

# 基于执行器故障的非线性异构车辆领导跟随容错控制

熊奔, 马晓旦, 陈倩

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年5月13日; 录用日期: 2024年6月23日; 发布日期: 2024年6月30日

## 摘要

本文研究了基于执行器故障的异构车辆编队领导跟随容错控制问题。针对领头车辆速度恒定的场景, 本文提出了一种新的分布式控制方案, 从而保证异构车辆编队在一维恒定间距策略下的稳定性。首先, 本文采用反馈线性化的方法, 将非线性车辆动力学模型转换为线性的异构状态空间模型。而后, 本文设计了一种分布式自适应容错控制协议, 确保当车辆发生执行器故障时, 相邻车辆之间仍保持等距, 同时维护整个车队的期望纵向速度。该协议通过使用自适应理论对执行器进行故障估计, 从而补偿执行器的有效性损失, 保证车队控制系统的稳定性。此外, 由于车队的设计拓扑结构是以领导者为根的生成树, 领导者无需与每个跟随车辆直接通信, 主要利用邻近车辆的状态信息, 包括相对距离、速度和加速度。最后, 仿真结果验证了本方案在车辆编队控制中的有效性。

## 关键词

执行器故障, 异构车辆编队, 容错控制, 分布式自适应

# Fault-Tolerant Control for Nonlinear Heterogeneous Vehicles Leader-Follower Formation Based on Actuator Faults

Ben Xiong, Xiaodan Ma, Qian Chen

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: May 13<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2024; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

This paper investigates the fault-tolerant leader-following control problem of heterogeneous ve-

hicle platoons based on actuator faults. In scenarios where the speed of the lead vehicle remains constant, a novel distributed control scheme is proposed to ensure the stability of heterogeneous vehicle platoons under a one-dimensional constant spacing strategy in this paper. Firstly, feedback linearization is employed to transform the nonlinear vehicle dynamics model into a linear heterogeneous state-space model. Subsequently, a distributed adaptive fault-tolerant control protocol is designed to ensure equidistance between adjacent vehicles and maintain the desired longitudinal velocity of the entire platoon even in the presence of actuator faults. This protocol utilizes adaptive fault estimation to compensate for the effectiveness loss of actuators, ensuring the stability of the platoon control system. Moreover, due to the platoon's design topology as a leader-rooted spanning tree, the leader does not need to communicate directly with each follower vehicle. Instead, it primarily utilizes the state information of neighboring vehicles, including relative distance, velocity, and acceleration. Finally, simulation results validate the effectiveness of this approach in vehicle platoon control.

## Keywords

Actuator Faults, Heterogeneous Vehicle Platoons, Fault-Tolerant Control, Distributed Adaptive

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

智能高速公路车辆系统(Intelligent Highway Vehicle Systems, IHVSs)的概念自提出以来,已经吸引了交通工程界的广泛关注。IHVSs 的核心在于采用自动或半自动巡航控制机制,目的是减少人为驾驶的干预。这种机制能适应高速公路交通量的指数级增长,并最小化交通事故的风险[1]。近年来,车辆编队控制系统(Vehicle Platoon Control System, VPCS)被视为智能高速公路车辆系统中最有前景的技术之一。它能有效减少空气污染、缩短车辆间距、减少交通事故、增加道路通行能力并提高公路安全性[2] [3]。当前,各种先进的控制算法被开发并应用于车辆编队控制,包括滑模控制、逆步控制、模型预测控制和最优控制。这些算法促进了车辆编队的有效配置,同时确保了系统的良好稳态性能。

在车辆编队控制中,车辆排控制是学者们广泛的研究热点,其基本挑战是当领头车辆由于外部干扰而突然加速或减速时,如何维持队列的稳定性。自动驾驶车辆队列的稳定性是至关重要的,它保证了车辆间的间距及速度误差不会沿车队传递增长或放大[4]。车辆编队控制方案的有效性极大依赖于车载反馈信息及采用的间距策略。例如,除了位置和速度反馈外,通过车辆间通信(V2V)提供的加速度反馈可以显著增强队列的相对串稳定性[5]。在车队控制策略的确定中,间距策略也发挥着重要作用。恒定间距策略由于能够提供与车队巡航速度无关的固定车间距,因而在研究领域内得到了广泛应用,这一策略不仅确保了高交通容量,也便于实施。

Naus 和 Vugts (2010)提出了一种针对异构车辆编队的合作自适应巡航控制(Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC)技术,给出了实际验证结果,并检验了实际设置的串稳定性[6]。Ploeg 和 Nijmeijer (2014)引入了网联车辆  $\mathcal{L}_p$  串稳定性的概念,分析了车辆队列协同自适应巡航控制策略的串稳定性特性,并给出了实验验证结果[7]。考虑传感器和执行器的时间延迟, Xiao 等人(2011)研究了采用恒定时间头车间距策略的同质和异质车辆编队的串稳定性[8]。Kwon 和 Chwa (2014)提出了一种自适应双向编队控制方案,使用了耦合滑模控制技术,以确保编队的串稳定性并提高其性能[9]。Guo 等人(2016)针对受有界外

源干扰的车辆编队问题,设计了一种分布式有限时间自适应积分滑模控制框架[10]。然而,这些研究都考虑了车辆之间的固定交互拓扑结构,降低了队列控制方案的灵活性和可靠性。近些年来,Delimpaltadakis和Bechlioulis(2018)开发了一种完全分散式的控制方案,该方案包含了障碍物避让功能,适用于装备有车载摄像头以检测障碍物的类车辆编队[11]。

随着多智能体一致性理论和编队控制技术的快速发展,网联车辆队列的协同控制近年来成为研究热点[12][13]。这种控制的主要目标是在平坦的一维直线道路上,维持车队中所有车辆的均匀速度,并在稳定状态下确保适当的车间距。2018年,Zheng等人开展了开创性的研究,开发了一种基于共识的技术应用于网联车辆队列的分布式控制方案[14][15]。尽管文献[14]针对同质车辆编队提出了控制方案,而文献[15]则扩展了这些研究成果,适用于异质车辆。此外,在实际多智能体系统中还应考虑执行器故障,因为这些不可预测的因素可能会降低系统性能,甚至导致系统不稳定[16]。针对多智能体系统执行器故障问题,Zuo等人(2015)提出了一种线性容错控制协议[17]。Chen等人(2015)设计出了一种全分布式容错控制算法来解决一致性问题[18]。Ye等人(2016)考虑了通用的执行器故障模型,该模型可以描述不同的故障类型:停机、卡死、有效性丧失和偏置[19]。然而,这些研究中的协同控制方案缺乏自适应性,在分布式框架下研究异构车辆编队自适应容错控制仍是一个有待解决的问题。

