

基于前馈 PID 的应急救援四旋翼无人机安全控制研究

孟冬月^{1,2} 黄玉钊^{1,2,3} 韩国祥^{1,2} 李红臣¹ 王棚飞¹

1 应急管理部大数据中心 北京 100013

2 网络和数据安全应急管理部重点实验室 北京 100013

3 系统控制与信息处理教育部重点实验室 上海 200240

(mengdy1104@163.com)

摘要 为保障四旋翼无人机在应急救援现场安全可靠作业,针对应急救援现场四旋翼无人机信息体系统交互不规范的问题,提出了应急救援四旋翼无人机系统救援现场空间信息体,并基于密码学对应急救援指挥部控制模块和控制信号进行完整性和保密性验证。同时,为了保证四旋翼无人机按照应急救援指挥部控制信号稳定飞行,建立了应急救援四旋翼无人机动力学模型,设计了基于前馈 PID 的应急救援四旋翼无人机位姿控制器,最后利用 Python 的 Cryptography 和 Matlab 的 Simulink 开展联合实验。实验结果表明,使用的密码模块可以高效完成真实性与保密性验证,前馈 PID 位姿控制器可以很好地完成事故救援现场巡飞作业。此研究将为应急救援四旋翼无人机在实际应用中的安全性和可靠性提供有效的理论支持。

关键词: 密码技术;四旋翼无人机;网络安全;前馈 PID;位姿控制

中图分类号 TP399

Research on Emergency Rescue Quadcopter UAV Safety Control Based on Feedforward PID

MENG Dongyue^{1,2}, HUANG Yuchuan^{1,2,3}, HAN Guoxiang^{1,2}, LI Hongchen¹ and WANG Pengfei¹

1 Ministry of Emergency Management Big Data Center, Beijing 100013, China

2 Key Laboratory of Cyberspace and Data Security, Ministry of Emergency Management, Beijing 100013, China

3 Key Laboratory of System Control and Information Processing, Ministry of Education of China, Shanghai 200240, China

Abstract To ensure the safe and reliable operation of quadcopter unmanned aerial vehicles at emergency rescue sites, and to address the non-standard interaction of quadcopter unmanned aerial vehicle information systems at emergency rescue sites, this paper proposes an emergency rescue quadcopter unmanned aerial vehicle system rescue site spatial information body, and verifies the integrity and confidentiality of the emergency rescue command center control module and control signals based on cryptographic methods. At the same time, in order to ensure stable flight of quadcopter drones according to command signals, a quadcopter drone dynamic model is established, and a Feedforward PID based quadcopter drone pose controller is adopted. Finally, a joint experiment is conducted using Python's Cryptography and Matlab's Simulink. The results indicate that the password module used in the study can complete authenticity and confidentiality verification, and the pose controller can also effectively achieve patrol operations at accident rescue sites. This study provides effective theoretical support and technical assurance for the safety and reliability of quadcopter unmanned aerial vehicles in practical emergency rescue applications.

Keywords Cryptography, Quadcopter unmanned aerial vehicle, Network security, Feedforward PID, Pose control

1 引言

我国自然灾害多发频发,国家相关部门分析 2024 年前三季度灾情:各种自然灾害共造成全国 8402.7 万人次不同程度受灾,因灾死亡失踪 836 人,紧急转移安置 334.7 万人次;倒塌房屋 5 万间,损坏房屋 63 万间;农作物受灾面积 9048.2 千公顷;直接经济损失 3232 亿元。提高防灾减灾救灾能力至关重要,开展无人飞行器通信、侦测是应急救援的重要手段。自 2018 年国家组建应急管理部门以来,为解决防灾减灾

救灾中暴露出来的应急指挥通信、灾情侦察等关键领域短板弱项,不少单位启动自然灾害应急能力提升、工程航空应急能力建设,通过构建无人飞行器(Unmanned Aerial Vehicles, UAV)航空应急救援力量体系,进一步提升灾害事故应急响应速度和效率,增强救援行动的灵活性与覆盖面,确保在面对各类事故灾害时能够迅速调动资源,精准施策。

2024 年国家发布了关于加快应急机器人发展的指导意见,明确提出提高机器人载荷功能及模块化水平、控制及智能化水平。这说明无人飞行器将有极大的用武之地。今年

基金项目:城市外洪内涝链生灾害风险智能预警与定向发布(2022YFC3090603);系统控制与信息处理教育部重点实验室开放基金

This work was supported by Intelligent Early Warning and Targeted Release of Urban Flood and Waterlogging Chain Disaster Risks (2022YFC3090603) and Foundation of Key Laboratory of System Control and Information Processing, Ministry of Education, China.

通信作者:黄玉钊(huangyu@mail.ustc.edu.cn)

针对暴雨、山洪和地质灾害预警,安徽六安、广西柳州等地提前预置无人机力量,开展雨前雨后水库大坝、重点堤防和山区道路险情巡查,排除重大灾害隐患。广东梅州、安徽黄山等地,针对失联村庄等重点抢险区域,通过无人机开展卫星电话和救灾物资投送等辅助救援工作。

四旋翼无人机具有 6 个自由度,且位形空间属于三维李群空间 $q \in SE(3)$,每个自由度由动力驱动,需要采用包含力和力矩的动力学模型进行控制。同时,四旋翼无人机没有复杂的斜盘传动机构,且具有垂直起降等优势,建模和控制也相对容易,是应急救援场景下的重要无人作战力量之一。它可以开展空中快速侦察:灾害发生时,能够第一时间飞抵现场,作为数字战场的重要一环,通过机载光电吊舱与航测相机等设备采集灾区现场高清视频与航测数据,快速精准感知灾害情况,构建现场立体化灾情态势图,辅助研判分析灾情发展态势。

国内外诸多学者针对无人机安全和控制问题进行了广泛的研究^[1-3]。其中,Wang 等综述了无人机系统性安全的问题^[4],Bao 等研究了无人机穿越高层建筑物灭火时刻的安全性问题^[5]。但是现有的无人机控制方法,如模型预测控制、一致性理论等,通常需要系统和各种干扰的精确模型,从而进行控制系统设计。前人的研究仍然存在不足之处,且没有充分考虑到应急救援场景下无人机面临的两类问题:一方面无人机需要和应急救援指挥部不断进行通信,且大多数时候应急救援现场需要临时组网,数据如何在救援现场与应急救援指挥部之间安全高效传送,面临数据泄露、违规连接^[6-12]、稳定可靠飞行等问题;另一方面无人机系统自身具有复杂、非线性、时变等特点,通道中存在不确定因素,比如模型误差、环境干扰、观测误差等,这些不确定性将降低无人机控制系统的闭环性能,加之使用的传感器误差、环境扰动等随机因素的影响,很难得到控制系统的精确模型^[13-18]。

