



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



无人机系统安全控制研究综述: 控制障碍函数

姚绍杰, 闫帅明, 张浩, 石磊, 石华光, 周毅

引用本文:

姚绍杰, 闫帅明, 张浩, 石磊, 石华光, 周毅. 无人机系统安全控制研究综述: 控制障碍函数[J]. 控制与决策, 2024, 39(10): 3169–3180.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0784>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于领航-跟随的有人/无人机编队队形保持控制

Formation keeping control for manned/unmanned aerial vehicle formation based on leader-follower strategy

控制与决策. 2021, 36(10): 2435–2441 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0453>

分布式多无人机的时变编队非线性控制设计

Time-varying formation nonlinear control of distributed multiple UAVs

控制与决策. 2021, 36(10): 2490–2496 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0136>

基于凸面体圆弧航路的无人机自主避障算法

Autonomous obstacle avoidance algorithm designed for UAV based on convex circular trajectory

控制与决策. 2021, 36(3): 653–660 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0768>

四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV

控制与决策. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

基于深度学习的四旋翼无人机地面效应补偿降落控制设计

Robust landing controller design for quadrotor unmanned aerial vehicle ground effects compensation via deep learning

控制与决策. 2021, 36(11): 2637–2646 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0184>

无人机系统安全控制研究综述：控制障碍函数

姚绍杰, 闫帅明, 张浩, 石磊, 石华光, 周毅[†]

(河南大学人工智能学院, 郑州 450046)

摘要: 近年来,控制障碍函数因其具有实时性强、兼容性强、约束性强、鲁棒性强等优势,已成为无人机安全领域的一个重要研究分支. 由于无人机系统多以非线性控制系统为主,且保障无人机飞行安全至关重要,首先以非线性控制系统为基础,展开介绍控制李雅普诺夫函数、控制障碍函数、安全屏障证书的基本概念;然后围绕基于控制障碍函数构成的二次规划控制器差异的角度梳理其在无人机系统中的应用现状,多无人机系统相比单无人机系统拥有更高的任务效率和适应性,因此进一步梳理集中式和分散式两种类型安全屏障证书在成对无人机中的应用;最后针对当前控制障碍函数在无人机系统应用中存在的技术难题进行分析,并提出未来需要进一步发展的研究方向.

关键词: 无人机系统; 控制障碍函数; 控制李雅普诺夫函数; 安全屏障证书; 二次规划; 安全控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0784

引用格式: 姚绍杰, 闫帅明, 张浩, 等. 无人机系统安全控制研究综述: 控制障碍函数 [J]. 控制与决策, 2024, 39(10): 3169-3180.

Review of safety control research in unmanned aerial vehicle systems: Control barrier functions

YAO Shao-jie, YAN Shuai-ming, ZHANG Hao, SHI Lei, SHI Hua-guang, ZHOU Yi[†]

(School of Artificial Intelligence, Henan University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In recent years, control barrier functions have become an important research branch in the field of unmanned aerial vehicle (UAV) safety due to their advantages in strong real-time performance, strong compatibility, strong constraint handling capability, and strong robustness. As UAV systems are mainly nonlinear control systems, ensuring the safety of UAV flights is crucial. This article first introduces the basic concepts of control Lyapunov functions, control barrier functions, and safety barrier certificates based on nonlinear control systems. Then, the application status of quadratic programming controllers based on control barrier functions in UAV systems is reviewed. Multi-UAV systems have higher task efficiency and adaptability than single UAV systems, so this article further reviews the application of centralized and decentralized safety barrier certificates in paired UAV systems. Finally, this article analyzes the technical challenges of applying control barrier functions in UAV systems and proposes future research directions that need to be further developed.

Keywords: unmanned aerial vehicle system; control barrier functions; control Lyapunov functions; safety barrier certificates; quadratic program; safety control

0 引言

随着通信技术、控制技术和传感器技术的飞速发展,无人机系统在复杂环境中的安全问题成为当前研究的主流问题之一. 无人机相比于传统地面设备,具有体型小、易携带、可视范围广、投入成本低且使用时无人人员伤亡等特点,因此无人机系统被广泛应用于高危环境、多任务环境等特殊场景中^[1-4]. 但是随

着无人机应用范围的不断延伸以及无人机系统自主智能性的不断提升,有关无人机应用的一系列问题不断浮现出来,其中无人机系统的安全性是首要考虑的问题.

无人机系统的安全性问题一直都是无人机领域中一个重要的研究方向,也是未来无人机控制器设计的关键部分. 安全通常被定义为确保系统状态轨

收稿日期: 2023-06-07; 录用日期: 2023-09-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62176088, 62303159).

责任编委: 关新平.

[†]通讯作者. E-mail: zhouyi@henu.edu.cn.

迹始终保持在给定的安全范围内,而对于无人机系统而言,保证系统安全往往需要考虑飞行控制系统、导航控制系统、通信系统、传感器系统等多个方面. 因为无人机系统是一个典型的欠驱动非线性控制系统,非线性控制系统的数学模型对比线性系统往往更加复杂,所以无人机系统的安全性分析是一个具有挑战性的问题. 利用障碍函数可以有效提高无人机系统安全分析的效率,尤其是近年来提出的控制障碍函数(control barrier functions, CBF)^[5-7]. CBF方法通过引入障碍函数,将系统状态限制在安全区域内,可以直接建立控制输入和系统安全性约束的联系,保证系统状态在满足约束的同时趋于稳定^[8-9],也可以通过收集环境数据,利用学习策略不断更新安全区域^[10-11]. CBF方法的提出为解决无人机系统安全问题提供了更加多元的方案,其作为解决无人机系统安全问题的一个重要研究分支,相比传统控制方法具有以下优势: 1)实时性强. CBF仅需使用局部坐标和传感器信息在控制层面强制系统保持在安全区域,计算负担较小,在动态未知环境可以高效调节系统状态. 2)兼容性强. CBF可以与任何规划算法结合使用,优化轨迹提高效率. 3)约束性强. CBF是一种硬约束,通过对控制输入进行线性约束来保证系统状态空间中集合的前向不变性. 4)鲁棒性强. CBF在使用过程中对系统不确定性和环境扰动具有良好的容许能力.

CBF的低计算复杂度及强约束性,使其适用于保障无人机系统在已知或未知环境^[12-13]、系统状态不确定^[14]等条件下的安全控制,并可结合更加激进的规划算法来提高任务效率^[15]. 近年来,在有关无人机系统安全性的研究中, CBF已经逐渐成为一种重要的安全控制方法,并被应用于固定覆盖^[16]、移动覆盖^[17]、通信保持^[18]、载荷运输^[19]、舰载机着舰^[20]等场景中以保障无人机系统的安全. 另外,安全障碍证书的提出有效提高了无人机系统在多约束复杂环境中的可扩展性^[21],使得CBF在无人机系统中拥有更广阔的应用空间. 目前,针对CBF的研究成果已产生了一些综述,其分别从非线性控制系统^[22-23]、强化学习^[24]等角度进行梳理,但还较少专门针对无人机系统进行梳理.

本文以控制障碍函数在无人机系统中的应用为核心,围绕单无人机系统和多无人机系统两个方面阐述控制障碍函数的安全性能. 首先,针对控制李雅普诺夫函数、控制障碍函数和安全屏障证书3个方面进行原理概述;在此基础上,结合单无人机系统应用环境的差异,对比总结不同控制器之间的性能差异;围

绕集中式和分散式安全屏障证书的作用特点,总结提出多无人机系统安全控制的主要难题;最后,针对最优控制障碍函数构造困难和多无人机系统易发生死锁两方面分析现有应用中存在的不足,对未来可能发展的方向做出展望.

1 原理概述

本节首先针对四旋翼无人机的动力学模型进行分析,然后从非线性控制系统的仿射形式阐述控制李雅普诺夫函数、控制障碍函数和安全屏障证书的相关概念,并以无人机系统为例来说明这些约束的控制性能. 本文符号列于表1.

