



航空学报

Acta Aeronautica et Astronautica Sinica

ISSN 1000-6893, CN 11-1929/V

《航空学报》网络首发论文

题目：复杂环境下多无人机轨迹姿态协同控制
作者：田栢苓，李品品，鲁瀚辰，宗群
网络首发日期：2020-06-15
引用格式：田栢苓，李品品，鲁瀚辰，宗群. 复杂环境下多无人机轨迹姿态协同控制. 航空学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20200615.1407.032.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

复杂环境下多无人机轨迹姿态协同控制

田栢苓^{1*}, 李品品¹, 鲁瀚辰¹, 宗群¹

1. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

摘 要: 考虑多无人机在实际飞行过程中的避障需求, 在建立面向控制的四旋翼无人机轨迹姿态模型基础上, 为避免传统多无人机为每架无人机规划轨迹的不足, 研究了基于多无人机中心点的轨迹设计策略, 进一步, 考虑避障约束, 基于半定规划进行迭代区域扩张, 完成了多无人机的安全飞行区域及队形设计。在此基础上, 基于干扰补偿策略为每架无人机设计了协同控制器, 最终确保了多无人机在多障碍环境下的安全飞行。

关键词: 多无人机; 轨迹姿态协同; 干扰补偿; 半定规划; 避障

中图分类号: V448.2 **文献标识码:** A

多无人机自主协同编队飞行控制是近年来的一个前沿研究课题, 它可以充分利用有限的单机资源, 共同完成复杂的任务。多无人机协同编队的灵感来源于自然界中鱼群及鸟群的集群行为, 其显著特点是自组织、自协调、并行性、强鲁棒及智能涌现。多无人机在执行任务时, 每架无人机搭载不同的传感器, 无人机之间共享信息、互相配合并各司其职, 整个编队具备很强的鲁棒自愈能力和故障冗余度, 即使失去一部分个体也不会对整体造成致命影响。相比单个无人机, 多无人机的主要优势主要体现在以下几个方面。

(1) 功能分布: 将单个完备平台所具备的各项功能如侦察监视、电子干扰、打击与评估等能力化整为零, 分散到大量低成本、功能单一的无人系统, 通过大量异构、异型的个体来实现原本复杂的系统功能, 系统的倍增效益将使无人机编队具备远超单一平台的作战能力; **(2) 去中心**

化: 目前无人机的通信模式仍然以单机与地面站通信方式为主, 信息传输仍是集中式的, 去中心化的多无人机利用自组网技术可以实现无人机之间信息的高速共享, 同时提高多无人机的抗故障能力及高效信息共享能力; **(3) 分布式探测:** 广泛分布传感器的能力对于主动与被动探测以及定位精度有显著优势, 多无人机可以相互协作实现目标的高精度定位, 当需要主动探测时, 无人机间还可采取频率、波段不同的雷达进行全频谱探测, 将极大提高探测能力。

然而, 无人机是一个典型的欠驱动、强耦合、多变量的复杂系统, 加之多障碍飞行环境下, 多无人机的避碰避障需求, 导致多无人机的协同控制面临巨大挑战。目前多无人机的避障控制方法主要有势场法和速度障碍法。文献[1]提出了使用势函数和虚拟Leader的多智能体分布式协同控制。势函数定义了相邻智能体之间的斥

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金 (61773278; 61673034; 61673294; 61873340)

