

多无人机协同的稳定控制机理研究*

茹常剑^{1)†} 魏瑞轩¹⁾ 沈东²⁾

1) (空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

2) (中国人民解放军 94795 部队, 芜湖 241000)

(2014 年 4 月 18 日收到; 2014 年 6 月 17 日收到修改稿)

多无人机协同系统的过度扩散会引起协同失效, 对系统进行规模控制是解决该问题的一种潜在方法. 首先抽象出多无人机协同搜索系统的宏观运动特征, 进而建立平台的运动方程, 然后通过构造合适的李雅普诺夫函数, 获得该系统的稳定控制规律及其控制参数. 仿真结果表明: 1) 本文所提的稳定控制机制不仅能够使多无人机系统实现有效的协同, 还能确保系统的稳定性; 2) 在系统稳定时, 通过调整相关控制参数可以有效地控制系统规模.

关键词: 无人机, 协同系统, 稳定控制

PACS: 02.30.Yy, 05.65.+b

DOI: 10.7498/aps.63.220202

1 引言

随着技术和需求的发展, 无人机的智能化和自主化程度不断提高, 并越来越广泛地应用于军事和民用领域^[1-5]. 当前, 无人机执行的任务主要包括搜索营救、灾害监测、航空拍摄以及侦察监视等^[6-10]. 可以预见的是, 无人机集群将会代替单个无人机在更加复杂多变的环境中执行更加复杂的任务, 其中多架无人机自主协同进行广域目标搜索就是典型的潜在应用形式.

为便于研究, 本文称进行自主协同搜索的多平台系统为自主协同搜索系统(平台以无人机为例, 如图 1 所示). 出于搜索效益最大化的考虑, 各平台的运动通常不遵循固定队形策略, 其典型的运动特征会形成类似于蚂蚁觅食的随机队形. 这必然会导致一对耦合的问题: 1) 如何使所有平台间的距离大于安全距离 ε_1 , 即 $d_1 > \varepsilon_1$, 以保证平台及大系统的安全性; 2) 如何使所有平台与系统动态质心 $o(t)$ 的距离在一定范围 ε_2 内, 即 $d_2 < \varepsilon_2$, 以确保平台间进行有效的信息交互. 解决这两个问题是实现高效自主协同搜索的首要前提.

目前, 国内外学者对群内防碰撞问题进行了相关研究, 引入了不同种类的防碰撞机制, 包括使用概率方法、混合整数规划和行为控制等^[11-13]. 多数方法仅适合于某种特定的编队任务. 例如, 文献^[14]提出采用球面对称函数构建人工势场导航, 引导多架无人机无碰撞飞行. 文献^[15]从线性规划方面考虑, 把多机碰撞模型化为一个混合整数规划问题, 在一般几何构造法上建立碰撞避免约束并把它们公式化为线性约束条件, 用最优化工具来解决. 文献^[16]基于群智能技术, 设计几种不同的防碰撞准则, 根据每架无人机的行为控制无人机集群有序飞行, 实现集群防碰撞控制.

众所周知, 无人机可被看作是一种空中机器人, 如果不考虑其实际的飞行动力学特性, 可将其抽象为一种具有一定自主能力的智能体^[17]. 此时, 多无人机协同的稳定控制就转化为多智能体系统的稳定控制. 目前, 有关多智能体系统的研究主要集中在一致性问题^[18-22]、群集问题^[23,24]和编队问题^[25,26]. 对于多智能体系统的编队控制来说, 其稳定性是指多智能体系统的运动同步^[27]. 文献^[28]研究了具有非线性和随机切换拓扑智能体网络的

* 国家自然科学基金(批准号: 51201182, 61105012)和中国航空科学基金(批准号: 20135896027)资助的课题

† 通讯作者. E-mail: ruchangjian1986@gmail.com

分布式同步问题. 文献[29]针对一类随机框架下多智能体系统的同步问题进行了理论分析, 其方法并不需假设网络是连通性的.