表1 符号列表

符号名称	符号释义
\mathbb{R}^n	n 维实向量空间
$\mathbb{R}^{n \times m}$	$n \times m$ 维实向量空间
\mathcal{C}	封闭集: $\{x : h(x) \geq 0\}$
$\partial\mathcal{C}$	边界 \mathcal{C} : $\{x : h(x) = 0\}$
$\text{int}(\mathcal{C})$	内部 \mathcal{C} : $\{x : h(x) > 0\}$
\mathcal{C}_{ij}	成对无人机的安全集
U	控制输入集合
X	系统状态集合

1.1 四旋翼无人机动力学模型

研究主要围绕四旋翼无人机展开,选择惯性与机体双坐标系作为参考坐标系. 通过惯性坐标系 I 可以得到无人机的空间位置,通过机体坐标系 B 可以得到无人机的空中姿态. 在惯性坐标系和机体坐标系下将四旋翼无人机的状态空间描述为 $x = [p_{IB}, q_{IB}, v_{IB}, \omega_B]^T$. 其中: $p_{IB} \in \mathbb{R}^3$ 为无人机的位置坐标, $q_{IB} \in \text{SO}(3)$ 为旋转组上的单位四元数(给定 $\|q_{IB}\| = 1$), $v_{IB} \in \mathbb{R}^3$ 为无人机的速度, $\omega_B \in \mathbb{R}^3$ 为无人机的角速度. 将机体水平方向上产生的升力 $T_B = [0 \ 0 \ T_{Bz}]^T$ 和螺旋桨在机臂上产生的力矩 τ_B 作为系统的控制输入. 由此将四旋翼无人机的动力学模型^[25]构建为

$$\begin{aligned} \dot{p} &= v, \\ \dot{q} &= \frac{1}{2}A(q) \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix}, \\ \dot{v} &= g + \frac{1}{m}R(q)T, \\ \dot{\omega} &= J^{-1}(\tau - \omega \times J\omega). \end{aligned} \quad (1)$$

其中: A 表示四元数乘法, $R(q)$ 为任意向量从机体坐标系到惯性坐标系的旋转矩阵, g 为重力加速度, m 为无人机的质量, J 为无人机的惯性.

将 T 和 τ 给出的输入空间进一步分解为单个旋翼产生的升力 $u = [T_1, T_2, T_3, T_4]$, 其中 T_i 是旋翼 $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ 处产生的升力, 有

$$T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum T_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} l/\sqrt{2}(T_1 + T_2 - T_3 - T_4) \\ l/\sqrt{2}(-T_1 + T_2 + T_3 - T_4) \\ c_\tau(T_1 - T_2 + T_3 - T_4) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

这里: l 为四旋翼无人机的机臂长度, c_τ 为电机的扭矩常数.

1.2 控制李雅普诺夫函数

考虑非线性四旋翼无人机控制系统的控制仿射形式为

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u. \quad (4)$$

其中: f, g 局部 Lipschitz 连续, $u \in U \subseteq \mathbb{R}^m$ 为无人机的控制输入, $x \in X \subseteq \mathbb{R}^n$ 为无人机的状态.

控制李雅普诺夫函数 (control Lyapunov functions, CLF) 通过闭环系统稳定性保障系统安全性, 最早在文献 [26-27] 中进行了深入研究, 利用李雅普诺夫函数及其导数上的不等式约束建立使给定系统稳定的标称控制器. 将李雅普诺夫函数推广到 CLF, 有助于在非线性控制系统 (4) 中找到保证系统稳定的控制律.

定义 1 假定正定函数 $V(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 是连续可微函数, 且 $V(x)$ 是局部 Lipschitz 连续的, 如果存在一个 κ 类函数 $\varphi(V(x))$ 和控制律 $K_{\text{clf}}^{[24,27]}$

$$K_{\text{clf}}(x) = \{u \in U : L_f V(x) + L_g V(x)u + (V(x)) \leq 0\}, \quad (5)$$

则 $V(x)$ 是一个局部 CLF, 其中 L_f 和 L_g 是 $V(x)$ 的李导数, 分别为

$$L_f V(x) = \frac{\partial V(x)}{\partial x} f(x), \quad L_g V(x) = \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x).$$

假定 $x_a \equiv 0$ 为一个平衡点, 即系统在该点渐近稳定, 此时 $V(x_a) = 0$. 对于非线性系统 (4), 如果存在一个常数 $a > 0$, 对于水平集 $D_a := \{x \in \mathbb{R}^n : V(x) \leq a\}$ 中的所有 x , 系统控制律 K_{clf} 渐近稳定, 则最大的水平集称为吸引区域 (region of attraction, ROA), 且正向不变.

CLF 在无人机系统中主要作为稳定约束进行使用, 而保证一个无人机的安全还需要考虑安全性. 本文无人机的安全约束通过控制障碍函数实现, 下面介绍控制障碍函数的相关概念.

1.3 控制障碍函数

CLF 是一个软约束 (soft constraints), 即希望控制系统满足的约束, 该类约束对系统状态的限制可以逾越. 而 CBF 是一种硬约束 (hard constraints), 即任何情况下都不能违反的约束, 该类约束对系统状态的限制不可逾越^[28]. CLF 在保证系统稳定性时往往不能兼顾系统安全性, 通常与作为强约束的控制障碍函数结合使用. CBF 作为一种在控制层面最小限度改变系统状态的方法, 可以有效保障非线性控制系统的安全性. 由于 CBF 是受 CLF 启发提出的, 其定义与 CLF 存在一定的相似性. 这里将非线性控制系统 (4) 的安全集定义为超水平集 \mathcal{C} , 表述为

$$\begin{aligned} \mathcal{C} &= \{x \in \mathbb{R}^n : h(x) \geq 0\}, \\ \partial\mathcal{C} &= \{x \in \mathbb{R}^n : h(x) = 0\}, \\ \text{int}(\mathcal{C}) &= \{x \in \mathbb{R}^n : h(x) > 0\}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $h(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 为连续可微的超水平集的期望约束. CBF 的目标是使无人机系统保持在安全集内, 即使集合 \mathcal{C} 前向不变.

定义 2 假定 $h(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 是连续可微函数, 且 $h(x)$ 是局部利普希茨连续的, 如果存在一个 κ 类函数 $\sigma(h(x))$ 和控制律 $K_{\text{cbf}}^{[29-33]}$

$$K_{\text{cbf}}(x) = \{u \in U : L_f h(x) + L_g h(x)u + \sigma(h(x)) \geq 0\}, \quad (7)$$

则该函数为系统 (4) 的 CBF. 对于所有的 $x \in X$, 给定式 (7) 中的控制条件, 式 (6) 中定义的安全集 \mathcal{C} 对于系统 (4) 是前向不变的. 当系统状态趋于安全区域边界时, $h(x)$ 趋近于零, 因此该类 CBF 又称为归零控制障碍函数 (zeroing control barrier functions, ZCBF), 更适用于需要消除系统误差的场景.

当系统状态趋于安全边界时, $h(x)$ 趋于无穷大, 此时 CBF 称为倒数控制障碍函数 (reciprocal control barrier functions, RCBF), 其定义如下^[34].

定义 3 假定 $B(x) : \text{int}(\mathcal{C}) \rightarrow \mathbb{R}$ 是连续可微函数, 且 $B(x)$ 是局部利普希茨连续的, 如果存在 κ 类函数 $\sigma_1(h(x)), \sigma_2(h(x)), \sigma_3(h(x))$, 且对于所有 $x \in \text{int}(\mathcal{C})$ 都有

$$\frac{1}{\sigma_1(h(x))} \leq B(x) \leq \frac{1}{\sigma_2(h(x))}, \quad (8)$$

其中 $B(x) = \frac{1}{h(x)}$. 此时控制律 $K_{\text{rcbf}}^{[33]}$ 为

$$K_{\text{rcbf}}(x) = \{u \in U : L_f B(x) + L_g B(x)u - \sigma_3(h(x)) \leq 0\}, \quad (9)$$

则该函数为系统 (4) 的 RCBF. 对于所有的 $x \in X$, 给

定式(9)中的控制条件,式(6)中定义的安全集 C 对于系统(4)是前向不变的.该类CBF适用于需要控制系统状态变量到一定目标范围内的场景.