*通讯作者. E-mail: bailing_tian@tju.edu.cn

力以保证期望的距离,虚拟Leader是一个移动的参考点,通过势函数影响相邻智能体,虚拟Leader用来引导整个编队的运动,这个方法给出了李雅普诺夫函数的构造,从而证明了闭环系统的稳定性。文献[2]研究了基于相对速度障碍的无人机协同避障控制问题,为了提高计算的实时性,每个无人机在避障时不需要无人机之间进行通信,每个无人机独立进行避障决策,最后仿真结果验证了算法的有效性。文献[3,4]用自适应势函数和终端滑模方法解决多无人机Leader-Follower分布式编队安全重构问题,实现了多无人机队形变换时多无人机的避碰飞行。此外,作者对Leader无人机设计了分布式状态观测器,使得编队控制器不依赖全局信息。文献[5]针对多无人机V字型编队和躲避障碍物的问题,在传统人工势能的基础上结合距离约束和视线角约束,提出了领航法和改进人工势能相结合的编队方法,仿真表明该方法能使编队能够随着环境变化而自适应改变,主动躲避障碍物。文献[6]针对无人机三维避障轨迹规划问题,建立包括非线性动力学、允许控制、状态边界、障碍规避和终端约束的非凸最优控制模型。利用控制与状态离散化方法,将无限维的非凸最优控制问题参数化为有限维的非凸优化问题。在此基础上,引入序列凸化技术,将非凸优化问题转化为一系列具有多项式复杂度的凸优化子问题进行求解,以提高轨迹规划效率。数值仿真验证结果表明,基于凸优化的轨迹规划方法能够为无人机快速生成规避障碍的三维轨迹。美国宾夕法尼亚大学Kumar研究团队^[7]提出了多无人机协同控制解决方案,利用混合整数规划技术实现了16架微型四旋翼无人机自主避障编队飞行。南加州大学的Preiss等人^[8],从优化角度对多无人机的避碰避障轨迹问题进行了研究,该算法首先对每个无人机建立基于椭圆的避碰模型,然后在障碍空间内生成栅格地图,并在该空间内找到离散的路径点,最后通过分布式优化技术得到每个无人机的避碰避障连续光滑轨迹。

上述多无人机避碰避障轨迹姿态协同控制的主要局限在于每架无人机都需要知道其它所有无人机的起始位置和目标位置,以此来规划自身轨迹。因此,计算复杂度随障碍物数量和无人机数量急剧增加。为解决该问题,论文研究了一种基

于多无人机中心航路点的轨迹姿态协同控制策略,该方法的计算复杂度与多无人机的规模无关,有效避免了避碰避障轨迹计算复杂度与多无人机规模之间的矛盾。论文章节安排如下:第1节给出障碍环境下多无人机轨迹姿态协同控制问题的描述,第2节面向安全域的多无人机轨迹姿态协同控制策略的具体实现,第3节给出本文的仿真结果分析,第4节对本文的研究工作进行总结。

1 问题分析

四旋翼无人机的桨叶对称分布在机体的前后、左右四个方向,四个旋翼处于同一高度平面,四旋翼飞行器通过调节四个电机转速来改变旋翼转速,实现升力的变化,从而控制飞行器的姿态和位置,以第*i*架无人机为例,其中 $i \in \{1, 2, \dots, n\} \subset N$,四旋翼无人机的轨迹姿态数学模型如下:

$$\dot{\mathbf{p}}_i = \mathbf{v}_i \quad (1)$$

$$\mathbf{v}_i = -g\mathbf{e}_z + \tau_{f_i} \mathbf{R}_i \mathbf{e}_z / m \quad (2)$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_i = \mathbf{W}_i \boldsymbol{\Omega}_i \quad (3)$$

$$\mathbf{I} \dot{\boldsymbol{\Omega}}_i = -\boldsymbol{\Omega}_i \times \mathbf{I} \boldsymbol{\Omega}_i + \boldsymbol{\tau}_i + \mathbf{A} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i, z_i] \in R^3$ 表示第*i*架无人机惯性坐标系下 x, y, z 三个坐标轴方向的位置;

$\mathbf{v}_i = [v_{x_i}, v_{y_i}, v_{z_i}] \in R^3$ 表示惯性坐标系下 x, y, z 三个坐标轴方向的线速度; $\boldsymbol{\theta}_i = [\phi_i, \theta_i, \psi_i] \in R^3$ 表示惯性坐标系下的滚转角、俯仰角及偏航角; $\boldsymbol{\Omega}_i = [\omega_{x_i}, \omega_{y_i}, \omega_{z_i}] \in R^3$ 表示机体坐标系下的滚转角速率、俯仰角速率及偏航角速率; $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 表示地球重力加速度; $\mathbf{e}_z = [0, 0, 1]$ 表示常值向量;

m 表示四旋翼无人机质量; τ_{f_i} 表示无人机的总升力; $\boldsymbol{\tau}_i = [\tau_{1_i}, \tau_{2_i}, \tau_{3_i}]$ 表示无人机三个方向的控制力矩; $\mathbf{I} = \text{diag}\{I_x, I_y, I_z\}$ 表示无人机惯性常值矩阵; \mathbf{A} 表示模型参数不确定及外界干扰的总和; 旋转矩阵 \mathbf{R}_i 和变换矩阵 \mathbf{W}_i 定义可参见文献[9,10]。本论文研究目标是设计多无人机的轨迹姿态协同控制策略,确保多无人机在如图1所示的场景下实现避碰避障飞行。

