Scientific Journal of Control Engineering
May 2017, Volume 7, PP. 23-30

Multi-Rotor Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Water Quality Sampling and its Control System

Mian Wang [1, 2], Tianxiang Bai[3, 4], Yaxin Xiong[5], Yingliang Ji[6], Jian Zhang[6], Yuyi Jiang[6], Xisong Dong[1,3], Zhen Shen [1,3†], Xiwei Liu[1,6]

1. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems & The Beijing Engineering Research Center of Intelligent Systems and Technology, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. College of Internet of Things, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

3. Cloud Computing Center, Chinese Academy of Sciences, Dongguan 523808, China

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5. Beijing No.4 High School, Beijing 100034, China

6. Institute of Smart Education Systems, Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266109, China

†Email: zhen.shen@ia.ac.cn

Abstract

To meet the requirements of users from the environmental protection departments, the quad-rotor UAV for water quality sampling is designed and developed. We describe in detail the UAV components, the water collecting devices, the embedded module and other hardware equipment, as well as the control algorithm and the sampling process. Based on the dynamic model of the quad-rotor UAV, this paper analyzes the impact force of water flow, and designs the flight and sampling mode of the quad-rotor UAV. Also, the effectiveness and practicality of the UAV for water quality sampling are verified by the simulation and practice, with the manual sampling and automatic sampling processes.

Keywords: Quad-rotor Unmanned Aerial Vehicle; Water Quality Sampling; Dynamic Model; Flight Control Method

水质采样专用多旋翼无人机及其控制系统*

王冕[1, 2]，白天翔[3, 4]，熊亚馨[5]，季英良[6]，张建[6]，姜宇一[6]，董西松[1, 3]，沈震[1, 3†]，刘希未[1, 6]

1. 中国科学院自动化研究所，复杂系统管理与控制国家重点实验室
&北京市智能化技术与系统工程技术研究中心，北京 100190

2. 江南大学物联网工程学院，江苏 无锡 214122

3. 中国科学院云计算中心，广东 东莞 523808

4. 中国科学院大学，北京 100049

5. 北京市第四中学，北京 100034

6. 青岛智能产业技术研究院，智慧教育研究所，山东 青岛 266109

摘　要：针对环境保护部门等用户对水质采样专用无人机的需求和具体要求，本文设计了水质采样专用四旋翼无人机，分别从无人机的部件、采水装置、电路模块等硬件设备，以及控制算法、采样流程等软件方面进行介绍。本文在四旋翼无人机动力学模型基础上，加入对水流冲击力的分析，设计四旋翼无人机的飞行采样模式，并对其有效性与实用性进行仿真测试与实践验证，完成了水质采样专用四旋翼无人机的手动采样与自动采样过程。

*资助基金：国家自然基金项目（61233001,71232006,61533019，61304201）；青岛市科技惠民专项项目（16-6-2-62-nsh）；广东科技厅项目（2014B010118001,2014B090902001,2014A050503004,2015B010103001,2016B090910001）。

关键词：四旋翼无人机；水质采样；动力学模型；飞行控制

引言

无人机（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）是通过无线通讯设备或内部控制算法进行操控，从而实现不同的轨迹和姿态飞行，且无需搭载人员实时控制的空中飞行器[1]。多旋翼无人机（Multi-rotor Aerial Vehicle, MAV）可实现垂直起落与空中悬停，此外，其姿态控制更加灵活，性能可靠、对起降场地与作业空间的要求较低，并且造价相对较低。

水质污染作为国家重点防治的污染之一，造成了饮用水短缺、周边环境恶劣等局面，必须实时探查污染物来源，并适时采样进行定性或定量的研究[2]。针对环境保护部门等用户对水质采样专用无人机的需求和具体要求，本文研发设计了用于水质采样专用多旋翼无人机，可免去人工亲涉河海采取水样的过程，效率高、危险性低。只需提前设下采样点，一键实施即可完成自主化采集。另外，通过无人机协同控制，可以实现同地不同时的精准定位取样。无人机采水样作业精度高，还可挂载高清摄像头，获得采样水域的空中俯瞰图。无人机研发成功后，所需维护保养费用相较于人工采集，作业成本大大降低。综上所述，水质采样专用多旋翼无人机的研发不仅具有一定的学术意义，更有相当的实用价值。

