

无人机群布散运动模型研究

王慧丽¹, 范人芳²

(1. 内蒙古包头市职业技术学院, 内蒙古 包头 014000; 2. 电子科技大学电子科学技术研究院, 成都 610054)

摘要: 无人机集群运动技术中, 布散模型是一项非常重要的研究内容。研究无人机的布散模型时, 最重要的工作就是建立每个无人机的运动方程。在建立无人机二维平面内质点运动方程的基础上, 设计了虚拟恒定引力、边界力、Lennard-Jones 分子力来对模拟无人机在散开运动中的受力, 以实现无人机整体运动的趋向性和避免碰撞的要求。通过对运动方程求数值解获得的仿真结果看出, 建立的运动模型可以实现无人机在一定范围内散开, 并保持运动趋向性和避撞性。

关键词: 无人机群; 集群运动; 布散模型; 虚拟力; 避碰

中图分类号: V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)01-0024-04

Dispersion Motion Model of UAV Swarm

WANG Hui-li¹, FAN Ren-fang²

(1. Baotou Vocational and Technical College, Baotou 014000, China; 2. Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The dispersion model is a very important issue in UAV swarm technology. In the research of dispersion model of UAVs, the most important effort should be exerted on building the motion equations for each UAV. Based on modeling the 2D centroid motion equations for the UAVs, virtual constant gravitation, boundary force and Lennard-Jones molecular force are designed to simulate the forces acted on the UAVs in dispersion, which aims to satisfy the requirements of alignment and obstacle avoidance. The simulation results obtained from numerical outcome of motion equations showed that, the dispersion model helps the swarm numbers to maintain a safe distance from each other and ensures that they can fly in a rough uniform direction.

Key words: UAV swarm; swarm motion; dispersion model; virtual force; obstacle avoidance

0 引言

随着微电子和微机电系统技术的飞速发展, 微小无人机以结构简单、成本低廉、无伤亡风险等特点, 在军事和民用领域得到广泛的应用。但由于单个微小无人机在飞行能力、飞行持续时间、自主运行、探测能力、识别角度等方面的能力限制, 无人机发挥的作用仍十分有限。由多个简单无人机通过协同、协作组成集群系统来完成单个无人机无法完成或难以完成的工作, 已经成为了各国研究者的普遍共识^[1-5]。基于群体的无人机系统具有更大的优势: 相互合作的 n 个无

人机能力远大于单个无人机能力的 n 倍; 设计和制造多个简单无人机比单个复杂无人机更容易, 成本更低; 无人机集群系统的平行性和冗余性可提高系统的灵活性和鲁棒性等。无人机集群系统可以抵抗来自内部和外部的干扰, 可以在其中一些无人机故障/坠毁时不影响整体的工作。

1 无人机群布散模型

集群运动技术是无人机群研究中的一项关键技术。无人机在运动过程中既要使个体的运动具有某种随机性, 同时又要保持某种整体的目的性和趋向性。抽象来说, 运动的主体是离散的无人机个体, 而整体的运动却像连续的液体, 使无人机群具有整体性的基础是建立合理的协调机制。如著名的“boids”模型^[6], 每个个体都执行以下 3 条规则: 1) 凝聚, 每个单位都往其邻近单位的平均位置移动; 2) 对齐, 每个单位行动

收稿日期: 2014-09-26

修回日期: 2014-11-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(ZYGX2011J138)

作者简介: 王慧丽(1981—), 女, 内蒙古包头人, 硕士, 讲师, 研究方向为仿真技术。

时,都要把自己对齐在其邻近单位的平均方向上;3) 分隔,每个单位行动时,要避免撞上其邻近单位。

如果所有的个体都执行相同的策略,整个群体展示出运动的整体性,如同一个不会随时间散开的具有大致常数密度的伪刚体。

对于无人机群来说,要形成集群运动的目标,需要构建集中、跟随、散开、对齐、引导等模型^[7],其中对于定点布散投放的无人机群来说,能够在短时间内迅速散开,并且保证在散开过程中,不发生碰撞,同时又不会远离目标区域,是实现集群运动的一个基本前提。因此,建立合理、适当的无人机群散开模型是无人机集群技术研究中的一项重要工作。

