

# 无人机集群自组织避障建模与控制策略研究

朱创创<sup>1</sup>, 梁晓龙<sup>1</sup>, 孙强<sup>2</sup>, 何吕龙<sup>3</sup>, 李野<sup>1</sup>, 王庆<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 空管领航学院, 陕西 西安 710051;

2. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051;

3. 空军工程大学 装备管理与安全工程学院, 陕西 西安 710051)

**摘要:** 针对无人机集群自组织避障问题, 在集群系统认知模型的基础上, 采用自下而上的建模方法, 对单个个体建立变系数控制器, 包括一致性运动模块和避障模块。借鉴地球偏转力原理增加了回转力作用, 以克服人工势场法存在的振荡和极小值问题。在此基础上, 针对所有个体和部分个体能感知障碍物的情况, 分别提出自组织避障的控制策略, 实现了集群自组织避障。仿真结果表明, 所建立的模型和控制方法是有效的。

**关键词:** 无人机集群; 自组织; 避障

中图分类号: V279; TP273

文献标识码: A

文章编号: 1002-0853(2018)01-0046-06

DOI: 10.13645/j.cnki.f.d.20170828.001

## Research on self-organized obstacle avoidance modeling and control strategy for UAV swarm

ZHU Chuang-chuang<sup>1</sup>, LIANG Xiao-long<sup>1</sup>, SUN Qiang<sup>2</sup>, HE Lyu-long<sup>3</sup>, LI Ye<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>1</sup>

(1. Air Traffic Control and Navigation College, AFEU, Xi'an 710051, China;

2. Science College, AFEU, Xi'an 710051, China;

3. Equipment Management and Safety Engineering College, AFEU, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Aiming at the self-organization obstacle avoidance problem for UAV swarm, a bottom-up modeling method is adopted on the basis of swarm system cognitive model. A variable coefficient controller, including the conformal motion module and the obstacle avoidance module, is established for individuals, the principle of earth deflection is used to increase the rotational force effect to overcome the oscillation and the minimum value with the artificial potential field method. Based on this, all individuals can perceive the obstacles or only some individuals can, we proposed the control strategy of self-organization obstacle avoidance respectively, and the self-organization obstacle avoidance is realized. The simulation results show that the established model and control method are effective.

**Key words:** UAV swarm; self-organized; obstacle avoidance

## 0 引言

随着计算机技术以及人工智能等学科的迅速发展, 采用无人机集群来协同完成复杂任务已逐渐成为无人机领域研究的热点。与单个航空器相比, 无人机集群具有环境适应能力强、鲁棒性好等优点, 是未来无人机作战的发展方向<sup>[1-2]</sup>。无人机集群自组织避障是指集群在保持一致性运动的基础上成功躲避环境中的障碍物<sup>[3]</sup>。由于战场环境的复杂性, 无人机集群自组织避障已经成为完成任务的基础。

分布式控制是一种有效的集群编队控制方式,

从信息角度看, 通常分为个体间共享信息和不共享信息的控制方法。个体间共享信息的控制方法通常有虚拟结构法<sup>[4]</sup>、长-僚机法<sup>[5]</sup>等, 其优点是简单可行, 但鲁棒性、灵活性较差。不共享信息的控制方法通常有人工势场法<sup>[6]</sup>、集群控制法<sup>[7]</sup>和 $\alpha\beta\gamma$ 框架法<sup>[8]</sup>, 具有较好的灵活性和自组织性, 但容易陷入局部最小。这两类方法各有优缺点, 由于实际环境复杂, 集群个体间通信易受干扰, 应减少全局通信, 个体只需感知周围无人机的状态, 调整自身状态即可, 因此本文以不共享信息的集群控制方法为基础

收稿日期: 2017-05-22; 修订日期: 2017-07-13; 网络出版时间: 2017-08-28 17:09

基金项目: 国家自然科学基金资助(61472442, 61472443); 陕西省自然科学研究发展计划资助(2017JQ6035)

作者简介: 朱创创(1989-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为航空集群理论与技术、空域规划与流量管理。