基于以上问题,综合前人研究,本文以四旋翼无人机为

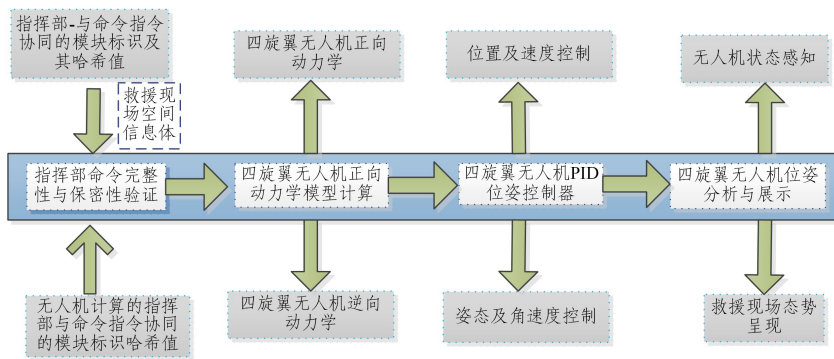


图1 四旋翼无人机网络安全控制流程图

Fig. 1 Network security control flowchart for quadcopter drones

(1)应急救援指挥部命令完整性与保密性验证模块。该模块重点实现对来自应急救援指挥部的四旋翼无人机信息完整性和保密性的验证,应急救援无人机系统救援现场空间信息是指挥部信息的载体,它包括 3 个维度:(1)时间维度,为各类指挥部信息源提供统一的时钟;(2)信息源维度,即指挥信息的各类模块标识,也是指挥信息的来源;(3)信息体,即指挥源中各类模块提供的具体内容信息,默认为字符串类型。根据四旋翼无人机动力学模型输入,利用 Python 中 Cryptography 的 SHA256 算法和 Fernet 算法分别实现 X 轴期望

研究对象,对应急救援现场各类无人机在与指挥部通信过程使用不同信息交互方式,且无人机数据传输的潜在威胁等问题,如黑客冒充指挥部,伪造或篡改指挥部各模块标识数据对无人机进行非法控制攻击和窃取应急救援无人机现场通信数据等进行深入分析,提出了应急救援无人机系统救援现场空间信息体,将指挥部与现场救援四旋翼无人机的信令和信令进行规范化,基于此开展网络安全真实性和完整性验证、网络安全传输和稳定飞行控制方法研究,形成一套包含数据真实性、完整性和保密性的应急救援现场无人机网络安全控制方案,并详述了其实现方法和效果评估。同时,针对无人机控制系统模型不精确等特点,控制方案选用前馈 PID 控制器^[19-25]解决上述问题。基于前馈补偿的 PID 控制算法融合了前馈控制与反馈控制的优点,通过在传统 PID 控制中引入前馈补偿通道,提前对系统的已知扰动或输入信号进行补偿,从而增强应急救援现场无人机控制系统的响应速度与抗扰能力。

2 网络安全控制流程

基于密码技术的四旋翼无人机网络安全控制流程图,如图 1 所示。在应急救援任务中,四旋翼无人机的各模块紧密协作,形成高效的闭环体系。应急救援指挥部命令完整性与保密性验证模块确保指令源的准确性和真实性,为无人机提供可靠的控制指令集;动力学模型计算模块则基于这些指令,精准分析无人机的动力学特性,为飞行控制提供数据支撑。PID 位姿控制器进一步将动力学模型的计算结果转化为实际的飞行操作,精确调整无人机的位姿,使其稳定飞行并执行任务。最后,位姿分析与展示模块实时反馈无人机的飞行状态,为操作人员提供直观信息,并为动力学模型提供反馈数据,优化控制策略。这 4 个模块相互关联、协同工作,保障了无人机在复杂环境下的高效、安全运行,为应急救援任务提供较为完备的技术支持。

位置、Y 轴期望位置、Z 轴期望位置及偏航角期望值的完整性和真实性判断。在指挥部控制指令中角度选择为 RPY 角 (Roll, Pitch, Yaw),即绕固定坐标系的 X-Y-Z 轴依次旋转的角度,也分别称为滚转角、俯仰角、偏航角。

(2)四旋翼无人机动力学模型计算模块。该模块主要建立四旋翼无人机的动力学模型^[26-28],模型涉及到的正负符号符合右手螺旋定则。图 2 展示了四旋翼无人机的示意模型,包含 4 个旋翼推力矢量和旋转方向示意,其中, d 是电机到无人机质心的距离。

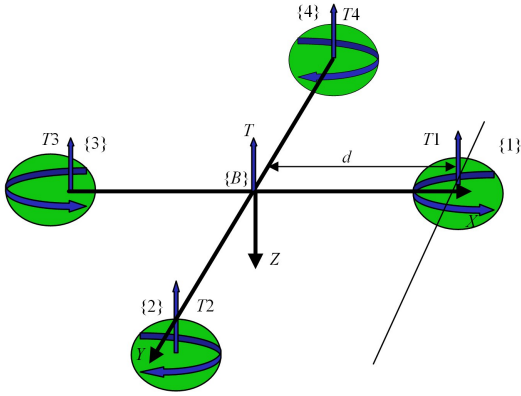


图2 四旋翼无人机4个旋翼推力矢量和旋转方向示意图
Fig.2 Schematic diagram of a quadcopter aircraft, including four rotors and their thrust vectors and rotation directions

规定四旋翼无人机机体坐标系 $\{B\}$ 的 Z 轴向下。该四旋翼无人机有4个转动桨叶,即旋翼,标记为 $\{1\}$ 至 $\{4\}$,分别安装在四旋翼无人机交叉臂的两端。四旋翼机体坐标系 $\{B\}$ 固联在无人机上,其原点与无人机质心重合。旋翼1和旋翼3从上往下看为逆时针旋转,旋翼2和旋翼4为顺时针旋转。旋翼由电子调速器控制的电机驱动,使用小型电机和减速齿轮系,以达到足够的扭矩。设旋翼转速为 ω ,旋转产生一个向上的推力向量,指向 Z 轴的负方向,如式(1)所示:

$$\mathbf{T}_i = b\omega_i^2, i=1,2,3,4 \quad (1)$$

其中, $b>0$ 为升力常数,它与四旋翼无人机任务执行环境的空气密度、旋翼叶片半径的立方、叶片的数量以及叶片的弦长相关。

(3)四旋翼无人机PID位姿控制器^[29-35]。为了控制四旋翼无人机的运动,引入了嵌套式控制结构,并引入前馈控制,这也是较为稳定的PID算法之一,通过优化可以使设计的PID控制器的超调量减少,调节时间减少,系统更加稳定。根据四旋翼无人机动力学模型,其欠驱动的代价是增加操作的复杂性,四旋翼无人机的俯仰角不能随意设定,它可以实现无人机飞行前进和后退控制。这里以控制无人机实现绕 Y 轴俯仰及沿 X 轴平移为例进行嵌套式控制结构说明。最内层的控制环使用一个比例微分控制器,计算需要施加在无人机机体上的俯仰力矩,如式(2)所示:

$$\tau_y = K_p(\theta_p^* - \theta_p) + K_d(\dot{\theta}_p^* - \dot{\theta}_p) \quad (2)$$