利用无人机群实现对目标区域的覆盖,通常采用两种方式来实现:一种是采用扫描的搜索方式,利用蛇形、螺旋形或者往复前进形的覆盖搜索路径^[8-11];另一种是利用设定的航路点进行航路规划,从而实现无人机群散开后对目标区域的覆盖^[12-13]。但是,上述这两种方法普遍适用于无人机群已经形成较稳定相对位置的时候,而对于定点投放情况下如何实现机群散开的问题,研究者们关注较少,也未见公开报道。

本文针对这一问题,利用物理学中运动力学和分子力学原理,构建虚拟力来引导无人机群的运动,从而实现无人机群在一定区域内布散的目标。

2 布散模型建模

2.1 目标

微小型无人机具备快速投放、布散,自动形成网络的能力,因此,如何使无人机在规定的区域内快速散开并保持一定的通信间距是一个亟待解决的问题。本文研究的目的是建立一种微小型无人机群的布散模型,以保证初始飞行方向随机分布的无人机群,经过一定时间,较均匀地分布于指定区域内。

2.2 机制

为了建立满足要求的布散模型,首先需要引入无人机的趋向机制和避免碰撞机制。趋向机制保证无人机都朝向指定区域飞行,而避碰机制则要求无人机在散开过程中,彼此之间不发生碰撞。无人机在飞行过程中,可以通过传感器探测到周围无人机的位置,根据相对距离而决定下一步如何运动。

2.3 实现

在研究无人机的布散模型时,最重要的工作就是建立每个无人机的运动方程,这是分析、计算和模拟无人机布散运动的基础。无人机在飞行期间,发动机不断喷出燃气流,无人机的质量不断发生变化,因此无人机是一个可变质量系;而且无人机是可控飞行,它被视

为一个被控对象。因此,完整描述无人机在空间的运动是相当复杂的。针对不同的设计要求和研究阶段,建立的数学模型可以进行相应的简化。在无人机布散运动模型的研究中,重点关注无人机的飞行轨迹,因此可把无人机视为定质量的质点,用质点计算模型来表征无人机的运动。此外,由飞行力学知识可知,无人机的运动是三维空间运动,本文重点关注的是二维平面区域内的布散,因此无人机的运动方程可进一步简化。

3 无人机运动方程建模

无人机的运动方程是描述无人机上的受力和运动参数间关系的方程组,它是由动力学方程和运动学方程等组成的。图1为无人机受虚拟力的示意图。

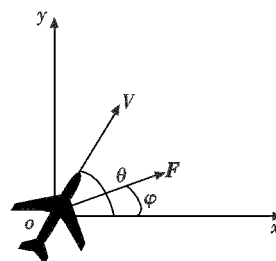


图1 无人机受虚拟力的示意图

Fig. 1 Illustration of virtual forces on UAV

3.1 运动学方程

在不考虑无人机绕质心转动的情况下,可以将无人机当作一个可操纵质点来进行研究。为确定无人机在空间的飞行轨迹,需要建立无人机质心的运动学方程。无人机质心在水平面内运动,飞行高度不变,将飞行速度 V 投影到直角坐标系,可得到运动方程

$$\begin{cases} dx/dt = V \cdot \cos \theta \\ dy/dt = V \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: V 为无人机的速度大小; θ 为速度矢量与水平 x 轴之间的夹角。通过对上式积分可以求得无人机质心相对于水平坐标平面的位置坐标 x 和 y 。

