

基于局部信息交互的仿生扑翼机集群自组织行为技术

摘要

仿生扑翼机是当下的热门研究对象，研究仿生扑翼机集群对于军事和民用都有重要意义。本文作为扑翼机集群实现高效节能的仿生飞行控制的基础，主要研究了基于局部信息交互的仿生扑翼机集群自组织行为技术。

首先，本文建立了仿生扑翼机个体与集群的空气动力学模型，通过分析扑翼过程中涡流的分布情况，计算了高效节能的编队飞行距离。

其次，本文选用视觉交互作为局部信息交互形式，提出了基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为模型和基于避障性的仿生扑翼机集群自组织行为模型，从数学模型、算法设计等方面对上述模型进行了详细阐述。

最后，本文通过仿真实验验证了上述提出的两种具有高效节能功能的基于局部信息交互的仿生扑翼机自组织行为模型的可行性。

关键词：仿生扑翼机，局部信息交互，自组织，NetLogo

Research on Self-organization Behavior of the Bionic Flapping-wing Air Vehicle Cluster Based on Local Information Interaction

ABSTRACT

In recent years, the bionic flapping-wing air vehicle is a popular research object, which has the great significance for both military and civil purposes. In this paper, as a basis for the efficient control for the bionic flapping-wing air vehicle cluster, the self-organization behavior based on local information interaction are researched.

Firstly, the aerodynamic model of individual and cluster of the bionic flapping-wing air vehicle is established, and the energy-efficient formation flight distance is calculated.

Secondly, this paper selects visual interaction as the form of local information interaction, proposes the self-organized behavior model of the bionic flapping-wing air vehicle cluster based on Couzin model and the self-organized behavior model of the bionic flapping-wing air vehicle cluster based on obstacle avoidance, and elaborates the above models from the aspects of mathematical model and algorithm design.

Finally, a simulation environment is established in the platform named NetLogo, and the feasibility of the two proposed self-organization behavior models of the bionic flapping-wing air vehicle based on local information interaction with high-efficiency and energy-saving functions is verified.

Key words: the bionic flapping-wing air vehicle cluster, local information interaction, self-organization, NetLogo

目 录

1 绪 论.....	4
1.1 课题背景及意义	5
1.2 国内外研究现状	5
1.2.1 仿生扑翼机结构设计研究现状.....	6
1.2.2 仿生扑翼机集群编队研究现状.....	7
1.2.3 仿生扑翼机集群自组织技术现状.....	8
1.3 本文主要工作及结构安排.....	8
2 仿生扑翼机集群编队飞行机理与阵型研究.....	10
2.1 引言	10
2.2 单仿生扑翼机空气动力学模型建立.....	10
2.3 仿生扑翼机集群编队飞行分析.....	12
2.3.1 鹈鹕鸟群编队飞行机理分析	12
2.3.2 仿生扑翼机集群行为阵型排布设计.....	13
2.4 小结	14
3 基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为模型研究	15
3.1 引言	15
3.2 传统集群自组织行为模型.....	15
3.3 基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为技术模型	17
3.3.1 模型设置	17
3.3.2 数学模型建立	19
3.3.3 仿生扑翼机自组织行为算法设计.....	20
3.3.4 算法验证	24
3.4 小结	25
4 基于视野范围的仿生扑翼机自组织行为技术优化算法.....	26
4.1 引言	26
4.2 基于避障性的自组织行为优化算法.....	26
4.2.1 集群避障性原因分析	26
4.2.2 个体避障策略	27
4.2.3 基于避障性的自组织行为技术模型.....	28
4.2.4 算法设计	29
4.3 小结	32
5 系统仿真设计与实验.....	33
5.1 仿真实验环境	33

5.2 环境搭建	34
5.3 基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为技术仿真	34
5.3.1 仿真环境设定	34
5.3.2 仿真实验	35
5.4 基于避障性的仿生扑翼机集群自组织行为优化算法仿真	38
5.4.1 仿真环境设定	38
5.4.2 仿真实验	38
6 结论与展望	42
6.1 结论	42
6.2 展望	42
参考文献	43
谢辞	43

1 绪 论

1.1 课题背景及意义

本文中研究的仿生扑翼机指的是受自然界鸟类生物学特征启发,模仿鸟类通过拍打翅膀飞行的特点研发的飞行器。仿生扑翼机是一种结构简单、两侧机翼能上下扑动的飞行器。机翼扑动产生向上的升力和向前的推力,结合自身的重力,仿生扑翼机能够完成复杂的飞行任务。由于其简单的结构形式、良好的负载能力、优异的飞行性能,不管是在军事方面还是民用方面,仿生扑翼机都具有深远的研究意义。