进行集群一致性运动研究。

针对集群运动过程中的避障问题,常用的算法有栅格法、模糊逻辑控制算法、遗传算法、神经网络法和人工势场法等。文献[9]提出了一种基于诱导航线的协同控制方法,采用改变编队队形的方法规避突发障碍。文献[10]针对二维静态环境下的编队保持及避障避碰问题,提出了NMPC法并采用代价惩罚与优先级策略分别实现了避障和机间避碰。以上方法都是假设所有个体均为已知障碍物信息的,实际中由于任务需要,无人机集群成员通常由多种类型的无人机组成,并非所有个体均能感知到障碍物。为实现无人机集群的自组织避障,本文在集群系统认知模型的基础上,采用自下而上的建模思想对单个个体建立模型,该模型共包括系统内部一致性运动模型和外部避障模型。并针对全部个体和部分个体能感知到障碍物的情况,提出了相应的自组织避障控制策略。

## 1 无人机集群系统认知模型

在集群自组织避障建模时,借鉴了生物集群中的认知模型。认知模型的建立可以有效探索和研究集群感知环境信息后的思维和信息处理机制。随着集群智能研究的逐渐深入,认知模型为设计相应的集群智能系统提供了新的体系结构和技术方法<sup>[11]</sup>。

在借鉴该模型时,将个体抽象为具有感知环境和周围其他个体状态以及信息处理能力的Agent。基于这一认知能力,集群个体间可以进行各种信息交互,包括位置、速度和各种传感器状态等。通过状态信息和环境信息的交互和处理,个体可以进行自我调整、自我完善,最终使整个系统能自适应地完成避障任务。图1为集群认知模型的信息交互示意图。整个集群中信息交互分为集群内部个体间的信息交互和个体与外部的信息交互。

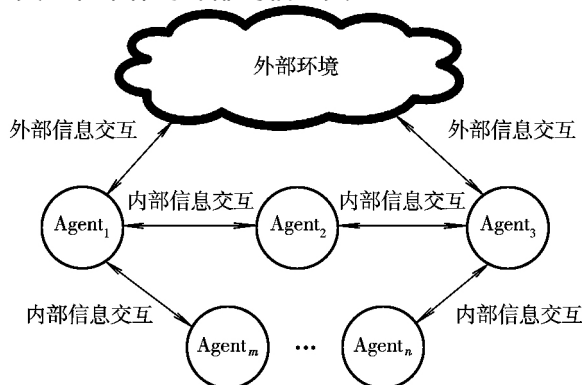


图1 集群认知模型的信息交互

Fig.1 Information interaction diagram of swarm cognitive model

## 2 集群自组织避障建模

集群自组织避障包括集群内部个体协同一致性和集群避障。集群内部个体协同一致性指一致性运动过程中个体间保持安全的矢量关系;集群避障指集群躲避环境中的障碍物,最终顺利到达任务点。

### 2.1 集群运动基本模型

本文假设系统中有  $n$  个智能体。在  $m$  维空间中  $\mathbf{x}_i(t) \in \mathbf{R}^m$ ,  $\mathbf{v}_i(t) \in \mathbf{R}^m$ ,  $\mathbf{u}_i(t) \in \mathbf{R}^m$ , 分别表示个体  $i$  的位置、速度和加速度,本文将  $\mathbf{u}_i(t)$  设置为控制输入。个体的运动方程表示为:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{v}_i(t), \dot{\mathbf{v}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t) \quad (1)$$

令

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{I}_n \\ \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{0}_{n \times n} \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_m, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} \\ \mathbf{I}_n \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_m$$

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1^T, \mathbf{p}_1^T]^T = [\mathbf{x}_1^T, \dots, \mathbf{x}_n^T, \mathbf{p}_1^T, \dots, \mathbf{p}_n^T]^T$$

$$\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1^T, \dots, \mathbf{u}_n^T]^T$$

则集群动力学方程可以转换为如下矩阵形式:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{2nm}$ ;  $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^{nm}$ 。