3.2 动力学方程

由理论力学可知,无人机质心运动的描述可用动量定理来表示。将矢量形式投影到直角坐标系中可得到

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dt} = F \cdot \cos(\theta - \varphi) \\ mV \frac{d\theta}{dt} = -F \cdot \sin(\theta - \varphi) \\ F = \sum F_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: F 为无人机所受合力; F_i 为各分力矢量; φ 为 F 与水平 x 轴之间的夹角。

4 虚拟力

由上文导出的无人机质心在水平面的运动方程中

包含的未知数有表示速度大小和方向的 (V, θ) 和表示质心在空间位置的 (x, y) 。为了保证未知数和方程式的封闭,必须建立分外力 F_i 的表达式。

4.1 虚拟恒定引力

为了保证无人机群的整体趋向性,设计一种虚拟的恒定的引力 F_{goal} 作用于无人机上,这种虚拟恒定引力相当于在目标区域方向上无穷远处有一个引力源,因此,各无人机所受到的引力方向从投放点指向目标区域中心。所有无人机都受到一个方向相同大小恒定的力来驱使无人机飞向目标区域,如图2所示。

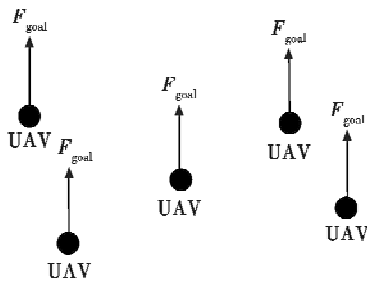


图2 恒定引力示意图

Fig. 2 Illustration of constant attract forces

4.2 边界力

由于无人机群布散是期望覆盖目标区域的,而不希望无人机远离目标区域,因此在本模型中,加入边界力 $F_{obstacle}$ 作为无人机运动的一个约束力以防止无人机飞出目标区域,如图3所示。

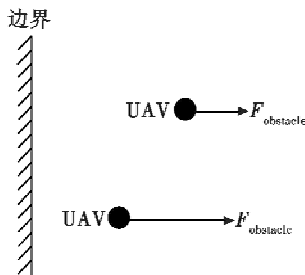


图3 边界力示意图

Fig. 3 Illustration of boundary forces

无人机距离边界越近,所受到的边界力越大。本文采用 Lennard-Jones 斥力模型,定义边界势能的大小与距离的12次方成反比,因此有如下边界力表达式

$$F_{obstacle} = \frac{A\sigma^{12}}{r^{13}} \quad (3)$$

式中: A 为边界力系数; σ 为显著斥力作用范围; r 为无人机到边界的距离。

4.3 无人机之间的相互作用力

无人机散开过程中要避免彼此的碰撞,因此希望无人机在相对距离较近时,飞离相邻无人机,而当无人机距离较远时,又存在一个吸引力,保持一个相对稳定的飞行间隔,由此很容易联想到分子间力的模型。当分子相距较远时,范德华力对分子有相互吸引的作用;

而当分子相距较近时,电子云及核产生排斥作用,使分子之间产生斥力,可采用一种形式较为简单的 Lennard-Jones 模型来描述分子间的力。

若用 U 代表分子间的相互势能,当相互作用势能随分子之间距离连续变化时,根据 Lennard-Jones 分子势能理论,有如下表达式

$$U = 4\epsilon [(\sigma/r)^{12} - (\sigma/r)^6] \quad (4)$$

式中: ϵ 为能量最小值; σ 为交互长度比例; r 为分子间的距离。

由分子的相互作用力计算公式

$$F = -\frac{\partial U}{\partial r} = 24\epsilon \left[\frac{2\sigma^{12}}{r^{13}} - \frac{\sigma^6}{r^7} \right] \quad (5)$$

