需要研究如何控制探测数据质量问题;又如,利用3D成像实现空中避障技术很成熟,但是,设备重,计算量大,所以,需要研究利用2D扫描辅以科学算法实现空中有效避障.

此外,机群自主协同作业无疑是对大气边界层实施空间网络同步动态观测的关键的基本保障.探测平台的开发显然是必要的.

结合前述对大气边界层实施空间网络同步动态观测的需求,实施多旋翼无人机群自主探测大气边界层气象要素业务,涉及科学问题包括:

1) 如何构建空间网络结构的探测模型,使得所获三维气象要素数据的结构更科学,更有应用价值;

2) 如何实行自主协调控制,保证在无人操作的前提下,顺利完成预定探测任务;

3) 如何利用2D扫描地图复原3D环境,使多旋翼无人机在自主巡航过程中能有效避障;

4) 如何增强多旋翼无人机的抗干扰能力,提高探测数据质量;

5) 多旋翼无人机群自主探测大气边界层气象要素平台需具有哪些功能,方可保证探测试验、运行的科学性与安全性.

图4描述了多旋翼无人机群自主探测过程中挑战性问题产生的环节.

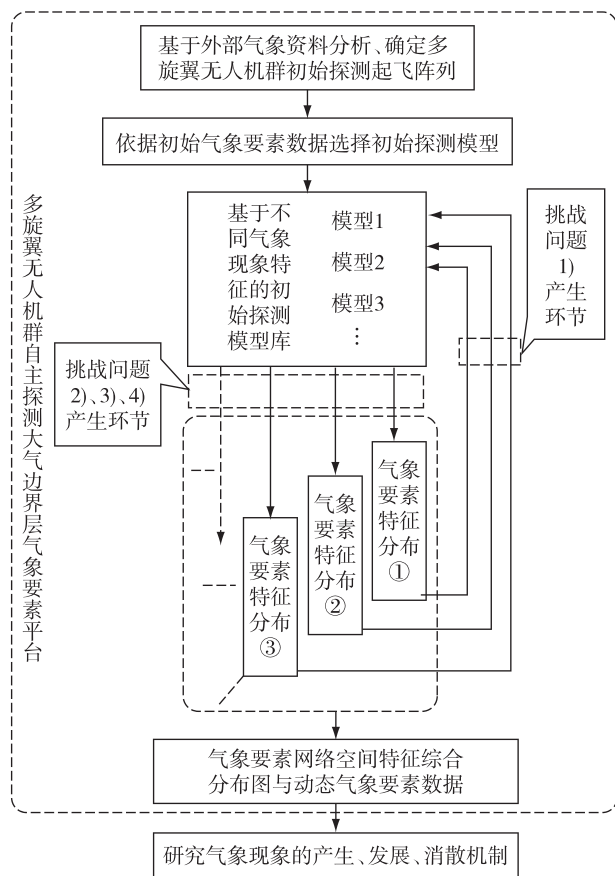


图4 多旋翼无人机自主探测大气边界层气象要素模式研究

Fig. 4 Challenge and related research approach on the detection mode of autonomously detecting the meteorological elements of atmospheric boundary layer by the multi-rotor Unmanned Aerial Vehicles

大气边界层气象现象种类繁多,且具有多尺度、非线性、非均匀性以及特征边界模糊等特性,给空间网络探测结构模型的构建与学习带来困难.它既不属于基于图像的建模,也不属于基于动态特性的建模,因此,对应的传统方法无法实现.所以,如何针对不同气象现象构建不同的空间网络探测模型,并能通过学习,不断优化探测模型是拟解决的关键问题之一.对应的研究内容包括:

1) 基于大气边界层气象现象基本特征的多旋

翼无人机群初始探测空间网络结构的设定方法;

2) 多旋翼无人机群探测气象要素数据(包括经纬度、海拔高度)的质量控制;

3) 基于初始气象要素数据的空间网络探测模型构建;

4) 基于气象要素观测数据在线自主学习并自主协同调整空间网络探测结构.