根据网联车辆队列协同控制领域的最新发展和面临的挑战,本文针对异构的双向连接车辆编队,开发了一个分布式自适应容错控制框架,以确保所有车辆保持相同的速度,并在任意两车之间维持恒定间距,确保编队的串稳定性。同时对于车辆执行器发生故障的情况,提出了一种容错自适应控制律。该设计不仅具备分布式和自适应的特性,同时还能保证车辆发生故障以及受到外部干扰时,车队仍然能够维持恒定的间距使得任务顺利进行。本文探讨的控制方案考虑了车辆的完整非线性动力学模型,充分考虑了因车辆参数不同而导致的异质性。

## 2. 车辆编队控制框架

本文主要研究异构车辆编队领导跟随容错控制问题,即车辆受到外部输入(如突然加速或减速)的影响或执行器出现故障时,编队中所有车辆仍能保持等间距。为实现此目标,本文设计了一个两层编队控制方案。首先,采用反馈线性化技术对非线性车辆动力学进行线性化处理,随后利用分布式自适应容错控制技术,在假设领头车辆速度恒定的条件下,构建了一个直线静态的网联车辆队列,以保证车辆间的等间距。

### 2.1. 车辆通信拓扑结构

假设跟随车辆之间的信息链是双向的,并且至少存在一条从领头车辆到跟随车辆的单向链路。首先,考虑一个加权有向图 $\mathcal{G}=(\mathcal{V},\mathcal{E},\mathcal{A})$ ,其中包含非空节点集合 $\mathcal{V}=\{1,2,\dots,N\}$ ,边集 $\mathcal{E}\subset\mathcal{V}\times\mathcal{V}$ ,以及相关的邻接矩阵 $\mathcal{A}=[\alpha_{ij}]\in\mathbb{R}^{N\times N}$ 。从第 $i$ 个节点出发到第 $j$ 个节点的边表示为 $(i,j)$ ,意味着信息可以从车辆 $i$ 流向车辆 $j$ 。 $\alpha_{ij}$ 是边 $(j,i)$ 的权重,如果 $(j,i)\in\mathcal{E}$ ,则 $\alpha_{ij}>0$ ,称车辆 $j$ 是车辆 $i$ 的邻居。然后,定义入度矩阵 $D=\text{diag}\{d_i\}\in\mathbb{R}^{N\times N}$ ,其中 $d_i=\sum_{j=1}^N\alpha_{ij}$ 。之后,加权有向图 $\mathcal{G}$ 的拉普拉斯矩阵 $L\in\mathbb{R}^{N\times N}$ 定义为 $L=D-\mathcal{A}$ 。如果第 $i$ 个跟随车观察到领头车辆,则存在一个边 $(0,i)$ ,称为嵌入增益 $g_i>0$ ,我们称嵌入矩阵为 $G=\text{diag}\{g_i\}\in\mathbb{R}^{N\times N}$ 。假设至少有一个跟随车辆与领头车辆相连,由于跟随车辆之间的双向通信拓扑,矩阵 $L+G$ 的所有特征值 $\lambda_i$ (对于 $1,2,\dots,N$ )都是正实数[15]。

### 2.2. 异构车辆建模

本文考虑一个由不同动力学特性车辆组成的网联车辆编队,假设没有超车的情况下,在直线高速公

路上密集车辆中排成一排行驶。在每个编队中，最前面的车辆被视为领头车辆，以恒定速度行驶，而下游的其余车辆被视为跟随车辆。图 1 展示了编队的示意图，其中所有跟随车辆都要尽量在任意两车之间保持相等的间距。在本文中，将使用以下符号：第  $i$  个跟随车辆的位置、速度和加速度分别使用  $p_i(t)$ ， $v_i(t)$ ， $a_i(t)$  表示，其中  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ，领头车辆的位置、速度和加速度用  $p_0(t)$ ， $v_0(t)$ ， $a_0(t)$  表示，单位分别为米(m)，米每秒(m/s)，米每二次方秒(m/s<sup>2</sup>)。每辆车的动力学可以通过非线性输入 - 仿射微分方程建模[4]，微分方程如下：

$$\dot{a}_i = f_i(v_i, a_i) + g_i(v_i)b_i \quad \forall i \quad (1)$$

其中包括发动机动力学，制动系统和空气动力学阻力。在上述等式(1)中  $b_i$  是第  $i$  辆车发动机的输入，非线性函数  $f_i(v_i, a_i)$  和  $g_i(v_i)$  由下式给出：

$$f_i(v_i, a_i) = -\frac{1}{\tau_i} \left( a_i + \frac{\sigma \phi_i c_{di}}{2m_i} v_i^2 + \frac{d_{mi}}{m_i} \right) - \frac{\sigma \phi_i c_{di}}{m_i} v_i a_i \quad (2)$$

$$g_i(v_i) = \frac{1}{\tau_i m_i}$$

其中  $\sigma$  表示空气密度，单位为千克每立方米(kg/m<sup>3</sup>)， $\phi_i$  表示车辆  $i$  横截面积，单位为平方米(m<sup>2</sup>)， $c_{di}$  表示阻力系数， $m_i$  表示车辆  $i$  的质量，单位为千克(kg)， $d_{mi}$  表示机械阻力，单位为千牛顿(kN)， $\tau_i$  表示发动机惯性滞后时间，单位为秒(s)，而  $\frac{\sigma \phi_i c_{di}}{2m_i}$  代表了空气阻力模型[4]。