集群运动中,个体的速度和加速度都在合理区间内,设其最大值分别为  $V_{\max}$  和  $U_{\max}$ :

$$\mathbf{v}_i(t) = \begin{cases} \mathbf{v}_i & (\|\mathbf{v}_i\| \leq V_{\max}) \\ V_{\max} \frac{\mathbf{v}_i}{\|\mathbf{v}_i\|} & (\|\mathbf{v}_i\| > V_{\max}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_i(t) = \begin{cases} \mathbf{u}_i & (\|\mathbf{u}_i\| \leq U_{\max}) \\ U_{\max} \frac{\mathbf{u}_i}{\|\mathbf{u}_i\|} & (\|\mathbf{u}_i\| > U_{\max}) \end{cases} \quad (4)$$

建立集群自组织避障模型时,借鉴集群系统认知模型,将个体控制量分为来自系统内部个体的相互作用和来自外界环境,则:

$$\mathbf{u}_i(t) = \mathbf{u}_{i\alpha}(t) + \mathbf{u}_{i\beta}(t) \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{u}_{i\alpha}(t)$  为实现一致性运动控制量;  $\mathbf{u}_{i\beta}(t)$  为实现避障控制量。

### 2.2 集群内部个体运动控制器设计

在设计集群内部控制器  $\mathbf{u}_{i\alpha}(t)$  时,参考 Reynolds<sup>[12]</sup> 提出的 Boid 集群模型理论。Boid 模型中,系统内所有智能个体行为须满足以下基本规则:

- (1) Collision Avoidance: 防止与邻域内智能体碰撞;
- (2) Flocking Centering: 努力与邻域内智能体保持聚拢;
- (3) Velocity Matching: 尽量与邻域内智能体速度保持一致。

本文设计  $u_{i\alpha}(t)$  时,采用文献[13]提出的变系数 RMAD (Repulsion Matching Attracting Desire) 控制器:

$$u_{i\alpha} = a_1 b_1 u_r^i + a_2 b_2 u_m^i + a_3 b_3 u_a^i + a_4 b_4 u_d^i \quad (6)$$

式中:  $u_r^i$   $u_m^i$   $u_a^i$  分别为个体  $i$  在排斥域、一致域、吸引域内受其他个体的作用量(个体作用力半径见图 2);  $u_d^i$  为个体意愿作用量;  $a_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 为非负数,表示权重系数;  $b_i$  为调节系数,用来适应不同任务环境。

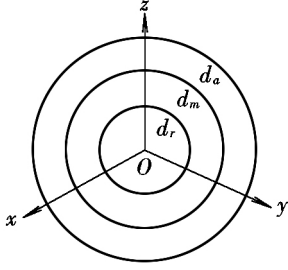


图 2 个体作用力半径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of individual force radius

作用向量设计如下:

当  $0 \leq r_{ij} < d_r$  时,个体  $j$  位于  $i$  的排斥域,排斥作用方向为  $x_i - x_j$ ,强度随着  $r_{ij}$  的增加而减小;当  $r_{ij} = d_r$  时,排斥力为 0;当  $r_{ij} = 0$  时,排斥强度无穷大。将  $j$  对  $i$  的排斥作用量表示为  $(r_{ij}^{-1} - d_r^{-1})(x_i - x_j)$ ,则个体  $i$  在排斥域中所受的总排斥作用表示为:

$$u_r^i = \sum_{j \in Rr_i, j \neq i} \left( \frac{1}{r_{ij}} - \frac{1}{d_r} \right) (x_i - x_j) \quad (7)$$

当  $d_r \leq r_{ij} < d_m$  时,个体  $j$  位于  $i$  的一致域,会根据  $j$  的速度调节自身速度以保持速度匹配,一致域中所有个体对  $i$  的调节总量为:

$$u_m^i = v_i + \sum_{j \in Rm_i, j \neq i} v_j \quad (8)$$

当  $d_m \leq r_{ij} < d_a$  时,个体  $j$  位于  $i$  的吸引域,会被  $j$  吸引,作用方向为  $x_j - x_i$ ,强度随着  $r_{ij}$  的增大而增加;当  $r_{ij} = d_m$  时,吸引力为 0;当  $r_{ij} = d_a$  时,吸引力最大。吸引域中  $i$  所受的作用量表示为:

$$u_a^i = \sum_{j \in Ra_i, j \neq i} \left( \frac{1}{d_a - r_{ij}} - \frac{1}{d_a - d_m} \right) (x_j - x_i) \quad (9)$$

