



(21) 申请号 202411932352.0

(22) 申请日 2024.12.26

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 119376256 A

(43) 申请公布日 2025.01.28

(73) 专利权人 华东交通大学

地址 330013 江西省南昌市青山湖区双港
东大街808号(72) 发明人 张正 余洋 夏接文 赵秀娟
安春兰(74) 专利代理机构 北京领果世纪知识产权代理
有限公司 16221

专利代理师 赵爱婷

(51) Int. Cl.

G05B 13/04 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 114791741 A, 2022.07.26

CN 114935915 A, 2022.08.23

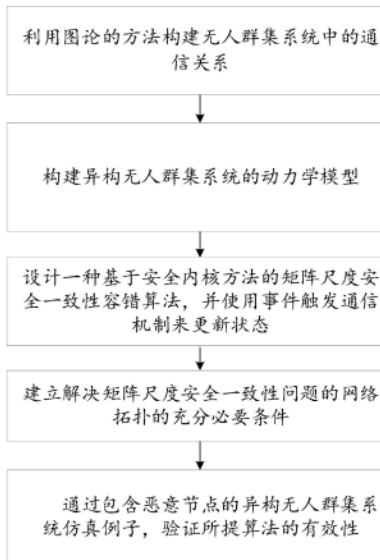
审查员 冯江琼

(54) 发明名称

一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性
控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性控制方法,属于无人自主系统控制技术领域,包括以下步骤:步骤S1、利用图论的方法构建无人集群系统中的通信关系;步骤S2、构建异构无人集群系统的动力学模型;步骤S3、设计一种基于安全内核方法的矩阵尺度安全一致性容错算法,并使用事件触发通信机制来更新状态;步骤S4、建立解决矩阵尺度安全一致性问题的网络拓扑的充分必要条件;步骤S5、通过包含恶意节点的异构无人集群系统仿真例子,验证所提算法的有效性。本发明采用上述的一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性控制方法,可使多自主体的应用更加灵活,并有效处理多维状态空间内的安全一致性问题。



1. 一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤S1、利用图论的方法来构建无人集群系统中的通信关系,定义 r -鲁棒性和 (r, s) -鲁棒性来描述网络拓扑的容错能力;

r -鲁棒性具体为:

给定一个有向图 $G = (V, E, A)$,其中 $|V| \geq 2$,对于 V 中的任意两个非空且不相交的子集 V_1 和 V_2 ,如果至少满足以下条件之一,则称图 G 为 r -鲁棒图:

1) 存在至少一个节点在 V_1 中,其至少有 r 个入度邻居不在 V_1 中;

2) 存在至少一个节点在 V_2 中,其至少有 r 个入度邻居不在 V_2 中;

r -鲁棒性衡量了网络拓扑中每个子集与外部连接的冗余度;

(r, s) -鲁棒性具体为:

给定一个有向图 $G = (V, E, A)$,其中 $|V| \geq 2$,对于 V 中的任意两个非空且不相交的子集 V_1 和 V_2 ,如果至少满足以下条件之一,则称图 G 为 (r, s) -鲁棒图:

1) V_1 中的所有节点都有至少 r 个入度邻居来自 V_1 的外部;

2) V_2 中的所有节点都有至少 r 个入度邻居来自 V_2 的外部;

3) $V_1 \cup V_2$ 中至少有 s 个节点,每个节点都有至少 r 个入度邻居来自其所属子集的外部;

(r, s) -鲁棒性是 r -鲁棒性的一个扩展,其引入了参数 s ,用于衡量满足连接条件的节点数量;

步骤S2、构建异构无人集群系统的动力学模型,异构无人集群系统包含一阶自主体和二阶自主体;

步骤S3、设计一种基于安全内核方法的矩阵尺度安全一致性容错算法,每个正常自主体在每个采样时间收集邻居的矩阵尺度位置信息,对收集到的信息按升序排序,并根据恶意自主体的数量限制,从排序后的序列中选取特定数量的点来构建安全内核,利用线性规划方法计算辅助点,并基于辅助点更新自主体的状态,自主体检查是否满足事件触发条件,如果不满足则不发送状态信息给邻居;

其中基于安全内核方法的矩阵尺度安全一致性容错算法具体如下:

1) 收集邻居的矩阵尺度位置信息;

每个正常自主体在每个采样时间 t_k 收集其邻居的矩阵尺度位置信息,采样时间 t_k 记为:

$$t_k = kT \quad (5);$$

其中 k 是整数; T 是采样周期;

对于自主体 $i \in V_N$, V_N 表示正常自主体集合,其邻居集合为 N_i ,每个邻居 $j \in N_i$ 的矩阵尺度位置信息表示为 $S_j p_j(t_k)$,将各邻居的矩阵尺度位置信息值储存至

$$\chi_i(t_k) = \{S_j p_j(t_k) | j \in N_i\};$$

2) 对收集到的信息按升序排序,并构建安全内核;

自主体 $i \in V_N$ 对收集到的邻居矩阵尺度位置信息 $\chi_i(t_k)$ 按每个维度进行升序排序;

然后,从排序后的序列中选取初始的 $(d+1)f+1$ 个点和最后的 $(d+1)f+1$ 个点,分

别储存至集合 $Y_i(\ell, t_k)$ 和 $Z_i(\ell, t_k)$, 其中, ℓ 表示第 ℓ 个维度; t_k 表示第 k 个采样时间; 用于构建安全内核 $\Psi(C, f) = \bigcap_{\psi \in \Pi(C, f)} \text{Conv}(\psi)$, 安全内核 $\Psi(C, f)$ 是对于点集 C 的所有 $(m - f)$ 子集凸包的交集, 其中 m 是点集 C 的基数, f 是恶意自主体的最大数量, 其中, $\text{Conv}(\psi)$ 是子集 ψ 的凸包;

3) 利用线性规划方法计算辅助点;

为了找到安全内核中的辅助点, 使用线性规划方法, 通过解决以下线性规划问题来找到一个点 $y_i(\ell, t_k)$ 和 $z_i(\ell, t_k)$, 使其位于安全内核内, 线性规划问题表示为:

$$\begin{aligned} \max_{\gamma} \quad & \mathbf{v}^T \gamma \\ \text{s.t.} \quad & (\mathbf{M} \otimes \mathbf{I}_d) H (\mathbf{I}_v \otimes \mathbf{1}_q^T) \gamma = \mathbf{0}_{dv \times 1} \quad (6); \\ & \gamma \geq \mathbf{0}_{qv \times 1} \end{aligned}$$

其中, $\mathbf{M}$ 是循环矩阵, H 是包含点集 $Y_i(\ell, t_k)$ 或 $Z_i(\ell, t_k)$ 中点的矩阵, γ 是决策变量, $\mathbf{v}$ 是任意正向量, $\otimes$ 表示克罗内克积, $\mathbf{I}_v$ 和 $\mathbf{1}_q$ 分别是 v 维单位矩阵和 q 维全1向量, $\mathbf{0}_{dv \times 1}$ 和 $\mathbf{0}_{qv \times 1}$ 分别是 dv 维和 qv 维全0向量; $\mathbf{I}_d$ 表示 $d \times d$ 的单位矩阵;

解决此线性规划问题后, 得到 γ^* , 然后计算点 $y_i(\ell, t_k)$ 或 $z_i(\ell, t_k)$:

$$\begin{aligned} y_i(\ell, t_k) &= \frac{1}{v} (\mathbf{1}_v^T \otimes \mathbf{I}_d) H \gamma^* \\ z_i(\ell, t_k) &= \frac{1}{v} (\mathbf{1}_v^T \otimes \mathbf{I}_d) H \gamma^* \end{aligned} \quad (7);$$

其中, $y_i(\ell, t_k)$ 和 $z_i(\ell, t_k)$ 的计算公式相同, 但它们基于不同的点集 $Y_i(\ell, t_k)$ 和 $Z_i(\ell, t_k)$; γ^* 表示最优决策变量;

4) 基于辅助点更新自主体状态;