1　水质采样专用多旋翼无人机的硬件模块

水质采样专用多旋翼无人机主要由硬件系统、数据链系统、控制系统三大部分组成。其中，硬件系统包含无人机的机体及相关外部设备等；数据链系统包括遥控器、数据传送器、图像传送器、地面站模块等；控制系统指的是多旋翼无人机的核心部件飞行控制器（简称“飞控”）。此外，水质采样专用多旋翼无人机还另外配置了采样模块，专门用于水质采样过程的控制与监测。本节着重介绍水质采样专用多旋翼无人机的硬件模块，包括电子调速器、差分 GPS 模块、硬件接口板与采样模块。

1.1　电子调速器

电子调速器(Electronic Speed Control)的主要作用是用来驱动电动机并根据控制信号对其转速及旋转方向进行调节。水质采样专用多旋翼无人机在自身飞行的情况下，还需挂载采样瓶、采集的水样等，对载重要求较高，因而需要功率较大的电子调速器。为满足无刷电机的驱动要求，本设计中电子调速器设计目标为额定电流 30A，如图 1 所示。该电子调速器具有油门响应线速度高，低压、欠压、过压保护等性能。硬件方面能实时监控电调温度、电机转速，同时设有通讯接口，功率驱动性能好、散热性能高。软件方面，电子调速器的进角可调整、驱动算法稳定、响应速度比较快，可实时返回电调参数信息，以备飞控进行高效控制。

1.2　差分 GPS 模块

为更好的提高作业时的稳定性，本设计将开源的载波相位差分定位 RTK（Real-Time Kinematic）技术运用在旋翼无人机上，将获取的载波信号差分传送给接收机进行坐标解算，大幅度地提高了无人机定位精度[3]。在此基础上，为设计符合标准的运算平台，以满足接收机端的解算工作，还设计出可靠的通讯链路，保证基准站和用户接收机端的通信，协调无人机控制器启动时间和 RTK 接收机端的上电定位解算时间。

1.3　硬件接口板

本次设计搭建了无人机硬件接口多功能扩展平台，可以解决飞控通信接口数量有限、无法同时挂载多个外部设备的弊端。接口板的主控芯片为 STM32F103RBT6，主频 72MHZ，具有 20KB SRAM、128KB FLASH、2 个 12 位 AD 转换器、7 通道 DMA 控制器、7 个定时器、2 个 IIC 接口、3 个 USART 接口、2 个 SPI 接口。

硬件接口板板载一个串行 FLASH 芯片，SPI 接口，容量为 8MB，可用于存放字库、图片；板载 CAN 收发器，同时留出 CAN 连接端子，可以与其他 CAN 模块通信；板载 USB 串口转换芯片，可以实现 USB 口对串口

的访问。此外，还设计了水泵/电机驱动接口，液位传感器接口，采样传感器接口，支持常用的 SPI 总线、IIC 总线等通讯方式。如图 3 所示，接口板可将每个外设的数据汇总归类，统一发送给飞控处理。

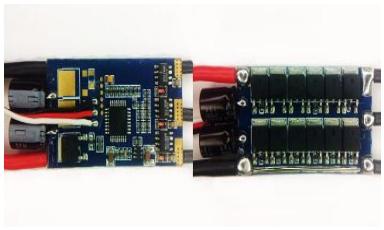

图 1. 电子速度调节器



图 2. RTK GPS 模块

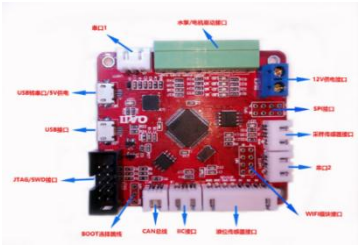

图 3. 硬件接口多功能扩展板图

1.4 采样模块

采样模块包括卷扬机构、采水器、采水器固定装置，采样控制器、传感器、固定结构件等部分。其中，采样控制器用来控制及管理整个采样模块，其与飞控通过串口连接。作业时，采样控制器控制卷扬机构释放采水器，待传感器检测到采水器入水后，控制卷扬机构回收采样瓶，回收完毕后控制采水器固定装置夹紧采水器防止晃动。所述采水器为环保行业专业设备，不同的采水器要保证独立密封，防止样品被混合污染；整个采样模块安装在无人机的下面，并由固定结构件固定。