针对单无人机系统,使用单CBF约束构成的安全控制器即可有效保证系统安全.但当无人机数量增多时,无人机间的拓扑关系也随之增加,单个安全约束很难满足系统要求,往往需要多个约束共同作用.基于CBF扩展的安全屏障证书可以将所有约束纳入一个容许控制空间,这极大地提高了系统的可扩展性.

1.4 安全屏障证书

安全屏障证书(safety barrier certificates, SBC)是在CBF基础上将多机系统中的成对安全约束纳入同一个容许控制空间 S_u 产生的,同样具有前向不变性以及最小限度改变系统控制输入等特性.无人机中成对的安全集 C_{ij} ^[21,35]可以定义为

$$C_{ij} = \{(p_i, v_i) \in \mathbb{R}^4 | h_{ij}(p, v) \geq 0\}, \forall i \neq j; \quad (10)$$

$$h_{ij}(p, v) = \sqrt{2(\beta_i + \beta_j)(\|\Delta p_{ij}\| - D_s)} + \frac{\Delta p_{ij}^T}{\|\Delta p_{ij}\|} \Delta v_{ij}. \quad (11)$$

其中: p 为无人机位置, v 为无人机速度, D_s 为安全距离, $(\beta_i + \beta_j)$ 为最大相对制动加速度, Δv_{ij} 为无人机间的相对速度, Δp_{ij} 为无人机间的相对位移, $h_{ij}(p, v)$ 为安全集 C_{ij} 的水平集函数以及用于保证 C_{ij} 前向不变性的CBF候选集.

安全屏障证书的容许控制空间定义为

$$S_u = \{u \in \mathbb{R}^{2N} | A_{ij}u \leq b_{ij}, \forall i \neq j\}. \quad (12)$$

其中: u 为加速度命令,且有

$$A_{ij} = \{0, \dots, -\Delta p_{ij}^T, \dots, \Delta p_{ij}^T, \dots, 0\},$$

$$b_{ij} = \frac{(\beta_i + \beta_j) \Delta v_{ij}^T \Delta p_{ij}}{\sqrt{2(\beta_i + \beta_j)(\|\Delta p_{ij}\| - D_s)}} + \gamma h_{ij}^3 \|\Delta p_{ij}\| + \|\Delta v_{ij}\|^2 - \frac{(\Delta v_{ij}^T \Delta p_{ij})^2}{\|\Delta p_{ij}\|^2},$$

γ 为权重因子(决定智能体状态接近安全集 C_{ij} 边界时的速度).

本节介绍了CLF、CBF和SBC的相关概念,当前利用上述约束构成的安全控制器已被广泛应用于无人机系统.下一节将围绕无人机系统详细讨论CBF构成的安全控制器.

2 无人机系统的CBF应用

稳定性和安全性都是无人机系统需要满足的基本特性,而满足这些期望特性需要构建出合适的控制器.对于无人机系统而言,合适的控制器并

不唯一,如何平衡多个控制输入和状态约束来展现良好的系统性能,便是构造出最优控制器的关键所在.最优控制问题一般是通过求解二次规划(quadratic program, QP)问题进行解决.本节将根据控制器的差异阐述CBF方法在无人机系统中的应用.图1为无人机安全控制示意图.

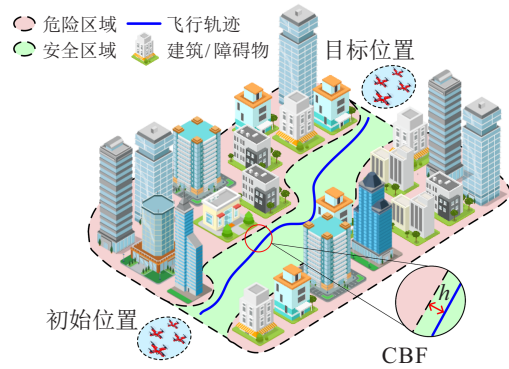


图1 无人机安全控制示意图

2.1 与轨迹规划器结合的控制

轨迹规划通常是创建并跟踪无碰撞轨迹的过程,该轨迹需要同时满足安全约束和目标约束.而无人机系统中目标约束的实现通常需要使用轨迹规划算法,当前无人机系统中与CBF方法结合较多的轨迹规划算法有模型预测控制(model predictive control, MPC)^[36]和多尺度规划^[37].这两种算法在一定程度上也可以保证无人机系统安全,其主要是在规划层面对系统进行安全约束,但并不是保证系统安全最有效的层面.无人机相比地面车辆,动力学模型更加复杂且不确定因素较多,当环境未知且具有扰动时,轨迹规划往往需要频繁获得信息并实时更新路径,这使得生成满足真实动力学模型的可行轨迹较为困难.

CBF方法仅需依赖布局坐标和传感器信息,即可在控制层面强制避免碰撞.该方法可以被看作一种约束条件,本身并不依赖于特定的轨迹规划算法,这使得其可以与任意轨迹规划算法相结合.将轨迹规划算法作为无人机系统的轨迹规划器,满足CBF约束的安全控制器作为轨迹滤波器,只在必要时间过滤系统的不安全行为以保证系统状态始终在安全集中^[34,38].

CBF的硬约束性会导致系统指令优先保障安全而非完成任务,这会与系统的初始目标产生冲突.为了解决这一问题,文献[36]将MPC轨迹优化中的CBF进行凸化处理,在一定程度上优化了上述出现的“短视”行为.由于CBF约束本质上是非凸的,将CBF约束直接纳入MPC优化公式往往比较困难,采

用凸差分规划将基于CBF的非凸避障约束进行逐次凸化并使其收敛,可以实时加速满足避障约束以及目标约束的局部最优且动态可行安全轨迹的获取。通常而言,MPC更适用于线性控制系统,非线性模型预测控制(nonlinear model predictive control, NMPC)是为了解决MPC不善于处理非线性控制系统问题而产生的轨迹规划方法,利用NMPC和CBF构成的QP控制器能够保证多无人机跟踪系统在杂波环境下的安全^[39]。针对非线性无人机动力学模型,文献[37]采用一种多步过滤方法,在动力学层面提供安全保障。将系统中的速度控制器产生的线速度代替电机PWM波作为安全滤波器的控制输入,并采用性能过滤器调节规划器输入速度以最大限度地减少安全过滤器造成的干预。通过多级过滤最终产生的控制命令可针对局部点云数据保障无人机系统安全,并对状态不确定和环境扰动具有一定的鲁棒性。

轨迹规划算法与CBF相结合产生的QP控制器虽可以有效保证无人机系统的安全性,但无人机系统复杂性较高且轨迹规划算法与CBF结合是一个非凸优化问题,最优控制器的求解速率面临巨大挑战。可以通过考虑使用离散时间控制障碍函数(discrete-time control barrier function, DCBF)并加入初始预测来降低轨迹求解复杂度,加速约束收敛。或是增加一些可行控制输入进行补偿,当求解时间较长时,无人机系统可以执行备用可行控制输入。目前无人机系统关于轨迹规划与CBF结合的优化问题的研究对象多是离线轨迹,而对在线未知环境鲁棒性较差,可针对在线轨迹规划以及权衡安全与死锁问题进行研究,进一步平衡系统的安全性、稳定性和鲁棒性。也可以采用CBF-CLF-QP控制器来保证无人机系统安全,其相比于MPC等方法具有更好的实时性,下一节将详细讨论。

2.2 二次规划控制器

无人机系统的控制问题通常可以定义为一个优化问题,其中最优控制策略的求解可以转换为一个QP问题。为了保证QP问题可解,可以将CLF和CBF两种约束设置不同的优先级,得到安全优先、其次保证稳定的最优控制器,即CBF约束优先于CLF约束^[28]。当然,根据使用场景不同,控制器的约束条件可以适当增减,例如:CLF-QP控制器可以保证系统稳定性^[40]、CBF-QP控制器可以保证系统安全性^[41]、CBF-CLF-QP控制器可以平衡系统安全性和稳定性^[28]等。本节只针对CBF-QP控制器和CBF-CLF-QP控制器进行详细讨论。