控制器计算主要基于期望俯仰角与实际俯仰角之间的误差。为了确定增益 K_p 和 K_d ,实践中先根据近似动力学模型用经典控制设计方法给出初始值,然后对它们进行调整优化,以达到最佳控制性能。四旋翼无人机俯仰角是由惯性导航传感器估算得出的,计算得出后,就可以由动力学模型确定各旋翼所需的转速。

在四旋翼无人机机体上假设连接一个坐标系,记作 $\{V\}$,其原点与坐标系 $\{B\}$ 相同,且它的 X 轴和 Y 轴始终与地面平行。为了使机体产生沿 X 轴方向的位移,我们控制无人机机头下俯,从而产生一个力,如式(3)所示:

$$\mathbf{f} = R_y(\theta_p) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T \sin \theta_p \\ 0 \\ T \cos \theta_p \end{pmatrix} \quad (3)$$

无人机机头下俯产生一个向 X 轴方向分量,可以推动无人机沿着 X 轴方向运动:

$$\mathbf{f}_x = T \sin \theta_p \approx T \theta_p \quad (4)$$

这个分量使得无人机可以沿 X 轴方向加速。我们使用比例控制法控制这个方向的速度:

$$\mathbf{f}_x^* = mK_f(\mathbf{V}_x^* - \mathbf{V}_x) \quad (5)$$

将上述两个公式联立,可以得到俯仰角:

$$\theta_p^* = \frac{m}{T} K_f (\mathbf{V}_{V_x}^* - \mathbf{V}_{V_x}) \quad (6)$$

这就是为达到期望的前进速度所需要的俯仰角。四旋翼无人机速度 \mathbf{v}_x ,可以由惯性导航传感器或北斗信号接收器估算得到。

(4)四旋翼无人机位姿分析与展示模块。该模块主要是为了分析应急救援现场任务执行情况,综合展示应急救援指挥部命令完整性与保密性验证结果、动力学模型计算模块及PID位姿控制器功能效果,同时实现分析 X 期望位置、 Y 期望位置、 Z 期望位置及 RPY 角期望值执行偏差,进而分析位姿控制器的控制效果,为后续控制参数调优和改进提供参考,并实现应急救援现场整体的态势感知,为救援提供辅助支撑。

3 模型介绍

3.1 四旋翼无人机动力学模型

根据Newton第二定律,式(7)给出了四旋翼无人机在世界坐标系中的垂直动力学公式:

$$m\dot{\mathbf{v}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{pmatrix} - {}^0R_B \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{pmatrix} \quad (7)$$

式(7)右边第一项是重力,在世界坐标系中方向垂直向下,第二项代表将机体坐标系中的总推力经旋转变换到世界坐标系。 $\dot{\mathbf{v}}$ 是无人机在世界坐标系中的加速度, g 是重力加速度, m 是该无人机的总质量, T 是四旋翼无人机总的向上推力。

每对旋翼之间的推力差异会导致无人机旋转。在 X 轴上产生的转矩即为横滚力矩,正负符号由右手螺旋定则决定,其大小为:

$$\tau_x = d\mathbf{T}_1 - d\mathbf{T}_2 \quad (8)$$

将式(1)代入,得到该力矩关于旋翼转速的表达式:

$$\tau_x = db(\omega_1^2 - \omega_2^2) \quad (9)$$

类似地,在 Y 轴上产生的转矩即俯仰力矩,其大小如式(10)所示:

$$\tau_y = db(\omega_1^2 - \omega_3^2) \quad (10)$$

电机施加到每个旋翼桨上的转矩与空气阻力力矩方向相反:

$$\mathbf{Q}_i = k\omega_i^2 \quad (11)$$

其中, k 与升力常数 b 的影响因素相同。该转矩会对无人机机体施加一个反转力矩,其作用是使整个机体产生一个绕旋翼轴的转动,方向与旋翼转向相反。因此在 Z 轴上总的转矩如下:

$$\tau_z = \mathbf{Q}_1 - \mathbf{Q}_2 + \mathbf{Q}_3 - \mathbf{Q}_4 = k(\omega_1^2 + \omega_3^2 - \omega_2^2 - \omega_4^2) \quad (12)$$

其中,不同的正负号对应于旋翼转动方向的不同。由式(12)可知,偏摆力矩可以简单地通过调整4个旋翼的转速来控制。由欧拉运动公式可以给出无人机机体的旋转加速度:

$$\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}} = -\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J}\boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\Gamma} \quad (13)$$

其中, \mathbf{J} 是 3×3 的机体惯性矩阵, $\boldsymbol{\omega}$ 是角速度向量。 τ_x, τ_y, τ_z ,是由式(9)一式(12)计算出的作用在机体上各个方向的力矩:

$$\boldsymbol{\Gamma} = (\tau_x, \tau_y, \tau_z)^T \quad (14)$$

通过整合计算四旋翼无人机上作用力的动力学式(7)和

作用力矩式(13),可以得到四旋翼无人机的动力学模型,如式(15)所示:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{\Gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -b & -b & -b & -b \\ 0 & -db & 0 & db \\ db & 0 & -db & 0 \\ k & -k & k & -k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{pmatrix} \quad (15)$$

可以看出,模型中力和力矩都是旋翼转速的函数。如果 $d > 0$, 则矩阵 \mathbf{A} 是满秩的,可以通过求逆得到式(16)。利用上式可以求出为机体施加特定的力和力矩时所需要的各旋翼转速。

$$\begin{pmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{pmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{pmatrix} \quad (16)$$

3.2 四旋翼无人机 PID 控制器模型

对于在竖直方向上保持平衡的无人机,所受推力总和应与重力相等,即有 $m/T \approx 1/g$ 。设定无人机在世界坐标系 XY 平面上的位置 $P \in R_2$, 由比例控制算法给出期望的速度:

$$\mathbf{v}^* = K_p (\mathbf{p}^* - \mathbf{p}) \quad (17)$$

它是基于期望位置 and 实际位置之间的误差计算。在坐标系 $\{V\}$ 中,期望的速度如下:

$${}^V \mathbf{v} = {}^V R_0(\theta_y) \mathbf{v} = {}^0 R_V^T(\theta_y) \mathbf{v} \quad (18)$$