由于直流驱动的旋翼无人机质量轻、体积小,且巡航或者定点悬停时不能变更形体结构,所以不宜通过增强其鲁棒性与自适应性以抗拒干扰,必须另辟蹊径.鉴于“随机干扰”对镇定动态系统具有积极作用,故拟研究如何利用干扰采用软恢复方式使旋翼无人机保持稳定(短时间复位能力).随机镇定理论表明随机干扰不仅可以使稳定的系统更稳定,还可以使不稳定系统变成稳定,类似于以毒攻毒.但如何利用随机镇定理论设计随机干扰器来增强多旋翼无人机的稳定性却无据可寻.随机干扰器的设计方法及技巧自然是拟研究的关键问题之一.

大气边界层内某些气象现象呈现出随时空动态复杂变化的特征(如夜间低空急流),为了清晰认识其在不同区域出现的位置、尺度、强度等特征,需要对其实施追踪探测获取相应的空间网络化气象要素动态数据.这也是研究难点之一.研究内容包括:

1) 多旋翼无人机群中长机与僚机的协调控制方案与原则;

2) 无线通信协议;

3) 基于多元数据融合的机群空间网络结构协调与航迹优化;

4) 自主协同进行追踪探测,并保持一致性.

多旋翼无人机在巡航过程中,可能遇到的障碍物既有静态式,也有动态式.其中,静态障碍物主要源自下垫面,动态障碍物包括其他多旋翼无人机以及多旋翼无人机群以外的不明飞行器.因此,针对不同的障碍物类型,需要研究如何有效避障并自主恢复到原定巡航路径上.3D地图构建是解决无人机自主飞行、实时路径规划、未知区域探索、自主避障等系列问题的基础,但3D激光测距扫描仪设备重,计算量大,耗能高,不适宜多旋翼无人机使用.因此,如何利用2D激光测距扫描仪获取2D地图辅以先进算法实现3D地图的实时构建也是拟研究的关键问题之一.

关于多旋翼无人机群自主探测大气边界层气象要素平台开发,包括长机的协同、容错控制,僚机的

数据感知、自主定位、自主巡航、自主避障、自主定点降落,以及多旋翼无人机群探测大气边界层地面实时监控等模块的分析与集成.虽然平台开发中系统分析尤为关键,但由于机载计算机容量有限,实时气象要素数据相对较大,因此,如何科学关联、融合各个模块,使系统具有高度自主性、协调性、灵活性、容错性等性能以及地面实时监控功能,是一个复杂的系统工程,自然也是拟研究的关键问题之一.

5 挑战性问题研究思路

多旋翼无人机群自主探测大气边界层气象要素是一个复杂的系统工程,因此,需要运用系统论的思想与方法,对相关理论与技术进行研究.

1) 关于建模与学习的研究,可以依据大气边界层动力结构、热力结构理论,在分析气象现象基本特征的基础上,依据体现其特征的主要气象要素(或各气象要素的加权融合)构建空间网络探测模型,并在建立气象要素梯度场的基础上,运用基于矢量的迭代学习方法,不断完善空间网络探测结构.

2) 关于自主追踪的研究,以追踪风速为例,首先根据多旋翼无人机机型结构与大小,通过实验取得多旋翼无人机处于空中悬浮状态时,风速与多旋翼无人机被动前进速度的关系曲线,再综合实时探测的风速、风向以及多旋翼无人机的实时经纬度、海拔高度构建向量场,最后运用基于矢量的迭代学习方法,计算多旋翼无人机应具备的速度与飞行方向,实现自主追踪探测.

3) 关于自主空间避障的研究,可考虑采用激光测距扫描仪,结合多旋翼无人机及时定位与地图构建(SLAM)算法,实时对周边环境进行分析判断,从而检测出可能对飞行产生阻碍的物体,以便重新规划多旋翼无人机的飞行轨迹,实现空间避障.可参考的使用方法有人工势场法、数学规划法以及基于进化计算的避障方法等^[45-53].

4) 基于2D激光扫描所获得的2D特征信息,加入高度信息即可构建出每个高度平面的2D地图.在此基础上,融合Octomap和HectorSLAM方法即可实现3D地图实时构建与无人机的自我定位.图5是对应的SLAM算法流程.