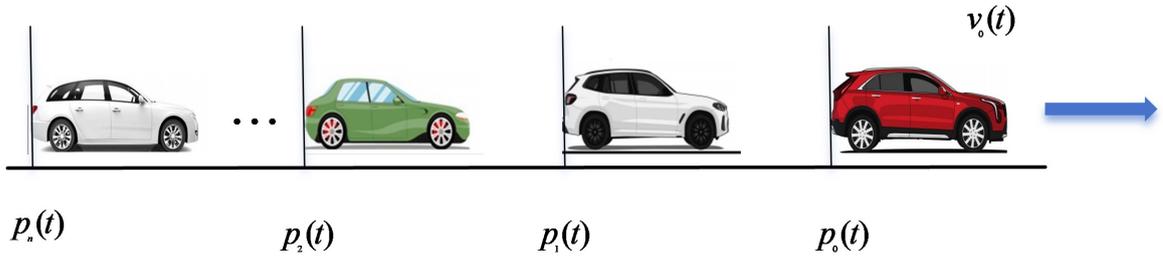


Figure 1. Illustration of vehicle platoon formation  
图 1. 车辆编队示意图

在本文中，采用了完整的非线性车型车辆模型等式(1)来进行控制器设计，由于上述等式(1)中的大多数参数对于所有车辆都不是相同的，因此当前是对异构车辆编队的控制。我们希望使用以下反馈线性化控制律：

$$b_i = u_i m_i + 0.5 \sigma \phi_i c_{di} v_i^2 + d_{mi} + \tau_i \sigma \phi_i c_{di} v_i a_i \quad (3)$$

对于所有  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$  将非线性车辆动力学转为线性模型。需要注意的是，局部反馈线性化控制作为内层控制器，对复杂的车辆动力学进行适当的简化，并确保任何零动态的渐近稳定性。在等式(3)中  $u_i$  是要设计的未考虑故障的理想控制输入，将等式(3)代入等式(1)中，得到车队中每辆车的纵向动力学为：

$$\begin{cases} \dot{p}_i = v_i, \\ \dot{v}_i = a_i, \\ \tau_i \dot{a}_i + a_i = u_i \quad \forall i \end{cases} \quad (4)$$

用标准状态空间形式表示为：

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i u_i \quad \forall i \quad (5)$$

其中  $x_i = \begin{bmatrix} p_i \\ v_i \\ a_i \end{bmatrix}$ ,  $A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_i} \end{bmatrix}$  and  $B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau_i} \end{bmatrix}$ 。可以立即验证对于所有的  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $(A_i, B_i)$  对矩阵是

可控的, 这意味着领头车辆在稳态条件下 ( $u_0 = 0$ ) 以恒定速度行驶时, 跟随车辆也能够实现对其速度和位置的有效控制。然而, 即使非线性车辆动力学等式(1)被线性化到等式(5), 但由于参数  $\tau_i$  的存在, 它仍然是异构的。这使得当前问题变得非常重要且具有挑战性。

### 2.3. 执行器故障

执行器在实际应用中可能会出现故障。本文考虑了执行器可能发生部分有效性丧失(Partial Loss of Effectiveness, PLOE)的情况:

$$u_i^F = \rho_i u_i, \quad 0 \leq \underline{\rho}_i \leq \rho_i(t) \leq \bar{\rho}_i \leq 1 \quad (6)$$

其中,  $u_i^F$  表示考虑了故障影响的车辆  $i$  的实际控制输入。 $\rho_i$  为故障参数,  $\bar{\rho}_i$  和  $\underline{\rho}_i$  分别为  $\rho_i$  的上界和下界。 $\rho_i = 1$  表示第  $i$  个车辆无执行器故障,  $\rho_i = 0$  表示第  $i$  个车辆执行器通道发生卡死故障。当  $0 \leq \underline{\rho}_i \leq \rho_i(t) \leq \bar{\rho}_i < 1$  时, 表示执行器发生故障。

因此, 车辆动力学系统等式(5)可以进一步改写为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= A_i x_i + B_i u_i^F \quad \forall i \\ &= A_i x_i + B_i \rho_i u_i \end{aligned} \quad (7)$$

### 2.4. 控制目标

本文研究了在直线平坦道路上行驶  $N+1$  辆异构车辆队列的协同控制问题, 该队列包括一个以 0 为索引的领头车和  $N$  个以 1 到  $N$  为索引的跟随车辆, 令  $\mathcal{F} = \{1, 2, \dots, N\}$  表示跟随车辆的集合。控制目标是确保所有跟随车辆保持与领头车辆相同的速度, 同时保持车辆间的恒定间距, 从而潜在地提高道路的通行能力。

根据图 1 所示的车辆编队, 如果对于任何给定的有界初始状态, 领头车辆保持恒定速度, 那么可以说达到了期望的编队控制目标。期望的控制目标可以表示为:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|p_i(t) - p_j(t)\| = (i - j)d_r \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|v_i(t) - v_0(t)\| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|a_i(t) - a_0(t)\| = 0 \end{cases} \quad (8)$$

对于所有的  $i, j \in \mathcal{F}, j \neq i$ , 包括保持车队串稳定性在内的车队控制活动, 被表示为一个“领导者-跟随”的静态车辆编队, 其中领头车视为根节点。车队的期望静态编队由向量  $d_i = [id_r, 0, 0]^T \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}$  指定, 对于编队中第  $i$  个跟随车辆是已知的, 其中  $d_r$  是编队中任何两个连续车辆之间的预设间隔。在实施恒定间距政策的情况下, 对于所有的  $i$ , 预设间隔  $d_r$  保持不变。另外, 车辆由于转弯、上坡或下坡而发生的任何加速度或减速度都可以被视为暂时作用于车辆的有界干扰。车队的串稳定性确保了在干扰期间间距误差增长, 但一旦干扰消失, 则迅速衰减至零。

### 3. 分布式控制策略及稳定性分析

#### 3.1. 控制策略的制定

本章开发了针对异构车辆编队的分布式自适应容错控制方案，本文的目标是设计自适应故障分布式控制协议，如定理 1 所示，以满足控制目标，即保持连续车辆之间的间距相等且恒定，保持所有跟随车辆的速度与领先车辆的速度相同，保持队列中所有车辆的加速度为零，从而保持车队的串稳定性。