上式是一个偏航角的函数,展开后得:

$$\begin{pmatrix} v_{x^*} \\ v_{y^*} \end{pmatrix} = {}^0 R_V^T(\theta_y) \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} \quad (19)$$

因此,为了达到期望的位置,可以先算出适当的转速,然后得到所需的俯仰角,从而产生推力使无人机移动。这也验证了四旋翼无人机是欠驱动的,无人机的位形空间是六维的,但其只有 4 个旋翼的速度可以调整。为使四旋翼无人机向前运动,就必须先让它头部下俯,使旋翼推力有一个水平分量来产生前进加速度。而当无人机接近目标位置时,又必须反方向上仰,使水平分力向后以实现减速。最后,机体旋转到水平姿态,使推力向量垂直向上。

在三维李群空间 $SE(3)$ 中运动的无人机,其转动惯量可用 3×3 的对称矩阵式(20)表示:

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} J_{xx} & J_{xy} & J_{xz} \\ J_{xy} & J_{yy} & J_{yz} \\ J_{xz} & J_{yz} & J_{zz} \end{pmatrix} \quad (20)$$

矩阵主对角线元素是惯性矩,非对角线元素是惯性积。9 个元素中只有 6 个是独立的:3 个惯性矩和 3 个惯性积。无人机质量分布关于坐标系是近似对称,即惯性积为零。

无人机的偏航角由一个比例微分控制器控制:

$$\tau_z = K_p (\theta_y^* - \theta_y) + K_d (\dot{\theta}_y^* - \dot{\theta}_y) \quad (21)$$

其中, $\dot{\theta}_y^*$ 很小,可以忽略。

此外,无人机的高度由一个比例-微分控制器控制,如下式所示:

$$\mathbf{T} = K_p (\mathbf{z}^* - \mathbf{z}) + K_d (\dot{\mathbf{z}}^* - \dot{\mathbf{z}}) + \omega_0 \quad (22)$$

该控制回路决定了无人机旋翼的平均转速。它是使旋翼推力与无人机重量保持平衡的旋翼转速,控制器最后有一个附加项:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mg}{4b}} \quad (23)$$

为了抵消重力的影响,引入前馈控制,否则重力将在高度控制回路中成为一个常数扰动。这里不使用积分项,因为引入积分控制,需要较长的时间来使积分项增加到一个有用的量值,而且会导致超调,从而导致四旋翼无人机飞行不稳定。前馈控制是开环的,是按扰动进行补偿的,因此,根据一种扰动设置的前馈控制就能克服这一扰动对被控变量的影响。经过对比分析,本文使用前馈控制,解决在控制回路中用一个很大的增益值和积分项发挥作用时间过长的问题,并避免驱动器饱和或者不稳定。

4 实验与分析

4.1 实验模型

图 3 是应急管理部大数据中心应急救援现场实战用的一款四旋翼无人机,也是本文参考控制的主要无人机机型。



图 3 应急管理部大数据中心某类四旋翼无人机
Fig. 3 Four rotor unmanned aerial vehicle in ministry of emergency management big data center

图 4 展示了使用 Matlab 的 Simulink 联合 Python 的 Cryptography,得到的四旋翼无人机的网络安全控制模型,它具有闭环控制结构。其中,Quadrotor 模块的 4 个输入量是 4 个旋翼的转速,它用式(15)计算作用在四旋翼无人机上的力和力矩。然后,联立式(7)、式(13)和式(15)算出位置、速度、姿态和姿态变化率。该模块的输出状态向量如下:

$$(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \text{yaw}, \text{pitch}, \text{roll}, \dot{\mathbf{x}}, \dot{\mathbf{y}}, \dot{\mathbf{z}}, \dot{\text{yaw}}, \dot{\text{pitch}}, \dot{\text{roll}})$$

图 4 中的控制部分包括多个嵌套的控制回路,用于计算所需的推力和扭矩,从而使无人机移动到指定作业位置。涉及到的角度为上文提到的四旋翼无人机的横滚-俯仰-偏航角,参数代表无人机的姿态及姿态变化率。

其中,Control Mixer 模块主要包括四旋翼无人机的动力学模型;out_result 模块是过程变量记录;包括 16 个维度值。Z.mat, Z2.mat, Z3.mat 及 Z4.mat 代表来自指挥部与命令指令协同的模块标识的哈希值,分别为与 \mathbf{X} 期望位置、 \mathbf{Y} 期望位置、偏航角 Yaw 的期望值及 \mathbf{Z} 期望位置命令协同的哈希值。通信模块基于救援现场空间信息体传输至四旋翼无人机, Z1.mat, Z22.mat, Z33.mat 与 Z44.mat 代表四旋翼无人机自带密码模块生成的基于指挥部命令指令协同的模块标识的新计算哈希值。

在上述控制回路中,四旋翼无人机的位置控制回路(position_loop)位于框图的中上方。其中,最内层回路控制无人机的高度,其输入信号包括实际和期望的滚转及俯仰角,以及用于提供阻尼的横滚和俯仰角变化率。图中外层回路控制无人机在 XY 平面上的位置,它通过获取滚转及俯仰角的变化,进而在 XY 平面期望的运动方向上提供相应的推力分量。在图中,式(6)和式(17)被合并成:

$$\theta_p^* = K_1 ({}^V \mathbf{p}_x^* - {}^V \mathbf{p}_x - K_2 {}^V \mathbf{v}_x) \quad (24)$$

在 XY 平面内的位置误差首先在世界坐标系中算出,然

后通过 $R^T(\theta_y)$ 旋转变换到坐标系 $\{v\}$ 中。根据图2所示的坐标系定义,沿 x 轴方向的运动需要一个绕 Y 轴的负转动,即一个俯仰角,而沿 y 轴方向的运动需要一个绕 X 轴的正转动,即一个横滚角。因此,在横滚和俯仰的回路中增益参数的符

号是不同的。四旋翼无人机根据指挥部任务,起飞后将以等高度飞行一圈。其中,动力学模块执行式(15)的运算,混合模块则执行其逆运算,同时限制旋翼的转速。Quadrotor模块在输出12个元素的状态向量 X 时,使用了一条Simulink总线。