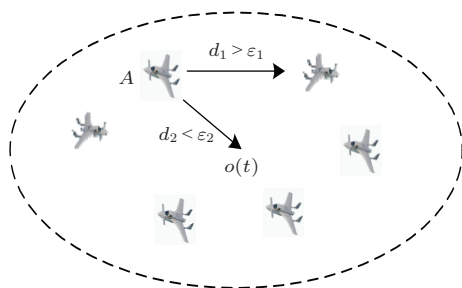


图1 协同搜索系统及稳定含义示意图

但是, 尚未见对系统规模控制进行的研究, 现有的方法不能在保证群内防碰撞的前提下实现对系统的规模控制, 即不能使系统稳定. 由于规模控制与群内防碰撞耦合性较强, 而已有的群内防碰撞方法又皆为针对具体情形的实现方法而非宏观机制, 在其基础上增加规模控制功能较难找到切入点. 针对该问题, 本文抽象出自主协同系统的宏观运动特征和内部运动模型, 寻找该系统在几种假设的内部对象基本交互作用下的稳定性控制原理和规模控制参数, 形成自主协同搜索系统的宏观稳定控制机制. 该机制形成后, 在设计任意自主协同搜索系统的实现方法时, 只要遵循该机制, 形成的控制方法就能使系统稳定.

2 问题描述

定义1 系统规模: 如果协同系统中的任意平台与系统动态质心 $o(t)$ 的距离 d 满足 $d < \varepsilon$, 且 ε 存在最小值, 那么就称此时的 ε 为系统的规模.

定义2 系统稳定: 如果协同系统中平台不发生碰撞, 且存在系统规模为 ε , 那么就称此时的系统是稳定的.

考虑到协同系统的内部避撞和规模控制需求, 这里对系统中平台与环境、平台间的相互作用关系做如下几个基本假设.

假设1 平台间能够感知环境中各种吸引和排斥特征的强度, 能够判断当前位置总的吸引和排斥趋势, 进而决定当前位置所对应特征函数剖面中的运动趋势.

假设2 研究其特性时, 所使用的吸引和排斥力函数是连续的, 且具有线性吸引和有限排斥特性.

考虑 M 个自主平台在任务区域 A 协同执行任务, 将 A 按规则划分为若干子区域 A_m . 此时, 假设在区域 A 中, 对平台的吸引因素取决于子区域 A_m 以及平台之间的吸引; 对平台的排斥因素取决于区域 A 的边界对平台的排斥、平台之间的近距离排斥. 设平台 i 的位置向量为 $x_i \in \mathbf{R}^n$, σ 为吸引或排斥剖面的表征函数, $\sigma(x) < 0$ 表示总体趋势为吸引, $\sigma(x) = 0$ 表示总体趋势为平衡, $\sigma(x) > 0$ 表示总体趋势为排斥. 因此, 作用于平台 i 上总的吸引和排斥力是由区域 A 和其他平台共同作用形成的. 图2是协同系统中平台 i 所受的吸引力和排斥力示意图.

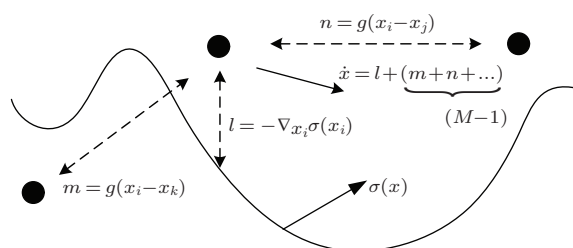


图2 协同系统中平台所受的吸引和排斥关系

考虑到吸引排斥特性, 不考虑平台的本体运动特性, 设平台的运动方程为

$$\dot{x}_i = -\nabla_{x_i} \sigma(x_i) + \sum_{j=1, j \neq i}^M g(x_i - x_j) \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, M,$$

其中, $-\nabla_{x_i} \sigma(x_i)$ 表征平台向着吸引强度较高和背向排斥强度的运动趋势. $g(x_i - x_j)$ 为其他平台对平台 i 的作用力, $g(\cdot)$ 表示平台之间相互吸引和排斥强度. 考虑到平台间吸引和排斥特性, $g(\cdot)$ 采用如下的形式:

$$g(x_i) = -y[g_a(\|x_i\|) - g_r(\|x_i\|)], \quad (2)$$

其中, $\|x_i\| = \sqrt{x_i^T x_i}$ 为欧氏范数, g_a 表示吸引力幅度, g_r 则表示排斥力幅度. g_a 和 g_r 在平台间某点取得平衡. 考虑假设2, 做以下规定: 当 $a > 0$ 和

$$\|x_i - x_j\|, \quad \|g_a(\|x_i - x_j\|)(x_i - x_j)\| = a;$$

当 $b > 0$ 和 $\|x_i - x_j\|, \|g_r(\|x_i - x_j\|)(x_i - x_j)\| \leq b$.