自主体 $i \in V_N$ 使用计算得到的辅助点来更新其状态, 对于二阶自主体 $i \in V_d$ 和一阶自主体 $i \in V_c$ 的更新规则如下,

二阶自主体:

$$\begin{cases} p_i(t_{k+1}) = (\mathbf{I}_d - \alpha_{i1} \text{sign}(S_i) S_i) p_i(t_k) + \alpha_{i1} \text{sign}(S_i) \tilde{p}_i(t_k) + \left(T - \frac{\beta_2 T^2}{2} \right) q_i(t_k) \\ q_i(t_{k+1}) = \alpha_{i2} \text{sign}(S_i) \tilde{p}_i(t_k) - \alpha_{i2} \text{sign}(S_i) S_i p_i(t_k) + (1 - \beta_2 T) q_i(t_k), i \in V_d \end{cases} \quad (8);$$

其中, $\alpha_{i1} = \frac{\beta_1 T^2}{2} \sum_{j \in N_i} a_{ij}[k]$, $\tilde{p}_i(t_k)$ 表示由线性规划算出来的辅助点;

$$\alpha_{i2} = \beta_1 T \sum_{j \in N_i} a_{ij}[k];$$

一阶自主体:

$$p_i(t_{k+1}) = (I_d - \alpha_{i2} \text{sign}(S_i) S_i) p_i(t_k) + \alpha_{i2} \text{sign}(S_i) \tilde{p}_i(t_k), i \in V_c \quad (9);$$

5) 检查事件触发条件;

事件触发条件定义为:

$$f_i(t_k) = \|e_i(t_k)\| - (p_0 + p_1 e^{-\alpha k}) > 0 \quad (10);$$

其中, $e_i(t_k) = \hat{p}_i(t_k) - p_i(t_{k+1})$ 是位置测量误差, $\hat{p}_i(t_k)$ 是自主体 i 在采样时间 t_k 的最新广播状态值; p_0 表示常数; $e^{-\alpha k}$ 表示一个随时间衰减的项;

自主体 $i \in V_N$ 检查是否满足事件触发条件, 如果不满足触发条件, 即 $f_i(t_k) \leq 0$, 则不发送状态信息给邻居; 否则, 发送更新后的状态 $p_i(t_{k+1})$ 给邻居;

步骤S4、依据步骤S3, 通过分析网络拓扑的鲁棒性, 建立解决矩阵尺度安全一致性问题的充分必要条件, 充分必要条件涉及网络拓扑的 r -鲁棒性和 (r, s) -鲁棒性, 以及采样周期和控制增益的特定取值范围;

步骤S5、通过包含恶意节点的异构无人集群系统仿真例子来验证所提算法的有效性。

2. 根据权利要求1所述的一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性控制方法, 其特征在于, 步骤S2中构建异构无人集群系统的动力学模型, 具体如下:

由一阶和二阶自主体构成的异构无人集群系统为:

$$\begin{cases} \dot{p}_i(t) = u_i(t), i \in V_c \\ \begin{cases} \dot{p}_i(t) = q_i(t), \\ \dot{q}_i(t) = u_i(t), i \in V_d \end{cases} \end{cases} \quad (1);$$

其中, $p_i = [p_{i,1}, \dots, p_{i,d}]^T \in R^d$, 表示自主体 i 的位置, $p_{i,d}$ 表示自主体 i 各位置的维度状态; $q_i = [q_{i,1}, \dots, q_{i,d}]^T \in R^d$, 表示自主体 i 的速度, $q_{i,d}$ 表示自主体 i 各速度的维度状态; $u_i = [u_{i,1}, \dots, u_{i,d}]^T \in R^d$, 表示自主体 i 的控制输入, $u_{i,d}$ 表示自主体 i 各控制输入的维度状态; V_c 表示一阶自主体; V_d 表示二阶自主体; t 表示连续时间; R^d 表示 d 维实数空间。

3. 根据权利要求2所述的一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性控制方法, 其特征在于, 离散时间下各二阶自主体的动态特性如下:

$$\begin{cases} p_i''(t_{k+1}) = p_i''(t_k) + h q_i''(t_k) + \frac{h^2}{2} u_i''(t_k) \\ q_i''(t_{k+1}) = q_i''(t_k) + h u_i''(t_k), i \in V_d \end{cases} \quad (2);$$

其中, $p_i''(t_k)$, $q_i''(t_k)$, $u_i''(t_k) \in R^d$ 分别表示二阶自主体 i 在采样时间 $t_k = kh$,

$k \in N$ 的位置、速度和控制输入, N 表示自然数; $p_i''(t_{k+1})$ 、 $q_i''(t_{k+1})$ 表示二阶自主体 i 在采样时间 t_{k+1} 的位置、速度; h 表示离散时间间隔;

离散时间下各一阶自主体的动态特性如下:

$$p_i'(t_{k+1}) = p_i'(t_k) + hu_i'(t_k), i \in V_c \quad (3);$$

其中, $p_i'(t_k)$, $u_i'(t_k) \in R^d$ 分别表示一阶自主体 i 在采样时间 $t_k = kh$, $k \in N$ 的位置和控制输入; $p_i'(t_{k+1})$ 表示一阶自主体 i 在采样时间 t_{k+1} 的位置。

4. 根据权利要求3所述的一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性控制方法, 其特征在于, 对于公式 (1), 设计如下矩阵尺度一致性算法:

$$\begin{cases} u_i(t_k) = \beta_1 \text{sign}(S_i) \sum_{j \in N_i} a_{ij}[k] (S_j p_j(t_k) - S_i p_i(t_k)) \\ \quad - \beta_2 q_i(t_k), i \in V_d \\ u_i(t_k) = \beta_1 \text{sign}(S_i) \sum_{j \in N_i} a_{ij}[k] (S_j p_j(t_k) - S_i p_i(t_k)), i \in V_c \end{cases} \quad (4);$$

其中, $a_{ij}[k]$ 为边权值; S_i 和 S_j 分别为自主体 i 和邻居 j 的矩阵权值; sign 表示 $\sin$ 函数; $p_i(t_k)$ 表示自主体 i 采样时间各位置的维度状态; $q_i(t_k)$ 表示自主体 i 采样时间各速度的维度状态; $p_j(t_k)$ 表示邻居 j 在时间 t_k 的位置状态; β_1, β_2 为待确定的控制增益。

5. 根据权利要求4所述的一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性控制方法, 其特征在于, 步骤S5具体为:

对任意的初始状态, 当且仅当公式 (1) 满足以下两个条件, 则称为实现矩阵尺度安全一致性:

C1) 安全条件: 存在一个安全内核 $\Omega \subset R^d$, 使得对于所有正常自主体 $\forall i \in V_N$, 其状态 $p_i(t)$ 在 $t \geq 0$ 时都位于安全内核 Ω 内;

C2) 矩阵尺度一致性: 对于 $\forall i, j \in V_N$, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|S_i p_i(t) - S_j p_j(t)\| \leq \varepsilon$, 其中, ε 表示误差水平。

一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及无人集群系统控制技术领域,尤其是涉及一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性控制方法。

背景技术

[0002] 无人集群系统利用一组相对能力有限的自主体协同工作,以分布式方式完成复杂任务。无人集群系统协同控制在许多领域具有广泛应用,包括一致性、编队控制、时钟同步等。近年来,随着网络和信息技术的飞速发展,研究人员对网络安全性给予了显著关注。在不稳定的网络环境中,一些脆弱的自主体可能容易受到恶意自主体的攻击。这些恶意自主体可能不遵守预定协议并试图误导正常自主体,阻止它们收敛或进入不安全范围。因此,设计适当的安全算法,使系统能够从恶意攻击中恢复并确保正常自主体之间的协议一致性,具有重要意义。

[0003] 在过去多年关于安全一致性的研究中,自主体的状态被假定为标量值,这种假设限制了这些方案在多维状态空间中的适用性,例如在二维平面上进行车辆编队控制时,标量值无法充分描述自主体的多维动态特性。受此启发,最近的研究集中在将MSR算法扩展到更一般的高维系统上。Yan提出了一种基于Tverberg方法的安全一致性算法,并利用多个凸集的交集来找到高维无人集群系统的安全点。该算法使用安全点的凸组合来更新自主体的状态。该算法的难点在于如何确保安全点取自正常自主体子集的凸包内。此外,安全点的存在与正常自主体的数量、恶意自主体的数量以及动态阶数密切相关。