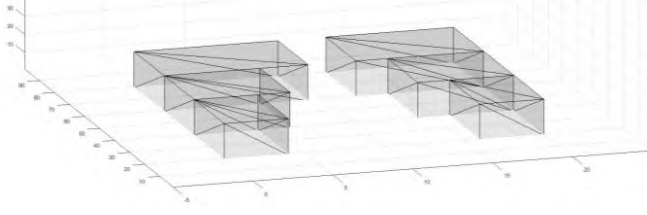


图1 多无人机飞行场景
Fig. 1 The flight scenario of multiple UAVs

2 多无人机轨迹姿态协同控制

2.1 总体框架

课题采取的总体研究方案如图2所示。其核心包括多无人机安全域及构型设计, 轨迹跟踪控制器设计, 其中轨迹规划模块只对多无人机中心点轨迹进行规划设计, 可有效避免传统多无人机为每架无人机规划轨迹的不足。在此基础上生成满足所有约束的安全飞行区域及最优编队构型; 轨迹跟踪模块, 主要通过设计分布式协同控制器, 确保多无人机能够安全、无碰撞地穿过障碍物朝着各自目标区域飞行。整个框架中的关键技术实现通过2.2和2.3给出。

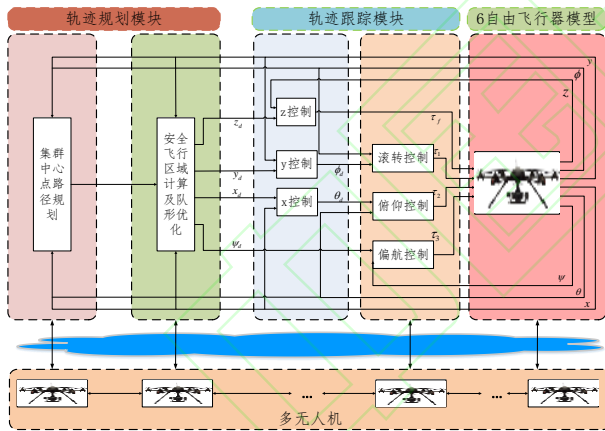


图2 多无人机轨迹姿态协同控制

Fig. 2 Trajectory and attitude cooperative control of multiple UAVs

2.2 面向安全域的优化设计及队形优化

基于文献[11]的研究方法, 该部分主要完成多无人机在障碍环境下的安全区域计算及构型设计, 具体实现步骤归纳如下:

步骤1: 在给定多无人机中心点起始位置和终点位置的前提下, 利用A*算法^[12]对无人机的避障航路轨迹进行优化设计;

步骤2: 基于获得的路径点, 使用半定规划进行迭代的区域扩张, 以初始路径点为当前无人机编队中心位置, 以下一个路径点为当前目标点 g , 在自由空间中找到包含所有无人机位置和目标点的最大安全飞行区域 $P_{f_o \rightarrow g}$, 包含所有无人机位置的中心和目标点的另一个安全飞行区域 $P_{o \rightarrow g}$, 取两个安全飞行区域的交集 $P = P_{f_o \rightarrow g} \cap P_{o \rightarrow g}$ 即为无人机队形变换的安全区域, 如图3中的蓝色多面体所示。

步骤3: 找到安全区域后, 即将安全区域 P 表示为等价的线性约束集合

$$P = \{z \in R^3 \mid Az \leq b, \text{ for } A \in R^{n_i \times 3}, b \in R^{n_i}\} \quad (5)$$