综合(1)和(2)式有

$$\begin{aligned} \dot{x}_i = & -\nabla_{x_i} \sigma(x_i) - \sum_{j=1, j \neq i}^M (x_i - x_j) \\ & \times [g_a(\|(x_i - x_j)\|) - g_r(\|(x_i - x_j)\|)] \\ & i = 1, \dots, M. \end{aligned} \quad (3)$$

3 稳定控制定理

在上述基本假设和运动模型下, 通过设置排斥力的上限, 可以确保平台间不会发生碰撞, 但自主协同搜索系统规模的变化规律不得而知. 这里以平台与群质心的距离为参考量, 考察系统规模的变化规律. 由于各平台同构, 则系统的质心为 $\bar{x} = \sum_{i=1}^M x_i/M$. 由(3)式可得

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}} &= \sum_{i=1}^M \left[-\nabla_{x_i} \sigma(x_i) - \sum_{j=1, j \neq i}^M (a - b \exp(-\|x_i - x_j\|^2/c)) \cdot (x_i - x_j) \right] / M \\ &= -\sum_{i=1}^M \nabla_{x_i} \sigma(x_i) / M \\ &\quad - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^M (a - b \exp(-\|x_i - x_j\|^2/c)) \\ &\quad \times (x_i - x_j) / M. \end{aligned} \quad (4)$$

考虑对称性, 有

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^M (a - b \exp(-\|x_i - x_j\|^2/c)) (x_i - x_j) = 0. \quad (5)$$

因此有

$$\dot{\bar{x}} = -\sum_{i=1}^M \nabla_{x_i} \sigma(x_i) / M. \quad (6)$$

在此基础上, 平台与群质心的距离的变化可表示为 $\dot{e}^i = \dot{x}_i - \dot{\bar{x}}$. 将 $\dot{e}^i$ 展开可得

$$\begin{aligned} \dot{e}^i &= -\nabla_{x_i} \sigma(x_i) - \sum_{j=1, j \neq i}^M [a - g_r(\|x_i - x_j\|)] \\ &\quad \times (x_i - x_j) + \sum_{j=1}^M \nabla_{x_j} \sigma(x_j) / M. \end{aligned} \quad (7)$$

设李雅普诺夫函数为 $V_i = \|e^i\|^2/2 = e^{iT} e^i/2$. 经计算可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= -aM \|e^i\|^2 \\ &\quad + \sum_{j=1, j \neq i}^M g_r(\|x_i - x_j\|) (x_i - x_j)^T e^i \\ &\quad - \left[\nabla_{x_i} \sigma(x_i) - \sum_{j=1}^M \nabla_{x_j} \sigma(x_j) / M \right]^T e^i. \end{aligned} \quad (8)$$

这里提前假定两个条件:

条件1 对于所有的 x_i , 存在常数 $\bar{\sigma} > 0$, 使得

$$\|\nabla_{x_i} \sigma(x_i)\| \leq \bar{\sigma}; \quad (9)$$

条件2 有恒定的 $A_\sigma > -aM$, 使得

$$\begin{aligned} &\left[\nabla_{x_i} \sigma(x_i) - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \nabla_{x_j} \sigma(x_j) \right]^T e^i \\ &\geq A_\sigma \|e^i\|^2. \end{aligned} \quad (10)$$

基于以上条件, 可以得到如下定理.

定理1 (稳定控制定理) 考虑(1)式所描述的模型, 且吸引/排斥函数 $g(\cdot)$ 具有线性吸引和有限排斥属性, 则当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $x_i(t) \rightarrow B_\varepsilon(\bar{x}(t))$, 其中

$$B_\varepsilon(\bar{x}(t)) = \{x_i(t) - \bar{x}(t) \leq \varepsilon\}, \quad (11)$$

且同时有

1) 若条件1成立, 则 $\varepsilon = [(M-1)/aM] \cdot [b + 2\bar{\sigma}/M]$;

2) 若条件2成立, 则 $\varepsilon = b(M-1)/(aM + A_\sigma)$.

证明 1) 从条件1可以得到

$$\begin{aligned} &\|\nabla_{x_i} \sigma(x_i) - \sum_{j=1}^M \nabla_{x_j} \sigma(x_j) / M\| \\ &\leq 2\bar{\sigma}(M-1)/M. \end{aligned} \quad (12)$$

基于该限制及对排斥力的限制, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &\leq -aM \|e^i\|^2 + b(M-1) \|e^i\| - \frac{2\bar{\sigma}(M-1)}{M} \\ &= -aM \|e^i\| \left[\|e^i\| - \frac{b(M-1)}{aM} \right. \\ &\quad \left. - \frac{2\bar{\sigma}(M-1)}{aM^2} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