图 4. 采水器



图 5. 卷扬机构与固定板

2 水质采样专用多旋翼无人机的飞行原理

2.1 动力学模型

为应对室外环境中的阵风扰动，本设计选用多旋翼无人机作为水质采样无人机机体。由于多旋翼无人机的控制方式本质上相通，本文选用四旋翼无人机简要阐述其控制器设计原理。

无人机在飞行过程中，进行各种姿态的运行与切换，机体会发生一定的倾斜。如图 6 所示，机体坐标系的 y 轴与大地坐标系平面的偏角φ即为滚转角，$-\pi/2 < \varphi < \pi/2$，规定右滚转时φ为正，左滚转时φ为负；同理可得，机体坐标系的 x 轴与大地坐标系平面的偏角θ即为俯仰角，$-\pi/2 < \theta < \pi/2$，规定抬头时θ为正，低头时为负；机体坐标系的 x 轴投影至大地坐标系，与其 x 轴的偏角Ψ即为偏航角，$-\pi < \Psi < \pi$，规定右偏航时Ψ为正，左偏航时Ψ为负[4]。

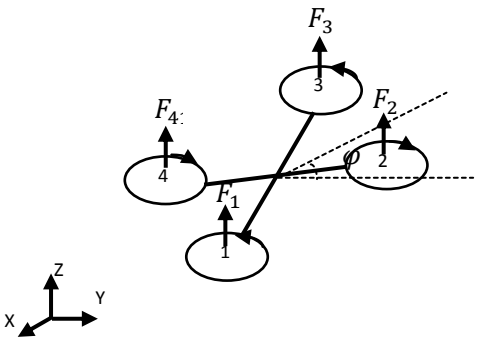

图 6. 水质采样专用多旋翼无人机的姿态角

假设无人机四个旋翼产生的升力分别为F_1、F_2、F_3、F_4，则垂直运行时无人机自身坐标系下所受的合力为$T_1 = F_1 + F_2 + F_3 + F_4$。实际飞行过程中，无人机可视为近似盘旋情况下的运动，偏移角度较小，故机体旋转角度近似为欧拉角。建立机体坐标系到大地坐标系的坐标变换矩阵$\boldsymbol{R}$，则大地坐标系下四旋翼无人机受力F_e的表达式为[5]

$$F_e = \boldsymbol{R} \cdot F_b = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\Psi\sin\theta + \sin\varphi\sin\Psi \\ \cos\varphi\sin\Psi\sin\theta - \sin\varphi\cos\Psi \\ \cos\varphi\cos\theta \end{bmatrix} T_1 \tag{1}$$

其中，F_b为机体坐标系下水质采样专用多旋翼无人机受力。

利用牛顿欧拉公式，可得出相关运动方程[6]：

$$\boldsymbol{J}\ddot{\boldsymbol{\Omega}} = -\dot{\boldsymbol{\Omega}} \times \boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{\Omega}} + \boldsymbol{L}\boldsymbol{T} \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{J} = \boldsymbol{diag}[\boldsymbol{J_x} \quad \boldsymbol{J_y} \quad \boldsymbol{J_z}]$为机体转动惯量；$\boldsymbol{\Omega} = [\varphi \quad \theta \quad \Psi]^{\mathrm{T}}$为机体欧拉角；$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{diag}[l \quad l \quad d]$为力臂系数；$\boldsymbol{T} = [T_2 \quad T_3 \quad T_4]^{\mathrm{T}}$为采样无人机滚转、俯仰、偏航状态下所受合力。

结合以上结论与牛顿第二定律，可得动力学方程：

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m}(\cos\varphi\cos\Psi\sin\theta + \sin\varphi\sin\Psi)T_1 \\ \ddot{y} = \frac{1}{m}(\cos\varphi\sin\Psi\sin\theta - \sin\varphi\cos\Psi)T_1 \\ \ddot{z} = \frac{1}{m}(\cos\varphi\cos\theta)T_1 - g \\ \ddot{\varphi} = \dot{\theta}\dot{\Psi}\left(\frac{J_y - J_z}{J_x}\right) + \frac{l}{J_x}T_2 \\ \ddot{\theta} = \dot{\varphi}\dot{\Psi}\left(\frac{J_z - J_x}{J_y}\right) + \frac{l}{J_y}T_3 \\ \ddot{\Psi} = \dot{\varphi}\dot{\theta}\left(\frac{J_x - J_y}{J_z}\right) + \frac{d}{J_z}T_4 \end{cases} \tag{3}$$