式中: A 表示线性约束矩阵; b 表示线性约束向量; n_i 表示多面体 P 的面数, 进而使用序列凸优化进行队形规划。为此首先定义 $f \in R$ 个默认队形, 如正方形, 一字形或三角形, 将其中任意一个默认队形表示为 $F_0^i, 1 \leq i \leq f$ 。编队 F_0^i 包括一个无人机位置的集合 $\{r_{0,1}^i, \dots, r_{0,n_i}^i\}$ 和一个相对于编队中心的顶点集合 $\{f_{0,1}^i, \dots, f_{0,n_i}^i\}$ 。则任意队形 F^i 中的无人机位置和顶点可以表示为

$$\begin{aligned} r_j^i &= t + s \cdot \text{rot}(q, r_{0,j}^i) \\ f_j^i &= t + s \cdot \text{rot}(q, f_{0,j}^i), \quad \forall i, j \in [1, n] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $t \in R^3$ 表示无人机编队中心的位置; $s \in R^+$ 表示队形扩张的大小; q 表示一个单位四元数, 其共轭表示为 \bar{q} ; rot 表示旋转函数, 具体表达式如下

$$[0 \quad \text{rot}(q, f_{0,j}^i)]^T = q \times [0 \quad f_{0,j}^i]^T \times \bar{q} \quad (7)$$

将所有优化变量表示为一个向量 $x_i = [t, s, q] \in R^8$, 定义目标函数为当前编队参数到目标点 g , 到期望编队大小 \bar{s} 及到旋转四元数 \bar{q} 这三个误差的加权求和

$$C(x_i) = w_t \|t - g\|^2 + w_s \|s - \bar{s}\|^2 + w_q \|q - \bar{q}\|^2 + c_i \quad (8)$$

式中: w_t, w_s, w_q 表示权重; c_i 表示队形 i 的指定代价。定义编队顶点 f_j^i 的安全区域边界约束 $C_1^j = \{A(t + s \cdot \text{rot}(q, f_{0,j}^i)) \leq b\}$, 总的安全区域边界约束 $C_1 = \bigcup_{j=1}^{n_i} C_1^j$, 单位四元数 q 约束 $C_2 = \{\|q\|^2 = 1\}$ 。则非线性优化问题可以表示为

$$\mathbf{x}_i^* = \arg \min_{\mathbf{x}_i} C(\mathbf{x}_i), \text{ s.t. constraint } s C_1, C_2 \quad (9)$$

其中 \mathbf{x}_i^* 为使目标函数 $C(\mathbf{x}_i)$ 取得最小值的最优解, 则最优队形 F^{i^*} 的指标 i^* 可以表示为

$$i^* = \arg \min_i C(\mathbf{x}_i^*) \quad (10)$$

使用稀疏非线性优化器 SNOPT^[13] 求解上述优化问题, 求得最优队形 F^{i^*} , 之后返回步骤 1, 将目标点更新为下一个路径点, 将无人机位置更新为优化求得的新位置。重新计算安全飞行区域并在新安全飞行区域中规划新队形。循环执行上述步骤直到优化出最后一个目标队形。

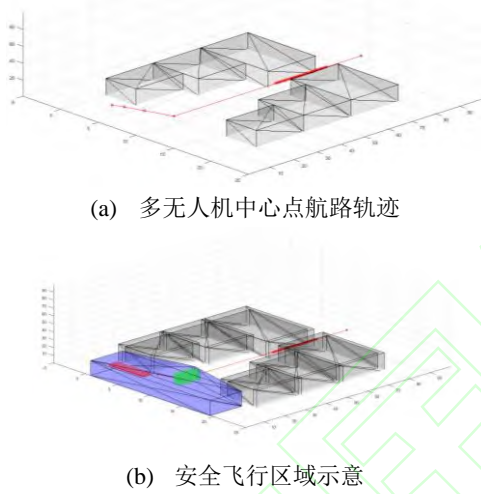


图 3 面向安全域的优化设计及队形优化

Fig. 3 Optimization design and formation optimization in security region

2.3 轨迹姿态协同控制

多无人机的轨迹姿态协同控制, 主要任务是通过设计控制器, 确保系统模型在受到不确定和外界干扰影响的情况下, 仍能够实现对给定位置指令和姿态指令(滚转角、俯仰角及偏航角)的跟踪控制, 从而确保系统的安全稳定飞行。该部分的主要实现过程归纳如下:

步骤 1: 以第 i 架无人机为例, 利用自身和邻机相对状态及无人机之间的拓扑链接关系, 定义如下的相对增广位置跟踪误差:

$$\mathbf{e}_{p_i} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \left((\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) - (\mathbf{p}_{\text{ref}_i} - \mathbf{p}_{\text{ref}_j}) \right) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{p}_{\text{ref}_i}$ 表示第 i 架无人机的期望位置; 则期望速度 $\mathbf{v}_{\text{pref}_i}$ 设计为: $\mathbf{v}_{\text{pref}_i} = \mathbf{K}_p \mathbf{e}_{p_i}$, 其中 \mathbf{K}_p 为常值向量, 表示位置控制器位置环比例增益。进一步, 第 i 架无人机的期望加速度可设计为如下形式:

$$\mathbf{acc}_{\text{ref}_i} = \mathbf{K}_{p_v} \mathbf{e}_{v_i} + \mathbf{K}_{i_v} \int \mathbf{e}_{v_i} \cdot dt + \mathbf{K}_{d_v} \mathbf{e}_{v_i} \quad (12)$$

式中: \mathbf{K}_{p_v} , \mathbf{K}_{i_v} , \mathbf{K}_{d_v} 为常值向量, 分别表示位置控制器速度环的比例、积分和微分增益。基于无人机电学平衡关系, 无人机的总升力可通过下式计算:

$$\tau_{f_i} = (m \cdot \mathbf{acc}_{\text{ref}_i} + m \mathbf{g} \mathbf{e}_z) (\mathbf{R}_i \mathbf{e}_z) \quad (13)$$

步骤 2: 由于四旋翼无人机无法通过控制力矩直接对飞行轨迹进行控制, 因此需要将位置控制器速度环获得的虚拟控制指令转化为期望的飞行姿态, 具体解算公式为:

$$\phi_{\text{ref}_i} = \arcsin \left(\frac{\mathbf{acc}_{\text{ref}_{i1}} \sin \psi_{\text{ref}} - \mathbf{acc}_{\text{ref}_{i2}} \cos \psi_{\text{ref}}}{\mathbf{acc}_{\text{ref}_{i1}}^2 + \mathbf{acc}_{\text{ref}_{i2}}^2 + (\mathbf{acc}_{\text{ref}_{i3}} + g)^2} \right) \quad (14)$$

$$\theta_{\text{ref}_i} = \arctan \left(\frac{\mathbf{acc}_{\text{ref}_{i1}} \cos \psi_{\text{ref}} + \mathbf{acc}_{\text{ref}_{i2}} \sin \psi_{\text{ref}}}{\mathbf{acc}_{\text{ref}_{i3}} + g} \right) \quad (15)$$

式中: $\phi_{\text{ref}_i}, \theta_{\text{ref}_i}, \psi_{\text{ref}_i}$ 表示期望的滚转角、俯仰角及偏航角; $\mathbf{acc}_{\text{ref}_j}, (j=1,2,3)$ 表示向量 $\mathbf{acc}_{\text{ref}_i}$ 的第 j 个元素。

步骤 3: 姿态控制器主要实现四旋翼无人机期望的飞行姿态的跟踪, 从而间接实现对飞行轨迹的跟踪。为了实现无人机对参考姿态指令的稳定跟踪控制, 论文采用基于多变量干扰补偿的姿态控制器设计方法^[9]。为此, 定义第 i 架无人机的期望姿态跟踪误差 $\mathbf{e}_{1_i} = \boldsymbol{\Theta}_i - \boldsymbol{\Theta}_{\text{ref}_i}$, 姿态角速率跟踪误差 $\mathbf{e}_{2_i} = \mathbf{W}_i \boldsymbol{\Omega}_i - \dot{\boldsymbol{\Theta}}_{\text{ref}_i}$, 则第 i 架无人机姿态跟踪误差动态方程满足如下形式