与固定翼飞行器和旋翼飞行器相比较,仿生扑翼机在低速飞行领域有着更好的飞行性能,包括但不限于隐蔽性、机动性、飞行效率和风阻抗性等。不同尺寸的仿生扑翼机通常有着不同的特性。小型仿生扑翼机通常模仿扑翼频率快、机动性强的昆虫和蜂鸟,但其负载能力通常较小,续航能力较差。而模仿鸬鹚鸟、大雁、海鸥等鸟类的大型仿生扑翼机有着较低的扑翼频率、良好的负载能力以及长久的续航能力等特点,更适合于户外任务。

近三十年来,鸟群、鱼群、细菌群落等社会性动物的群体智能行为引起了相关学者们的高度关注。这类群体社会性动物的行为有个突出的特点体现为:个体所具备的能力相对有限,但数量一定的个体聚集在一起便可以完成复杂的任务(如群体迁徙),呈现出群体智能。研究分析社会性动物的群体智能行为,归纳总结出合情切实的集群行为的规则模型,并将其应用于群体机器人系统的运动行为分析中,则会对群体机器人系统的运动协调产生积极的促进作用。

本课题仿生扑翼机集群受自然界鸟群启发,鸟类集群行为的优势体现在具有良好的机动性以及长距离耐久飞行,自然界中的鸟群的社会性集群行为可以使鸟群增加觅食和迁徙的范围。据法国国家科学研究中心测试数据表明,鹅群、鸽群等小型鸟类的集群飞行节约能耗约为2%-3%,而鸬鹚鸟群等大型鸟群的总能量节约为11.4-14.0%,因此,研究并转化受鸬鹚鸟群启发的扑翼机集群仿生飞行技术对仿生扑翼飞行器技术来说具有重要意义。

本课题作为仿生扑翼机集群实现高效节能的仿生飞行控制的基础,研究集群内的信息交互方式,实现通过局部范围信息交互,达到外界刺激信号在集群中快速传播的效果,从而使无人机集群的自组织行为涌现出来。通过研究鸬鹚鸟群的群体智能行为,结合仿生扑翼机的空气动力学,实现仿生扑翼机集群的编队飞行以及一定范围内自主队形变换等功能,以期为实现复杂的仿生扑翼机集群任务执行奠定基础,在军事隐蔽侦察行动和民用商业文艺汇演等方面具有良好的应用价值。

1.2 国内外研究现状

国内外对于仿生扑翼机的畅想由来已久,但在近几十年才逐渐成为研究热点。本节将对其从三个方面展开讨论,分别是仿生扑翼机结构设计研究现状、仿生扑翼机集群编队研究现状和仿生扑翼机集群自组织技术现状。

1.2.1 仿生扑翼机结构设计研究现状

国外对于仿生扑翼机的研究由来已久，早在 1250 年，英国学者 Roger Bacon 将其设想发表于《工艺和自然的奥秘》。然后到 15 世纪初达·芬奇按技术规程设计出了世界上第一张扑翼机图纸。1913 年，俄罗斯学者 M.斯穆尔诺夫制成了一架带电动机驱动装置的扑翼机。但是碍于没有准确的空气动力学方面的理论指导和成熟的控制理论，扑翼机机翼的设计和飞行控制遇到很大的研究阻力。从提出设想到初步造出实物，仿生扑翼机的发展进程相当缓慢，直到近些年，由于新型材料、微机电技术、惯性传感器技术和飞行控制算法的进步，仿生扑翼机的研究才取得了较大进展，典型代表有：美国国防高等研究计划署资助研发的蜂鸟飞行机器人 Nano hummingbird^[1]、麻省理工学院的 Phoenix 扑翼机^[2]和德国 Festo 公司的 SmartBird。

Nano hummingbird 蜂鸟飞行机器人（如图 1.1 a）所示）是由美国国防高等研究计划署资助研发的一款纳米飞行器。在结构设计方面，该扑翼机翅膀采用了轻量化的柔性膜、无尾的结构设计；在运动控制方面，其通过扑翼机翅膀的扭动、转动两种方式实现姿态控制，能够实现旋转、滚动和倾斜等姿态的实现。但是，在实际复杂任务中，由于其过小的整体结构，蜂鸟飞行机器人难以搭载充足的能源，使得其推进效率较低、产生的升力和推力较小，只能实现较为简单的任务要求。