式中，m为采样无人机与负载的总质量；g为当地重力加速度。

2.2 流水冲击力

通过流水的物体都会受到其冲击力的影响，采样瓶入水时，受水流压力和剪切应力的作用，表现为作用在采样瓶表面上水流方向的冲击力，具体可归纳为[7]

$$F_d = 0.5 c_d \rho s v^2 \tag{4}$$

式中，F_d表示水流对采样瓶冲击（N），c_d表示阻力系数，ρ表示水体密度（kg/m^3），v表示水流流速（m/s），s表示采样瓶特征面积（m^2）。阻力系数c_d是几个参数的函数，如物体形状、流量雷诺数和表面粗糙度；特征面积s取决于采样瓶本身特征。

3 水质采样专用多旋翼无人机的控制方法

3.1 采样流程图

水质采样专用多旋翼无人机可挂载采水器飞至目标采样点上空，通过卷扬装置下放采水器至目标深度区，采样结束再将采水器收回无人机底部完成取样。该采样方式可实现自主化操作，操作者仅需预先在地面站设置好采样目标点，即可一键实现多旋翼无人机采样作业和自主返航。无人机多点自动采样指令流程如图 7 所示。

3.2 PID 控制

水质采样专用多旋翼无人机采用经典 PID 控制实现飞行任务，达到指定水域完成悬停与采样过程。在多旋翼无人机控制系统中，采用双闭环控制结构。其中，内环控制器负责角度调整，稳定飞行姿态；外环控制器负责位置调整，确保跟踪目标运动轨迹[8]。内环控制器为线性子系统，采用如式（5）所述的 PID 控制律。

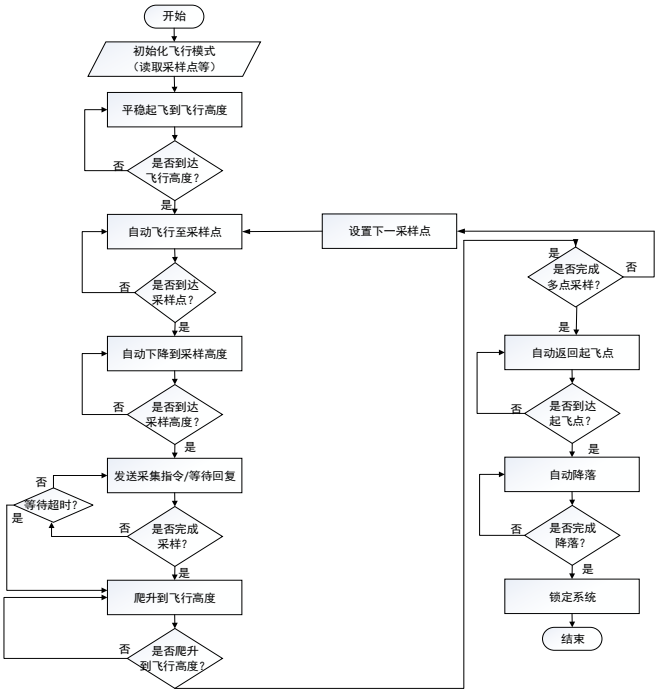

图 7. 多旋翼无人机多点自动采样指令流程图

$$u(t) = K_p e_\theta + K_I \int_0^t e_\theta(\tau)\,\mathrm{d}\tau + K_d \dot{e_\theta} \tag{5}$$

其中，e_θ为系统角度误差，K_p、K_I、K_d分别为姿态 PID 控制器比例、积分、微分增益。

考虑到外部扰动，外环控制器结合积分环节可保证系统在稳定状态下消除稳态误差，控制律如式（6）。

$$\varphi(t) = K_{rp} e_r + K_{rI} \int_0^t e_r(\tau)\,d\tau + K_{rd} \dot{e_r} \tag{6}$$

式中，$\varphi(t)$为位置控制器生成的目标姿态角，e_r为系统位置误差，K_{rp}、K_{rI}、K_{rd}分别为位置 PID 控制器比例、积分、微分增益。