可以获得 Lennard-Jones 力。利用 Lennard-Jones 分子力的作用原理,构造无人机之间的相互作用力模型。当无人机距离相对较近的时候,产生虚拟的斥力;当无人机相距较远的时候,又存在相互的引力,超出一定距离范围后,这种引力将趋近于零。因此,无人机之间的相互作用力就可以用 Lennard-Jones 分子力进行表示,即

$$F_{interaction} = 24\epsilon \left[\frac{2\sigma^{12}}{r^{13}} - \frac{\sigma^6}{r^7} \right] \quad (6)$$

式中: ϵ 为无人机相互作用的强度; r 为无人机之间的距离; σ 为引力和斥力交互变换距离。如图4所示,当两个无人机之间的距离 r 大于 σ 时, $F_{interaction}$ 表现为引力,如粉色的矢量所示;当两个无人机之间的距离小于 σ 时, $F_{interaction}$ 表现为斥力,如蓝色的矢量所示。

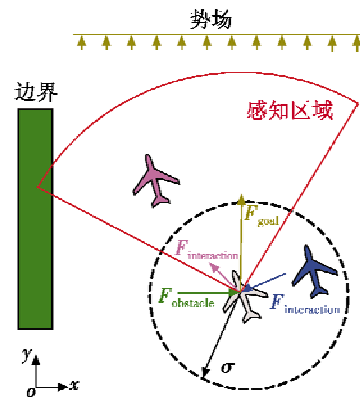


图4 相互作用力示意图

Fig. 4 Illustration of interacting forces

Lennard-Jones 分子力在分子相互靠近的过程中,斥力随着距离的减小而显著增大;当距离变得很小时,斥力可以达到无穷大,这种情况在无人机间作用力建模的时候,会带来不希望出现的问题。因此,规定无人机间的最大作用力为 F_{max} ,无人机间的相互作用力可见图5。

由此可以得到布散模型中无人机所受到的外力包括 F_{goal} , $F_{interaction}$ 和 $F_{obstacle}$,即

$$F = F_{goal} + F_{interaction} + F_{obstacle} \quad (7)$$

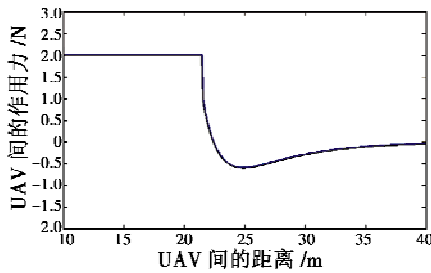


图 5 Lennard-Jones 力示意图

Fig. 5 Illustration of Lennard-Jones force

5 数学仿真

5.1 场景设定

设定无人机的搜索区域为 x 轴向 $-1\ 000 \sim 1\ 000\text{ m}$ 的范围。假设在初始时刻,从坐标原点附近区域释放的无人机的数量为 20 个。从左至右,从下至上依次以 1 ~ 20 进行编号,其编号对应的初始坐标如图 6 所示。所有无人机的初始速度大小都为 100 m/s ,产生一组随机数作为无人机飞行的初始速度方向,可用弧度分别表示为 $(1.5, 2.23, 0.65, 0.52, 0.3, 1.6, 2.5, 2.98, 3.27, 0.12, 0.88, 2.15, 2.5, 5.9, 2.48, 0.59, 3.57, 0.52, 3.68, 2.68)$ 。

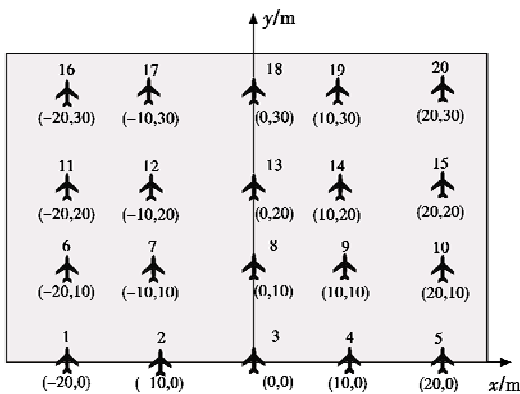


图 6 无人机初始位置示意图

Fig. 6 Initial positions of UAVs

5.2 受力参数

为了验证上述的布散运动模型,一些受力参数也需要同时进行设定。所有无人机收到 y 轴正向无穷远处的恒引力为 15,引力和斥力交互变换距离 $\sigma = 30\text{ m}$,无人机相互作用强度 $\varepsilon = 5$,无人机间的最大作用力 $F_{\text{max}} = 2\text{ N}$ 。同时设定无人机的质量 $m = 1\text{ kg}$ 。