令 $\dot{V} = 0$, 则有

$$\begin{aligned} \|e^i\| &= b(M-1)/aM + 2\bar{\sigma}(M-1)/aM^2 \\ &= [(M-1)/aM][b + 2\bar{\sigma}/M]. \end{aligned} \quad (14)$$

综合(13)和(14)式可知, 只要 $\|e^i\| > [(M-1)/aM][b + 2\bar{\sigma}/M]$, 就会有 $\dot{V}_i \leq 0$, 系统稳定. 令

$$\varepsilon_1 = [(M-1)/aM][b + 2\bar{\sigma}/M], \quad (15)$$

此值为系统规模的界限. 至此, 定理1第一部分得到了证明. 这同时也证明了当 $t \rightarrow \infty$ 时, 存在 $\varepsilon_1 = [(M-1)/aM][b + 2\bar{\sigma}/M]$, 使得

$$x_i(t) - \bar{x}(t) \leq \varepsilon_1 = \varepsilon. \quad (16)$$

令 $B_\varepsilon(\bar{x}(t)) = \{x_i(t) - \bar{x}(t) \leq \varepsilon\}$, 即可得

$$x_i(t) \rightarrow B_\varepsilon(\bar{x}(t)). \quad (17)$$

2) 基于条件2可以得到

$$\dot{V}_i \leq -aM \|e^i\|^2 + b(M-1) \|e^i\|$$

$$\begin{aligned}
 & - \left[\nabla_{x_i} \sigma(x_i) - \sum_{j=1}^M \nabla_{x_j} \sigma(x_j) \right]^T e^i / M \\
 & \leq aM \|e^i\|^2 + b(M-1) \|e^i\| - A_\sigma \|e^i\|^2 \\
 & = (-aM - A_\sigma) \|e^i\| \left[\|e^i\| - \frac{b(M-1)}{aM + A_\sigma} \right]. \quad (18)
 \end{aligned}$$

令 $\dot{V} = 0$, 则有

$$\|e^i\| = b(M-1)/(aM + A_\sigma). \quad (19)$$

综合 (18) 和 (19) 式可知, 只要 $\|e^i\| > b(M-1)/(aM + A_\sigma)$, 就有 $\dot{V}_i \leq 0$, 即系统稳定. 此时令

$$\varepsilon_2 = b(M-1)/(aM + A_\sigma), \quad (20)$$

此值为系统的界限. 至此, 定理 1 第二部分得到了证明. 这同时也证明了当 $t \rightarrow \infty$ 时, 存在 $\varepsilon_2 = b(M-1)/(aM + A_\sigma)$, 使得

$$x_i(t) - \bar{x}(t) \leq \varepsilon_2 = \varepsilon. \quad (21)$$

令 $B_\varepsilon(\bar{x}(t)) = \{y(t) - \bar{x}(t) \leq \varepsilon\}$, 即可得

$$x_i(t) \rightarrow B_\varepsilon(\bar{x}(t)). \quad (22)$$

证毕.

定理 1 是本文提出的自主协同搜索系统的稳定性基本定理. 它证明了基于基本假设的自主协

同搜索系统的内聚性, 也证明了系统规模取决于参数 a 和 b 、剖面负梯度 $-\nabla_{x_i} \sigma(x_i)$ 和系统中的平台数 M , 同时给出了稳定时的系统规模值.

4 仿真与分析

本部分主要验证多无人机协同系统在抽象作用关系下的稳定性以及主要控制参数对系统规模的影响. 假定有 20 架无人机平台在 $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ 的区域上执行搜索任务, 环境特征剖面函数由若干个高斯函数叠加而成, 平台速度范围为 $[50, 100] \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

首先, 分析系统的稳定控制能力.

吸引力参数 $a = 0.1$, 排斥力参数 $b = 500$, 高斯调幅参数 $\sigma = 100$. 图 3(a)–(d) 分别为自主协同搜索系统中平台所受的环境应力、吸引力、排斥力和合力的示意图. 图 4(a) 为系统运动快照, 图 4(b) 为系统运动轨迹. 可以看出, 在抽象力作用下, 平台做平滑运动, 系统规模不断变化. 图 5 为系统规模变化曲线. 可以看出, 系统规模迅速演变为 5200 左右, 并围绕 5200 做幅值衰减的振荡. 因此, 系统是稳定的, 且系统实际规模与预测值 5225 (根据定理 1 计算得到) 较为符合.