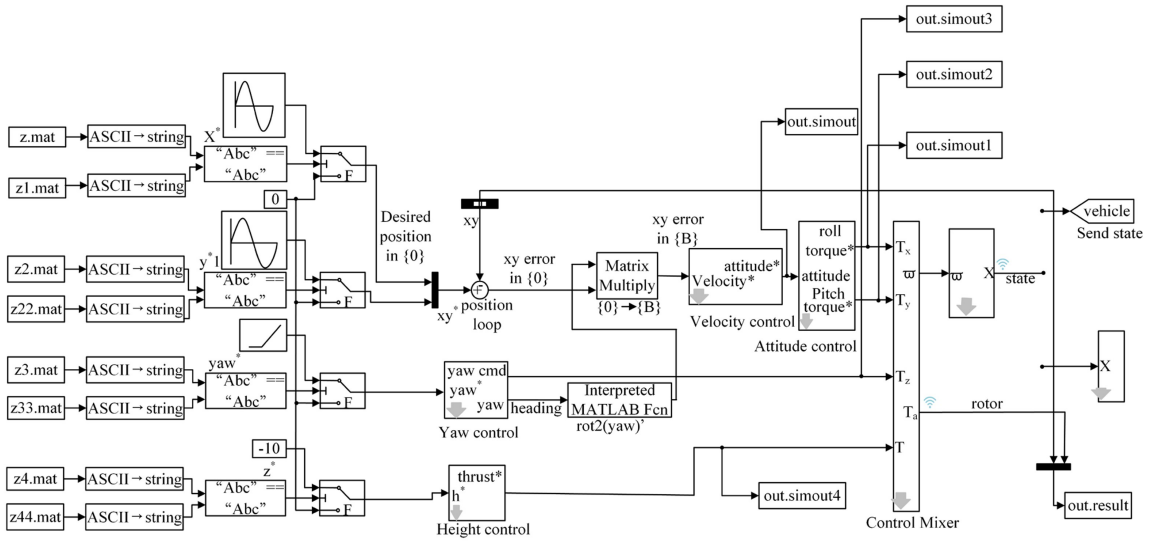


图4 四旋翼无人机的网络安全控制仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of network security control for quadcopter unmanned aerial vehicle

本文实验使用的四旋翼无人机的参数可以用 mdl_quadrotor 加载,它将在工作空间里创建一个名为 quad 的结构,其元素就是四旋翼无人机不同的动态性能参数。

4.2 实验设置

应急救援指挥部给出任务:在救援现场,四旋翼无人机实现12m高度、半径为12m的圆形巡飞轨迹。图5是实现的四旋翼无人机飞行轨迹,仿真飞行中的一个状态展示。图6是四旋翼无人机在飞行过程中, X 轴、 Y 轴及 Z 轴位置的速度变化图。四旋翼无人机起飞升空,然后飞行一圈,同时缓慢绕本体的 Z 轴旋转。可以看到无人机3个方向的线性速度基本平稳,这与后面的旋转姿态控制形成对比。

实验准备中,首先需要做好 Python 与 Matlab 的环境互通适配。实验过程通过“save out.mat out”命令,可以将每个采样时间点对应的仿真结果进行保存,并写入工作空间的一个矩阵,以供后续控制查看相关变量,主要过程如下所示。

```

    »about(out.result)
    out.result[543X16double]
    »about(out)
    out [Simulink.Simulation]:1×1(136.3 kB)

```

在 out.result 变量中,每个时间点对应矩阵的一行,每行中第一列是时间信息,然后是状态向量信息,包括变量中元素1到元素12,即

```

    (x, y, z, yaw, pitch, roll, dx, dy, dz, dyaw, dpitch, droll)

```

最后是相关扭矩值,包括变量中元素13到元素16。

基于密码技术的应急救援四旋翼无人机控制研究^[36-37]需要设置四旋翼无人机本体相关参数,本文综合考虑几种较为常见的影响因素,设定主要参数如表1所列。

表1 四旋翼无人机本体相关参数

Table 1 Relevant parameters of quadcopter drone body

参数	参数值
d/m	0.3150
J	$[0.0820 \ 0; 0 \ 0.0820 \ 0; 0 \ 0 \ 0.149]$
g	9.81
h	-0.007
b	1.3234×10^{-5}
k	1.0697×10^{-7}
M	4
ρ	1.184

接下来进行四旋翼无人机通信过程完整性验证。本部分采用 SHA256 算法完成,对来自指挥部各模块标识数据进行完整性验证^[38-44],确保数据在传输过程中没有被篡改。实现过程如下:将来自指挥部与命令指令协同的模块标识的哈希值 Z.mat, Z2.mat, Z3.mat 及 Z4.mat, 与四旋翼无人机自带密码模块生成的计算哈希值 Z1.mat, Z22.mat, Z33.mat 与

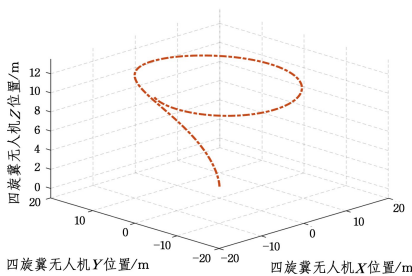


图5 四旋翼无人机飞行轨迹

Fig. 5 Quadcopter drone flight trajectory

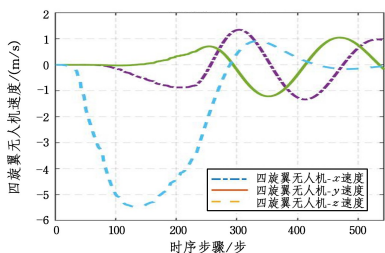


图6 四旋翼无人机在飞行过程中位置速度变化图

Fig. 6 Velocity variation diagram of positions vehicles during the flight of quadcopter unmanned aerial

Z44.mat 进行对比。两部分为 ASCII 码格式,需进行字符串转换后进行对比,对比一致性通过后,启动无人机进行现场作业,否则无法进行作业。部分实验计算如表 2 所列,可以看到哈希值长度是 256 位,符合 SHA256 算法特征。

表 2 指挥部命令完整性部分实验

Table 2 Headquarters Command Integrity Test partial

模块标识	二进制哈希值	十六进制哈希值
zhihuibu1	b'\H\T\1\c\QC\c4\cdW\18/\x9b\x83\x04\13\x83\xa5b\cxe\x6-\x98\x97\x9e6\x9c\xbb\xfeLt\x15'	5c488a54b1c05143c4cd57182f9b83041383a562cee62d9897e69cbbfe4c7415
zhihuibu2	b'\xf4\xb6\x0b;\x08V\x04\x848L\x14/y\x11\c7\cxe\xf3\xa5\xdbR\x8a\x9\xae\x6\x9e5\x9cGN\x0c9\x9d'	6ff4b60b3a08560484384c142f7911c7cef3a5db528ae9ace6e59c474e0c39d9
zhihuibu3	b'\v\x93d\x6p\x8r\xacQg\xe7\x17\x13\cxc\xa0\x1c\xdaR\x84\xff\xf6\x98\x9m\xea\x95\xaf\x7\xa6\r\x14	769364d670d80dac5167e71713cca01cda6b5284fff698d96dead5afb7a60d14
zhihuibu4	b'\<h\x90t\x14\x86#\xc06\cxc\x90R'\x99W\x97\x1d\x94\xad\x11o\xa6\x15\x9d\$ \x9e88'	293c6820e074c1348623dc06dc9052603d9957f71db4ad116fa615d92478e838