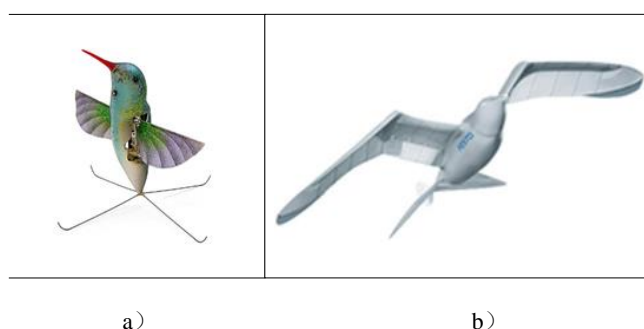


图 1.1 两种仿生扑翼机模型

SmartBird^[3]（如图 1.1 b）所示）是由德国 Festo 公司研发的一款仿生扑翼飞行器，其结构设计和运动控制等方面的设计灵感来源于海鸥。该仿生扑翼飞行器的扑翼翅膀采用主动铰接扭转驱动，两侧扑翼翅膀为飞行器提供升力和推力，其尾翼为其提供紧急上升、滚动和旋转等姿态控制作用。SmartBird 整体系统的机电效率可以达到 45%，基于科学调查，SmartBird 在圆圈飞行中表现尤为出色，其空动效率高达 80%。该仿生扑翼飞行器在气流优化设计方面结合功能整合高效能源，其轻量化设计有效地减少了整体机体质量。美中不足的是 SmartBird 的飞行模型在设计过程中不包含扭转部件，虽然该设计能使其避免受损，但这让控制效果受到限制，不能完成精细复杂的运动，难以在实际任务中完成复杂的要求。

相较于国外而言，国内对于仿生扑翼机的研究尽管起步较晚，但是近几年也取得了不错的进展。中国哈尔滨工业大学徐文福教授及其团队研制的大型仿生扑翼机器人 HIT-Hawk^[4]（如图 1.3 所示），通过模仿大中型体积鸟类的拍打运动，在薄翼理论的基础上，将扑翼机

构的自由度简化为一个,通过两侧翅膀的平面拍打产生升力和推力以供其飞行。这一设计减轻了整体结构重量,使得整体有效负载能力达到 100g 以上,在自然天气条件下续航能力能达到 1h 以上。良好的负载能力和续航能力使其能够承担一定程度上的户外任务,为扑翼飞行器编队飞行技术在户外实验奠定了良好基础。

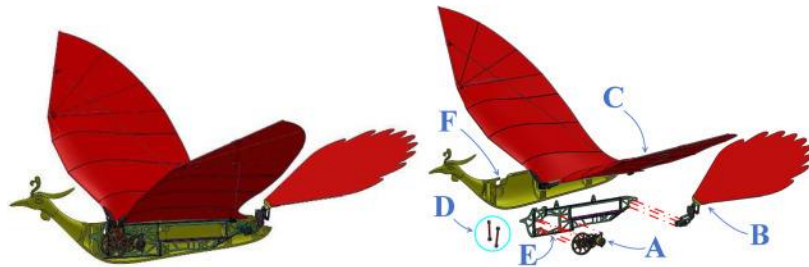


图 1.3 HIT-Hawk^[2]

仿生扑翼机空气动力学参数的数值计算是相关研究中的重要方面。在有足够算力和充裕时间的条件下,人们总是使用计算流体力学(CFD)来分析流场。CFD 是一种利用计算机数值计算来分析、计算和预测流场的方法。CFD 可以清晰地获得流场的细节和变化。但是,CFD 需要大量的算力支撑以及较长的计算时间,无法快速计算出 FAV 的空气动力载荷。近来, Peter 等人开发的状态空间空气载荷理论^[5]的计算速度远远超过 CFD,而且对算力要求也较低。这种方法在计算如扑翼飞行这类兼具较大刚性变形和较小柔性变形的运动有着相对较高的精度,非常适合仿生扑翼机的动力学仿真和控制设计。