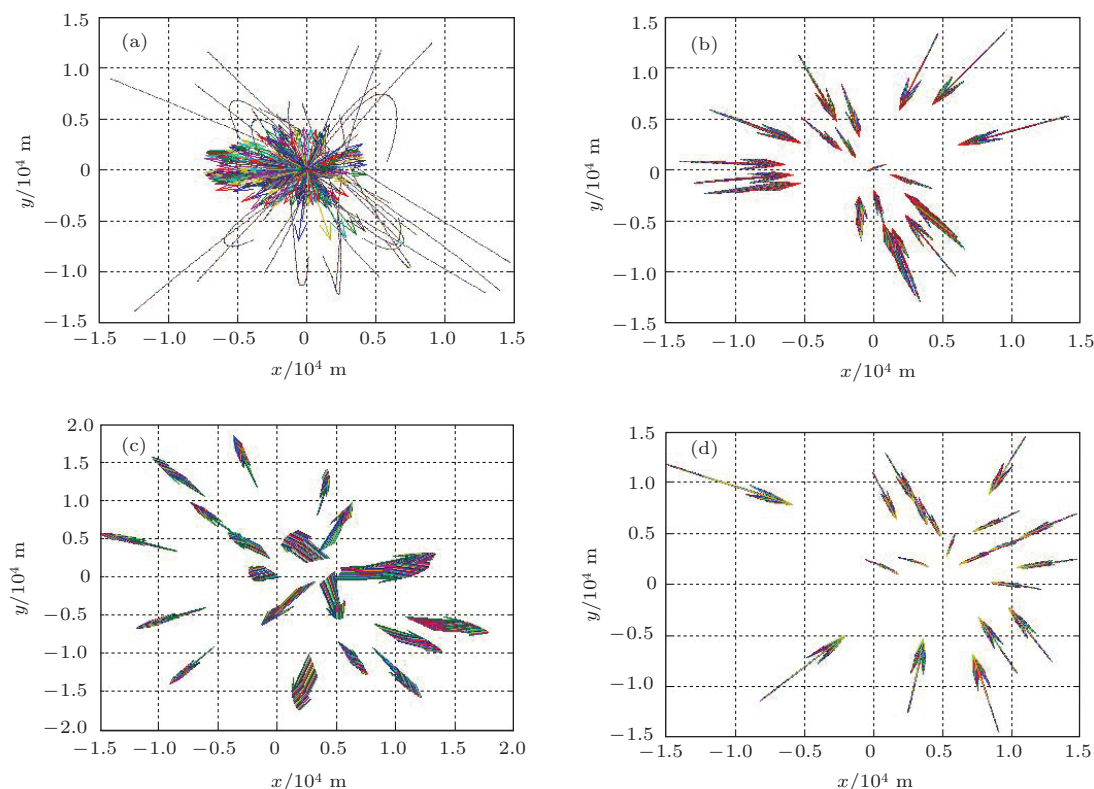


图 3 (网刊彩色) 多机协同系统中平台所受应力 (a) 环境应力; (b) 吸引力; (c) 排斥力; (d) 合力

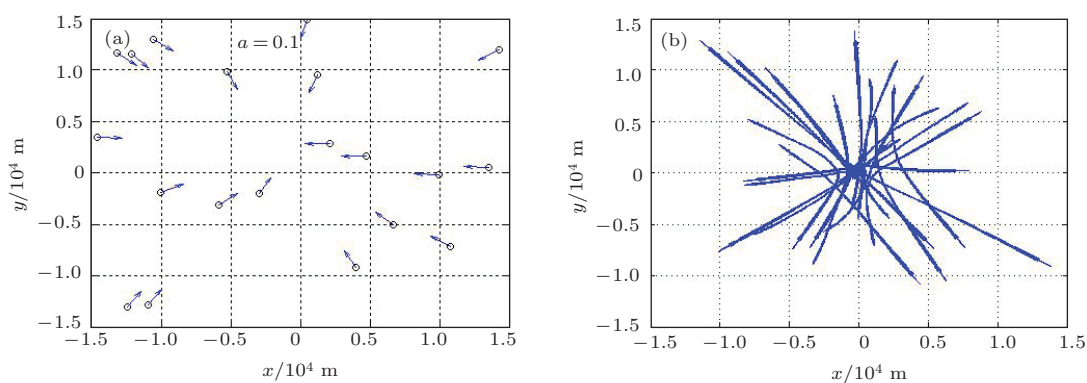


图4 多机协同系统中平台的运动 (a) 系统运动快照; (b) 系统运动轨迹

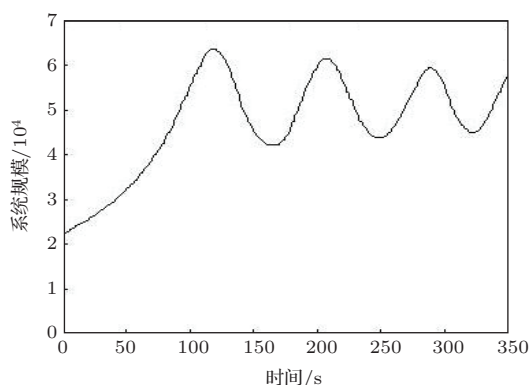
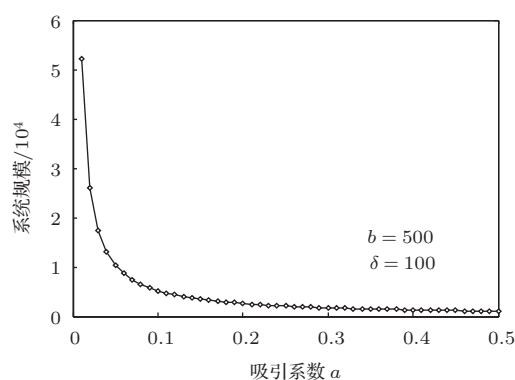
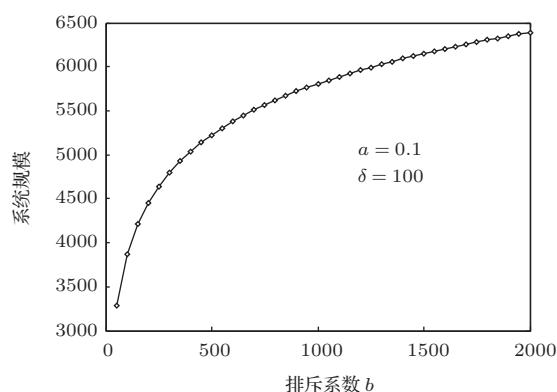


图5 固定参数下的系统规模变化


 图6 参数 a 的变化对系统规模的影响

其次, 分析系统稳定后的规模控制能力.

1) 分析吸引参数 a 和排斥参数 b 的对系统规模的控制能力. 在 $b = 500$ 和 $\sigma = 100$ 的情况下, 在区间 $(0, 0.5)$ 取一组 a 值, 对每个值进行 200 次仿真并取系统规模的平均值, 得到图 6. 用与图 6 相同的方法得到图 7. 