将位置误差与速度误差作为系统输入，给定外环位置控制器进行轨迹跟踪；其输出作为内环姿态控制器输入进行姿态调整，同时对姿态角输入进行限幅。该结构能够有效应对外部扰动，且具有一定的稳定性和鲁棒性，在实际应用中效果明显。图 8 为采样无人机控制结构图。

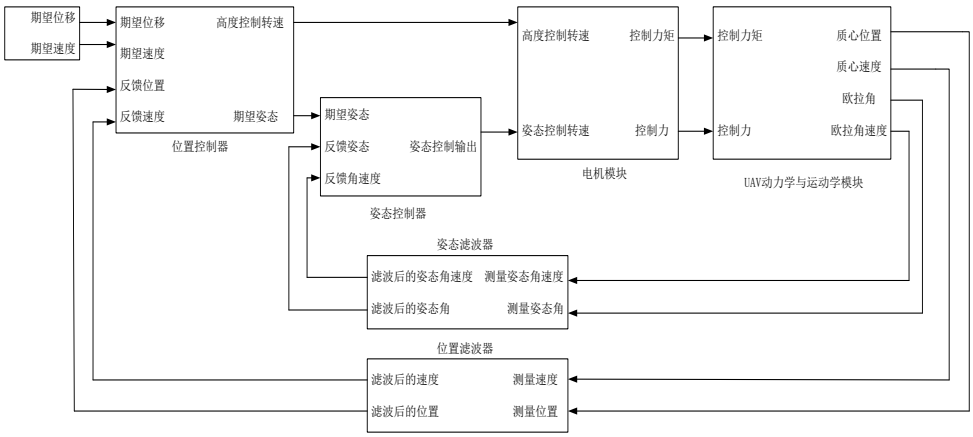

图 8. 水质采样专用多旋翼无人机控制框图

3.3 仿真验证

对所设计的无人机 PID 控制器进行仿真验证，在不考虑外界扰动的情况下，对系统给定期望姿态，观测其姿态角与角速率的响应情况，无人机的滚转、俯仰通道最终都能够准确跟踪并稳定在最终值（图 9）

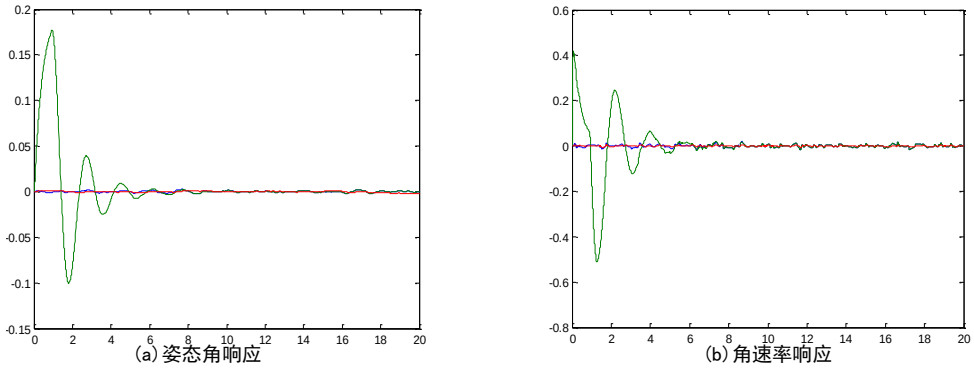

图 9. PID 姿态控制响应

3.4 水流冲击力计算

假设采样瓶垂直入水，根据冲击力计算公式，选取以下参数估算采样瓶进入不同流速水体时受到的冲击力：1）采样瓶重 2 kg；2）采样瓶特征面积 0.04 m^2；

3）水体密度为 1000 kg/m^3；4）水流速度从 0 变化到 10 m/s。

阻力系数近似选取 0.005；图 10、图 11、图 12 分别给出该参数情况下，随着水流变化的冲击力大小，冲击力与重力的合力大小以及采样绳偏离垂直方向的角度大小。由下图可知，当水流速度上升时，采样绳偏离角度变化幅度最大，受水流冲击影响最明显，当流速达到 10 m/s 时，偏离角已达到 27°；其次，当水流速度达到 4 m/s 时，冲击力与重力合力开始大幅上升；冲击力变化则相对前者较为平缓，随着流速从 0-10 m/s 的增加，相应增加到约 10 N。