本文还进行了四旋翼无人机通信过程保密性验证。本部分采用 Fernet 对称加密算法,它基于 AES(Advanced Encryption Standard)算法和 HMAC(Hash-based Message Authentication Code)算法的组合。测试中的实现过程主要使用 Python 中密码模块库 Cryptography 中 cryptography.fernet 的类 Fernet。这提供了一种简单且安全的方式来对来自指挥部各模块的指令数据进行保密性验证^[45-48],确保数据在传输过程中没有被窃听。 X^*, Y^*, Z^* 及 Yaw^* 来自指挥部命令指令值,是对指挥部命令值进行解密后得到的。部分实验计算如表 3 所列,可以明显看到以 gAAAAA 开头的 Token 标志,符合 Fernet 算法特征。

表 3 指挥部命令保密性部分实验

Table 3 Headquarters Command Confidentiality Test partial

信号	ASCII	加密值
0	48	'gAAAAABnTSHdqHlq9g0Y4UsF3hDl7upLyKb7p3ee8YbwTkxkZ6a0jy8JKuf43sbobGyxL9EuR_Bsh-eNsWkt0YmjhfAaC7A=='
0.1	46	'gAAAAABnTSlleVCI0QEvhBJMzjEizQEQ1yO9TZINYWtoY54tQTbMW--xgCo2JALoch0sFACIMMfLO1E_uCv83Re676f6fWmg=='
1.2	46	'gAAAAABnTSK_y176tMwqr2EPxR_CBRBeQT4nds7e2imww_U4vVEaGORVVUtsValF2evbUtBm4D1EpV5SZEgIIBEYH5Zli_BA3w=='
-1.2	46	'gAAAAABnTSJzCM-IPXRwtjNBAhagBVZa1cbW1kXt0sR6KZsotSRDb5L-C3mVDap6uEBgp_B2CyETy_6blqbnC08X1XBMJFYtw=='
0.85	46	'gAAAAABnTSDnidv0jnXpcXD7Kljc_B1I3s1S3c6JQ5PENInQrXGJBJFUHpkazC0-EYsvln50t2JTr8umtWdkbimLKFVYt6mp3w=='
-0.85	46	'gAAAAABnTSOoH33ZHbKQrwdk1qVi6KWGXV86cJPRq6ZmjRAF_opMPK3WlpndXaADEgulYsLgulInqKvYRh_so_-L5VHXy5Uw=='

四旋翼无人机 PID 控制器的主要作用是通过比例(P)、积分(I)和微分(D) 3 个参数的设定,维持飞行作业中的控制稳定,以满足应急救援现场侦测等任务要求。四旋翼无人机 PID 控制器通过反馈回路对系统进行巡飞路径控制,减

少误差,使四旋翼无人机系统控制更加精准。图 7 是四旋翼无人机偏航角的 PID 控制器,图 8 是四旋翼无人机的 X 轴与 Y 轴的速度 PID 控制器。

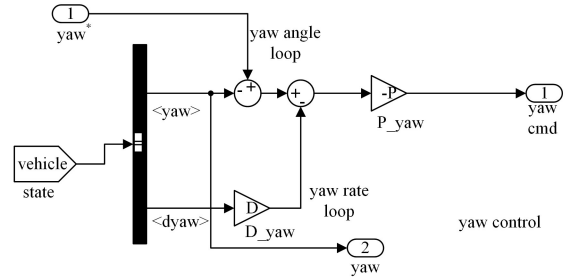


图 7 四旋翼无人机偏航角的 PID 控制器

Fig. 7 PID controller for yaw angle of quadcopter unmanned

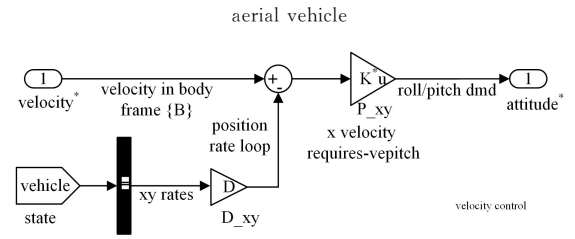


图 8 四旋翼无人机的 X 轴与 Y 轴速度 PID 控制器

Fig. 8 PID controller for X-axis and Y-axis speed of quadcopter unmanned aerial vehicle

四旋翼无人机位姿环和位姿速度环 PID 控制器与上类似。图 9 是四旋翼无人机实现飞行轨迹任务时,RPY 角的实际测量值。经分析, Yaw 角是斜线,这与期望 Yaw^* 轨迹基本重合,因为巡飞任务主要是圆形轨迹,需要较大的偏航角实现四旋翼无人机偏航控制。相反,可以看到 $Roll$ 角与 $Pitch$ 角较小,否则会导致无人机绕 X 和 Y 轴大幅度翻滚,导致四旋翼无人机飞行不稳定,这可以由式(4)等分析得到。图 10 是四旋翼无人机实现飞行轨迹任务时的角速度展示,同理,不再赘述。

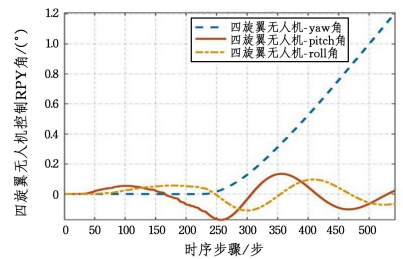


图 9 四旋翼无人机飞行轨迹 RPY 角实际测量值变化

Fig. 9 Actual measurement value variation of RPY angle in quadcopter unmanned aerial vehicle flight trajectory mission

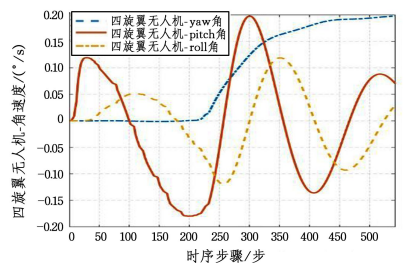


图 10 四旋翼无人机实现飞行轨迹任务时角速度

Fig. 10 Display of angular velocity during flight trajectory tasks of quadcopter unmanned aerial vehicles

图 11 是四旋翼无人机实现飞行轨迹任务时,相关变量对比图。(a)是 X 轴的相关变量对比图,包括 X 轴实际测量位置、期望扭矩、实际测量扭矩及 Roll 角。(c)是 X 轴的相关变量归一化后对比图,也包括 X 轴实际测量位置、期望扭矩、实际测量扭矩及 Roll 角。(b)是 Y 轴的相关变量对比图,包括 Y 轴实际测量位置、期望扭矩、实际测量扭矩及 Pitch 角。(d)是 Y 轴的相关变量归一化后对比图,包括 Y 轴实际测量位置、期望扭矩、实际测量扭矩及 Pitch 角。将相关变量数值标准化与归一化,计算各属性的平均值和平均绝对误差,使得每个数值归一化到 $[0,1]$ 区间,有助于消除特征之间的量纲差异,提高对比显示度,使得不同特征之间具有相对可比