5) 关于随机干扰器的设计,可以通过实验检测出多旋翼无人机受扰动大小与振动幅频特性的关系,再依据随机镇定理论^[54-59]计算确定随机干扰器的干扰强度,用以抵消或减轻低频振动等随机干扰

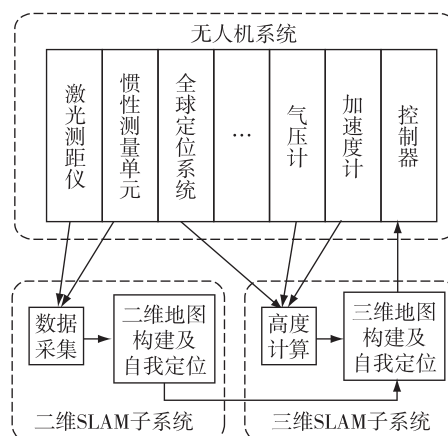


图5 SLAM 算法流程

Fig. 5 Flow chart of algorithm SLAM

对多旋翼无人机稳定性的影响.

6 探测模式系统分析

多旋翼无人机群自主探测大气边界层气象要素业务平台结构如图6所示.

7 总结

本文就多旋翼无人机群自主探测大气边界层气象要素模式进行了分析,提出了具有空间网络结构的动态探测理念,并赋予气象要素数据质量控制的新含义.同时指出,为实现该探测模式,还需要在分析大气边界层气象现象特征的基础上,研究空间网络探测结构模型的构建与学习方法;建立基于空间网络结构的分层自主控制理论,实现基于空间网络探测结构的航迹优化与协同控制;研究基于气象要素梯度方向场的迭代学习方法,实现多旋翼无人机自主追踪梯度方向的探测技术;采用扩展卡尔曼滤波和粒子滤波算法,完成基于2D分层图像的3D环境复原,实现多旋翼无人机空中有效避障功能;设计基于随机镇定理论的随机干扰器,增强多旋翼无人机巡航与定点悬浮的稳定性,以获取更高质量的气象要素数据.

参考文献

References

- [1] 沈怀荣,邵琼玲,王盛军,等.无人机气象探测技术[M].北京:清华大学出版社,2010
SHEN Huairong, SHAO Qiongling, WANG Shengjun, et al. UAV meteorological detection technology[M]. Beijing:

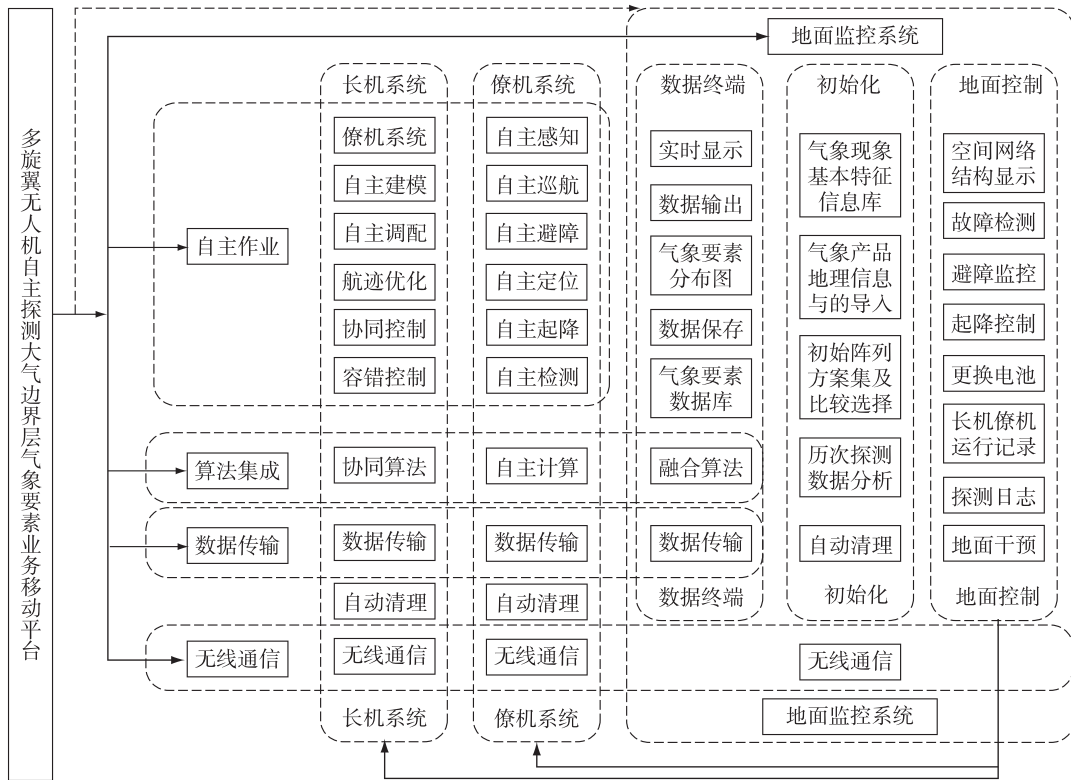


图 6 多旋翼无人机群自主探测大气边界层气象要素业务平台结构

Fig. 6 Platform structure of autonomously detecting the meteorological elements of atmospheric boundary layer by the multi-rotor Unmanned Aerial Vehicles