定理 1: 考虑一个由异构网联车辆组成的编队，其反馈线性化动力学表示如等式(7)所示。定义  $\delta = \frac{\tau_0}{\max_{i \in \mathcal{F}} \tau_i}$ 、 $\rho = \frac{\tau_0}{\min_{i \in \mathcal{F}} \tau_i}$  (其中  $\rho_i$  为故障因子， $\rho$  为控制器参数) 并选择  $\varphi \geq \frac{1}{2\delta \min_{i \in \mathcal{F}} \lambda_i}$ 。那么对所有  $i \in \mathcal{F}$  的第  $i$  个车辆应用以下自适应容错控制协议，实现控制目标。

$$\begin{cases} u_i = B_0^T \xi_i x_i + \varphi \hat{\rho}_i K \sum_{j=0}^N \alpha_{ij} ((x_i - d_i) - (x_j - d_j)) \\ \dot{\xi}_i = \rho x_i^T B_0 K \sum_{j=0}^N \alpha_{ij} ((x_i - d_i) - (x_j - d_j)), \end{cases} \quad (9)$$

其中， $\hat{\rho}_i$  是  $\rho_i$  的估计值， $\tilde{\rho}_i = \hat{\rho}_i - \rho_i$ ， $K = -B_0^T P$  为控制增益， $\xi_i$  为控制协议中第  $i$  个车辆的耦合权重。 $P$  是一个未知的正定矩阵，它是代数黎卡提方程的解，代表最优控制问题的解中的状态反馈增益矩阵， $\gamma$  是一个大于零的标量，用作权重因子，用于调整控制律的性能。 $P > 0$  是在  $\gamma > 0$  时，代数黎卡提方程的唯一解，即：

$$PA_0 + A_0^T P - PB_0 B_0^T P + \gamma I_3 = 0 \quad (10)$$

其中  $I_3$  是一个  $3 \times 3$  的单位矩阵，对应于车辆的位置、速度和加速度状态。

为了估计执行器的故障，介绍了以下自适应故障估计算法。 $\hat{\rho}_i$  是基于以下自适应定律给出的：

$$\dot{\hat{\rho}}_i = \text{Proj}\{F_i\} = \begin{cases} 0 & \text{if } \hat{\rho}_i = \underline{\rho}_i \text{ and } F_i \leq 0 \\ & \text{or } \hat{\rho}_i = \bar{\rho}_i \text{ and } F_i \geq 0 \\ F_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

其中  $F_i = \partial_i \Psi \lambda_0 \varepsilon_i^T P B_0 B_0^T P \varepsilon_i$ ，其中  $\partial_i$ 、 $\Psi$ 、 $\lambda_0$  均为正常数。

证明：在前面提出的分布式编队控制律等式(9)的前提下，等式(7)给出的异构车辆编队动力学方程可以转化为：

$$\dot{x}_i = (A_i + B_i B_0^T \xi_i) x_i + \varphi \hat{\rho}_i B_i K \sum_{j=0}^N \alpha_{ij} ((x_i - d_i) - (x_j - d_j)) \quad (12)$$

对于每一辆车，利用  $A_0$ 、 $B_0$ 、 $A_i$  和  $B_i$  的可控规范结构，可以找到常向量  $\zeta_i$  使得对于所有  $i \in \mathcal{F}$ ，有如下等式：

$$A_0 = A_i + B_i B_0^T \zeta_i \quad \forall i \in \mathcal{F} \quad (13)$$

将等式(13)代入等式(12)中，可以得到：

$$\dot{x}_i = A_0 x_i + B_i B_0^T (\xi_i - \zeta_i) x_i + \varphi \hat{\rho}_i B_i K \sum_{j=0}^N \alpha_{ij} ((x_i - d_i) - (x_j - d_j)) \quad (14)$$

定义编队中每个跟随车辆的跟踪误差  $\varepsilon_i = x_i - d_i - x_0$ ，单位米(m)，且令向量  $\varepsilon = [\varepsilon_1^T, \varepsilon_2^T, \dots, \varepsilon_N^T]^T$ 。由于  $A_0 d_i = 0$  且  $\dot{d}_i = [000]^T$ ，对于任意  $i, j \in \mathcal{F}$ ， $\varepsilon_i - \varepsilon_j = (x_i - d_i) - (x_j - d_j)$ ，可以通过对  $\varepsilon_i$  微分求得  $\dot{\varepsilon}_i$ ，也即等式(15)：

$$\dot{\varepsilon}_i = A_0 \varepsilon_i + B_i B_0^T (\xi_i - \zeta_i) x_i + \varphi \hat{\rho}_i B_i K \sum_{j=0}^N \alpha_{ij} (\varepsilon_i - \varepsilon_j) \quad (15)$$

将等式(15)用克罗内克积形式表达为:

$$\dot{\varepsilon} = (I \otimes A_0) \varepsilon + \varphi \text{diag} \{ \hat{\rho}_i B_i (\rho_i) K \} ((L+G) \otimes I) \varepsilon + \begin{bmatrix} B_1 B_0^T (\xi_1 - \zeta_1) x_1 \\ B_2 B_0^T (\xi_2 - \zeta_2) x_2 \\ \vdots \\ B_N B_0^T (\xi_N - \zeta_N) x_N \end{bmatrix} \quad (16)$$

### 3.2. 稳定性分析

在上文的证明中, 车队控制问题, 包括串稳定性, 被构造成了闭环编队跟踪误差动态  $\varepsilon_i$  的渐近稳定性问题。为了求解这个问题, 本文考虑以下李雅普诺夫函数:

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 \\ V_1 &= \varepsilon^T ((L+G) \otimes P) \varepsilon + \sum_{i=1}^N (\xi_i - \zeta_i)^2 \\ V_2 &= \sum_{i=1}^N \frac{\tilde{\rho}_i^2}{\partial_i} \end{aligned} \quad (17)$$

当给定  $\gamma > 0$ , 由于  $L+G > 0$  且  $P > 0$ , 所以  $V > 0$ 。沿着等式(12)计算  $V$  的导数  $\dot{V}$