### 2.3 集群避障建模

集群运动过程中,任务环境的不同会对集群的运动行为产生影响。本节在设计  $u_{i\beta}(t)$  时受库伦定律中同性电荷相斥和地球偏转力启发,在二维平面内提出如图 3 所示的避障机制。

图 3 中:  $o_b$  为障碍物中心;  $r$  和  $R$  分别为障碍物半径和缓冲区域半径;  $r_{io} = \|o_b - x_i\|$  为障碍物中心与智能体的欧式距离( $x_i$  为智能体  $i$  的位置向

量);  $v^i$  为智能体  $i$  的速度向量。

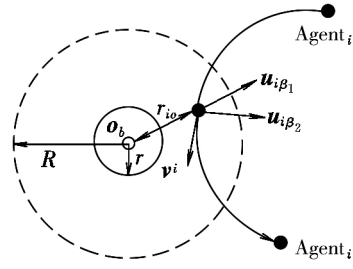


图 3 个体避障示意图

Fig. 3 Schematic diagram of obstacle avoidance

$u_{i\beta}$  设计思路为:个体  $i$  与障碍物  $o_b$  为同性电荷,二者在靠近时产生斥力  $u_{i\beta_1}$ ,以使个体远离障碍物。为克服集群在障碍物前方出现振荡以及极小值的情况,受地球偏转力的启发设计一个偏转力  $u_{i\beta_2}$ :

$$u_{i\beta} = k(u_{i\beta_1} + u_{i\beta_2}) \quad (10)$$

式中:  $k$  为非负常数;  $u_{i\beta_2}$  为始终垂直于个体速度方向的作用量。以下为  $u_{i\beta_1}$  和  $u_{i\beta_2}$  的具体设计方法。个体  $i$  进入障碍物  $o_b$  的作用半径  $R$  时,将个体和障碍物视为同性电荷。 $u_{i\beta_1}$  为二者产生的斥力,作用方向与  $o_b x_i$  同向,强度随距离的减小而增大。当  $r_{io} = r$  时,作用力趋于无穷大;当  $r_{io} = R$  时,作用力为 0。综合上将  $u_{i\beta_1}$  设计为:

$$u_{i\beta_1} = \begin{cases} 0 & (\|x_i - o_b\| > R) \\ \left( \frac{1}{R - r} - \frac{1}{r_{io} - r} \right) (o_b - x_i) & (r < \|x_i - o_b\| \leq R) \end{cases} \quad (11)$$

设计  $u_{i\beta_2}$  时,将个体  $i$  与障碍物  $o_b$  的矢量连线  $x_{io}$  抽象为地球赤道。当  $v^i$  在  $x_{io}$  右侧时,将个体看作在地球北半球,此时个体在运动过程中受向右偏转力作用,方向为  $v^i$  向右旋转至与其垂直,力的大小随着  $\|x_{io}\|$  的增加而减小;当  $v^i$  在  $x_{io}$  左侧时,  $u_{i\beta_2}$  设计同理。因为  $u_{i\beta_2}$  始终垂直于个体速度方向,所以不影响集群一致性运动。在二维平面内,令

$$u_{i\beta_2} = \begin{bmatrix} 0 & -P \\ P & 0 \end{bmatrix} v^i \quad (12)$$

其中:

$$P =$$

$$\begin{cases} \frac{1}{\|x_{io}\|} & ((r < \|x_{io}\| \leq R) \wedge (x_{io} \cdot v^i > 0) \wedge (\det[x_{io}, v^i] > 0)) \\ -\frac{1}{\|x_{io}\|} & ((r < \|x_{io}\| \leq R) \wedge (x_{io} \cdot v^i > 0) \wedge (\det[x_{io}, v^i] < 0)) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