可以看出, 系统规模均值随 a 的增大而减小, 随 b 的增大而增大, 这与定理的推论一致. 同时, 当 a 和 b 较小时, 其变化对系统规模均值影响较大, 随着 a 和 b 的增大, 该影响逐渐减弱. 进一步分析还可看出, 若要对系统规模均值进行控制, a 的有效作用范围为 $(0, 0.2)$, b 的有效作用范围为 $(0, 1000)$.

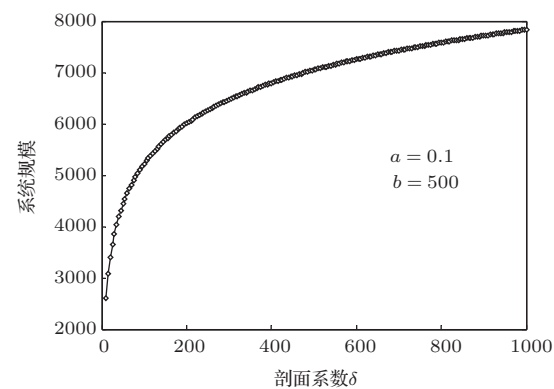

 图7 参数 b 的变化对系统规模的影响

2) 分析调幅参数 σ 对系统规模的控制能力. 用与图 6 相同的方法得到图 8. 可以看出, 系统规模均值随 σ 的增大而增大, 这与定理的推论一致. 同时, 当 σ 较小时, 其变化对系统规模均值影响较大, 随着 σ 的增大, 该影响逐渐减弱. 若要对系统规模均值进行控制, σ 的有效作用范围为 $(0, 200)$.

以上通过仿真验证了:

1) 在本文提出的抽象运动方程和基本假设条件下, 自主协同搜索系统会渐进达到稳定;

2) 同时, 三个主要控制参数 a, b, σ 能够实现对稳定时的系统规模的有效控制.