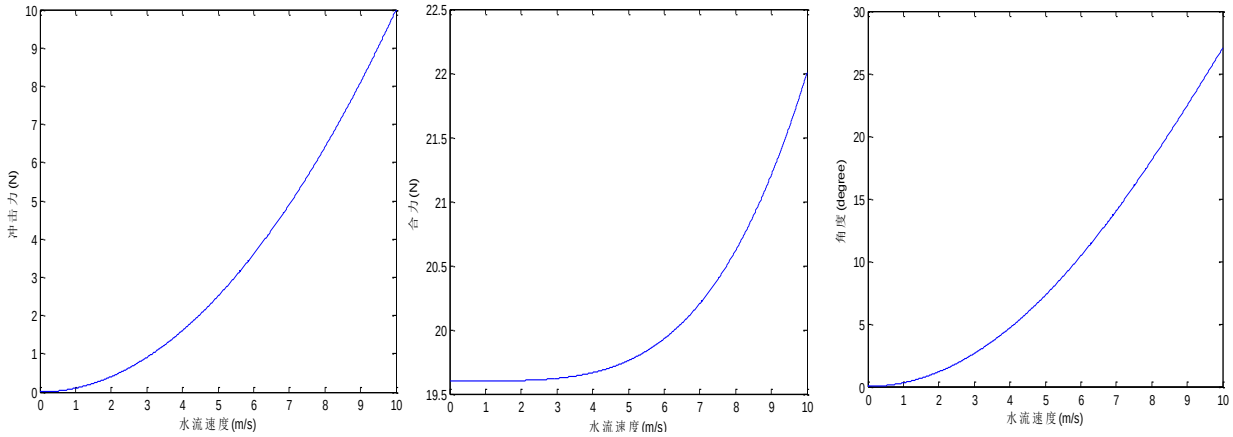

图 10. 水流冲击力随水流变化　图 11. 重力与冲击力合力随水流变化　图 12. 采样绳偏离垂直方向的角度随水流变化

根据以上估算可知，当采样水域水体流速较小（小于 4 m/s）时，可忽略水流对采样瓶的冲击力影响，流速较大时必须要考虑水流冲击力对采样瓶的影响。

4 水质采样专用多旋翼无人机测试

4.1 采样无人机手动模式

该旋翼无人机可应用于海洋、河流、湖泊等不同水域，能够完成水域环境的监测、预警、采样等任务。超出监测范围后可启动自动采样模式，定点返航，自动完成采样任务。针对采样不同需求可以搭载不同的采样设备。为了符合环保采样要求，除了直流电机和卷扬机构以外，还设计了环保专用采样瓶装置，如图 13 所示。

本次设计采取“无人机+采水器”的方案，在最大程度上近似人工采样过程。当采样无人机到达指定采样目标点上空时，通过无线技术可以控制无人机距离水面高度以及绳索下放的长度。电源供电后，按下手动按钮，

直流电机带动卷扬机构运动，即可下放采水器，实现手动采样过程，如图 14 所示。



图 13. 项目组研制的采水无人机实物



图 14. 无人机采水实测图

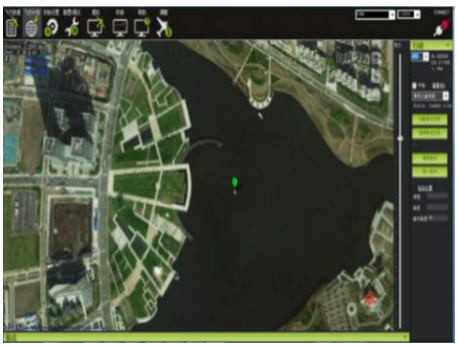

图 15. 地面站地图选择水域目标采样点

4.2 采样无人机自动模式

通过地面站对采样无人机的轨迹进行规划，采样无人机即可按照指定航线飞行，其运行半径为 500 m。采样目标点可通过地面站地图进行选择，如图 15 所示，标注出目标点的 GPS 坐标方位，待位置选取后将数据写入，操作方式默认为全自动操作，也可切换至手动操作。全自动采样下，无人机起飞后携带采样设备准确到达采样点，将采样设备下放入水中，当达到需要采样的水深以后，再将采样设备收回，自动完成采样任务后返航。

5 小结与展望

本文设计了环保采样专用多旋翼无人机，包括其硬件结构、控制算法和操作流程，实现了水域环境液体样本的手动采样与全自动采样，并实践了“水文采样无人机”在真实湖泊中的水文采样。本文的工作主要包括：