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \varepsilon^T ((L+G) \otimes (PA_0 + A_0^T P)) \varepsilon + 2 \sum_{i=1}^N (\xi_i - \zeta_i) \dot{\xi}_i \\ &\quad + 2 \varepsilon^T ((L+G) \otimes I) \varphi \text{diag} \{ PB_i \hat{\rho}_i K \} ((L+G) \otimes I) \varepsilon \\ &\quad + 2 \varepsilon^T ((L+G) \otimes P) \begin{bmatrix} B_1 B_0^T (\xi_1 - \zeta_1) x_1 \\ B_2 B_0^T (\xi_2 - \zeta_2) x_2 \\ \vdots \\ B_N B_0^T (\xi_N - \zeta_N) x_N \end{bmatrix} \\ &= \varepsilon^T ((L+G) \otimes (PA_0 + A_0^T P)) \varepsilon + 2 \varepsilon^T ((L+G) \otimes I) \varphi \text{diag} \{ PB_i \hat{\rho}_i K \} ((L+G) \otimes I) \varepsilon \\ &\quad + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^N \alpha_{ij} (\varepsilon_i - \varepsilon_j)^T PB_i B_0^T (\xi_i - \zeta_i) x_i + 2 \rho \sum_{i=1}^N (\xi_i - \zeta_i) x_i^T B_0 K \sum_{j=0}^N \alpha_{ij} ((x_i - d_i) - (x_j - d_j)) \\ &= \varepsilon^T ((L+G) \otimes (PA_0 + A_0^T P)) \varepsilon + 2 \varepsilon^T ((L+G) \otimes I) \varphi \text{diag} \{ PB_i \hat{\rho}_i K \} ((L+G) \otimes I) \varepsilon \\ &\quad + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^N \alpha_{ij} (\varepsilon_i - \varepsilon_j)^T P (B_i B_0^T - \rho B_0 B_0^T) (\xi_i - \zeta_i) x_i \end{aligned}$$

现在利用  $B_0$ 、 $B_i$  的结构和参数  $\rho = \frac{\tau_0}{\min_{i \in \mathcal{F}} \tau_i}$ , 可以直接得到等式(18):

$$B_i B_0^T - \rho B_0 B_0^T \leq 0 \quad (18)$$

将等式(17)用于  $\dot{V}_1$  的最后一个表达式中, 可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq \varepsilon^T ((L+G) \otimes (PA_0 + A_0^T P)) \varepsilon + 2 \varepsilon^T ((L+G) \otimes I) \varphi \text{diag} \{ \hat{\rho}_i PB_i K \} ((L+G) \otimes I) \varepsilon \\ &\leq \varepsilon^T \left[ (L+G) \otimes (PA_0 + A_0^T P) - 2 \varphi \delta (L+G)^2 \hat{\Omega} \otimes PB_0 B_0^T P \right] \varepsilon \end{aligned}$$

对  $V_2$  求导可以得到:

$$\dot{V}_2 = 2 \sum_{i=1}^N \frac{\tilde{\rho}_i}{\partial_i} \dot{\rho}_i$$

第一种情况: 如果  $\hat{\rho}_i = \rho_i$  和  $F_i \leq 0$  或者  $\hat{\rho}_i = \bar{\rho}_i$  和  $F_i \geq 0$ ,  $\dot{V}_2 = 0$ 。以  $\hat{\rho}_i = \rho_i$  和  $F_i \leq 0$  的情况进行分析

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \leq \varepsilon^T \left[ (L+G) \otimes (PA_0 + A_0^T P) - 2\varphi\delta(L+G)^2 \bar{\Omega} \otimes PB_0 B_0^T P \right] \varepsilon$$

其中  $\Omega = \text{diag}\{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N\}$ 。由于对于所有  $i \in \mathcal{F}$ ,  $B_i B_0^T - \delta B_0 B_0^T \geq 0$ , 这是类似于证明等式(18)所使用的论证。现在, 由于  $L+G > 0$ , 因此总是存在一个对角化矩阵  $D \in \mathbb{R}^{N \times N}$ , 使得  $\Lambda = D^T (L+G) D$ , 其中  $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$ 。将  $B_i B_0^T - \delta B_0 B_0^T \geq 0$  中的  $L+G$  替换为  $D^T \Lambda D$ , 可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \varepsilon^T (D^T \otimes I) \left[ \Lambda \otimes (PA_0 + A_0^T P) - \frac{1}{\min_{i \in \mathcal{F}} \lambda_i} \bar{\Omega} \Lambda^2 \otimes PB_0 B_0^T P \right] (D \otimes I) \varepsilon \\ &\leq \varepsilon^T (D^T \otimes I) \left[ \Lambda \otimes (PA_0 + A_0^T P - PB_0 B_0^T P) \right] (D \otimes I) \varepsilon \end{aligned} \quad (19)$$

那么, 根据  $\gamma > 0$  时在等式(9)中给出的代数黎卡提方程, 则等式(19)意味着  $\dot{V} \leq 0$ , 且仅当  $\varepsilon = 0$  时  $\dot{V} = 0$ 。因此, 根据拉塞尔不变性定理[20], 可以确保等式(15)中给出的闭环跟踪误差  $\varepsilon$  的渐近稳定性。因此,  $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = 0$  意味着:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) - d_i - x_0(t) = 0 \quad \forall i \in \mathcal{F} \quad (20)$$

第二种情况: 如果  $\rho_i \leq \hat{\rho}_i \leq \bar{\rho}_i$ ,  $\dot{\rho}_i = F_i$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= 2 \sum_{i=1}^N \frac{\tilde{\rho}_i}{\partial_i} F_i \\ &= 2 \sum_{i=1}^N \tilde{\rho}_i (\Psi \lambda_0 \varepsilon_i^T PB_0 B_0^T P \varepsilon_i) \\ &= 2 \sum_{i=1}^N (\hat{\rho}_i - \rho_i) \Psi \lambda_0 \varepsilon_i^T PB_0 B_0^T P \varepsilon_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \\ &\leq \varepsilon^T \left[ (L+G) \otimes (PA_0 + A_0^T P) - 2\varphi\delta(L+G)^2 \hat{\Omega} \otimes PB_0 B_0^T P \right] \varepsilon + 2 \sum_{i=1}^N (\hat{\rho}_i - \rho_i) \Psi \lambda_0 \varepsilon_i^T PB_0 B_0^T P \varepsilon_i \\ &\leq \varepsilon^T \left[ (L+G) \otimes (PA_0 + A_0^T P) \right] \varepsilon - 2\varepsilon^T \left[ \Psi \underline{\Omega} \otimes PB_0 B_0^T P \right] \varepsilon \\ &\leq \lambda_0 \varepsilon^T \left[ I_N \otimes (PA_0 + A_0^T P - \Psi \underline{\Omega} PB_0 B_0^T P) \right] \varepsilon \end{aligned}$$