 图8 参数 σ 的变化对系统规模的影响

5 结 论

1) 为同时兼顾自主协同搜索系统的内部防碰撞与规模控制, 实现对该类系统的稳定控制, 本文将该类系统中的交互过程抽象为力的作用关系, 建立并证明了自主协同搜索系统稳定性定理, 得到了自主协同搜索系统的宏观稳定控制机制。

2) 在设计实际的自主协同搜索控制方法时, 只

要使平台与环境、平台之间作用关系满足抽象运动方程所描述的特征, 所形成的搜索驱动方法就能够在实现搜索行为的同时使该系统稳定, 且稳定时的规模可以通过相关参数进行有效控制。

附录

(8) 式的详细推导过程如下所示。

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_i &= \frac{1}{2}(\dot{e}^i)^T e^i + \frac{1}{2}(e^i)^T \dot{e}^i \\
 &= \frac{1}{2} \left[-\nabla_{x_i} \sigma(x_i) - \sum_{j=1, j \neq i}^M (a - g_r(\|x_i - x_j\|))(x_i - x_j) + \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \nabla_{x_j} \sigma(x_j) \right]^T e^i \\
 &\quad + \frac{1}{2} e^{iT} \left[-\nabla_{x_i} \sigma(x_i) - \sum_{j=1, j \neq i}^M (a - g_r(\|x_i - x_j\|))(x_i - x_j) + \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \nabla_{x_j} \sigma(x_j) \right] \\
 &= -\frac{1}{2} [\nabla_{x_i} \sigma(x_i)^T e^i + e^{iT} \nabla_{x_i} \sigma(x_i)] + \frac{1}{2M} \left[\sum_{j=1}^M \nabla_{x_j} \sigma(x_j)^T e^i + e^{iT} \sum_{j=1}^M \nabla_{x_j} \sigma(x_j) \right] \\
 &\quad - \frac{1}{2} \left[\sum_{j=1, j \neq i}^M (a - g_r(\|x_i - x_j\|))(x_i - x_j)^T e^i + e^{iT} \sum_{j=1, j \neq i}^M (a - g_r(\|x_i - x_j\|))(x_i - x_j) \right] \\
 &= \left[-\nabla_{x_i} \sigma(x_i)^T e^i - \frac{1}{M} \left(\sum_{j=1}^M \nabla_{x_j} \sigma(x_j) \right)^T e^i \right] - \frac{1}{2} \left[\sum_{j=1, j \neq i}^M a(x_i - x_j)^T e^i + e^{iT} \sum_{j=1, j \neq i}^M a(x_i - x_j) \right] \\
 &\quad - \frac{1}{2} \left[\sum_{j=1, j \neq i}^M -g_r(\|x_i - x_j\|)(x_i - x_j)^T e^i + e^{iT} \sum_{j=1, j \neq i}^M -g_r(\|x_i - x_j\|)(x_i - x_j) \right] \\
 &= - \left[\nabla_{x_i} \sigma(x_i) - \sum_{j=1}^M \nabla_{x_j} \sigma(x_j)/M \right]^T e^i + \sum_{j=1, j \neq i}^M g_r(\|x_i - x_j\|)(x_i - x_j)^T e^i - a \sum_{j=1, j \neq i}^M (x_i - x_j)^T e^i \\
 &= \left[\nabla_{x_i} \sigma(x_i) - \sum_{j=1}^M \nabla_{x_j} \sigma(x_j)/M \right]^T e^i + \sum_{j=1, j \neq i}^M g_r(\|x_i - x_j\|)(x_i - x_j)^T e^i - a \sum_{j=1, j \neq i}^M [(x_i - \bar{x}) - (x_j - \bar{x})]^T e^i \\
 &= \left[\nabla_{x_i} \sigma(x_i) - \sum_{j=1}^M \nabla_{x_j} \sigma(x_j)/M \right]^T e^i + \sum_{j=1, j \neq i}^M g_r(\|x_i - x_j\|)(x_i - x_j)^T e^i - a \sum_{j=1, j \neq i}^M [e^i - e^j]^T e^i \\
 &= -aM\|e^i\|^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^M g_r(\|x_i - x_j\|)(x_i - x_j)^T e^i - \left[\nabla_{x_i} \sigma(x_i) - \sum_{j=1}^M \nabla_{x_j} \sigma(x_j)/M \right]^T e^i.
 \end{aligned}$$