[0004] 目前所有多自主体安全一致性的工作都是聚焦于普通安全一致性的研究,然而,在许多实际应用中,针对恶意攻击环境下,具有多维状态空间且复杂动态特性的无人集群系统安全一致性控制问题,传统的恶意攻击防御机制难以应对异构多维系统的安全一致性问题,现有共识问题研究大多局限于一维状态空间,未能有效处理多维度状态之间的独立性。因此,我们亟需将分析视角从传统的恶意攻击下的标量尺度拓展至矩阵尺度安全一致性控制,以全面刻画恶意攻击下正常多维自主体状态的相互依赖性。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性控制方法,可使多自主体的应用更加灵活,并有效处理多维状态空间内的安全一致性问题。

[0006] 为实现上述目的,本发明提供了一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性控制方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤S1、利用图论的方法来构建无人集群系统中的通信关系,定义 r -鲁棒性和 (r, s) -鲁棒性来描述网络拓扑的容错能力;无人集群系统由正常自主体和恶意自主体组成,这些自主体可能具有一阶或二阶动力学特性,从而形成一个异构无人集群系统,在此基础上,定义两种鲁棒性指标来描述网络拓扑的容错能力;

[0008] 步骤S2、构建异构无人集群系统的动力学模型,异构无人集群系统包含一阶自主

体和二阶自主体；

[0009] 步骤S3、设计一种基于安全内核方法的矩阵尺度安全一致性容错算法,每个正常自主体在每个采样时间收集邻居的矩阵尺度位置信息,对收集到的信息按升序排序,并根据恶意自主体的数量限制,从排序后的序列中选取特定数量的点来构建安全内核,利用线性规划方法计算辅助点,并基于辅助点更新自主体的状态,自主体检查是否满足事件触发条件,如果不满足则不发送状态信息给邻居；

[0010] 步骤S4、依据步骤S3,通过分析网络拓扑的鲁棒性,建立解决矩阵尺度安全一致性问题的充分必要条件,充分必要条件涉及网络拓扑的 r -鲁棒性或 (r, s) -鲁棒性,以及采样周期和控制增益的特定取值范围;通过理论推导,证明在满足这些条件的情况下,异构无人集群系统能够实现矩阵尺度安全一致性；

[0011] 步骤S5、通过一个包含恶意节点的异构无人集群系统仿真例子来验证所提算法的有效性。仿真结果表明,即使在存在恶意自主体的情况下,通过应用我们提出的矩阵尺度安全一致性容错算法和事件触发通信机制,正常自主体仍然能够在安全范围内达成一致,并且显著降低了通信负担。这验证了算法的有效性和鲁棒性。

[0012] 优选的,步骤S1中 r -鲁棒性具体为:

[0013] r -鲁棒性(r -Robustness):给定一个有向图 $G = (V, E, A)$,其中 $|V| \geq 2$,对于 V 中的任意两个非空且不相交的子集 V_1 和 V_2 ,如果至少满足以下条件之一,则称图 G 为 r -鲁棒图:

[0014] 1) 存在至少一个节点在 V_1 中,其至少有 r 个入度邻居不在 V_1 中;

[0015] 2) 存在至少一个节点在 V_2 中,其至少有 r 个入度邻居不在 V_2 中。

[0016] r -鲁棒性衡量了网络拓扑中每个子集(V_1 或 V_2)与外部连接的冗余度。这里的“ r ”代表了一个阈值,表示每个子集至少需要与外部保持多少个连接,才能认为该网络是鲁棒的。

[0017] 优选的,步骤S1中 (r, s) -鲁棒性具体为:

[0018] 给定一个有向图 $G = (V, E, A)$,其中 $|V| \geq 2$,对于 V 中的任意两个非空且不相交的子集 V_1 和 V_2 ,如果至少满足以下条件之一,则称图 G 为 (r, s) -鲁棒图:

[0019] 1) V_1 中的所有节点都有至少 r 个入度邻居来自 V_1 的外部;

[0020] 2) V_2 中的所有节点都有至少 r 个入度邻居来自 V_2 的外部;

[0021] 3) $V_1 \cup V_2$ 中至少有 s 个节点,每个节点都有至少 r 个入度邻居来自其所属子集(V_1 或 V_2)的外部。

[0022] (r, s) -鲁棒性是 r -鲁棒性的一个扩展,它不仅考虑了每个子集与外部的连接数量(r),还引入了另一个参数 s ,用于衡量满足这种连接条件的节点数量。相比于 r -鲁棒性, (r, s) -鲁棒性为网络拓扑提供了更强的容错能力。它要求至少有一定数量的节点(s)保持足够的外部连接,这有助于在网络遭受更大规模攻击时维持系统的稳定性。

[0023] 优选的,步骤S2中构建异构无人集群系统的动力学模型,具体如下:

[0024] 由一阶和二阶自主体构成的异构无人集群系统为:

$$\begin{aligned} \dot{p}_i(t) &= u_i(t), i \in V_c \\ [0025] \quad &\begin{cases} \dot{p}_i(t) = q_i(t), \\ \dot{q}_i(t) = u_i(t), i \in V_d \end{cases} \quad (1); \end{aligned}$$

[0026] 其中, $p_i = [p_{i,1}, \dots, p_{i,d}]^T \in R^d$, 表示自主体 i 的位置, $p_{i,d}$ 表示自主体 i 各位置的维度状态; $q_i = [q_{i,1}, \dots, q_{i,d}]^T \in R^d$, 表示自主体 i 的速度, $q_{i,d}$ 表示自主体 i 各速度的维度状态; $u_i = [u_{i,1}, \dots, u_{i,d}]^T \in R^d$, 表示自主体 i 的控制输入, $u_{i,d}$ 表示自主体 i 各控制输入的维度状态; V_c 表示一阶自主体; V_d 表示二阶自主体; t 表示连续时间; R^d 表示 d 维实数空间。

[0027] 优选的, 离散时间下各二阶自主体的动态特性如下:

$$[0028] \quad \begin{cases} p_i''(t_{k+1}) = p_i''(t_k) + h q_i''(t_k) + \frac{h^2}{2} u_i''(t_k) \\ q_i''(t_{k+1}) = q_i''(t_k) + h u_i''(t_k), i \in V_d \end{cases} \quad (2);$$

[0029] 其中, $p_i''(t_k), q_i''(t_k), u_i''(t_k) \in R^d$ 分别表示二阶自主体 i 在采样时间 $t_k = kh$, $k \in N$ 的位置、速度和控制输入, N 表示自然数; h 表示离散时间间隔;

[0030] 离散时间下各一阶自主体的动态特性如下:

$$[0031] \quad p_i'(t_{k+1}) = p_i'(t_k) + h u_i'(t_k), i \in V_c \quad (3);$$

[0032] 其中, $p_i'(t_k), u_i'(t_k) \in R^d$ 分别表示一阶自主体 i 在采样时间 $t_k = kh, k \in N$ 的位置和控制输入。

[0033] 优选的, 对于公式 (1), 设计如下矩阵尺度一致性算法:

$$[0034] \quad \begin{cases} u_i(t_k) = \beta_1 \text{sign}(S_i) \sum_{j \in N_i} a_{ij}[k] (S_j p_j(t_k) - S_i p_i(t_k)) \\ \quad - \beta_2 q_i(t_k), i \in V_d \\ u_i(t_k) = \beta_1 \text{sign}(S_i) \sum_{j \in N_i} a_{ij}[k] (S_j p_j(t_k) - S_i p_i(t_k)), i \in V_c \end{cases} \quad (4);$$

[0035] 其中, $a_{ij}[k]$ 为边权值; S_i 和 S_j 分别为自主体 i 和邻居 j 的矩阵权值; sign 表示符号函数; $p_i(t_k)$ 表示自主体 i 采样时间各位置的维度状态; $q_i(t_k)$ 表示自主体 i 采样时间各速度的维度状态; $p_j(t_k)$ 表示邻居 j 在时间 t_k 的位置状态; β_1, β_2 为待确定的控制增益。