假设  $\Psi \underline{\Omega} \geq 1$

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \leq \lambda_0 \varepsilon^T \left[ I_N \otimes (PA_0 + A_0^T P - PB_0 B_0^T P) \right] \varepsilon$$

那么, 同样根据  $\gamma > 0$  时在等式(9)中给出的代数黎卡提方程, 则等式(19)意味着  $\dot{V} \leq 0$ , 且仅当  $\varepsilon = 0$  时  $\dot{V} = 0$ 。因此, 根据拉塞尔不变性定理[20], 可以确保等式(15)中给出的闭环跟踪误差  $\varepsilon$  的渐近稳定性。因此,  $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = 0$  意味着:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) - d_i - x_0(t) = 0 \quad \forall i \in \mathcal{F}$$

证明完成。

与别的只考虑同质车辆队列, 即  $A_i = A_0$ 、 $B_i = B_0$ ,  $\forall i \in \mathcal{F}$  的研究不同, 本文提出的控制策略可以处理异构车辆, 并且考虑到了执行器出现故障的情况, 在实际应用中更为实用。同时, 虽然 Kwon 和 Chwa (2014)研究了异构车辆编队的控制[9], 但是他们在设计控制律之前需要知道领头车和跟随车的所有模型信息, 而本文只需要知道领头车模型和跟随车模型的界限, 这在很大程度上降低了计算复杂度, 从而为实际的硬件实现提供了更多的可能性。

## 4. 仿真实验

本节中, 使用 Matlab 来进行仿真实验, 得出结果证明了本文所提出的分布式自适应容错控制方法的实用性和有效性。

### 4.1. 实验设置

本文考虑了一个由 6 辆网联车辆组成的车队, 第一辆是领导者, 其余是跟随者, 通过如图 2 所示的方式互联, 每辆车的参数随意选取但符合实际, 如表 1 所示。另外, 在仿真中, 考虑了车辆的非线性动力学。领头车的初始状态设定为  $p_0(0) = 200 \text{ m}$ ,  $a_0(0) = 0 \text{ m/s}^2$ ,  $v_0(0) = 8 \text{ m/s}$ , 第  $i$  辆跟随车的初始位置为  $\{p_i(0)\} = (200 - 8i) \text{ m}$ , 两车间的期望间距  $d_r = 5 \text{ m}$ 。领头车的加速或减速视为车队中的扰动。根据表 1 所给定的数据, 计算控制器参数为  $\rho = 1.545$ ,  $\delta = 0.823$ ,  $\varphi = 0.5$ ,  $\lambda_0 = 1$ ,  $\Psi = 0.5$ ,  $\partial_i = 1 \quad \forall i \in \mathcal{F}$  然后选择  $\gamma = 100$ , 并通过求解等式(9), 得到:

$$P = \begin{bmatrix} 180.287 & 112.517 & 7.1 \\ 112.517 & 195.7535 & 12.8004 \\ 7.1 & 12.8004 & 7.2787 \end{bmatrix} > 0$$

反馈增益矩阵为:

$$K = -B_0^T P = -[10 \quad 18.0287 \quad 10.2517]$$

假设车辆执行器的故障因子满足如下的式子:

$$\rho_i = \begin{cases} \text{diag}\{1, 1, 1, 1, 1\}, & 0 \text{ s} < t \leq 2 \text{ s} \\ \text{diag}\{0.6, 0.2, 0.5, 0.3, 0.4\}, & 2 \text{ s} \leq t \leq 30 \text{ s} \end{cases}$$

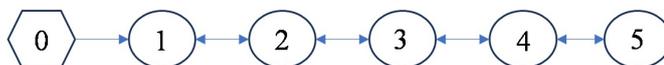


Figure 2. Leader-following topology structure

图 2. 领导者 - 跟随拓扑结构

Table 1. Vehicle parameters

表 1. 车辆参数

参数	0	1	2	3	4	5
$m_i$ (kg)	1753	1837	1942	1764	1029	1688
$\tau_i$ (s)	0.51	0.55	0.62	0.52	0.33	0.48

### 4.2. 实验结果分析

经过仿真, 得出结果如图 3~8 所示, 其中图 3~5 为在执行器不发生故障的情况下的仿真结果, 分别为加速度  $a_i(t)$ 、速度  $v_i(t)$  以及位置  $p_i(t)$  图, 如下所示:

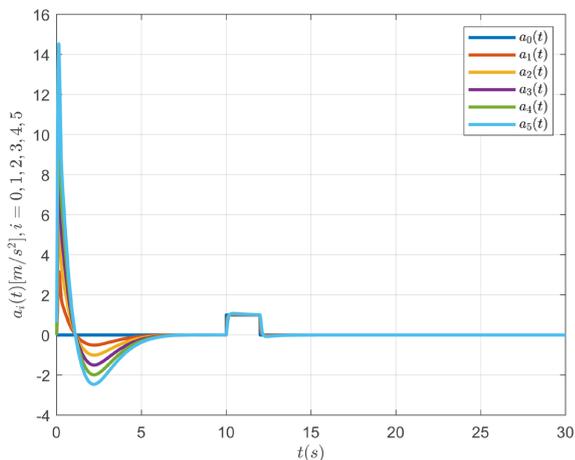


Figure 3. Acceleration variation graph (no actuator faults)  
图 3. 加速度变化图(无执行器故障)

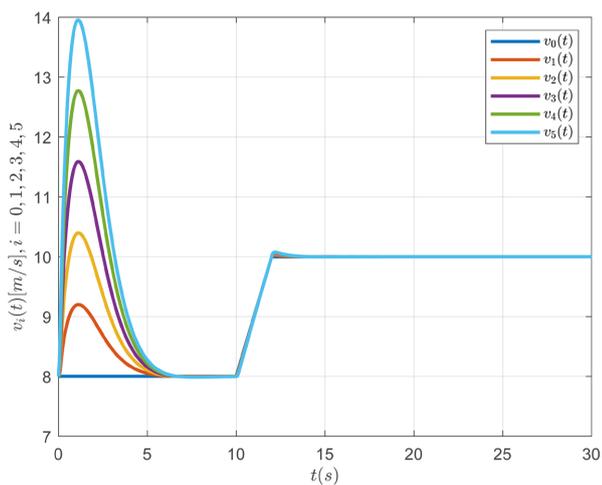


Figure 4. Velocity variation graph (no actuator faults)  
图 4. 速度变化图(无执行器故障)