1) CBF-QP控制器。

侧重考虑系统的安全性,不注重系统别的特性,因此可以只使用CBF安全约束构成QP控制器。CBF-QP控制器^[41-43]设计如下:

$$\begin{aligned} \hat{u}(x) &= \arg \min \|u - k(x)\|; \\ \text{s.t. } L_f h(x) + L_g h(x)u &\geq -\sigma(h(x)). \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $\hat{u}(x)$ 为被CBF过滤后最接近 $k(x)$ 的安全控制输入。CBF的作用是确保系统状态在任何时间都不会越过定义的安全边界,因此将CBF用作控制器的安全约束具有合理性。利用QP求解最优控制输入,可以在保证系统安全性的同时优化系统的控制性能,这使得CBF-QP控制器在系统控制性能方面同样具有合理性。CBF-QP控制器具有最小限度改变控制输入和前向不变性等特性,在多无人机安全避障中有较大使用价值^[42-43]。且CBF只在必要时刻施加安全约束,相比于人工势场方法(artificial potential field, APF),无人机产生的轨迹更激进^[13]。

为了保证无人机的飞行安全性,CBF-QP控制器可以有效过滤不安全输入,保证无人机始终在安全集之内,因此搭载CBF-QP控制器的无人机系统非常适合用来培养新手的飞行手感,极大地减少了穿越机上手难度和财产损失^[44]。为了减小新手操作员的上手难度,文献[41]利用动作捕捉系统将空间进行划分,规划出安全区域范围,利用CBF-QP控制器对无人机系统加强保护的同时减小人工输入与控制器命令之间的差异。而为了满足实际环境中无人机高速飞行的特性,文献[45]将无人机飞行速度进一步提高,利用备份控制器实现无梯度评估以确保必要时间具有CBF约束的备份控制器对系统进行接管以保证安全。根据上述无人机应用实例,将CBF-QP控制器在无人机系统中的控制机理整合,具体如图2所示。

虽然CBF-QP控制器可以有效保证无人机系统安全,但更多时候无人机系统不仅需要满足安全约束,还需要完成系统的既定任务,因此构造更多的约束条件保证无人机系统能够高效地完成既定任务。

2) CBF-CLF-QP控制器。

通过整合CBF和CLF反馈信息得到的局部Lipschitz连续反馈控制器,可以有效调整安全约束和目标约束产生的矛盾冲突,该控制器称作CBF-CLF-QP控制器。相比MPC、多尺度规划等方法,CBF-CLF-QP具有更好的实时性,这使得无人机适应变化环境能力更佳。在CBF-CLF-QP控制方案中不仅需要系统的安全性,同时需要兼顾系统的稳定性,因此CBF-CLF-QP控制器^[28]设计如下:

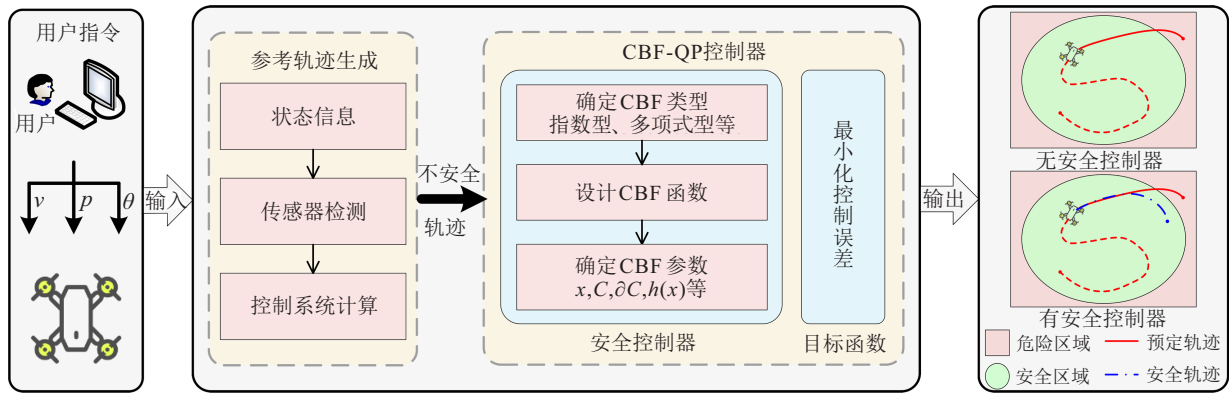


图2 CBF-QP控制器在无人机中的控制机理

$$\hat{u}(x) = \arg \min \frac{1}{2} u^T H u + p \delta^2.$$

$$\text{s.t. } L_f V(x) + L_g V(x) u \leq -\varphi(V(x)) + \delta;$$

$$L_f h(x) + L_g h(x) u \geq -\sigma(h(x)). \quad (14)$$

其中： H 为任意正定矩阵， δ 为松弛变量，且 $p > 0$ 以确保QP问题的可解性。该定义中，CLF作为控制器的软约束能够始终满足，而CBF作为控制器的硬约束，只在系统不安全时临时接管，所以CBF-CLF-QP始终存在可行解。在该控制方案中，CLF约束用于评估控制系统的稳定状态，并通过控制输入来驱使系统进入稳定状态。CBF约束条件则对控制系统提供安全保障，确保系统状态不越过安全边界。当安全约束与目标约束不冲突时，CLF产生的目标约束主导控制器，系统在不违反安全约束的前提下会优先保证期望轨迹跟踪的稳定性；但当期望轨迹进入不安全区域时，控制器将由CBF接管，安全约束成为主导，系统将违反目标约束优先保证系统安全^[15,46-47]。通过引入QP，CBF-CLF-QP控制器可以在满足安全性和稳定性约束的前提下求解最优控制输入，以优化系统的控制性能。QP可以考虑系统的性能指标，并提供最优的控制策略，因此CBF-CLF-QP控制器在系统控制性能方面具有合理性。CBF-CLF-QP控制器允许对CBF、

CLF和QP进行调节，以满足具体的系统需求和约束条件。这种可调节性使得该控制器能够适应不同的无人机系统和控制任务，并提供良好的灵活性和适应性。

当前基于CBF和CLF设计的顺序，QP控制方案包括位置级QP和方向级QP两个层级^[46]。位置级QP控制器计算无人机位置动力学所需推力矢量，方向级QP控制器生成满足无人机推力和物理力矩的控制输入，该方法也被推广到三维场景中^[15]。级联结构的QP控制方案由内环和外环两部分组成^[47]。外环是进行高水平安全目标调节的高度域，内环是进行低水平安全目标调节的横向域。控制器外环和内环分别放置单独CBF安全约束可以规划出一个有效性更强的安全集，高度域和横向域独立调节无人机飞行姿态，满足无人机位置和速度空间上的有效性。

上述CBF-CLF-QP控制器设计方案都是考虑一种CBF安全约束的情况，然而针对无人机执行任务的不同，需要几个安全约束共同作用。例如进行载荷运输、机体着舰等任务时，不仅需要满足避障约束，同时需要满足机体间距离约束、预定轨迹约束、通信保持约束等^[48-52]。综合CBF-CLF-QP控制器的使用特点，QP控制器在无人机系统中的控制机理如图3所示。