[0036] 优选的, 步骤 S3 中构建矩阵尺度安全一致性容错算法具体如下:

[0037] 1) 收集邻居的矩阵尺度位置信息;

[0038] 每个正常自主体(标记为 $i \in V_N$) 在每个采样时间 t_k 收集其邻居的矩阵尺度位置信息, 采样时间 t_k 记为:

[0039] $t_k = kT$ (5);

[0040] 其中 k 是整数; T 是采样周期;

[0041] 对于自主体 $i \in V_N$, V_N 表示正常自主体集合, 其邻居集合为 N_i , 每个邻居 $j \in N_i$ 的矩阵尺度位置信息表示为 $S_j p_j(t_k)$, 将各邻居的矩阵尺度位置信息值储存至

$$\chi_i(t_k) = \{S_j p_j(t_k) | j \in N_i\};$$

[0042] 2) 对收集到的信息按升序排序, 并构建安全内核;

[0043] 自主体 $i \in V_N$ 对收集到的邻居矩阵尺度位置信息 $\chi_i(t_k)$ 按每个维度(标记为 ℓ , 其中 $\ell \in \{1, 2, \dots, d\}$) 进行升序排序;

[0044] 然后, 从排序后的序列中选取初始的 $(d+1)f+1$ 个点和最后的 $(d+1)f+1$ 个点, 分别储存至集合 $Y_i(\ell, t_k)$ 和 $Z_i(\ell, t_k)$, 这些点用于构建安全内核

$\Psi(C, f) = \bigcap_{\psi \in \Pi(C, f)} \text{Conv}(\psi)$, 安全内核 $\Psi(C, f)$ (在此处为 $Y_i(\ell, t_k)$ 和 $Z_i(\ell, t_k)$) 是对于点集 C 的所有 $(m-f)$ 子集凸包的交集, 其中 m 是点集 C 的基数, f 是恶意自主体的最大数量, 其中, $\text{Conv}(\psi)$ 是子集 ψ 的凸包;

[0045] 3) 利用线性规划方法计算辅助点;

[0046] 为了找到安全内核中的辅助点, 使用线性规划方法。具体来说, 通过解决以下线性规划问题来找到一个点 $y_i(\ell, t_k)$ (对于 $Y_i(\ell, t_k)$) 和 $z_i(\ell, t_k)$ (对于 $Z_i(\ell, t_k)$), 使其位于安全内核内。线性规划问题可以表示为:

$$\max_{\gamma} \quad \mathbf{v}^T \gamma$$

[0047] s.t. $(\mathbf{M} \otimes \mathbf{I}_d)H(\mathbf{I}_v \otimes \mathbf{1}_q^T)\gamma = \mathbf{0}_{dv \times 1}$ (6);

$$\gamma \geq \mathbf{0}_{qv \times 1}$$

[0048] 其中, $\mathbf{M}$ 是循环矩阵, H 是包含点集 $Y_i(\ell, t_k)$ 或 $Z_i(\ell, t_k)$ 中点的矩阵, γ 是决策变量, $\mathbf{v}$ 是任意正向量(用于最大化目标函数, 但实际求解中不关心其值), $\otimes$ 表示克罗内克积, $\mathbf{I}_v$ 和 $\mathbf{1}_q$ 分别是 v 维单位矩阵和 q 维全1向量, $\mathbf{0}_{dv \times 1}$ 和 $\mathbf{0}_{qv \times 1}$ 分别是 dv 维和 qv 维全0向量; $\mathbf{I}_d$ 表示 $d \times d$ 的单位矩阵;

[0049] 解决此线性规划问题后, 得到 γ^* , 然后计算点 $y_i(\ell, t_k)$ 或 $z_i(\ell, t_k)$:

$$\begin{aligned}
 [0050] \quad y_i(\ell, t_k) &= \frac{1}{v} (1_v^T \otimes I_d) H \gamma^* \\
 z_i(\ell, t_k) &= \frac{1}{v} (1_v^T \otimes I_d) H \gamma^*
 \end{aligned} \quad (7);$$

[0051] 其中, $y_i(\ell, t_k)$ 和 $z_i(\ell, t_k)$ 的计算公式相同, 但它们基于不同的点集 $Y_i(\ell, t_k)$ 和 $Z_i(\ell, t_k)$; γ^* 表示最优决策变量。

[0052] 4) 基于辅助点更新自主体状态;

[0053] 自主体 $i \in V_N$ 使用计算得到的辅助点来更新其状态, 对于二阶自主体 $i \in V_d$ 和一阶自主体 $i \in V_c$ 的更新规则如下,

[0054] 二阶自主体:

$$[0055] \quad \begin{cases} p_i(t_{k+1}) = (I_d - \alpha_{i1} \text{sign}(S_i) S_i) p_i(t_k) + \alpha_{i1} \text{sign}(S_i) \tilde{p}_i(t_k) + \left(T - \frac{\beta_2 T^2}{2} \right) q_i(t_k) \\ q_i(t_{k+1}) = \alpha_{i2} \text{sign}(S_i) \tilde{p}_i(t_k) - \alpha_{i2} \text{sign}(S_i) S_i p_i(t_k) + (1 - \beta_2 T) q_i(t_k), i \in V_d \end{cases} \quad (8);$$

[0056] 其中, $\alpha_{i1} = \frac{\beta_1 T^2}{2} \sum_{j \in N_i} a_{ij}[k]$, $\tilde{p}_i(t_k)$ 表示由线性规划算出来的辅助点;

$$\alpha_{i2} = \beta_1 T \sum_{j \in N_i} a_{ij}[k];$$

[0057] 一阶自主体:

$$[0058] \quad p_i(t_{k+1}) = (I_d - \alpha_{i2} \text{sign}(S_i) S_i) p_i(t_k) + \alpha_{i2} \text{sign}(S_i) \tilde{p}_i(t_k), i \in V_c \quad (9);$$

[0059] 5) 检查事件触发条件;

[0060] 事件触发条件定义为:

$$[0061] \quad f_i(t_k) = \|e_i(t_k)\| - (p_0 + p_1 e^{-\alpha k}) > 0 \quad (10);$$

[0062] 其中, $e_i(t_k) = \hat{p}_i(t_k) - p_i(t_{k+1})$ 是位置测量误差, $\hat{p}_i(t_k)$ 是自主体 i 在时间 t_k 的最新广播状态值; p_0 表示常数; $e^{-\alpha k}$ 表示一个随时间衰减的项;

[0063] 自主体 $i \in V_N$ 检查是否满足事件触发条件, 如果不满足触发条件, 即 $f_i(t_k) \leq 0$, 则不发送状态信息给邻居; 否则, 发送更新后的状态 $p_i(t_{k+1})$ 给邻居, 这有助于减少通信负担。

[0064] 优选的, 步骤S5具体为:

[0065] 对任意的初始状态, 当且仅当公式 (1) 满足以下两个条件, 则称为实现矩阵尺度安全一致性:

[0066] C1) 安全条件: 存在一个安全内核 $\Omega \subset R^d$, 使得对于所有正常自主体 $\forall i \in V_N$, 其状态 $p_i(t)$ 在 $t \geq 0$ 时都位于安全内核 Ω 内; 安全条件确保即使在网络中存在恶意节点的情况下, 正常自主体的状态也不会超出安全范围, 从而保持了系统的安全性。

[0067] C2) 矩阵尺度一致性: 对于 $\forall i, j \in V_N$, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|S_i p_i(t) - S_j p_j(t)\| \leq \varepsilon$, 其中, ε 表示误差水平; 矩阵尺度一致性则要求在长时间运行后, 正常自主体的状态在矩阵尺度下能够达成一致, 即它们的状态差异在一个小的范围内波动。