Tsinghua University Press, 2010

[2] Nonami K, Kartidjo M, Yoon K J, et al. Autonomous control systems and vehicles: Intelligent unmanned systems[M]. Japan: Springer Japan, 2013

[3] 中国气象局, 国家气候委员会. 2013 中国气候公报 [M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2014
China Meteorological Administration, The National Climate Committee. China's climate communique 2013 [M]. Beijing: China Financial & Economic Publishing House, 2014

[4] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island[J]. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 1982, 108(455): 1-24

[5] 周淑珍, 束炯. 城市气候学 [M]. 北京: 气象出版社, 1994
ZHOU Shuzhen, SHU Jiong. Urban climatology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1994

[6] Sun Y, Song T, Tang G Q, et al. The vertical distribution of PM_{2.5} and boundary-layer structure during summer haze in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2013, 74: 413-421

[7] 许健民, 杨军, 张志清, 等. 我国气象卫星的发展与应用[J]. 气象, 2010, 36(7): 94-100
XU Jianmin, YANG Jun, ZHANG Zhiqing, et al. Chinese meteorological satellites, achievements and application [J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(7): 94-100

[8] 杨成顺, 杨忠, 葛乐, 等. 基于多旋翼无人机的输电线路智能巡检系统 [J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2013, 27(4): 358-362
YANG Chengshun, YANG Zhong, GE Le, et al. Transmission line intelligent inspection system based on multi-rotor unmanned aerial vehicle [J]. Journal of University of Jinan: Science and Technology, 2013, 27(4): 358-362

[9] Wang L L, Zhou W P, Zhao S L. Application of mini-UAV in emergency rescue of major accidents of hazardous chemicals [C] // 2013 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2013), Atlantis Press, 2013: 152-155

[10] Baiocchil V, Dominici D, Mornnilel M. Unmanned aerial vehicle for post seismic and other hazard scenarios [J]. Safety and Security Engineering V, 2013, 134: 113-122

[11] Yakimenko O A, Slegers N J, Bourakov E A, et al. Precise autonomous aerial payload delivery system integrated with UAV and UGV [C] // AIAC14: Fourteenth Australian Aeronautical Conference, 2011: 49-57

[12] Kanistras K, Martins G, Rutherford M J, et al. A survey of unmanned aerial vehicles (UAVs) for traffic monitoring [C] // 2013 IEEE International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013: 221-234

[13] Liu X F, Gao L M, Guang Z W, et al. A UAV allocation method for traffic surveillance in sparse road network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: English Edition, 2013, 7(2): 81-87