参考文献

- [1] Karimooddini A, Lin H, Chen B M, Lee T H 2013 *Automatica* **49** 424
- [2] Duan H B, Luo Q N, Shi Y H, Ma G J 2013 *IEEE Comput. Intellig. Magaz.* **8** 16
- [3] Dydek Z T, Anuradha A M, Lavretsky E 2013 *Control Engineer. Pract.* **21** 1043
- [4] No T S, Kim Y, Tahk M J, Jeon G E 2011 *Aerospace Sci. Technol.* **15** 431
- [5] Paul t, Krogstad T R, Gravdahl J T 2008 *Simul. Model. Pract. Theory* **16** 1453
- [6] Doherty P, Rudol P 2007 *Adv. Artif. Intellig. Lect. Notes Comput. Sci.* **4830** 1
- [7] Liao F, Wang J L 2012 *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference* Minneapolis, Minnesota, August 13–16, 2012 p4823
- [8] Manathara J G, Sujit P B, Beard R W 2011 *J. Intellig. Robotic Syst.* **62** 125
- [9] Sun T Y, Huo C L, Tsai S J, Yu Y H, Liu C C 2011 *Expert Syst. Appl.* **38** 10036
- [10] Bürkle A, Segor F, Kollmann M 2011 *J. Intellig. Robotic Syst.* **61** 339
- [11] Jansson J, Gustafsson F 2008 *Automatica* **44** 2347
- [12] Schlanbusch R, Kristiansen R, Nicklasson PJ 2011 *Automatica* **47** 1443
- [13] Cetin B, Bikdash M, Hadaegh FY 2007 *IET Control Theory Appl.* **1** 522
- [14] Yang X L, Alvarez L M, Bruggemann T 2013 *J. Intellig. Robot Syst.* **70** 315

- [15] Borrelli F, Keviczky T, Balas G J 2004 *The 43rd IEEE Conference on Decision and Control* Nassau, December 17, 2004 p1099
- [16] Sharma R K, Ghose D 2009 *Int. J. Syst. Sci.* **40** 521
- [17] Lee G, Chong N Y 2009 *Mechatronics* **19** 85
- [18] Guo L X, Hu M F, Hu A H, Xu Z Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 050508
- [19] Li L, Fang H J 2013 *Chin. Phys. B* **22** 110505
- [20] Xie Y Y, Wang Y, Ma Z J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 040202 (in Chinese) [谢媛艳, 王毅, 马忠军 2014 物理学报 **63** 040202]
- [21] Ji L H, Liao X F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 150202 (in Chinese) [纪良浩, 廖晓峰 2012 物理学报 **61** 150202]
- [22] Ji L H, Liao X F 2013 *Chin. Phys. B* **22** 040203
- [23] An B R, Liu G P 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 090205 (in Chinese) [安宝冉, 刘国平 2014 物理学报 **63** 090205]
- [24] Olfati-Saber R 2006 *IEEE Trans. Autom. Control* **51** 401
- [25] Su H S, Wang X F 2009 *IEEE Trans. Autom. Control* **54** 293
- [26] Oh K, Ahn H 2011 *Automatica* **47** 2306
- [27] Hamed R, Faraneh A 2013 *Commun. Nonlinear Numer. Simulat* **18** 744
- [28] Tang Y, Gao H J, Zou W 2013 *IEEE Trans. Cyber.* **43** 358
- [29] Liu Z, Guo L 2009 *Automatica* **45** 2744

Study on stability control mechanism of multiple unmanned aerial vehicle cooperative system*

Ru Chang-Jian^{1)†} Wei Rui-Xuan¹⁾ Shen Dong²⁾

1) (Institute of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xian 710038, China)

2) (No. 94795 Army of PLA, Wuhu 241000, China)

(Received 18 April 2014; revised manuscript received 17 June 2014)

Abstract

The excessive diffusion of multiple unmanned aerial vehicle (UAV) cooperative system may lead to the cooperative failure, but to control the system scale is a potential way to solve this problem. First, macroscopic motion characteristic of multi-UAV cooperative searching system is abstracted, and then motion model of the platform is established. Afterwards, by constructing an appropriate Lyapunov function, the stable control mechanism of this system and its stable control parameters are obtained. Simulation results verify the following two conclusions: 1) the proposed stable control mechanism can not only make multi-UAV system realizes the effective cooperation, but also can ensure the stability of this system; 2) when this system is in a stable state, its scale can be controlled effectively by adjusting the relevant control parameters.

Keywords: unmanned aerial vehicle, cooperative system, stability control

PACS: 02.30.Yy, 05.65.+b

DOI: 10.7498/aps.63.220202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51201182, 61105012), and the National Aviation Science Foundation of China (Grant No. 20135896027).

† Corresponding author. E-mail: ruchangjian1986@gmail.com