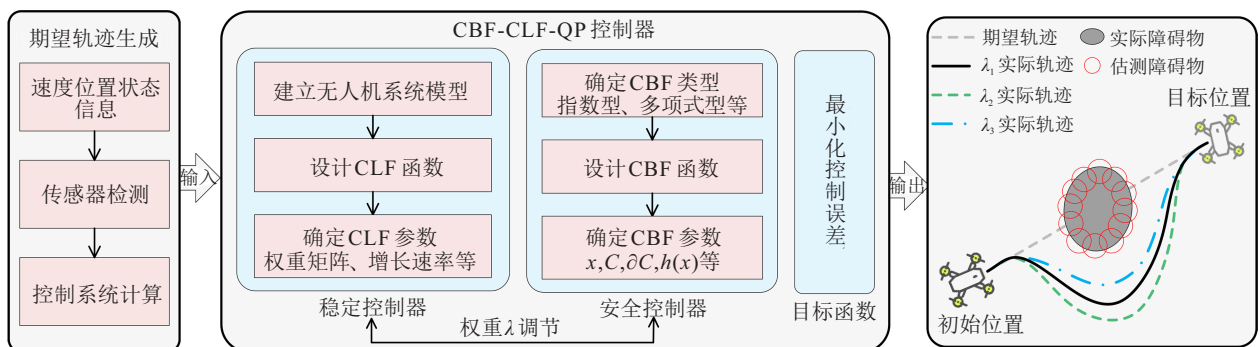


图3 CBF-CLF-QP控制器在无人机中的控制机理

二次规划控制方法不仅能够快速适应环境变化,而且具有鲁棒性. 由于二次规划器的构造仅利用系统局部信息,会产生非凸集合,导致QP控制器无解. 在实际应用中可以通过限制机身传感器和障碍物间的相对速度来保证QP控制器的可行性,也可以对控制器进行长期规划来实现无人机安全高效飞行^[53]. 在当前研究中,CBF-CLF-QP控制器通常仅用于单无人机系统,然而随着集群技术的发展,多无人机系统的安全愈发重要. 下面归纳近年来CBF在多无人机系统中的研究.

3 多无人机系统安全问题

单无人机执行任务时往往具有一定的局限性,而多无人机协同作业有助于提高任务效率. 随着无人机数量级的增加和任务的复杂化,设计一个独立控制器来同时实现避碰、保持形状、通信保持等多个目标变得越发困难. 利用CBF可以最小限度改变系统控制输入的性质,将多个CBF约束整合在一个屏障证书中^[34,54],保证系统状态在未来所有时间都是安全的,即满足前向不变性.

确保集群中无人机避碰的关键是需要将所有成

对无人机之间的潜在碰撞因素都考虑在内,所以多无人机系统之间的避碰问题可以简化为成对无人机之间的避碰问题. 成对无人机相对速度的切向分量只引导无人机相互旋转,而相对速度的法向分量则是导致成对无人机之间碰撞的关键. 为了避免移动无人机之间发生碰撞,需要对法向分量施加制动力来进行调节,即施加一定的安全约束. 但确保集群中无人机对的安全问题通常需要考虑多个安全约束,基于CBF合成的SBC可以将各对无人机间的安全约束纳入一个容许控制空间中^[21,35],其中每个无人机受其自身CBF安全集合的约束. 当前关于SBC的研究可以分为集中式SBC和分散式SBC两类,下面将围绕这两部分展开讨论.

3.1 集中式安全屏障证书

集中式SBC通过一个中心节点计算和协调系统来跟踪目标无人机对,这需要考虑所有无人机对之间的安全关系^[35,55]. 从拓扑学上讲,这将形成一个包含全部无人机对信息的完整的图,如图4(a)所示. 多无人机系统的集中式SBC由所有成对无人机间的安全屏障约束组成,其容许控制空间 S_u 可以定义为不同半空间的交集.

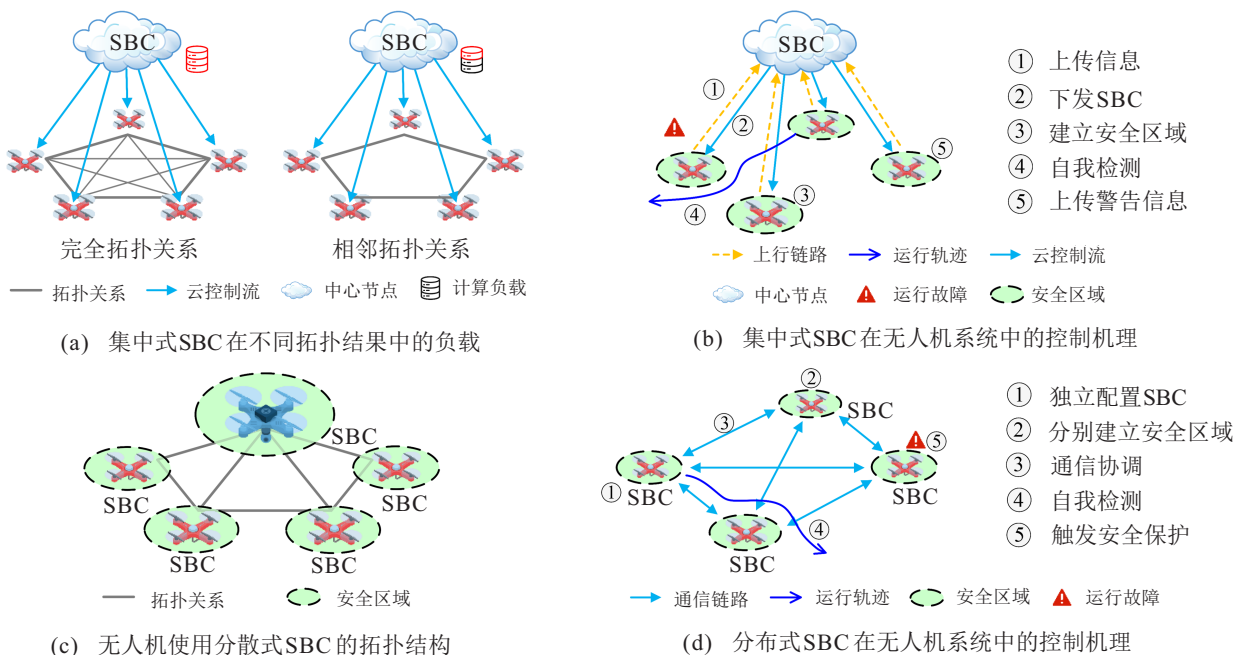


图 4 SBC在多无人机系统中的安全控制

集中式SBC的构成需要获得所有无人机对之间的安全关系. 随着集群数量级的增大,对集群间通信传输要求也增高,但SBC的容许控制空间逐渐变小,甚至变为空集,因此需要扩大容许控制空间或降低计算复杂度. 由于足够远的无人机在有限时间内不会发生碰撞,通过引入“邻居”概念^[56],只考虑一定范

围内无人机对的安全问题,可以将完整的拓扑结构减少至圆环拓扑结构,如图4(a)所示. 有了“邻居”概念,每个无人机只需要考虑其附近的无人机以避免碰撞,这在一定程度上降低了计算复杂度并扩大了系统的容许控制空间.

虽然引入“邻居”概念可以有效提升集中式SBC

的性能,但对中央协调单位的过度依赖可能会影响多无人机系统的可扩展性、鲁棒性和反应性.通过设置概率函数可以有效提高SBC的安全性能和处理效率,基于此,文献[57]提出一种基于概率安全障碍证书(probabilistic safety barrier certificates, PrSBC)的不确定性多无人机避碰方法,该方法设置的概率约束安全集不仅可以提高SBC的计算效率和安全性,同时可以生成更为宽松的容许控制空间.

前述文献大都通过降低计算复杂度的方法扩大控制器的容许控制空间,而利用动态学习与SBC相结合的方法也可提高控制器的容许控制空间.文献[58]采用基于高斯过程回归的数据驱动方法学习在部分未知环境中运行的无人机模型,利用学习控制器将收集到的动态系统的数据点进行分析,减少不确定性,促使安全集体积最大化,从而找到具有最大容许控制空间的SBC.

综合上述关于多无人机系统集中式SBC的使用方法,将其在无人机移动策略中的控制机理整合,具体步骤如图4(b)所示.1)无人机上传环境状态信息到中心节点;2)中心节点向无人机下发SBC配置;3)中心节点指挥无人机建立安全区域;4)无人机在飞行过程中不断检测自身位置和状态信息并上传中心节点;5)无人机发生故障,但无法触发安全保护,需上传警告信息到中心节点.集中式SBC虽然具有良好的中央协调能力,但由于计算量大,集群可扩展性较差,下面将介绍扩展性较强的分散式SBC.