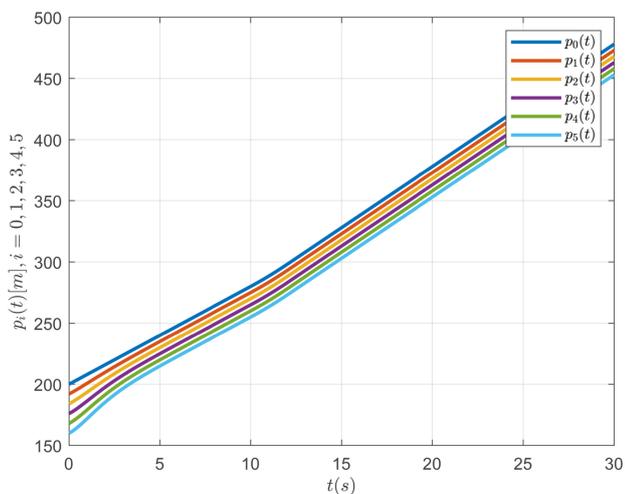


Figure 5. Position variation graph (no actuator faults)  
图 5. 位置变化图(无执行器故障)

由上图可以看出, 在系统开始响应后, 跟随车辆速度和加速度开始趋向于领头车, 并最终保持一致, 即车队中所有车辆以  $v_0(0) = 8 \text{ m/s}$  的速度一起移动, 加速度也都为 0, 因此, 在此阶段任意两辆车之间的间距误差保持为零, 车辆行驶的距离以恒定速率增加。为了干扰车队的恒定速度运动, 对领头车施加了一个外部输入为:

$$w_0(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 10 \text{ s} \\ 1, & 10 \leq t < 12 \text{ s} \\ 0, & t \geq 12 \text{ s} \end{cases} \quad (21)$$

该外部输入导致领头车加速, 随后其速度急剧上升, 如图 3、图 4 所示。该图还显示, 作为对领头车速度突然增加的响应, 跟随车辆也试图以与领头车同样的加速度加速, 与领头车的新稳定速度同步, 并在  $t = 12 \text{ s}$  后, 所有跟随车达到了与领头车相同的速度, 这表明了所提出的车队控制方案有效性。之后, 从图 5 中可以看出在扰动后各车辆位置变化率重新保持一致, 即以同等间距保持行驶, 这表明所提出的方案已达到了车队控制的目标, 并且在短时间内能够承受由于对领头车施加加速度输入而引起的扰动。

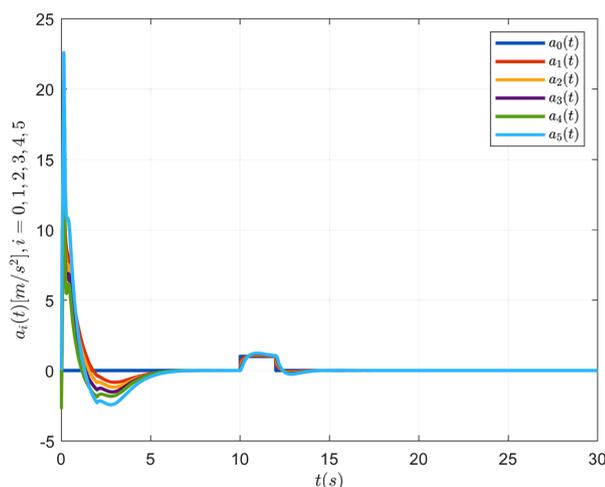


Figure 6. Acceleration variation graph (actuator faults)

图 6. 加速度变化图(执行器故障)

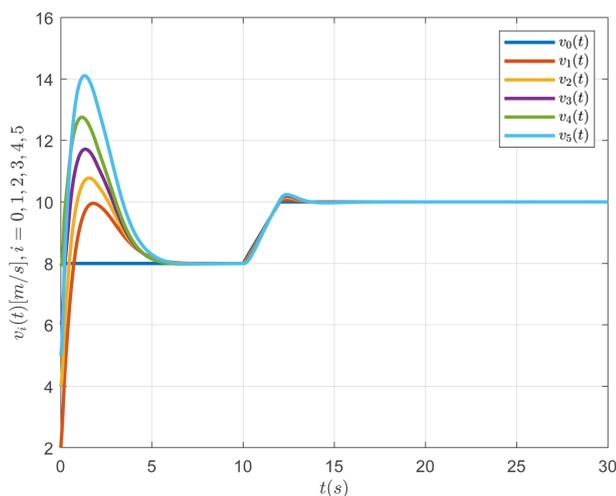
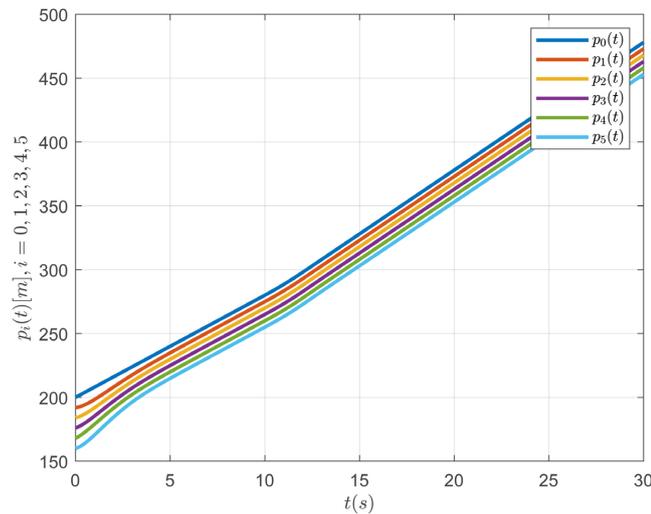


Figure 7. Velocity variation graph (actuator faults)

图 7. 速度变化图(执行器故障)