[0068] 因此, 本发明采用上述针对无人集群系统的基于安全核的矩阵尺度安全一致性控制方法, 该方法深度融合了图论、网络恶意攻击分析与多自主体控制理论。通过将矩阵尺度应用于表征群体中个体多维状态之间的相互依赖性, 本发明突破了传统标量一致性的局限, 使得多自主体系统的状态空间从直线扩展到了更广阔的开放子空间。

[0069] 在存在恶意自主体的复杂网络环境中, 本发明设计的基于事件触发的矩阵尺度安全一致性协议, 旨在有效节省通信资源的同时, 确保正常自主体能够达到矩阵尺度一致。该协议通过引入安全核的概念, 并利用线性规划方法高效地计算辅助点, 以更新自主体的状态。这一创新机制不仅显著降低了计算复杂度, 还使得自主体的状态在变化过程中, 始终以其各自的矩阵尺度保持在一个安全容许的凸包内。

[0070] 本发明提出的协议仅当触发函数满足条件时, 才允许自主体之间进行通信, 这一策略极大地减少了不必要的通信开销, 提高了系统的能效。综上所述, 本发明在理论创新和技术应用方面均展现出显著优势, 为无人集群系统在复杂网络环境下的安全一致性控制提供了全新的解决方案。

[0071] 下面通过附图和实施例, 对本发明的技术方案做进一步的详细描述。

附图说明

[0072] 图1是本发明一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性控制方法实施例的步骤框图;

[0073] 图2是本发明网络通信拓扑结构图;

[0074] 图3是本发明在图2通信拓扑图下多自主体的纵向位置轨迹;

[0075] 图4是本发明在图2通信拓扑图下多自主体的横向位置轨迹;

[0076] 图5是本发明在图2通信拓扑图下的多自主体的二维状态空间中的动态轨迹;

[0077] 图6是事件触发机制下多自主体的具体触发时刻。

具体实施方式

[0078] 以下通过附图和实施例对本发明的技术方案作进一步说明。

[0079] 除非另外定义, 本发明使用的技术术语或者科学术语应当为本发明所属领域内具有一般技能的人士所理解的通常意义。

[0080] 实施例一

[0081] 如图1所示, 本发明提供了一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性控制方法, 包括以下步骤:

[0082] 步骤S1、利用图论的方法来构建无人集群系统中的通信关系,定义r-鲁棒性和(r, s)-鲁棒性来描述网络拓扑的容错能力;无人集群系统由正常自主体和恶意自主体组成,这些自主体可能具有一阶或二阶动力学特性,从而形成一个异构无人集群系统,在此基础上,定义两种鲁棒性指标来描述网络拓扑的容错能力;如图2所示,其中1是恶意自主体,其他是正常自主体。

[0083] 步骤S1中r-鲁棒性具体为:

[0084] r-鲁棒性(r-Robustness):给定一个有向图 $G = (V, E, A)$,其中 $|V| \geq 2$,对于V中的任意两个非空且不相交的子集V1和V2,如果至少满足以下条件之一,则称图G为r-鲁棒图:

[0085] 1) 存在至少一个节点在V1中,其至少有r个入度邻居不在V1中;

[0086] 2) 存在至少一个节点在V2中,其至少有r个入度邻居不在V2中。

[0087] r-鲁棒性衡量了网络拓扑中每个子集(V1或V2)与外部连接的冗余度。这里的“r”代表了一个阈值,表示每个子集至少需要与外部保持多少个连接,才能认为该网络是鲁棒的。

[0088] (r, s)-鲁棒性具体为:

[0089] 给定一个有向图 $G = (V, E, A)$,其中 $|V| \geq 2$,对于V中的任意两个非空且不相交的子集V1和V2,如果至少满足以下条件之一,则称图G为(r, s)-鲁棒图:

[0090] 1) V1中的所有节点都有至少r个入度邻居来自V1的外部;

[0091] 2) V2中的所有节点都有至少r个入度邻居来自V2的外部;

[0092] 3) $V1 \cup V2$ 中至少有s个节点,每个节点都有至少r个入度邻居来自其所属于子集(V1或V2)的外部。

[0093] (r, s)-鲁棒性是r-鲁棒性的一个扩展,它不仅考虑了每个子集与外部的连接数量(r),还引入了另一个参数s,用于衡量满足这种连接条件的节点数量。相比于r-鲁棒性,(r, s)-鲁棒性为网络拓扑提供了更强的容错能力。它要求至少有一定数量的节点(s)保持足够的外部连接,这有助于在网络遭受更大规模攻击时维持系统的稳定性。

[0094] 用通信拓扑模型来描述异构无人集群系统具体为:

[0095] 用有向图 $G = (V, E, A)$ 表示,其中,V是一系列自主体集,包括正常自主体集合 V_N 和恶意自主体集合 V_M , $V = V_N \cup V_M$ (即系统总自主体集合是正常自主体和恶意自主体的并集),且 $V_N \cap V_M = \emptyset$ (即正常自主体和恶意自主体没有交集)。在正常自主体集合 V_N 中,有些具有一阶动力学特性,而其他自主体则具有二阶动力学特性,其中 $V_c = \{1, 2, \dots, n_1\}$ 为具有一阶动力学特性的正常自主体集合, $V_d = \{n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, m\}$ 为具有二阶动力学特性的正常自主体集合, $|V_N| = |V_c| + |V_d| = m$,其中m是点集C的基数, $E \subseteq V \times V$ 是边集; $A = [a_{ij}] \in R^{m \times n}$, $R^{m \times n}$ 表示 $n \times n$ 的矩阵; $a_{ij} \geq 0$ 是有向图G的邻接矩阵。

[0096] 在有向图G中, $e_{ij} = (i, j) \in E$ 定义的是从自主体j指向自主体i的边的方向;自

主体 i 的邻居定义为 $N_i = \{j \in V : (i, j) \in E\}$;

[0097] 若自主体 i 能直接接收到自主体 j 的信息, 那么 $a_{ij} > 0$, 否则 $a_{ij} = 0$ 。

[0098] 步骤S2、构建异构无人集群系统的动力学模型, 异构无人集群系统包含一阶自主体和二阶自主体;

[0099] 步骤S2中构建异构无人集群系统的动力学模型, 具体如下:

[0100] 由一阶和二阶自主体构成的异构无人集群系统为:

$$\dot{p}_i(t) = u_i(t), i \in V_c$$

$$\begin{cases} \dot{p}_i(t) = q_i(t), \\ \dot{q}_i(t) = u_i(t), i \in V_d \end{cases} \quad (1);$$

[0102] 其中, $p_i = [p_{i,1}, \dots, p_{i,d}]^T \in R^d$, 表示自主体 i 的位置, $p_{i,d}$ 表示自主体 i 各位置的维度状态; $q_i = [q_{i,1}, \dots, q_{i,d}]^T \in R^d$, 表示自主体 i 的速度, $q_{i,d}$ 表示自主体 i 各速度的维度状态; $u_i = [u_{i,1}, \dots, u_{i,d}]^T \in R^d$, 表示自主体 i 的控制输入, $u_{i,d}$ 表示自主体 i 各控制输入的维度状态; V_c 表示一阶自主体; V_d 表示二阶自主体; t 表示连续时间;

R^d 表示 d 维实数空间。

[0103] 离散时间下各二阶自主体的动态特性如下:

$$\begin{cases} p_i''(t_{k+1}) = p_i''(t_k) + h q_i''(t_k) + \frac{h^2}{2} u_i''(t_k) \\ q_i''(t_{k+1}) = q_i''(t_k) + h u_i''(t_k), i \in V_d \end{cases} \quad (2);$$

[0105] 其中, $p_i''(t_k), q_i''(t_k), u_i''(t_k) \in R^d$ 分别表示二阶自主体 i 在采样时间 $t_k = kh$, $k \in N$ 的位置、速度和控制输入, N 表示自然数; h 表示离散时间间隔;

[0106] 离散时间下各一阶自主体的动态特性如下:

$$p_i'(t_{k+1}) = p_i'(t_k) + h u_i'(t_k), i \in V_c \quad (3);$$

[0108] 其中, $p_i'(t_k), u_i'(t_k) \in R^d$ 分别表示一阶自主体 i 在采样时间 $t_k = kh, k \in N$ 的位置和控制输入。图3、图4分别为多自主体的纵向位置轨迹、横向位置轨迹。图5为多自主体的二维状态空间中的动态轨迹。