3.2 分散式安全屏障证书

分散式SBC不依赖于中心节点集中协调计算,而是将SBC分配到每个无人机上,以确保无人机不会失去安全保障.分散式SBC将系统的容许控制空间划分为更小的子集,只需将每个无人机的状态维持在其所在子集内即可确保系统整体安全.分散式SBC需要每个无人机独立处理自身获得的局部信息,优化自身的安全目标.由于无人机之间没有交流,每个无人机需要对其他无人机即将发生的违反安全约束的行为模式进行一定假设.根据式(7)中权重因子 γ 相对于冲突无人机的不同,可将当前无人机行为模式分为“激进”“中立”和“保守”3种^[35,59].“激进”模式指无人机优先进往目标,此时 γ 相对于冲突无人机较大;“中立”模式指无人机尽量保持当前路线,此时 γ 相对于冲突无人机一致或相差甚微;“保守”模式指无人机主动避免碰撞,此时 γ 相对于冲突无人机较小.图5为具有不同权重因子 γ 的无人机 i 与冲突无人机 j 相遇时,表现出的3种不同行为模式,其中冲

突无人机 j 的权重因子 γ 始终不变.在实际应用中,通过有意调节权重因子 γ 的相对大小,使得具有紧急任务的无人机优先级更高,即 γ 越大;任务优先级较低的无人机 γ 越小.

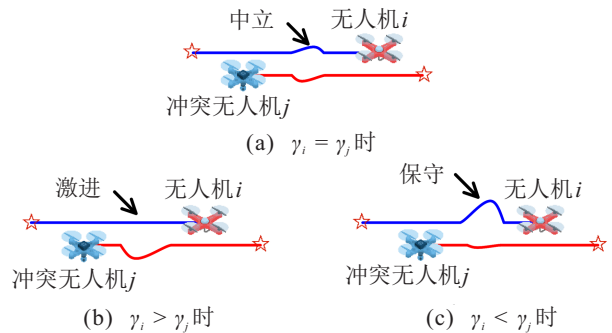


图5 不同行为模式下无人机飞行轨迹

分散式SBC要求当前无人机对目标无人机的行为模式做出假设并进行提前规避,这对无人机自身的加速度极限要求较高,尤其是当集群中无人机加速度极限不尽相同的情况下^[59].异构多无人机由于自身大小、速度、加速度极限的不同,对碰撞状态发生时调整速度不同,所承担的避碰责任也不相同.具有较大加速度极限的无人机更加灵活,容许控制空间也更大,对于避碰任务也要承担更大的责任.针对异构多无人机也可引入“邻居”概念来减少不必要的安全屏障约束对.通常异构多无人机具有不同半径的安全区域,其与同构多无人机相比,不同无人机可能具有不同的安全拓扑结构.加速度极限较低且体积较大的个体所需的最小安全区域更大.最小安全区域较大的个体可能具有更多相邻的安全关系,这意味着需要考虑更多碰撞的情况,具体如图4(c)所示.

相比于集中式,虽然利用分散式SBC也可使无人机系统安全得到保障,但由于不存在中央协调,必须预先进行避碰干预才可有效保障安全,运行路径相对更保守.文献[57]引入概率约束在一定程度上可以使路径更激进,且不需要集中优化,但可能导致无人机运动更加极端时求解不可行,即陷入死锁状态.文献[55]将死锁分为3种情况,并给出一定的解决方案,分散式SBC也可与强化学习相结合来进行多无人机多目标场景下安全性和性能之间的平衡^[60],这里不详细讨论.图4(d)是分散式SBC在无人机系统中的控制机理,其中SBC被分发到每一个独立无人机上计算,具体步骤如下:1)每个无人机独立配置SBC;2)每个无人机根据本地策略各自建立安全区域;3)任务开始前无人机之间需要相互通信协调;4)无人机在飞行过程中不断检测自身位置和状态信息并与其他无人机保持通信;5)无人机发生

故障并自动触发安全保护。

集中式SBC虽然具有中心节点协调计算,这在一定程度上使得无人机产生的安全路径相比分散式SBC更优,但利用中心节点协调消耗计算资源较大,虽然引入的“邻居”概念可以降低一定的计算复杂度,但是当无人机数量级提升后,计算难度较大,反应时间较长,不易于集群扩展。分散式SBC将安全屏障任务分配给每个单独无人机,所以路径规划需要每个无人机自身进行计算,对单机要求较高。而且因为系统不具有中央协调,每个无人机需要提前对周围无人机的行为模式进行预测,这使得产生的路径更加保守。由于路径计算的分散,使得集群的可扩展性、反应性和鲁棒性大大提升,但缺少中央调控,无人机间发生死锁的概率增高。针对CBF在保证多无人机系统安全方面的使用方式还有很多,例如将CBF与学习策略相结合来保证策略学习阶段或已学会策略的安全^[61-63]、利用广播机制提高系统的可扩展性^[64-67]等,未来也可将该方法应用于跟随控制^[68]、合作-竞争网络^[69-70]、深度神经网络^[71-72]、分布式控制^[73-74]等方面以提高系统的安全性。

4 技术难题与挑战

针对无人机系统的CBF应用已较为广泛,但是由于该方法在无人机安全控制领域较新,目前仍然存在许多亟待解决的技术难题。

1) 无人机系统中构造最优控制器较为困难。当前CBF在无人机中的安全应用大多针对已知静态障碍物环境的仿真实验,考虑动态未知环境的较少。已知静态障碍物环境中只需完整无人机动力学模型即可构建CBF,而实际场景大多是动态未知环境,无人机动力学模型受复杂扰动环境影响,模型中不确定部分增多,二次规划控制器中的约束条件也相应增多,这使得构造安全控制器的复杂度大大提高。未来针对实际场景中如何构造最优安全控制器来保障无人机作业安全的情景需要进一步研究。

2) 多无人机系统中易发生死锁现象。已知静态环境中单无人机作业只需引入松弛变量且使用单个CBF安全约束便可保证控制器的可行性,而在多无人机复杂环境中往往需要多CBF安全约束同时作用,不同的CBF强弱不同可能存在冲突导致QP控制器不存在可行解,即无人机进入死锁状态。在死锁状态下无人机虽可以保持安全状态,但无法满足目标约束。进入死锁的主要因素是CBF安全约束只通过局部信息来计算,这会导致系统陷入局部最优。可以通过扰乱QP控制器解决死锁状态,这样无人机在死锁

时便可以相互移动,但QP控制器需要受到方向一致的扰动来避免随机扰动下无人机直接相互影响。虽然这种方式在一定程度上可以解决死锁问题,但CBF主要提供安全保障,并不考虑目标任务是否可以完成,可能仍不满足目标约束,从而导致无人机不能实现最终任务目标。相对好的做法是将轨迹跟踪系统与安全控制系统有机结合,但仍需未来进一步研究。

随着多智能体系统应用研究的不断深入,针对上述两个技术难题的研究已有很多,但仍有很大的发展空间,本文认为可以从以下两个方面继续持续深化研究。

1) 利用强化学习框架构造最优安全控制器。在多无人机系统和复杂未知环境中,由于无人机动力学中一些参数并不是精确已知的,需要验证安全控制器是否满足CBF约束条件。可以借助无模型强化学习框架进行控制律的求解,通过不断学习数据来自适应设计和调节安全控制器中的约束条件,从而达到更好的控制效果。

2) 利用安全强化学习框架解决死锁问题。传统强化学习框架生成的学习策略在安全性方面的性能值得商榷。具有防护机制的安全强化学习框架可以有效保证学习环境时的连通性,避免物理碰撞。考虑通信连通保持,并且加入惩罚、安全动作可以有效解决多无人机间的死锁问题。

5 结语

本文首先简要梳理了基于CBF的无人机安全控制的相关研究成果。与MPC、多尺度规划等安全控制方法相比,CBF具有计算复杂度低、安全性更强、鲁棒性更好等特点,利用CBF构建的控制器在满足安全性的前提下兼顾任务目标约束。由于多无人机系统相比单无人机系统有更高的任务效率和更好的鲁棒性,对多无人机系统方面的研究也进行了一定梳理。针对多无人机系统中成对约束构造的SBC,其在满足CBF前向不变性、最小限度改变控制输入等特性的情况下,还具备协同性、可扩展性等优点。最后针对CBF在无人机系统应用中存在的技术难题与挑战进行了分析。

参考文献(References)

- [1] 李鸿一, 陈锦涛, 任鸿儒, 等. 基于随机采样的高层消防无人机协同搜索规划[J]. 中国科学: 信息科学, 2022, 52(9): 1610-1626.
(Li H Y, Chen J T, Ren H R, et al. Random-sampling-based multi-UAV cooperative search planning for high-rise firefighting[J]. Scientia Sinica: Informationis, 2022, 52(9): 1610-1626.)