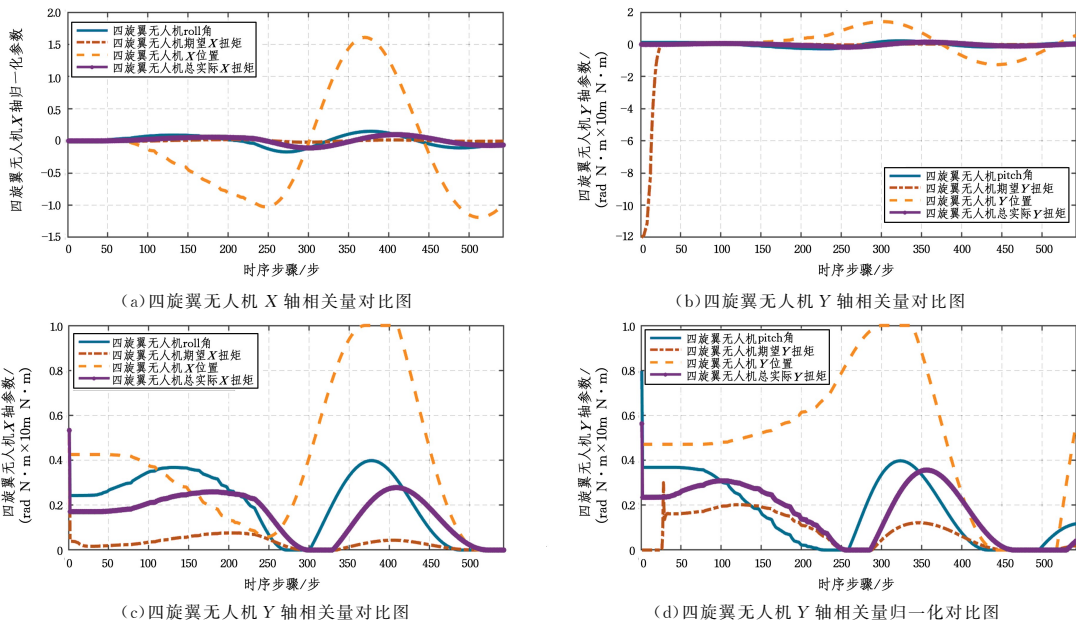


图 11 四旋翼无人机实现飞行轨迹任务时相关变量对比图

Fig. 11 Comparison chart of relevant variables when quadcopter unmanned aerial vehicles achieve flight trajectory

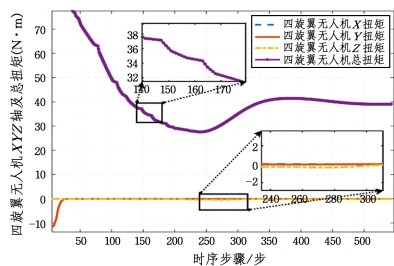


图 12 四旋翼无人机实现飞行轨迹任务时各轴扭矩值

Fig. 12 Torque values of each axis for quadcopter unmanned aerial vehicle to achieve flight trajectory tasks

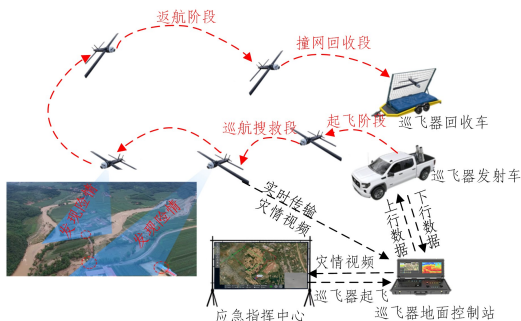


图 13 应急救援现场任务执行中的部分态势图

Fig. 13 Partial situation map during the execution of emergency rescue on-site tasks

性,有助于分析无人机各物理量之间的关系,例如从图 11(b)中,可以看到四旋翼无人机刚开始扭矩是负号,说明四旋翼无人机是产生负的俯仰角,即实现扎头的效果,这样会使得整体提升力 T 产生一个斜向前向上的力,推动四旋翼无人机向前前进。同理,从图 11(a)中可以看到四旋翼无人机扭矩为负号时,四旋翼无人机是产生负的滚动角,即实现微左滚的效果,这样会使得整体提升力 T 产生一个斜向左向上的力,推动四旋翼无人机向左前进,反之向右飞行。图 12 展示了四旋翼无人机实现飞行轨迹任务时各轴扭矩值,经分析其方向和趋势与无人机飞行任务一致。图 13 是四旋翼无人机位姿分析与展示模块展示的应急救援现场任务执行中的部分态势图。

4.3 总结

通过建立基于密码技术的四旋翼无人机网络安全控制模型,并利用 Python 的 Cryptography 和 Matlab 的 Simulink 开展联合实验,本文较好地实现了四旋翼无人机的安全平稳控制,经实验验证指挥部各模块标识数据被篡改后,本模型可以有效抵御诸如该类的攻击行为,为解决基于密码模块的自组网无人机联合控制的问题提供了理论依据和应用基础。

结束语 后续,我们将紧密围绕应急管理应急救援实战,开展多无人机智能体的研究;开展针对密码模块和整体系统的网络攻防验证;持续开展控制器算法优化和改进,提高应急救援各类极端场景下的无人机安全可靠飞行,进一步结合实战需求做好应用。

参考文献

[1] HE D J, DU X, QIAO Y R. A Survey on Cyber Security of Unmanned Aerial Vehicles[J]. Chinese Journal of Computer, 2029, 42(5): 1076-1074.
 [2] GUO L, YU X, ZHANG X, et al. Safety control system technologies for UAVs: review and prospect[J]. Scientia Sinica Informationis, 2020, 50(2): 184-194.
 [3] JAHAN F, SUN W, NIYAZ Q, et al. Security modeling of autonomous systems: a survey[J]. ACM Computing Surveys, 2019, 52(5): 1-34.