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}_{1_i} = \mathbf{e}_{2_i}, \dot{\mathbf{e}}_{2_i} = & \underbrace{\mathbf{W}_i \mathbf{I}^{-1} \boldsymbol{\tau}_i}_{\boldsymbol{\tau}_i'} - \\ & \underbrace{(\mathbf{W}_i \mathbf{I}^{-1} \boldsymbol{\Omega}_i \times \mathbf{I} \boldsymbol{\Omega}_i + \ddot{\boldsymbol{\Theta}}_{\text{ref}} - \mathbf{W}_i \dot{\boldsymbol{\Omega}}_i)}_{\mathbf{F}_i} + \underbrace{\mathbf{W}_i \mathbf{I}^{-1} \mathbf{A}_i(t)}_{\mathbf{A}_i(t)} \end{aligned} \quad (16)$$

基于上述定义, 后续控制任务可归纳为: 设计虚拟控制力矩 $\boldsymbol{\tau}_i'$ 使得姿态跟踪误差 \mathbf{e}_{1_i} 收敛到零, 为了实现该目的, 利用[9]中的结论, 第 i 架

无人机的干扰补偿姿态控制器通过以下引理给出：

引理 1^[9]：考虑如式(16)所示的无人机姿态误差动态系统，若虚拟控制力矩设计为

$$\tau_i' = F_i - \lambda_1' \langle e_{1_i} \rangle^{p_1} - \lambda_2' \langle e_{2_i} \rangle^{p_2} - k_1 \langle s_{1_i} \rangle^{\frac{1}{2}} - k_2 \int_0^t \text{sign}(s_{1_i}) dt \quad (17)$$

式中对任意非负实数 α ，函数 $x \mapsto \langle x \rangle^\alpha$ 定义为 $\langle x \rangle^\alpha = \|x\|^\alpha \text{sign}(x)$ ， λ_1', λ_2' 为任意正常值； p_1, p_2 为介于 0 到 1 之间的正常值， s_{1_i} 定义如下：

$$s_{1_i} = e_{2_i} + \int_0^t (\lambda_1' \langle e_{2_i} \rangle^{p_1} + \lambda_2' \langle e_{2_i} \rangle) dt \quad (18)$$

式(2-18)中的 k_1, k_2 满足如下条件：

$$k_1 > \frac{3L}{\sqrt{k_2 - L}}, k_2 > 2L \quad (19)$$

式中： L 是公式(3-14)中不确定 $\Delta_i'(t)$ 的上界，即满足条件 $\Delta_i'(t) \leq L$ 。则无人机姿态跟踪误差 e_{1_i} 在有限时间收敛到零。

3 仿真验证与结果分析

3.1 仿真参数设置

以 20 架四旋翼无人机为例，对上述提出的轨迹规划算法及分布式协同控制器的有效性进行数值仿真验证。四旋翼无人机物理参数：质量 $m=1.1\text{kg}$ ，旋翼转动中心到无人机中心的距离 $d=0.225\text{m}$ ，惯性参数为 $I_x=1.431 \times 10^{-2} \text{kgm}^2$ ， $I_y=1.431 \times 10^{-3} \text{kgm}^2$ ， $I_z=2.721 \times 10^{-3} \text{kgm}^2$ 。位置控制器： $K_p=[0.95;0.95;1]$ ， $K_{p_r}=[0.09;0.09;0.2]$ ， $K_{i_r}=[0.02;0.02;0.02]$ ， $K_{i_r}=[0.01;0.01;0]$ 。姿态解算算法期望偏航角 $\psi_d=0$ 。姿态控制器增益 $K_{p_\theta}=[6.5;6.5;2.8]$ ， $K_{p_\theta}=[0.15;0.15;0.3]$ ，积分增益 $K_{i_\theta}=[0.05;0.05;0.1]$ ，微分增益 $K_{d_\theta}=[0.003;0.003;0.001]$ 。基于干扰补偿的有限时间姿态控制器滚转俯仰偏航三通道控制器参数选择相同，具体为 $k_1=9, k_2=18, \lambda_1'=5, \lambda_2'=4$,

$p_1=0.6, p_2=0.7$ 。仿真过程中，不确定干扰通过 $\Delta_i = 0.5[1 + \sin(t), 1 + \cos(t), 1 + 0.5(\sin(t) + \cos(t))]^T$ 模拟。