- [2] Shi J L, Cong P Y, Zhao L, et al. A two-stage strategy for UAV-enabled wireless power transfer in unknown environments[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, DOI: 10.1109/TMC.2023.3240763.
- [3] 罗俊海, 王芝燕. 无人机探测与对抗技术发展及应用综述[J]. *控制与决策*, 2022, 37(3): 530-544.
(Luo J H, Wang Z Y. A review of development and application of UAV detection and counter technology[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(3): 530-544.)
- [4] 刘学达, 何明, 禹明刚, 等. 基于公共物品博弈的无人机集群弹药分配方法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(10): 2696-2704.
(Liu X D, He M, Yu M G, et al. UAV swarm ammunition distribution method based on public goods game[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(10): 2696-2704.)
- [5] Xiao W, Belta C A, Cassandras C G. Sufficient conditions for feasibility of optimal control problems using control barrier functions[J]. *Automatica*, 2022, 135: 109960.
- [6] Marvi Z, Kiumarsi B. Robust satisficing cooperative control barrier functions for multirobots systems using information-gap theory[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2022, 32(3): 1721-1737.
- [7] Capelli B, Fouad H, Beltrame G, et al. Decentralized connectivity maintenance with time delays using control barrier functions[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Xi'an, 2021: 1586-1592.
- [8] Zeng J, Zhang B K, Sreenath K. Safety-critical model predictive control with discrete-time control barrier function[C]. *2021 American Control Conference*. New Orleans, 2021: 3882-3889.
- [9] Xiao W, Wang T H, Hasani R, et al. BarrierNet: Differentiable control barrier functions for learning of safe robot control[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, 39(3): 2289-2307.
- [10] Marvi Z, Kiumarsi B. Safe reinforcement learning: A control barrier function optimization approach[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2021, 31(6): 1923-1940.
- [11] Long K H, Qian C, Cortes J, et al. Learning barrier functions with memory for robust safe navigation[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(3): 4931-4938.
- [12] Llanes C, Abate M, Coogan S. Safety from fast, In-the-loop reachability with application to UAVs[C]. *IEEE 13th International Conference on Cyber-Physical Systems*. Milano, 2022: 127-136.
- [13] Singletary A, Klingebiel K, Bourne J, et al. Comparative analysis of control barrier functions and artificial potential fields for obstacle avoidance[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. New York: ACM, 2021: 8129-8136.
- [14] Alattas K A, Vu M T, Mofid O, et al. Barrier function-based nonsingular finite-time tracker for quadrotor UAVs subject to uncertainties and input constraints[J]. *Mathematics*, 2022, 10(10): 1659.
- [15] Wu G F, Sreenath K. Safety-critical control of a 3D quadrotor with range-limited sensing[C]. *Proceedings of ASME 2016 Dynamic Systems and Control Conference*. Minneapolis, 2016: 12-14.
- [16] Funada R, Santos M, Gencho T, et al. Visual coverage maintenance for quadcopters using nonsmooth barrier functions[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Paris, 2020: 3255-3261.
- [17] Dan H, Yamauchi J, Hatanaka T, et al. Control barrier function-based persistent coverage with performance guarantee and application to object search scenario[C]. *2020 IEEE Conference on Control Technology and Applications*. Montreal, 2020: 640-647.
- [18] Capelli B, Sabattini L. Connectivity maintenance: Global and optimized approach through control barrier functions[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway: IEEE, 2020: 5590-5596.
- [19] Hegde A, Aloor J J, Ghose D. Bounded distance control for multi-UAV formation safety and preservation in target-tracking applications[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers — Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2023, 237(6): 1403-1416.
- [20] Zhou H T, Zheng Z W, Guan Z Y, et al. Control barrier function based nonlinear controller for automatic carrier landing[C]. *2020 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*. Shenzhen, 2020: 584-589.
- [21] Hirshberg T, Vemprala S, Kapoor A. Safety considerations in deep control policies with safety barrier certificates under uncertainty[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Las Vegas, 2020: 6245-6251.
- [22] Li B Q, Wen S P, Yan Z, et al. A survey on the control Lyapunov function and control barrier function for nonlinear-affine control systems[J]. *CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, 10(3): 584-602.
- [23] 陈杰, 吕梓亮, 黄鑫源, 等. 非线性系统的安全分析与控制: 障碍函数方法[J]. *自动化学报*, 2023, 49(3): 567-579.
(Chen J, Lyu Z L, Huang X Y, et al. Safety analysis and safety-critical control of nonlinear systems: Barrier function approach[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(3): 567-579.)
- [24] Anand A, Seel K, Gjørnum V, et al. Safe learning for control using control Lyapunov functions and control barrier functions: A review[J]. *Procedia Computer Science*, 2021, 192: 3987-3997.
- [25] Foehn P, Romero A, Scaramuzza D. Time-optimal planning for quadrotor waypoint flight[J]. *Science Robotics*, 2021, 6(56): eabh1221.
- [26] Freeman R A, Primbs J A. Control Lyapunov functions: New ideas from an old source[C]. *Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control*. Kobe, 1996: 3926-3931.