式中:  $r < \|x_{io}\| \leq R$  表示个体进入障碍物缓冲区;  $x_{io} \cdot v^i > 0$  表示障碍物在个体运动方向的前半平面; 第三项表示偏转力方向。上式表明, 只有障碍物在个体运动方向前半平面且个体进入障碍物作用范围时才会产生相应偏转力。当出现障碍物重叠时, 式中障碍物的中心坐标  $(o_x, o_y)$  计算如下:

$$o_x = \frac{1}{n} \sum_{l=0}^n o_{xl}, o_y = \frac{1}{n} \sum_{l=0}^n o_{yl} \quad (13)$$

3 自组织避障策略与仿真

集群个体在内部相互排斥、一致、吸引、个体意愿以及外部环境的作用下, 会涌现出随机性的集群运动行为, 因此无人机集群要完成既定任务, 通常要给定明确的任务信息以实现可控的自组织飞行。文中假定如下场景: 无人机集群执行战场侦察任务时, 遇到敌方雷达开机, 将雷达覆盖范围视作障碍物缓冲区, 敌火力覆盖区视作障碍物半径。当集群内部个体探测到敌方雷达开机时, 集群远离该区域。本节在自组织避障模型和假定场景的基础上, 以所有个体均拥有任务点为前提, 分别给出所有和部分无人机能感知到障碍物时的自组织避障控制策略。

3.1 所有个体均能感知障碍物时集群避障

无人机集群在自组织机制下, 能够实现一致性运动, 因此在任务实施时, 不需为集群中的每架无人机提供路径规划, 只需为集群提供任务点即可。在初步的任务点中, 并不包含随时出现的障碍物信息, 本节假设所有个体均能感知到障碍物。

根据无人机集群自组织避障模型, 每架无人机已知任务点信息, 令  $R^m$  中的  $Track = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  表示任务点信息, 将个体意愿  $u_d^i$  设计为:

$$u_d^i = P_k - x_i \quad (14)$$

仿真过程中, 由于给出的是任务点, 因此集群沿着给定的点飞行即可满足要求。仿真过程中取无人机个数  $N = 5$ , 具体参数见表 1。

表 1 所有个体均能感知障碍物时仿真参数取值

Table 1 Simulation parameter selection when all individuals in the swarm can perceive obstacles

参数	取值	参数	取值
$d_r$	1.0	$a_2$	6
$d_m$	1.5	$a_3$	8
$d_a$	2.5	$a_4$	4
$U_{\max}$	0.5	$k$	3.5
$V_{\max}$	1.0	$R$	6
$a_1$	5.5	$r$	2

所有个体均能感知障碍物时的避障轨迹仿真结果如图 4 所示。

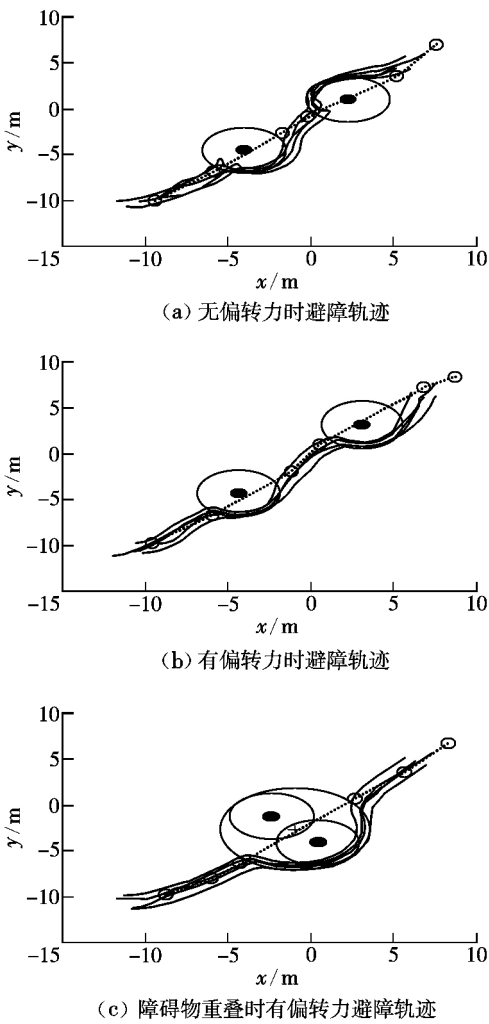


图 4 所有个体均能感知障碍物时的避障轨迹  
Fig. 4 Trajectory with all individuals being able to perceive obstacles