[0109] 对于公式 (1), 设计如下矩阵尺度一致性算法:

$$[0110] \quad \begin{cases} u_i(t_k) = \beta_1 \text{sign}(S_i) \sum_{j \in N_i} a_{ij}[k] (S_j p_j(t_k) - S_i p_i(t_k)) \\ \quad - \beta_2 q_i(t_k), i \in V_d \\ u_i(t_k) = \beta_1 \text{sign}(S_i) \sum_{j \in N_i} a_{ij}[k] (S_j p_j(t_k) - S_i p_i(t_k)), i \in V_c \end{cases} \quad (4);$$

[0111] 其中, $a_{ij}[k]$ 为边权值; S_i 和 S_j 分别为自主体 i 和邻居 j 的矩阵权值; sign 表示符号函数; $p_i(t_k)$ 表示自主体 i 采样时间各位置的维度状态; $q_i(t_k)$ 表示自主体 i 采样时间各速度的维度状态; $p_j(t_k)$ 表示邻居 j 在时间 t_k 的位置状态; β_1, β_2 为待确定的控制增益。

[0112] 在步骤S2的基础上引入事件触发通信规则, 基于自主体的当前广播值与最新测量值之间的差异设计事件触发条件, 仅当自主体的状态值显著变化时, 即满足事件触发条件才进行通信, 并为一阶和二阶自主体分别设计基于事件触发机制的矩阵尺度一致性控制算法, 使得自主体的最终状态不再局限于某个固定值或特定比例, 而是扩展到一个更广泛的状态空间子空间中; 其中为一阶和二阶自主体分别设计基于事件触发的矩阵尺度一致性控制算法具体如下:

[0113] 为了节省通信资源, 考虑基于事件触发的通信机制, 其中自主体 i 只在满足事件触发条件的采样瞬间将其状态值发送给其外部邻居。假设 $\hat{x}_{i,\ell}(t_k)$ 表示自主体 i 在时间 t_k 的 ℓ 维状态的最新广播值, 即自主体 i 在最后一次事件触发时间的 ℓ 维状态值; 将 $\hat{x}_{i,\ell}(t_k)$ 定义为 $\hat{x}_{i,\ell}(t_k) = x_{i,\ell}(t_l^i), t_k \in [t_l^i, t_{l+1}^i)$, 其中 t_l^i 表示自主体 i 的传输时间, 由公式 (5) 决定; 定义 $k \geq 0$ 的位置测量误差 $e_{i,\ell}(t_k) = \hat{x}_{i,\ell}(t_k) - x_{i,\ell}(t_{k+1})$, 触发函数 $f_{i,\ell}(t_k)$ 为:

$$[0114] \quad f_{i,\ell}(t_k) = e_{i,\ell}(t_k) - (p_0 + p_1 e^{-\alpha k}) > 0;$$

[0115] 其中, p_0 和 p_1 为根据实际需要预定义的常量;

[0116] 基于上述事件触发通信机制, 结合公式 (4), 提出以下基于事件触发的矩阵尺度控制协议:

$$[0117] \quad \begin{cases} u_i(t_k) = \beta_1 \text{sign}(S_i) \sum_{j \in N_i} a_{ij}[k] (S_j \hat{x}_j(t_k) - S_i x_i(t_k)) \\ \quad - \beta_2 v_i(t_k), i \in V_d \\ u_i(t_k) = \beta_1 \text{sign}(S_i) \sum_{j \in N_i} a_{ij} (S_j \hat{x}_j(t_k) - S_i x_i(t_k)), i \in V_c \end{cases};$$

[0118] 其中, $\hat{x}_j(t_k)$ 表示 j 在 t_k 处的最新广播值。图6展示了在事件触发机制下八个自主体的具体触发时刻。这张图呈现了不同自主体在达到特定触发条件时的时间点。具体来说, 图6的横轴代表时间, 纵轴代表自主体编号, 分别对应自主体1-8, 图中用不同的颜色来区分

不同的自主体。每个标记在横轴上的位置,表示对应自主体触发事件的具体时刻。从图中可以看出,不同自主体的触发时刻是分散的,这意味着它们不是同时触发,而是根据各自的状态变化和需求在不同时间点触发。这种事件触发的机制相比传统的时间触发机制,能够显著减少不必要的通信和计算,从而节省系统资源。

[0119] 步骤S3、设计一种基于安全内核方法的矩阵尺度安全一致性容错算法,每个正常自主体在每个采样时间收集邻居的矩阵尺度位置信息,对收集到的信息按升序排序,并根据恶意自主体的数量限制,从排序后的序列中选取特定数量的点来构建安全内核,利用线性规划方法计算辅助点,并基于这些辅助点更新自主体的状态,自主体检查是否满足事件触发条件,如果不满足则不发送状态信息给邻居;

[0120] 步骤S3中构建矩阵尺度安全一致性容错算法具体如下:

[0121] 1) 收集邻居的矩阵尺度位置信息;

[0122] 每个正常自主体(标记为 $i \in V_N$) 在每个采样时间 t_k 收集其邻居的矩阵尺度位置信息,采样时间 t_k 记为:

[0123] $t_k = kT$ (5);

[0124] 其中 k 是整数; T 是采样周期;

[0125] 对于自主体 $i \in V_N$, V_N 表示正常自主体集合,其邻居集合为 N_i ,每个邻居 $j \in N_i$ 的矩阵尺度位置信息表示为 $S_j p_j(t_k)$,将各邻居的矩阵尺度位置信息值储存至 $\chi_i(t_k) = \{S_j p_j(t_k) | j \in N_i\}$;

[0126] 2) 对收集到的信息按升序排序,并构建安全内核;

[0127] 自主体 $i \in V_N$ 对收集到的邻居矩阵尺度位置信息 $\chi_i(t_k)$ 按每个维度(标记为 ℓ , 其中 $\ell \in \{1, 2, \dots, d\}$) 进行升序排序;

[0128] 然后,从排序后的序列中选取初始的 $(d+1)f+1$ 个点和最后的 $(d+1)f+1$ 个点,分别储存至集合 $Y_i(\ell, t_k)$ 和 $Z_i(\ell, t_k)$,这些点用于构建安全内核

$\Psi(C, f) = \bigcap_{\psi \in \Pi(C, f)} \text{Conv}(\psi)$,安全内核 $\Psi(C, f)$ (在此处为 $Y_i(\ell, t_k)$ 和 $Z_i(\ell, t_k)$) 是对于

点集 C 的所有 $(m-f)$ 子集凸包的交集, f 是恶意自主体的最大数量,其中, $\Psi(C, f)$ 是点集 C 中所有 $(m-f)$ 子集的集合, $\text{Conv}(\psi)$ 是子集 ψ 的凸包;

[0129] 3) 利用线性规划方法计算辅助点;

[0130] 为了找到安全内核中的辅助点,使用线性规划方法。具体来说,通过解决以下线性规划问题来找到一个点 $y_i(\ell, t_k)$ (对于 $Y_i(\ell, t_k)$) 和 $z_i(\ell, t_k)$ (对于 $Z_i(\ell, t_k)$),使得这些点位于安全内核内。线性规划问题可以表示为:

$$\begin{aligned}
& \max_{\gamma} \quad \mathbf{v}^T \gamma \\
[0131] \quad & \text{s.t.} \quad (\mathbf{M} \otimes \mathbf{I}_d) \mathbf{H} (\mathbf{I}_v \otimes \mathbf{1}_q^T) \gamma = \mathbf{0}_{dv \times 1} \quad (6); \\
& \gamma \geq \mathbf{0}_{qv \times 1}
\end{aligned}$$