- [27] Artstein Z. Stabilization with relaxed controls[J]. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 1983, 7(11): 1163-1173.
- [28] Ames A D, Grizzle J W, Tabuada P. Control barrier function based quadratic programs with application to adaptive cruise control[C]. *The 53rd IEEE Conference on Decision and Control*. Los Angeles, 2014: 6271-6278.
- [29] 娜茜泰, 赵国亮, 翁智, 等. 基于屏障控制函数的轮式机器人系统多目标分布式协同控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(9): 2235-2244.
(Na X T, Zhao G L, Weng Z, et al. Multi-objective control of wheeled robot system using control barrier functions[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(9): 2235-2244.)
- [30] Hsu S C, Xu X R, Ames A D. Control barrier function based quadratic programs with application to bipedal robotic walking[C]. *American Control Conference*. Chicago, 2015: 4542-4548.
- [31] Ibuki T, Wilson S, Ames A D, et al. Distributed collision-free motion coordination on a sphere: A conic control barrier function approach[J]. *IEEE Control Systems Letters*, 2020, 4(4): 976-981.
- [32] Zhang D W, Yang G, Khurshid R P. Haptic teleoperation of UAVs through control barrier functions[J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2020, 13(1): 109-115.
- [33] Zhang D W, Tron R. Stable haptic teleoperation of UAVs via small L_2 gain and control barrier functions[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Prague, 2021: 8352-8357.
- [34] Ames A D, Xu X R, Grizzle J W, et al. Control barrier function based quadratic programs for safety critical systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(8): 3861-3876.
- [35] Borrmann U, Wang L, Ames A D, et al. Control barrier certificates for safe swarm behavior[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, 48(27): 68-73.
- [36] Varun V P, Vinod A P, Kolathaya S. Motion planning with dynamic obstacles using convexified control barrier functions[C]. *The 7th Indian Control Conference*. Mumbai, 2021: 81-86.
- [37] Singletary A, Gurriet T, Nilsson P, et al. Safety-critical rapid aerial exploration of unknown environments[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Paris, 2020: 10270-10276.
- [38] Agrawal A, Sreenath K. Discrete control barrier functions for safety-critical control of discrete systems with application to bipedal robot navigation[C]. *Robotics: Science and Systems XIII. Robotics: Science and Systems Foundation*, 2017: 13.
- [39] Hung H A, Hsu H H, Cheng T H. Image-based multi-UAV tracking system in a cluttered environment[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2022, 9(4): 1863-1874.
- [40] Dawson C, Qin Z Y, Gao S C, et al. Safe nonlinear control using robust neural Lyapunov-barrier functions[J/OL]. 2021, arXiv: 2109.06697.
- [41] Xu B, Sreenath K. Safe teleoperation of dynamic UAVs through control barrier functions[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Brisbane, 2018: 7848-7855.
- [42] Qing W M, Chen H, Wang X K, et al. Collision-free trajectory generation for UAV swarm formation rendezvous[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Sanya, 2021: 1861-1867.
- [43] Squires E, Pierpaoli P, Egerstedt M. Constructive barrier certificates with applications to fixed-wing aircraft collision avoidance[C]. *IEEE Conference on Control Technology and Applications*. Copenhagen, 2018: 1656-1661.
- [44] Zhang H R, Zhang X T, Li T Y, et al. Barrier function enhanced geometric controller for safe control of a quadrotor UAV[C]. *International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics*. Guilin, 2022: 187-192.
- [45] Singletary A, Swann A, Chen Y X, et al. Onboard safety guarantees for racing drones: High-speed geofencing with control barrier functions[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2): 2897-2904.
- [46] Wu G F, Sreenath K. Safety-critical control of a planar quadrotor[C]. *American Control Conference*. Boston, 2016: 2252-2258.
- [47] Khan M, Zafar M, Chatterjee A. Barrier functions in cascaded controller: Safe quadrotor control[C]. *American Control Conference*. Denver, 2020: 1737-1742.
- [48] Hegde A, Ghose D. Multi-UAV collaborative transportation of payloads with obstacle avoidance[J]. *IEEE Control Systems Letters*, 2022, 6: 926-931.
- [49] Hegde A, Ghose D. Collaborative guidance of UAV-transported semi-flexible payloads in environments with obstacles[C]. *The 60th IEEE Conference on Decision and Control*. Austin, 2021: 490-495.
- [50] Dongare A, Sanyal A K, Kolmanovsky I, et al. Integrated guidance and control of driftless control-affine systems with control constraints and state exclusion zones[C]. *American Control Conference*. Atlanta, 2022: 3893-3898.
- [51] Niu G C, Yang Q K, Gao Y F, et al. Vision-based autonomous landing for unmanned aerial and ground vehicles cooperative systems[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(3): 6234-6241.
- [52] Garg K, Panagou D. Control-Lyapunov and control-barrier functions based quadratic program for spatio-temporal specifications[C]. *IEEE 58th Conference on Decision and Control*. Nice, 2019: 1422-1429.
- [53] Watterson M, Kumar V. Safe receding horizon control for aggressive MAV flight with limited range sensing[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Hamburg, 2015: 3235-3240.

- [54] Prajna S. Barrier certificates for nonlinear model validation[J]. *Automatica*, 2006, 42(1): 117-126.
- [55] Wang L, Ames A D, Egerstedt M. Multi-objective compositions for collision-free connectivity maintenance in teams of mobile robots[C]. *IEEE 55th Conference on Decision and Control*. Las Vegas, 2016: 2659-2664.
- [56] Wang L, Ames A D, Egerstedt M. Safety barrier certificates for collisions-free multirobot systems[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(3): 661-674.
- [57] Luo W H, Sun W, Kapoor A. Multi-robot collision avoidance under uncertainty with probabilistic safety barrier certificates[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2020, 33: 372-383.
- [58] Wang L, Theodorou E A, Egerstedt M. Safe learning of quadrotor dynamics using barrier certificates[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Brisbane, 2018: 2460-2465.
- [59] Wang L, Ames A, Egerstedt M. Safety barrier certificates for heterogeneous multi-robot systems[C]. *American Control Conference*. Boston, 2016: 5213-5218.
- [60] Cai Z Y, Cao H H, Lu W J, et al. Safe multi-agent reinforcement learning through decentralized multiple control barrier functions[J/OL]. 2021, arXiv: 2103.12553.
- [61] Cheng R, Orosz G, Murray R M, et al. End-to-end safe reinforcement learning through barrier functions for safety-critical continuous control tasks[J]. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2019, 33(1): 3387-3395.
- [62] Cheng R, Khojasteh M J, Ames A D, et al. Safe multi-agent interaction through robust control barrier functions with learned uncertainties[C]. *The 59th IEEE Conference on Decision and Control*. Jeju, 2020: 777-783.
- [63] Scukins E, Ogren P. Using reinforcement learning to create control barrier functions for explicit risk mitigation in adversarial environments[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Xi'an, 2021: 10734-10740.
- [64] Folkestad C, Chen Y X, Ames A D, et al. Data-driven safety-critical control: Synthesizing control barrier functions with koopman operators[J]. *IEEE Control Systems Letters*, 2020, 5(6): 2012-2017.
- [65] Song L, Wan N, Gahlawat A, et al. Generalization of safe optimal control actions on networked multi-agent systems[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2023, 10(1): 491-502.
- [66] Squires E, Pierpaoli P, Konda R, et al. Composition of safety constraints for fixed-wing collision avoidance amidst limited communications[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2022, 45(4): 714-725.
- [67] Chen Y X, Singletary A, Ames A D. Guaranteed obstacle avoidance for multi-robot operations with limited actuation: A control barrier function approach[J]. *IEEE Control Systems Letters*, 2021, 5(1): 127-132.
- [68] Shi L, Zheng W X, Shao J L, et al. Sub-super-stochastic matrix with applications to bipartite tracking control over signed networks[J]. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2021, 59(6): 4563-4589.
- [69] Shi L, Cheng Y H, Shao J L, et al. Cucker-Smale flocking over cooperation-competition networks[J]. *Automatica*, 2022, 135: 109988.
- [70] Shi L, Li W H, Shi M J, et al. Opinion polarization over signed social networks with quasi-structural balance[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2023, 68(11): 6867-6874.
- [71] 黄亭飞, 程光权, 黄魁华, 等. 基于DQN的多类型拦截装备复合式反无人机任务分配方法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(1): 142-150.
(Huang T F, Cheng G Q, Huang K H, et al. Task assignment method of compound anti-drone based on DQN for multi type interception equipment[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(1): 142-150.)
- [72] 杨帅东, 谌海云, 许瑾, 等. 利用深度卷积特征的无人机视觉跟踪[J]. *控制与决策*, 2023, 38(9): 2496-2504.
(Yang S D, Chen H Y, Xu J, et al. UAV visual tracking using deep convolutional feature[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(9): 2496-2504.)
- [73] 戴邵武, 赵超轮, 李飞, 等. 一种多约束下无人机编队的模型预测控制算法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(3): 706-714.
(Dai S W, Zhao C L, Li F, et al. An algorithm of model predictive control for formation control of a multi-UAV system considering multiple constraints[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(3): 706-714.)
- [74] 吕冬翔, 张志成, 朱立宏, 等. 基于多智能体的太阳能无人机能源控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(2): 372-378.
(Lv D X, Zhang Z C, Zhu L H, et al. Multi-agent based energy control for solar unmanned aerial vehicles[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(2): 372-378.)

作者简介

姚绍杰(1999—), 男, 硕士生, 从事多智能体协同定位的研究, E-mail: YaoShaojie@henu.edu.cn;

闫帅明(1992—), 男, 博士生, 从事多智能体协同控制的研究, E-mail: yansm@henu.edu.cn;

张浩(1999—), 男, 硕士生, 从事多智能体协同编队的研究, E-mail: zhanghao99@henu.edu.cn;

石磊(1991—), 男, 教授, 硕士生导师, 从事无人机协同定位、网络安全与隐私保护、多智能体集群系统协同控制等研究, E-mail: shilei910918@126.com;

石华光(1991—), 男, 讲师, 硕士生导师, 从事工业互联网、多智能体协同控制、空地一体化协同组网等研究, E-mail: shihuaguang@henu.edu.cn;

周毅(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 从事无人驾驶与车路协同、车联网与智能交通、多智能体协同优化等研究, E-mail: zhouyi@henu.edu.cn.