通过图 4(a) 可以看出, 在没有加入偏转力  $u_{\beta_2}$  时, 集群在障碍物前方首先出现了“振荡徘徊”, 然后在下一任务点的作用下继续前进; 通过图 4(b) 可以看出, 加入  $u_{\beta_2}$  后, 集群克服了图 4(a) 中出现的问 题, 顺利躲开障碍物; 通过图 4(c) 可以看出, 本文提出的重合障碍物中心坐标计算方法, 集群可以成功躲避障碍物, 有效避免了极小值问题。

3.2 部分个体能感知障碍物时集群避障

实际任务中无人机集群通常由多种类型的无人机组成, 只有部分无人机才能感知到障碍物。由于任务环境中不允许集群系统进行内部全局导航通信, 因此其余无人机并不能得到障碍物信息。

在有  $N$  架无人机的集群内, 假设能够感知到障碍物信息的无人机个数为  $M$ , 其余  $N - M$  个无人机仅掌握任务点但无法感知障碍物。这种情况下, 可

以将生物集群中领导者的概念引入到无人机集群自组织避障机制中,将能感知到障碍物的无人机视为领导者,不能感知到障碍物的无人机视为跟随者。领导者感知到障碍物后,根据已知的信息自主安全飞行,其他无人机跟着领导者飞行。

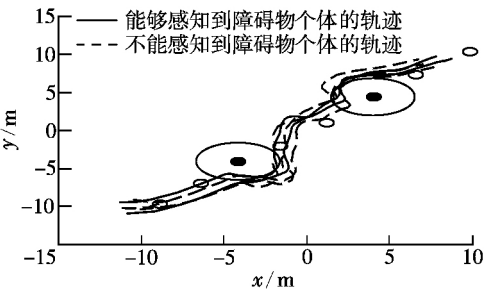
由于外界障碍物的作用,无人机集群个体控制器系数需要调整。调整策略如下:领导者感知到前方有障碍物时将增大 $u_{ij}$ 系数,使集群能够尽早改变航向,以缩短集群整体反应时间,使其他无人机能够在吸引力的作用下达达到一致性飞行,同时增大排斥力系数以消解跟随者跟进而增加的潜在冲突;由于跟随者避障模块 $u_{ij}$ 为0,要将个体意愿系数 $b_4$ 调整为0,以防止个体盲目前进与障碍物相撞,同时增大一致性系数 $b_2$ 和吸引系数 $b_3$ 。仿真具体参数见表2。

表 2 部分个体能感知障碍物时仿真参数取值

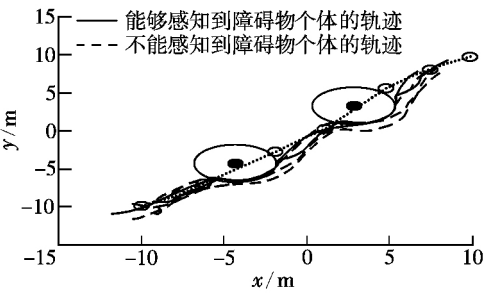
Table 2 Simulation parameter selection when some individuals in the swarm can perceive obstacles

参数	取值	参数	取值	参数	领导者	跟随者
$d_r$	1.0	$a_1$	5.5	$b_1$	1.3	1.0
$d_m$	1.5	$a_2$	6	$b_2$	1.0	1.3
$d_a$	2.5	$a_3$	8	$b_3$	1.0	1.7
$U_{\max}$	0.5	$a_4$	4	$b_4$	2.2	0
$V_{\max}$	1.0	$k$	12			
$R$	6	$r$	2			