[0132] 其中, $\mathbf{M}$ 是循环矩阵, $\mathbf{H}$ 是包含点集 $Y_i(\ell, t_k)$ 或 $Z_i(\ell, t_k)$ 中点的矩阵, γ 是决策变量, $\mathbf{v}$ 是任意正向量 (用于最大化目标函数, 但实际求解中不关心其值), $\otimes$ 表示克罗内克积, $\mathbf{I}_v$ 和 $\mathbf{1}_q$ 分别是 v 维单位矩阵和 q 维全1向量, $\mathbf{0}_{dv \times 1}$ 和 $\mathbf{0}_{qv \times 1}$ 分别是 dv 维和 qv 维全0向量; $\mathbf{I}_d$ 表示 $d \times d$ 的单位矩阵;

[0133] 解决此线性规划问题后, 可以得到 γ^* , 然后计算点 $y_i(\ell, t_k)$ 或 $z_i(\ell, t_k)$:

$$\begin{aligned}
[0134] \quad & y_i(\ell, t_k) = \frac{1}{v} (\mathbf{1}_v^T \otimes \mathbf{I}_d) \mathbf{H} \gamma^* \\
& z_i(\ell, t_k) = \frac{1}{v} (\mathbf{1}_v^T \otimes \mathbf{I}_d) \mathbf{H} \gamma^* \quad (7);
\end{aligned}$$

[0135] 其中, $y_i(\ell, t_k)$ 和 $z_i(\ell, t_k)$ 的计算公式相同, 但它们基于不同的点集 $Y_i(\ell, t_k)$ 和 $Z_i(\ell, t_k)$; γ^* 表示最优决策变量。

[0136] 4) 基于辅助点更新自主体状态;

[0137] 自主体 $i \in V_N$ 使用计算得到的辅助点来更新其状态, 对于二阶自主体 $i \in V_d$ 和一阶自主体 $i \in V_c$ 的更新规则如下,

[0138] 二阶自主体:

$$[0139] \quad \begin{cases} p_i(t_{k+1}) = (\mathbf{I}_d - \alpha_{i1} \text{sign}(S_i) S_i) p_i(t_k) + \alpha_{i1} \text{sign}(S_i) \tilde{p}_i(t_k) + \left(T - \frac{\beta_2 T^2}{2} \right) q_i(t_k) \\ q_i(t_{k+1}) = \alpha_{i2} \text{sign}(S_i) \tilde{p}_i(t_k) - \alpha_{i2} \text{sign}(S_i) S_i p_i(t_k) + (1 - \beta_2 T) q_i(t_k), i \in V_d \end{cases} \quad (8);$$

[0140] 其中, $\alpha_{i1} = \frac{\beta_1 T^2}{2} \sum_{j \in N_i} a_{ij}[k]$, $\tilde{p}_i(t_k)$ 表示由线性规划算出来的辅助点;

$$\alpha_{i2} = \beta_1 T \sum_{j \in N_i} a_{ij}[k];$$

[0141] 一阶自主体:

$$[0142] \quad p_i(t_{k+1}) = (\mathbf{I}_d - \alpha_{i2} \text{sign}(S_i) S_i) p_i(t_k) + \alpha_{i2} \text{sign}(S_i) \tilde{p}_i(t_k), i \in V_c \quad (9);$$

[0143] 其中, $\alpha_{i2} = \beta_1 T \sum_{j \in N_i} a_{ij}[k];$

[0144] 5) 检查事件触发条件;

[0145] 事件触发条件定义为:

$$[0146] \quad f_i(t_k) = \|e_i(t_k)\| - (p_0 + p_1 e^{-\alpha k}) > 0 \quad (10);$$

[0147] 其中, $e_i(t_k) = \hat{p}_i(t_k) - p_i(t_{k+1})$ 是位置测量误差, $\hat{p}_i(t_k)$ 是自主体 i 在采样时间 t_k 的最新广播状态值;

[0148] 自主体 $i \in V_N$ 检查是否满足事件触发条件, 如果不满足触发条件, 即 $f_i(t_k) \leq 0$, 则不发送状态信息给邻居; 否则, 发送更新后的状态 $p_i(t_{k+1})$ 给邻居, 这有助于减少通信负担。

[0149] 步骤S4、依据步骤S3, 通过分析网络拓扑的鲁棒性, 建立解决矩阵尺度安全一致性问题充分必要条件的充分必要条件涉及网络拓扑的 r -鲁棒性或 (r, s) -鲁棒性, 以及采样周期和控制增益的特定取值范围; 通过理论推导, 证明在满足这些条件的情况下, 异构无人集群系统能够实现矩阵尺度安全一致性。

[0150] 步骤S5、通过一个包含恶意节点的异构无人集群系统仿真例子来验证所提算法的有效性。仿真结果表明, 即使在存在恶意自主体的情况下, 通过应用我们提出的矩阵尺度安全一致性容错算法和事件触发通信机制, 正常自主体仍然能够在安全范围内达成一致, 并且显著降低了通信负担。这验证了算法的有效性和鲁棒性。

[0151] 对任意的初始状态, 当且仅当公式 (1) 满足以下两个条件, 则称为实现矩阵尺度安全一致性:

[0152] C1) 安全条件: 存在一个安全内核 $\Omega \subset R^d$, 使得对于所有正常自主体 $\forall i \in V_N$, 其状态 $p_i(t)$ 在 $t \geq 0$ 时都位于安全内核 Ω 内; 安全条件确保即使在网络中存在恶意节点的情况下, 正常自主体的状态也不会超出安全范围, 从而保持了系统的安全性。

[0153] C2) 矩阵尺度一致性: 对于 $\forall i, j \in V_N$, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|S_i p_i(t) - S_j p_j(t)\| \leq \varepsilon$, 其中, ε 表示误差水平; 矩阵尺度一致性则要求在长时间运行后, 正常自主体的状态在矩阵尺度下能够达成一致, 即它们的状态差异在一个小的范围内波动。

[0154] 值得注意的是, 本发明中尚未详细阐述的内容均为现有技术, 为本领域技术人员所熟知。

[0155] 因此, 本发明采用上述一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性控制方法, 本发明采用上述的一种无人集群系统的矩阵尺度安全一致性控制方法, 可使多自主体的应用更加灵活, 并有效处理多维状态空间内的安全一致性问题。

[0156] 最后应说明的是: 以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非对其进行限制, 尽管参照较佳实施例对本发明进行了详细的说明, 本领域的普通技术人员应当理解: 其依然可以对本发明的技术方案进行修改或者等同替换, 而这些修改或者等同替换亦不能使修改后的技术方案脱离本发明技术方案的精神和范围。