1）多旋翼无人机硬件模块的开发，包括电子调速器、GPS、硬件接口、采样装置等，及其相应的驱动算法调试。硬件方面设有通讯接口，能实时监控无人机姿态与转速，功率驱动性能好；软件方面响应速度快，驱动算法稳定，可实时反馈电调参数信息，便于控制器实时控制。

2）多旋翼无人机飞行方式与控制原理的实现，包括无人机飞行模式的介绍，动力学方程的建立，各种模式下的受力分析，流水冲击力的仿真以及 PID 控制方法的设计与实践。

3）多旋翼无人机自动采样与手动采样实践、地面站控制参数的设置、无人机采样过程的监测与控制。

本项目组所研制的环保采样无人机，在飞行中多表现为非线性，载荷量相对较小，滞空时间受电池限制较短，飞行速度也有待提高。未来的工作中，一方面我们将改进无人机控制算法，提高无人机应对阵风和负载变化时的稳定性、响应速度和轨迹跟踪精度。另一方面我们将从多采水样无人机协同工作的角度，研究能耗最小、最短飞行时间、协同避障完成采水任务。

REFERENCES

[1] Zhang TH, Bai JP. Development and Trend of Rotor Unmanned Aerial Vehicle [J]. Artificial Intelligence and Robot Research. 2013(2): 16-23.

[2] Chen F, Meng FS, and Wang YY, et al. Application of Multivariate Statistical Model in Analysis of Water Environmental Pollutants [J]. Yellow River. 2016(01): 79-84.

[3] Ma HW, Wang JQ. Application of RTK Combined with UAV Low Altitude Photography in Surveying and Mapping in Plateau Area [J]. Journal of Technical Studies. 2014(3): 1-6.

[4] An HL. Research on Geometric Sliding Mode Attitude Control Technology and Disturbance Rejection Application of Quadrotor Aircraft [D]. PhD diss., National University of Defense Science and Technology, 2013.

[5] Salazar-Cruz, S., Palomino, A. and Lozano, R. Trajectory tracking for a four rotor mini-aircraft [C] //Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference. Seville, Spain, 2005: 2505-2510.

[6] Lin F, Dong XX, Ben M. Chen, et al. A Robust Real-Time Embedded Vision System on an Unmanned Rotorcraft for Ground Target Following [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics. 2012, 59(2): 1038-1049.

[7] Qu YX. The structure design and stress analysis of underwater measuring equipment [J]. Ship Science and Technology. 2012(01): 18-21.

[8] Wang SY. Design and Implementation of the Flight Control System of Hexa-copters [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

【作者简介】



[1] 王冕（1995-），男，汉族，江南大学学士，本项目实习生，研究方向为多旋翼无人机控制，伺服系统振动抑制，机器人动力学。Email: mianwangmw@qq.com



[2] 白天翔（1991-），男，汉族，博士研究生，中国科学院大学，中国科学院自动化研究所，研究方向为先进机器人控制，机器人协调与机器人仿真。Email: baitianxiang2014@ia.ac.cn



[3] 熊亚馨（1999-），女，汉族，本项目实习生，北京市第四中学学生。Email: yassi259@foxmail.com



[4] 季英良（1990-），男，汉族，硕士研究生，初级工程师，研究方向为机器人导航与控制。
Email: yingliang.ji@qaii.ac.cn



[5] 张建（1987-），男，汉族，硕士研究生，中级工程师，研究方向为嵌入式系统，机器人控制。
Email: jian.zhang@qaii.ac.cn



[6] 姜宇一（1989-），女，汉族，学士，初级工程师，研究方向为电子信息工程。
Email: yuyi.jiang@qaii.ac.cn



[7] 董西松（1978-），男，汉族，博士，中国科学院自动化研究所副研究员，研究方向为复杂系统，智能统。
Email: xisong.dong@ia.ac.cn



[8] 沈 震（1982-），男，汉族，博士，中国科学院自动化研究所副研究员，研究方向为智能控制，智能制造。
Email: zhen.shen@ia.ac.cn



[9] 刘希未（1978-），男，汉族，博士，高级工程师，研究方向为过程控制，智能硬件，智慧教育等。
Email: xiwei.liu@ia.ac.cn