5.3 仿真结果分析

设定完上述参数后,利用龙格库塔法求解布散运动微分方程。经过 1 000 步迭代,得到无人机的最终位置和飞行路径如图 7 所示。从图中可以看出,随着迭代次数的增加,无人机从各个方向散开。由于恒定引力的牵引,无人机大致都朝一个方向飞行。本文模型中采用的 Lennard-Jones 力在无人机相对较近时,存

在显著的斥力,避免无人机之间的相撞。同时,由于边界力的存在,使得无人机的布散范围集中在所要求的 $-1\ 000 \sim 1\ 000\text{ m}$ 的横向区域内。

当无人机的初始速度方向依次为 $(1.5, 1.51, 1.52, 1.49, 1.48, 1.5, 1.51, 1.52, 1.49, 1.48, 1.5, 1.51, 1.52, 1.49, 1.48, 1.5, 1.51, 1.52, 1.49, 1.48)$,单位为 rad,其他参数不变时,布散模型进行 1 000 次迭代之后,无人机的最终位置和飞行路径如图 8 所示。比较图 7 和图 8 可以看出,无人机的飞行路径、最终位置与初始时刻速度的方向有显著的关系。从图 8 中可以看出,虽然无人机初始飞行方向大致相同,但是由于 Lennard-Jones 力在其中的作用,使得无人机在经过一定时间飞行之后,它们之间的距离和速度方向有了较为明显的变化,也使得无人机群能够充分散开。

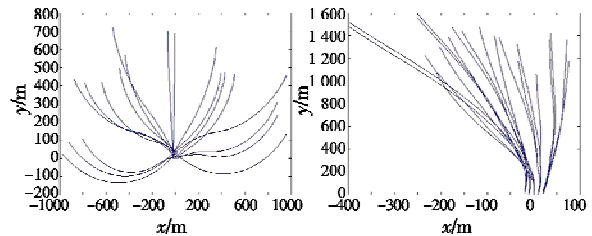


图 7 无人机散开路径

Fig. 7 Disperse paths of UAVs

图 8 无人机初始速度基本同向时的散开路径

Fig. 8 Disperse paths of UAVs when the initial velocities are almost same

6 结论

本文首先说明了无人机群散开模型的机制,利用飞行力学原理构建无人机群在二维平面内的质点运动方程组;然后,利用物理学中的运动学和分子力学原理,设计了虚拟的恒定引力、边界力、Lennard-Jones 分子力,来引导无人机的散开运动。通过对运动方程组的数值求解,对无人机群的运动模型进行了仿真,从仿真结果看出,本文设计的布散模型可以保证无人机在一定区域内散开,同时避免彼此之间的碰撞。

本文模型中采用的 Lennard-Jones 力在无人机相对较近时才能发挥显著的影响,当无人机数量较少时,仅依靠 Lennard-Jones 力不能很好地保证无人机散布的均匀性,因此,本文的布散模型更加适于数量较多的无人机群应用,未来将会针对无人机数量较少时的布散模型开展研究。

参考文献

[1] Unmanned aircraft systems roadmap 2005-2030 [R]. Office of the Secretary of Defense, Department of Defense, USA, 2005. (下转第 38 页)