**Figure 8.** Position variation graph (actuator faults)  
**图 8.** 位置变化图(执行器故障)

图 6~8 为在执行器出现故障的情况下的仿真结果，分别为加速度  $a_i(t)$ 、速度  $v_i(t)$  以及位置  $p_i(t)$  的变化图。将图 3~5 和图 6~8 分别进行一一对比，可以看出，在执行器出现故障的情况下对车队状态产生轻微的影响，但仍能保持队列的串稳定。因此，仿真结果表明了本文所提出的分布式自适应容错控制策略的有效性。

## 5. 结论

本文提出了一种针对异构车辆编队执行器故障的分布式自适应容错控制策略，该策略首先利用输入-输出反馈线性化技术对非线性车辆动力学进行线性化处理，然后应用分布式自适应容错控制来实现控制目标。所提出的方法确保当车辆发生执行器故障时，连续车辆之间的间距相等且恒定，并在领头车以恒定速度行驶时保持所需的期望速度。此外，即使领头车受到外部扰动，也保持了车队的串稳定性。研究表明，加速度反馈与位置和速度反馈相结合，提高了所提控制策略的串稳定性和可靠性。仿真结果表明，在车辆发生执行器故障时或在领头车受到扰动的情况下，该策略具有良好的控制性能。

## 参考文献

- [1] Swaroop, D., Hedrick, J.K. and Choi, S.B. (2001) Direct Adaptive Longitudinal Control of Vehicle Platoons. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **50**, 150-161. <https://doi.org/10.1109/25.917908>
- [2] Zhan, J., Ma, Z. and Zhang, L. (2023) Data-Driven Modeling and Distributed Predictive Control of Mixed Vehicle Platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, **8**, 572-582. <https://doi.org/10.1109/tiv.2022.3168591>
- [3] Liu, Y., Yao, D., Li, H. and Lu, R. (2022) Distributed Cooperative Compound Tracking Control for a Platoon of Vehicles with Adaptive NN. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **52**, 7039-7048. <https://doi.org/10.1109/tcyb.2020.3044883>
- [4] Ghasemi, A., Kazemi, R. and Azadi, S. (2013) Stable Decentralized Control of a Platoon of Vehicles with Heterogeneous Information Feedback. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **62**, 4299-4308. <https://doi.org/10.1109/tvt.2013.2253500>
- [5] Ploeg, J., Shukla, D.P., van de Wouw, N. and Nijmeijer, H. (2014) Controller Synthesis for String Stability of Vehicle Platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **15**, 854-865. <https://doi.org/10.1109/tits.2013.2291493>
- [6] Naus, G.J.L., Vugts, R.P.A., Ploeg, J., van de Molengraft, M.J.G. and Steinbuch, M. (2010) String-stable CACC Design and Experimental Validation: A Frequency-Domain Approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **59**, 4268-4279. <https://doi.org/10.1109/tvt.2010.2076320>

- 
- [7] Ploeg, J., van de Wouw, N. and Nijmeijer, H. (2014) Lp String Stability of Cascaded Systems: Application to Vehicle Platooning. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **22**, 786-793. <https://doi.org/10.1109/tcst.2013.2258346>
- [8] Xiao, L. and Gao, F. (2011) Practical String Stability of Platoon of Adaptive Cruise Control Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **12**, 1184-1194. <https://doi.org/10.1109/tits.2011.2143407>
- [9] Kwon, J. and Chwa, D. (2014) Adaptive Bidirectional Platoon Control Using a Coupled Sliding Mode Control Method. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **15**, 2040-2048. <https://doi.org/10.1109/tits.2014.2308535>
- [10] Guo, X., Wang, J., Liao, F. and Teo, R.S.H. (2016) Distributed Adaptive Integrated-Sliding-Mode Controller Synthesis for String Stability of Vehicle Platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **17**, 2419-2429. <https://doi.org/10.1109/tits.2016.2519941>
- [11] Delimpaltadakis, I.M., Bechlioulis, C.P. and Kyriakopoulos, K.J. (2018) Decentralized Platooning with Obstacle Avoidance for Car-Like Vehicles with Limited Sensing. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **3**, 835-840. <https://doi.org/10.1109/lra.2018.2793340>
- [12] Hu, J. and Lanzon, A. (2018) An Innovative Tri-Rotor Drone and Associated Distributed Aerial Drone Swarm Control. *Robotics and Autonomous Systems*, **103**, 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.02.019>
- [13] Hu, J. and Lanzon, A. (2018). Cooperative Control of Innovative Tri-Rotor Drones Using Robust Feedback Linearization. 2018 *UKACC 12th International Conference on Control (CONTROL)*, Sheffield, 5-7 September 2018, 347-352. <https://doi.org/10.1109/control.2018.8516820>
- [14] Zheng, Y., Li, S.E., Li, K. and Ren, W. (2018) Platooning of Connected Vehicles with Undirected Topologies: Robustness Analysis and Distributed H-Infinity Controller Synthesis. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **19**, 1353-1364. <https://doi.org/10.1109/tits.2017.2726038>
- [15] Zheng, Y., Bian, Y., Li, S. and Li, S.E. (2021) Cooperative Control of Heterogeneous Connected Vehicles with Directed Acyclic Interactions. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, **13**, 127-141. <https://doi.org/10.1109/itsmag.2018.2889654>
- [16] Ye, D., Park, J.H. and Fan, Q. (2015) Adaptive Robust Actuator Fault Compensation for Linear Systems Using a Novel Fault Estimation Mechanism. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, **26**, 1597-1614. <https://doi.org/10.1002/rnc.3369>
- [17] Zuo, Z., Zhang, J. and Wang, Y. (2014) Adaptive Fault Tolerant Tracking Control for Linear and Lipschitz Nonlinear Multi-Agent Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **62**, 3923-3931. <https://doi.org/10.1109/tie.2014.2367034>
- [18] Chen, S., Ho, D.W.C., Li, L. and Liu, M. (2015) Fault-tolerant Consensus of Multi-Agent System with Distributed Adaptive Protocol. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **45**, 2142-2155. <https://doi.org/10.1109/tycb.2014.2366204>
- [19] Ye, D., Zhao, X. and Cao, B. (2016) Distributed Adaptive Fault-tolerant Consensus Tracking of Multi-agent Systems against Time-varying Actuator Faults. *IET Control Theory & Applications*, **10**, 554-563. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2015.0790>
- [20] Khalil, H.K. (2002) *Control of Nonlinear Systems*. Prentice Hall.