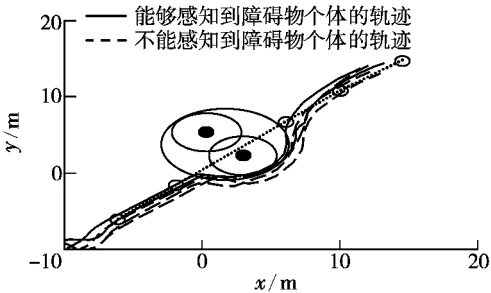
仿真时取 $N=5$ , $M=2$ ,部分个体能感知障碍物信息时的避障轨迹如图5所示。



(a) 无偏转力时避障轨迹



(b) 有偏转力时避障轨迹



(c) 障碍物重叠时有偏转力避障轨迹

图 5 部分个体能感知障碍物信息时避障轨迹

Fig. 5 Trajectory with some individuals being able to perceive obstacles

由图5可以看出:集群在无偏转力时出现了“振荡徘徊”,避障过程中引入了领导者机制,跟随者在领导者的吸引力作用下顺利避开了障碍物;图5(b)和图5(c)显示,加入偏转力后,在领导者的带领下集群顺利避开了单一障碍物和重叠障碍物。

4 结束语

针对集群自组织避障问题,本文借鉴生物集群系统认知模型,采用自下而上的建模方法,将个体运动控制器设计为集群系统内部一致性运动模块和集群避障模块两部分,并针对全部个体和部分个体能感知障碍物的情况,给出了不同的避撞控制策略。最后通过仿真,验证了建模方法和控制策略的有效性,实现了集群对单一障碍物和重合障碍物的有效规避。

参考文献:

[1] 梁晓龙,李浩,孙强,等.空中作战发展特征及对策[J].空军工程大学学报(军事科学版),2014,14(3):4-7.

[2] 梁晓龙,孙强,尹忠海,等.大规模无人系统集群智能控制方法综述[J].计算机应用研究,2015,32(1):11-16.

[3] Chaumette F,Hutchinson S. Visual servo control, part I: basic approaches [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2006, 13(4): 82-90.

[4] Kang S,Choi H, Kim Y. Formation flight and collision avoidance for multiple UAVs using concept of elastic weighting factor [J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2013, 14(1): 75-84.

[5] 王晓燕,王新民,姚从潮.无人机编队飞行神经网络自适应逆控制器设计[J].控制与决策,2013,28(6):837-843.

[6] Cifuentes S,Girón-Sierra J M,Jiménez J. Virtual fields and behaviour blending for the coordinated navigation of robot teams: some experimental results [J]. Expert Sys-

- tems with Applications, 2015, 42(10): 4778-4796.
- [7] 陈世明,丁贤达,化俞新. 大规模机器人群体的分层编队控制算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(10): 52-57.
- [8] Ren W, Sorensen N. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56(4): 324-333.
- [9] 吴俊成,周锐,董卓宁,等. 基于诱导航线的多无人机编队飞行控制方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(7): 1518-1525.
- [10] Chou Z, Zhou S L, Ming L, et al. UAV formation flight based on nonlinear model predictive control [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 2012 (1024-123X): 181-188.
- [11] 王新鹏. 认知模型的研究和应用[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007.
- [12] Reynolds C W. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model [J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4): 25-34.
- [13] 孙强,梁晓龙,尹忠海,等. UAV 集群自组织飞行建模与控制策略研究[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(7): 1649-1653.
- (编辑: 崔立峰)

////////////////////////////////////  
(上接第 45 页)

- [16] 袁东,马晓军,曾庆含,等. 二阶系统线性自抗扰控制器频带特性与参数配置研究[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1630-1640.
- [17] 段竹青. 基于频域分析的自抗扰控制器参数自整定研究[D]. 天津: 南开大学, 2015.
- [18] 夏青元,徐锦法. 三轴式无人旋翼飞行器及自适应飞行控制系统设计[J]. 航空学报, 2013, 34(3): 495-508.
- [19] 刘波. 无人机非线性姿态控制律设计及仿真研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- [20] Nicholas A D. Automated carrier landing of an unmanned combat aerial vehicle using dynamic inversion[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2007.
- (编辑: 姚妙慧)