3.2 仿真结果分析

针对飞行场景图 3，图 4 给出了 20 架无人机的轨迹控制曲线，以第 1 架无人机为例，图 5 给出该无人机在飞行过程中的轨迹跟踪误差曲线和姿态跟踪误差曲线，进一步图 6，给出了 20 架无人机飞行过程的典型示意图，从中可以看出，本文提出的多无人机轨迹姿态协同控制策略，在保证多无人机编队控制稳定的同时，可有效实现多无人机在给定障碍区域的避障飞行。

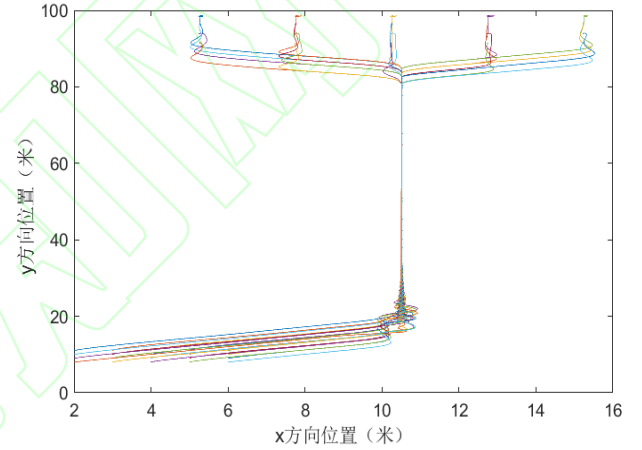


图 4 20 架无人机飞行轨迹曲线

Fig. 4 Flight trajectory curves of 20 UAVs

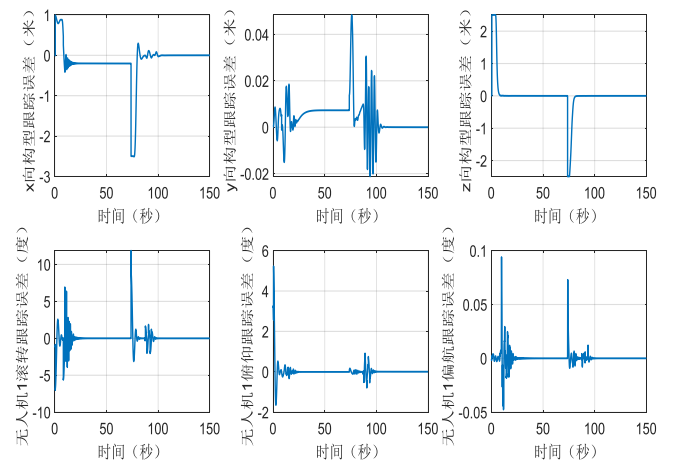


图 5 无人机实际构型与期望构型的跟踪误差

Fig. 5 Errors between actual and expected configuration of UAV

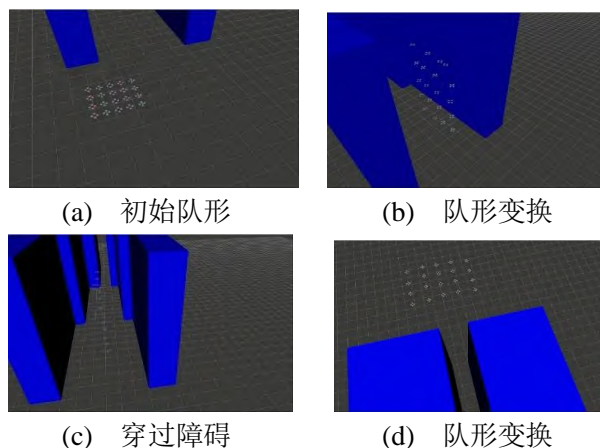


图6 20架无人机编队飞行示意图

Fig. 6 Formation flight diagram of 20 UAVs

4 结论

考虑多无人机障碍空间区域的编队飞行控制问题,研究了基于多无人机中心点的轨迹设计策略,进一步,考虑避障约束,基于半定规划进行迭代区域扩张,完成了多无人机的安全飞行区域计算及队形设计,最后设计了基于干扰补偿的多无人机分布式协同控制器,实现了多无人机在给定场景下的避障飞行。