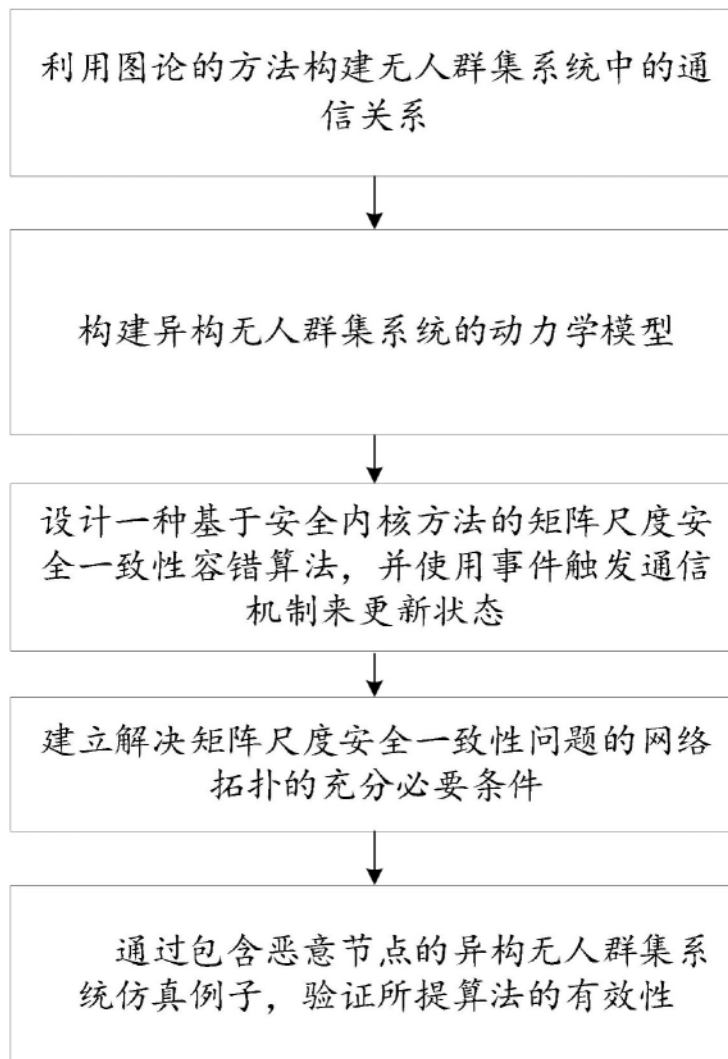


图 1

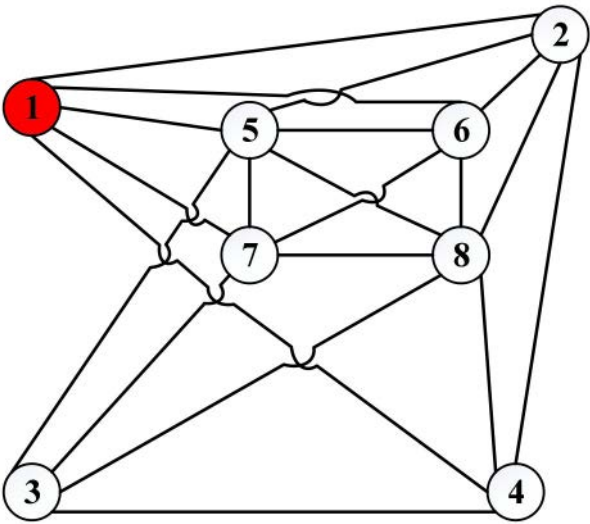


图 2

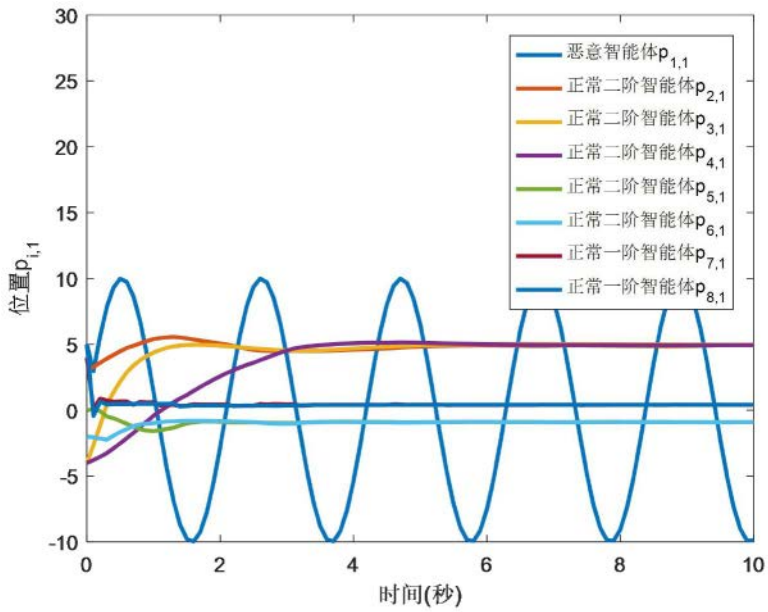


图 3

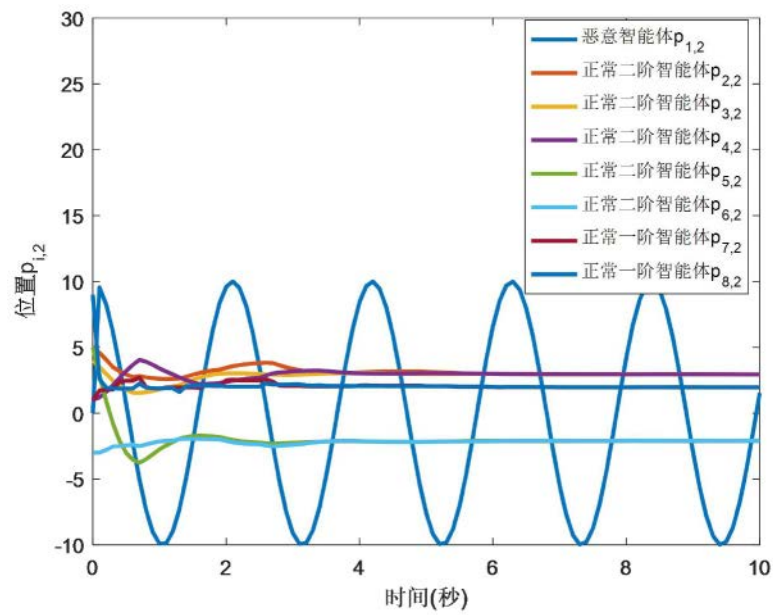


图 4

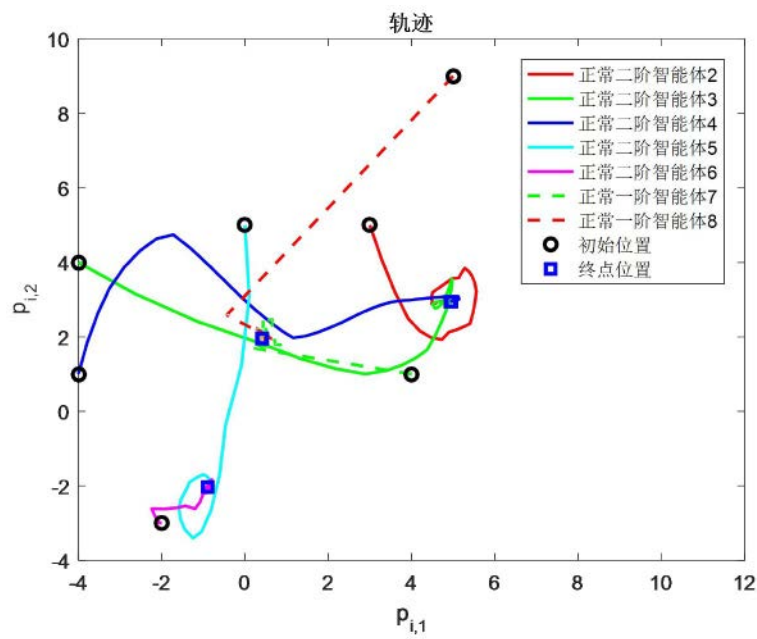


图 5

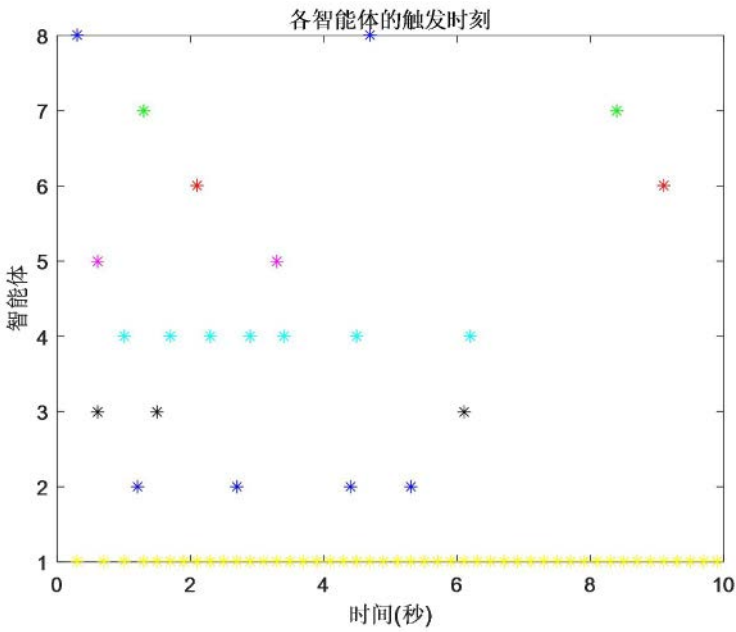


图 6