[14] Tokekar P, Hook J V, Mulla D, et al. Sensor planning for

- a symbiotic UAV and UGV system for precision agriculture [C] // 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013:5321-5326
- [15] 沈林成,牛轶峰,朱华勇.多无人机自主协同控制理论与方法[M].北京:国防工业出版社,2013
SHEN Lincheng, NIU Yifeng, ZHU Huayong. Theories and methods of autonomous cooperative control for multiple UAVs [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013
- [16] Tal Shima, Steven Rasmussen. 无人机协同决策与控制:面临的挑战与实践应用[M].刘忠,彭鹏飞,陈伟强,等译.北京:国防工业出版社,2012
Tal Shima, Steven Rasmussen. UAV cooperative decision and control challenges and practical approaches [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012
- [17] 蔡国伟,陈本美,李崇兴,等.无人驾驶旋翼飞行器系统[M].北京:清华大学出版社,2012
CAI Guowei, CHEN Benmei, LI Chongxing, et al. Unmanned rotorcraft system [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012
- [18] <http://acl.mit.edu/>
- [19] Jackson K F. Development and evaluation of a collision avoidance system for supervisory control of a micro aerial vehicle [D]. Cambridge, MA: Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 2012
- [20] <http://www.vision4uav.com/>
- [21] Rodríguez-Canosa G R, Thomas S, del Cerro J, et al. A real-time method to detect and track moving objects (DATMO) from unmanned aerial vehicles (UAVs) using a single camera [J]. Remote Sensing, 2012, 4 (4) : 1090-1111
- [22] Kim J W, Shim D H, Morrison J R. Tablet PC-based visual target following system for quadrotors [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 74 (1/2) : 85-95
- [23] <http://mec2.tm.chiba-u.jp/uav/main/>
- [24] Abas M F B, Pebrianti D, Ali S A M, et al. Circular leader-follower formation control of quad-rotor aerial vehicles [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2013, 25 (1) : 60-71
- [25] Escareño J, Salazar S, Romero H, et al. Trajectory control of a quadrotor subject to 2D wind disturbances [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, 70 (1/2/3/4) : 51-63
- [26] Mellinger D, Shomin M, Michael N, et al. Cooperative grasping and transport using multiple quadrotors [M] // Distributed Autonomous Robotic Systems. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 545-558
- [27] <http://grvc.us.es/en/>
- [28] Suárez A, Heredia G, Ollero A. Analysis of perturbations in trajectory control using visual estimation in multiple quadrotor systems [C] // ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference, 2014: 115-129
- [29] 姚敏,王绪芝,赵敏.多旋翼无人机群协同作战任务分配方法研究 [J].电子科技大学学报, 2013, 42 (5) : 723-727
YAO Min, WANG Xuzhi, ZHAO Min. Cooperative combat task assignment optimization design for unmanned aerial vehicles cluster [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2013, 42 (5) : 723-727
- [30] 李远.多 UAV 协同任务资源分配与编队轨迹优化方法研究 [D].长沙:国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2011
LI Yuan. Research on resources allocation and formation trajectories optimization for multiple UAVs cooperation mission [D]. Changsha: School of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2011
- [31] Raffo G V, Ortega M G, Rubio F R. Robust nonlinear control for path tracking of a Quad-rotor helicopter [J]. Asian Journal of Control, 2014, early view
- [32] Pounds P E I, Bersak D R, Dollar A M. Stability of small-scale UAV helicopters and quadrotors with added payload mass under PID control [J]. Autonomous Robots, 2012, 33 (1/2) : 129-142
- [33] Rinaldi F, Chiesa S, Quagliotti F. Linear quadratic control for quadrotors UAVs dynamics and formation flight [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, 70 (1/2/3/4) : 203-220
- [34] Rinaldi F, Gargioli A, Quagliotti F. PID and LQ regulation of a multirotor attitude: Mathematical modelling, simulations and experimental results [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 73 (1/2/3/4) : 33-50
- [35] Alexis K, Nikolakopoulos G, Tzes A. On trajectory tracking model predictive control of an unmanned quadrotor helicopter subject to aerodynamic disturbances [J]. Asian Journal of Control, 2014, 16 (1) : 209-224
- [36] Lee D J, Ha C S, Zuo Z Y. Backstepping control of quadrotor-type UAVs and its application to teleoperation over the internet [M] // Intelligent Autonomous Systems 12. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013, 194: 217-225
- [37] Lee T, Leok M, McClamroch N H. Nonlinear robust tracking control of a quadrotor UAV on SE (3) [J]. Asian Journal of Control, 2013, 15 (2) : 391-408
- [38] Zheng E H, Xiong J J. Quad-rotor unmanned helicopter control via novel robust terminal sliding mode control and under-actuated system sliding mode controller [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics (In press)
- [39] Gonzalez I, Salazar S, Lozano R. Chattering-free sliding mode altitude control for a quad-rotor aircraft: Real-time application [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 73 (1/2/3/4) : 137-155
- [40] Chowdhary G, Wu T B, Cutler M, et al. Rapid transfer of controllers between UAVs using learning-based adaptive control [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2013: 5409-5416
- [41] Abbeel P, Coates A, Ng A Y. Autonomous helicopter aerobatics through apprenticeship learning [J]. The International Journal of Robotics Research, 2010, 29 (13) : 1608-1639
- [42] 左宗玉.四旋翼无人飞行器自适应轨迹跟踪控制 [C] // 烟台:第 30 届中国控制会议, 2011: 2435-2439
ZUO Zongyu. Adaptive trajectory tracking control of a