- cell images[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1966, 128:1035-1053.
- [4] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, SMC-9(1):62-66.
- [5] RIDLER T, CALVARD S. Picture thresholding using an iterative selection method[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1978, SMC-8:630-632.
- [6] TRUSSELL H J. Comments on picture thresholding using an iterative selection method[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, SMC-9:1238-1239.
- [7] 王浩,高晓光.基于连续帧的红外小目标检测技术[J]. *火力与指挥控制*, 2012, 37(11):153-155. (WANG H, GAO X G. An infrared small target detecting algorithm with consecutive frames [J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(11):153-155.)
- [8] KAPUR J N, SAHOO P K, WONG A K C. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1985, 29:273-285.
- [9] 张新明,李振云,孙印杰.快速二维直方图斜分最小误差的图像阈值分割[J]. *电光与控制*, 2012, 19(6):8-12. (ZHANG X M, LI Z Y, SUN Y J. Fast image thresholding with minimum error based on 2-D oblique segmentation [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(6):8-12.)
- [10] DOYLE W. Operations useful for similarity-invariant pattern recognition[J]. *Journal of the ACM*, 1962, 9(2):259-267.
- [11] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理[M]. 3版. 阮秋琦,阮宇智,译. 北京:电子工业出版社,2012. (GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital image processing*[M]. 3rd ed. Translated by RUAN Q Q, RUAN Y Z. Beijing:Publish House of Electronics Industry, 2012.)
- [12] 王建华,王春平,梁伟,等.单帧红外图像多弹迹点检测[J]. *火力与指挥控制*, 2013, 38(5):124-128. (WANG J H, WANG C P, LIANG W, et al. Multi-shell track detection in one single frame infrared image[J]. *Fire Control & Command Control*, 2013, 38(5):124-128.)

(上接第 27 页)

- [2] FRELINGER D, KVITKY J, STANLEY W. Proliferated autonomous weapons[R]. Santa Monica: Rand Corporation, 2005.
- [3] SCHUMACHER C J, CHANDLER P R, RASMUSSEN S R. Task allocation for wide area search munitions[C]//Proceedings of the American Control Conference, 2002, 3:1917-1922.
- [4] DUNKE R E. Investigation of cooperative behavior in autonomous wide area search munitions[R]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2002.
- [5] GOZAYDIN O. Analysis of cooperative behavior for autonomous wide area search munitions[R]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2002.
- [6] REYNOLDS C W. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model[J]. *Computer Graphics*, 1987, 21(4):25-34.
- [7] PARK C S, TAHK M J, BANG H. Multiple aerial vehicle formation using swarm intelligence[C]//AIAA Guidance Navigation and Control Conference and Exhibit, Austin, Texas, August, 2003:5729-5737.
- [8] 郭美芳,范宁军,袁志华.巡飞弹战场运用策略[J]. *兵工学报*, 2006, 27(5):944-947. (GUO M F, FAN N J, YUAN Z H. Battlefield operation strategy of loitering munition[J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(5):944-947.)
- [9] MARZOLF G S. Time critical targeting predictive versus reactionary methods: An analysis for the future[M]. Maxwell Air Force Base, Alabama: Air University Press, 2004.
- [10] 彭辉,沈林成,霍霄华.多 UAV 协同区域覆盖搜索研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(11):2472-2476. (PENG H, SHEN L C, HUO X H. Research on multiple UAV cooperative area coverage searching [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(11):2472-2476.)
- [11] 沈延航.攻击型无人机飞行轨迹优化设计与仿真[D].西安:西北工业大学,2003. (SHEN Y H. *Optimal design and simulation of flying paths of attack UAVs* [D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2003.)
- [12] SHANMUGAVEL M. Path planning of multiple autonomous vehicles [D]. UK: Cranfield University, 2007.
- [13] PETERSSON P O, DOHERTY P. Probabilistic roadmap based path planning for an autonomous unmanned aerial vehicle [C]//The 14th International Conference on Automated Planning and Scheduling, Canada, 2006, 17:395-405.