参 考 文 献

- [1] Leonard N E, Fiorelli E. Virtual Leaders, Artificial Potentials and Coordinated Control of Groups[C]//Decision and Control, 2001. Proceedings of the 40th IEEE Conference on. IEEE, 2001, 3: 2968-2973.
- [2] 杨秀霞, 华伟, 孟启源. 多个无人飞行器协同避障及避碰研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(10): 113-114.
YANG X X, HUA W, MENG Q Y. Study on Cooperative Collision Avoidance of Multi-Unmanned Aerial Vehicle[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(10): 113-114(in Chinese).
- [3] WANG D D, ZONG Q, TIAN B L. Adaptive Finite-time Reconfiguration Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicles with a Moving Leader[J/OL]. Nonlinear Dynamics, 2018, DOI: 10.1007/s11071-018-4618-y.
- [4] WANG D D, ZONG Q, TIAN B L*, et al. Finite-time Fully Distributed Formation Reconfiguration Control for UAV Helicopters[J/OL]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 4361. <https://doi.org/10.1002/rnc>
- [5] 刘艳, 阳周明, 冯运铎. 基于改进人工势能的无人机编队与避障[J]. 火力与指挥控制, 2018, 10(2): 116-120.
LIU Y, YANG Z M, FENG Y D, et al. UAV Formation and Obstacle Avoidance Based on Improved Artificial Potential Field[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 10(2): 116-120(in Chinese).
- [6] 王祝, 刘莉, 温永禄. 基于凸优化的无人机三维避障轨迹规划[C]//第28届中国控制与决策会议. 2016.
WANG Z, LIU L, WEN Y L. Three-Dimensional Obstacle Avoidance Trajectory Planning For Uav Based On Convex Optimization[C]//Proceedings of the 28th China Control and Decision Conference, 2016(in Chinese).
- [7] Kushleyev A, Mellinger D, Powers C, et al. Towards a Swarm of Agile Micro Quadrotors[J]. Autonomous Robots, 2013, 35(4): 287-300.
- [8] W.Honig, J.A.Preiss, T.K.S.Kuma, et al. Trajectory Planning for Quadrotor Swarms[J]. IEEE Transactions on Robotics, 10.1109/TRO.2018.2853613, 2018.
- [9] TIAN B L, LIU L H, LU H C, et al. Multivariable Finite Time Attitude Control for Quadrotor UAV: Theory and Experimentation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2567-2577.
- [10] TIAN B L, CUI J, LU H C, et al. Adaptive Finite-Time Attitude Tracking of Quadrotors with Experiments and Comparisons[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 10.1109/TIE.2019.2892698, 2019.
- [11] Javier Alonso-Mora, Eduardo Montijano, Mac Schwager. Distributed multi-robot formation control among obstacles: A geometric and optimization approach with consensus[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Stockholm, Sweden, 2016.
- [12] Botea A, Müller M, Schaeffer J. Near Optimal Hierarchical Path-Finding[J]. Journal of Game Development, 2004, 1(7): 7-28.
- [13] P.E.Gill and E.Wong. User'S Guide for SNOPT Version 7.6: Software For Large-Scale Nonlinear Programming, 1-176.

Trajectory and attitude coordinated control of multiple unmanned aerial vehicles in complex environment

TIAN Bailing ^{1,*}, LI Pinpin ¹, LU Hanchen ¹, ZONG Qun ¹

1. School of Electric and Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: Considering the collision avoidance and obstacle avoidance requirements of the multi-UAVs actual flight process, on the basis of establishing the trajectory attitude model of the four-rotor UAV, the trajectory design strategy based on the central point of the cluster UAV is proposed to avoid the deficiencies of the planning trajectory of each UAV for the traditional cluster UAV. Further, considering the obstacle avoidance constraints and the iterative regional expansion based on the semi-definite program, the safe flight area and formation design of the cluster UAVs are completed. On this basis, based on disturbance compensation strategy, a distributed cooperative controller is designed for each UAV, which finally ensures the obstacle avoidance flight of multiple UAVs in a complex environment.

Keywords: Multiple unmanned aerial vehicles; Trajectory attitude coordination; disturbance compensation; semi-definite program; obstacle avoidance

URL:

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61773278; 61673034; 61673294; 61873340)

*Corresponding author. E-mail: bailing_tian@tju.edu.cn