- quadrotor unmanned aircraft [C] // Yantai: Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, 2011: 2435-2439
- [43] 宿敬亚,樊鹏辉,蔡开元.四旋翼飞行器的非线性 PID 姿态控制 [J].北京航空航天大学学报, 2011, 37(9): 1054-1058
 SU Jingya, FAN Penghui, CAI Kaiyuan. Attitude control of quadrotor aircraft via nonlinear PID [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(9): 1054-1058
- [44] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow [J]. J Atmos Sci, 1963, 20(2): 130-141
- [45] Myeong H, Hong S. Method used by robot for simultaneous localization and map-building [P]. US 20060041331 A1
- [46] Steckel J, Peremans H. BatSLAM: Simultaneous localization and mapping using biomimetic sonar [J]. PLoS ONE, 2013, 8(1): e54076
- [47] Oh S, Hahn M, Kim J. Simultaneous localization and mapping for mobile robots in dynamic environments [C] // 2013 IEEE International Conference on Information Science and Applications (ICISA), 2013: 1-4
- [48] Yu H L, Beard R W. Vision-based local-level frame mapping and planning in spherical coordinates for miniature air vehicles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(3): 695-703
- [49] Forster C, Lynen S, Kneip L, et al. Collaborative monocular SLAM with multiple micro aerial vehicles [C] // 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013: 3962-3970
- [50] Shao G, Wan L, Shen X D. Hierarchical map building based UKF-SLAM approach for AUV [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 437: 793-797
- [51] Wang C L, Wang T M, Liang J H, et al. Bearing-only visual SLAM for small unmanned aerial vehicles in GPS-denied environments [J]. International Journal of Automation and Computing, 2013, 10(5): 387-396
- [52] Scaramuzza D, Achtelik M C, Doitsidis L, et al. Vision-controlled micro flying robots: From system design to autonomous navigation and mapping in GPS-denied environments [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2013: 1-10
- [53] Wang X B, Song C, Zhao G R, et al. Obstacles avoidance for UAV SLAM based on improved artificial potential field [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 241/242/243/244: 1118-1121
- [54] Hasminskii R Z. Stochastic stability of differential equations [M] // Sijthoff and Noordhoff. Mechanics: An analysis, Alphen/d Rgd, 1981
- [55] Arnold L, Crauel H, Wihstutz V. Stabilization of linear systems by noise [J]. SIAM J Control Optim, 1983, 21(3): 451-461
- [56] Mao X R. Stochastic stabilization and destabilization [J]. Systems Control Lett, 1994, 23(4): 279-290
- [57] Appleby J A D, Mao Xuerong. Stochastic stabilisation of functional differential equations [J]. Systems & Control Letters, 2005, 54(11): 1069-1081
- [58] Mao X R, Yin G G, Yuan C G. Stabilization and destabilization of hybrid systems of stochastic differential equations [J]. Automatica, 2007, 43(2): 264-273
- [59] Deng F Q, Luo Q, Mao X R. Stochastic stabilization of hybrid differential equations [J]. Automatica, 2012, 48(9): 2321-2328

Analysis on the detection mode of autonomously detecting the meteorological elements of atmospheric boundary layer by multi-rotor UAVs

LUO Qi¹ WANG Wei¹ LU Zhenyu¹ JIANG Haimei¹ ZHANG Yutian¹
 MIAO Guoying¹ XIA Junrong¹ WANG Chenggang¹

¹ School of Information and Control, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 200044

Abstract The three-dimensional synchronous meteorological data are demanded for further understanding the occurrence, development and disappearance mechanism of meteorological phenomena on the atmospheric boundary layer. However, current detection technology seems powerless to this requirement. A new detection mode is proposed in this paper, which is applying the multi-rotor Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to autonomously detect the meteorological elements in the atmospheric boundary layer. Furthermore, its background, significance, characteristics, advantages, procedure, feasibility and some scientific problems related to this detection mode are analyzed. This detection mode has the characteristics of high pertinency, flexibility, mobility and maneuverability, and the functions of autonomous dynamic synchronous detection, intelligent Auto-Tracking detection.

Key words multi-rotor UAVs; meteorological element; autonomous synchronous cooperative detection; atmospheric boundary layer