- [4] WANG Z H, ZHOU C H, PAN Y W., et al. Overview of Unmanned Aerial Vehicle Systems Security[J]. Computer Science, 2024, 51(S1): 876-881.
- [5] BAO S G, YAO Q C, WANG Y W. Research on the application of fire fighting UAV in high-rise buildings [J]. Fire Industry (Electronic Version), 2024, 10(15): 31-33.
- [6] LIU Y, NING P, REITER M K. False data injection attacks against state estimation in electric power grids[J]. ACM Transactions on Information and System Security, 2011, 14(1): 1-33.
- [7] LIANG G Q, ZHAO J H, LUO F J. A review of false data injection attacks against modern power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1630-1638.
- [8] QIN J H, LI M L, SHI L. Optimal denial-of-service attack scheduling with energy constraint over packet-dropping networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 63(6): 1648-1663.
- [9] RAHMAN M A, MOHSENIAN-RAD H. False data injection attacks with incomplete information against smart power grids [C] // IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2012.
- [10] LIU X, BAO Z, LU D. Modeling of local false data injection attacks with reduced network information[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 6(4): 1686-1696.
- [11] LIU X, LI Z Y. False data attacks against AC state estimation with incomplete network information[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2239-2248.
- [12] ESMALIFALAK M, NGUYEN H, ZHENG R, et al. Stealth false data injection using independent component analysis in smart grid[C] // IEEE International Conference on Smart Grid Communications. 2011.
- [13] LIU W, FENG B W, WENG J. Survey on research of mini-drones security[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2016, 2(3): 39-45.
- [14] HE D J, D X, Q Y R, et al. A Survey on cyber security of unmanned aerial vehicles[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(5): 1076-1094.
- [15] BHATTI J, HUMPHREYS T E. Hostile control of ships via false GPS signal: demonstration and detection[J]. Journal of the Institute of Navigation, 2017, 64: 51-66.
- [16] KERNS A J, SHEPARE D P, BHATTI J A, et al. Unmanned aircraft capture and control via GPS spoofing [J]. Journal of Field Robotics, 2014, 31(4): 617-636.
- [17] PSIAKI M L, HUMPHREYS T E. GNSS spoofing and detection [J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(6): 1258-1270.
- [18] LIU X Y, JIA J. Safety analysis method of small shipboard fixed wing UAV[J]. Command Control and Simulation, 2019, 41(1): 109-111.
- [19] CHEN P Z, WU H Y, CHEN Y. Path planning for micro quadrotor UAVs based on dynamic movement primitives[J]. Chinese High Technology Letters, 2016(2): 186-194.
- [20] XU J, CAI CX, LI YQ, et al. Dual-loop path tracking and control for quad-rotor miniature unmanned aerial vehicles[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(10): 1335-1342.
- [21] LIU J Y, JIA W F, LAI J Z, et al. Multi-information Nonlinear Fusion Technology of Micro Quadrotor Aircraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(5): 575-582.
- [22] WU C F, LIU X Q, YUAN X. Modeling and PID control for a quadrotor[J]. Electronic Design Engineering, 2012(16): 68-70.
- [23] CHEN Z Q, CHEN Y, SUN M W, et al. Surveys on Theory and Engineering Applications for Linear Active Disturbance Rejection Control[J]. Information and Control, 2017(3): 257-266.
- [24] GAO J, WANG P, HOU Z X. UAV velocity control based on improved PID algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015 (S1): 1-5.
- [25] HAN Z Q. Auto-disturbances-rejection Controller and Its Applications[J]. Control and Decision, 1998(1): 19-23.
- [26] SONG W G. Theory, methods and algorithms of robot mechanical systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [27] CAI Z X. Robotics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [28] LIU R. Robotics, Machine Vision and Control—Fundamentals of MATLAB Algorithms[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.
- [29] GUO H, GUO X H. Local path planning algorithm for UAV based on improved velocity obstacle method[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2023, 44(11): 327586-327586.
- [30] ZHAI L, ZHANG X Y, ZHANG X, et al. Local Dynamic Obstacle Avoidance Path Planning Algorithm for Unmanned Vehicles Based on Potential Field Method[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(7): 696-705.
- [31] ZHANG Q, SONG B Y, ZHAO H D. Discretization of Fractional Order Differentiator and Integrator with Different Fractional Orders[J]. Intelligent Control and Automation, 2017(8): 75-85.
- [32] 崔凤午, 梁怀学. 棣莫弗公式在推导倍角公式中的应用[J]. 松辽学刊(自然科学版), 1997(4): 64-65.
- [33] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 科学出版社, 2007.
- [34] OSSAREH H R, WISOTZKI S, BUCKLAND S, et al. An Internal Model Control-Based Approach for Characterization and Controller Tuning of Turbocharged Gasoline Engines[J]. IEEE transactions on control systems technology: A publication of the IEEE Control Systems Society, 2021, 29(2): 866-875.
- [35] GUO L. Feedback and uncertainty: Some basic problems and results[J]. Annual Review in Control, 2020: 4927-4936.
- [36] WU L F, HONG Z, PAN F. Network protocol reverse analysis and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [37] YE Y, ZHANG Z, WANG F, et al. Netplier: probabilistic network protocol reverse engineering from message Traces[C] // Network and Distributed System Security Symposium. 2021.
- [38] GENTRY C, WATERS B. Adaptive security in broadcast encryption systems (with short ciphertexts)[C] // Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques. 2009: 171-188.
- [39] ZHAO X, ZHANG F. Fully CCA2 secure identity-based broadcast encryption with black-box accountable authority[J]. Journal of Systems and Software, 2012, 85(3): 708-716.
- [40] SHI X L, ZHU Y F, LIU L, et al. Method of encrypted protocol reverse engineering [J]. Application Research of Computers, 2015, 32(1): 214-217.
- [41] GAO J F, ZHANG Y F, LUO S, et al. Research on Taint Backtracking Reverse Analysis Method of Network Encoding Protocol[J]. Netinfo Security, 2017(1): 68-76.
- [42] MA R K, ZHENG H, WANG J Y, et al. Automatic protocol reverse engineering for industrial control systems with dynamic

taint analysis[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2022, 23(3): 351-360.

- [43] ZHU Y, HAN J, YUAN L, et al. SPFPA: A format parsing approach for unknown security protocols[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2015, 52(10): 2200.
- [44] HE X D. *Security Analysis of Security Protocol Implementations Based on Network Trace* [D]. Wuhan: South-Central Minzu University, 2019.
- [45] TANG S Y, CHENG G, JIANG B M, et al. Detection and recognition of VPN encrypted traffic based on segmented entropy distribution[J]. *Cyberspace Security*. 2020, 11(8): 23-27, 33.
- [46] XIAO D Q, ZHOU Q, ZHANG H G, et al. Analyzing encryption protocols based on temporal logic[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2002, 25(10): 1083-1089.
- [47] DING S F, ZHU H, XU X Z, et al. Entropy-based fuzzy information measures[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(4): 796-801.

- [48] ZHU Y N, HAN J H, YUAN L, et al. Protocol ciphertext field identification by entropy estimating[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(8): 1865-1871.



MENG Dongyue, born in 1984, undergraduate. Her main research interests include quadrotor UAV and cryptography.



HUANG Yuchuan, born in 1985, Ph.D. His main research interests include quadrotor UAV and cryptography.