1.2.2 仿生扑翼机集群编队研究现状

在实际复杂应用环境中,仿生扑翼机集群具有分工合作、协同完成任务等优势。因此研究仿生扑翼机集群具有重要意义。尹翌^[6]等人借鉴“雁阵效应”,对仿生扑翼机高效集群编队飞行问题进行了研究。通过分析雁群在飞行过程中的阵型变换,结合涡流的产生,分析得出了耗能最少的仿生扑翼机集群阵型排布方式以及相应的阵型变换机制,最后参考雁群的交互方式设计了基于局部信息交互的最优阵型拓扑结构变换控制方法。邱华鑫等人^[7]通过研究分析总结鸽群的社会性行为,参考鸽群特有的社会性层级行为,建立了基于鸽群层级行为的集群行为机制模型。在仿生扑翼机集群编队飞行机理的基础上,结合有向图和人工势场理论,设计了一种汲取鸽群行为机制的仿生扑翼机自主编队控制方法。邓婉、王新民等人^[8]对“长机-僚机”编队结构中飞行队形的稳定性进行了研究,其通过分析编队的几何关系见了编队飞行相对运动学方程,结合无人机的自动驾驶仪模型建立了对应的无人机编队飞行线性化数学模型。该课题采用 PID 控制方法设计了能控制编队间距实现无人机队形变化的空间无人机编队队形变换保持控制器,该控制器在仿真实验中通过调整速度、航向和高度等参数有效地控制了无人机编队飞行。段海滨等人^[9]利用人工势场法将无人机紧密编队转化为了一种抽象的人造势场中的运动,分别基于人工势场法和鸽群优化算法设计无人机编队的外环控制器和内环控制器,引入了捕食逃逸机制在基本鸽群机制上改善了鸽群优化的总体性能。

1.2.3 仿生扑翼机集群自组织技术现状

在自然界中,微观到生物大分子的自发折叠、磷脂双分子层的形成,宏观到蚂蚁群落、鸟类集群等社会性行为,生物系统总是按照某种规则,各尽其职、协同而自动地形成有序的结构,没有外部指令,系统自动地从无序走向有序,广大学者将这现象称之为自组织行为。

近三十年来,鸟群、鱼群、细菌群落等社会性动物的群体智能行为引起了相关学者们的高度关注。Reynold 等人研究了动物群体的集群行为,提出著名的 Boid 模型^[10]。在该模型中定义了三个基本规则:分离 (Separation)、聚合 (Cohesion)、速度匹配 (Alignment)。通过局部信息交互,群体中的个体可以实现自发的集体行为,Boid 模型的三个基本规则在自然界中大部分的群体智能行为上都等有所体现。Vicsek 等人在 Boid 模型的基础上提出了又一个经典的群体智能模型^[11]。经典的 Vicsek 模型除了 Reynold 提出的三个基本规则外,只考虑一定范围内不同个体之间的速度一致性,在一定时间内,群体中个体之间的速度将收敛于一致。Couzin 等人在 Boid 模型的基础上进行了精确的数学模型描述^[12],将群体中个体的感知区域分为三个区域:排斥区、取向区、吸引区,按照排斥优先的规则,结合自然界中生物个体的视线范围和速度的转向区域对 Boid 模型进行了更切合社会性动物群体智能行为的刻画。

如何将社会性动物的群体智能用到多智能体群集系统的控制理论中同样引起了研究学者们的高度关注。俞辉等人^[13]利用有向网络对具有二次积分动态特性的智能群体进行了研究,提出了一个分散控制方法对智能群体进行分散控制,并利用拉塞尔不变集原理证明了其提出理论的可行性。程磊等人^[14]研究了一类多移动机器人有序化集群运动系统控制方案,并进一步提出了基于“最小稳定时间”的集群运动分析法,该方法可用于对有序化集群运动系统进行分析。王冬梅等人^[15]在前者基础上建立了一种智能个体在运动过程中根据所处环境自适应选取智能群体虚拟领航者的集群运动控制模型。该模型避免了“长机-僚机”模式中单向信息流的劣势,增强了智能群体系统的自适应性和鲁棒性,提高了智能群体系统的稳定性。李沛等人^[16]通过分析社会性生物集群的自组织行为总结出了组织结构、行为主体、作用模式和系统整体等方面的特点,结合社会性生物集群和无人机集群的相似性,分析了两者的映射关系,探讨了仿生物多智能体在自主控制中的核心问题。

1.3 本文主要工作及结构安排

本课题主要研究内容有:

- (1) 利用空气动力学方法建立仿生扑翼机个体及其集群的动力学模型;
- (2) 研究仿生扑翼机集群中外界刺激信号对集群内部的影响,在仿真中对信号刺激影响进行验证;
- (3) 研究仿生扑翼机集群中基于局部信息交互的自组织行为,在仿真中实现至少 8 台扑翼机的自组织行为技术仿真。

本文具体章节安排如下:

第 1 章为绪论部分。首先讲述课题研究的背景及意义,然后阐述了当前国内外对于仿生扑翼机结构设计、空气动力学分析方法以及群体自组织行为技术的研究现状,最后介绍了本

文的内容安排。

第 2 章为仿生扑翼机集群动力学建模部分。首先对仿生扑翼机个体进行了空气动力学建模, 然后对仿生扑翼机集群编队空气动力学进行了分析, 最后计算了仿生扑翼机集群编队飞行距离的合适间距。

第 3 章为基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为技术部分。首先介绍了传统集群自组织行为模型, 然后基于 Couzin 模型提出了适用于仿生扑翼机集群的自组织行为模型, 详细阐述了其数学模型、算法设计等, 最后对该算法模型进行了可行性验证。

第 4 章为基于避障性的仿生扑翼机集群自组织行为技术部分。首先结合实际情况分析了仿生扑翼机个体及其集群的避障策略, 然后提出了基于避障性的仿生扑翼机集群自组织行为技术模型, 最后阐述了其数学模型和算法设计。

第 5 章为系统仿真设计与实验。利用 NetLogo 平台对前述提出的基于局部信息交互的仿生扑翼机集群自组织行为模型进行了仿真实验, 对仿真实验进行详尽的阐述, 验证了本文提出的两种模型的可行性。

第 6 章给出本课题的结论并作出展望。

2 仿生扑翼机集群编队飞行机理与阵型研究

2.1 引言

受结构设计、负载能力不足等影响,单架仿生扑翼机在执行远距离飞行,长时间侦察等任务中往往存在续航不足的问题。面对轻型材料、高能量密度电池等研发阻碍短期内无法突破的情况,采用合适的集群编队阵型减少仿生扑翼机彼此之间的能耗成为当下解决上述问题切实有效的方法。据法国国家科学研究中心测试数据表明,鹅群、鸽群等小型鸟类的集群飞行节约能耗约为 2%-3%,而鸬鹚鸟群等大型鸟群的总能量节约为 11.4-14.0%,因此,研究并转化受大型鸟群启发的扑翼机集群仿生飞行技术对仿生扑翼机技术来说具有重要意义。本文将借鉴大型鸟群编队能量节省原理并将其应用到仿生扑翼机集群编队飞行过程中。

2.2 单仿生扑翼机空气动力学模型建立

在处理单体仿生扑翼机的空气动力学模型建立时,现在主流的建模方式是刚体动力学方式和翅膀动力学方式。前者将仿生扑翼机模型的各个部件考虑成刚体,利用欧拉运动方程进行动力学分析即通过坐标转换速度、角速度、位置坐标以及 Roll-Pitch-Yaw 角的相互关系建立空气动力学方程;后者则是通过分析仿生扑翼机翅膀具体单元位置的弯曲位移和扭转变移,建立空气动力学方程计算得到具体单一单元的动力学参数,进而利用有限元的方法得到翅膀整体的动力学参数。由于自然界中鸟类身体、翅膀的形状极不规则且在飞行过程中不断变化,要获得其精准的外形几何数据非常困难,为了方便分析,本文选用刚体动力学的方法将仿生扑翼机简化为多刚体模型进行动力学分析。

为方便仿生扑翼机空气动力学模型的建立,本文将做如下假设:

假设 1.1: ①地面坐标系为惯性坐标系;②本文在建模过程中将仿生扑翼机的各个部件考虑成刚体,不考虑拍打翼和尾翼的弹性变量。

仿生扑翼机模型包括机身、尾翼以及一对对称的拍打翼。两侧拍打翼通过铰链与机身相连接,绕 x_b 轴上下扑动,同时绕拍打翼中心线扭转运动,扑动角为 φ ,扭转角为 η ,如图 2.1 所示。仿生扑翼机稳定飞行时,拍打翼的扑动和扭转运动是周期性的,为了方便表示拍打翼的运动规律,参照 Dietl 和 Uarcia 的方法^[17]将拍打翼扑动和扭转分别简化为频率为 f_1 和 f_2 的正弦运动:

$$\varphi = A \sin(2 \pi f_1 t + \theta_1) \quad (2.1)$$

$$\eta = R \sin(2 \pi f_2 t + \theta_2) \quad (2.2)$$

在上述假设条件下，将仿生扑翼机身简化为一个质量均匀的圆柱体，长度为 l ，半径为 r ；左右两侧拍打翼的形状简化为矩形，拍打翼展长为 l_1 ，单个拍打翼质心到机身尾翼组合体质心距离为 l_2 ，单个拍打翼弦长为 l_3 ；尾翼简化为矩形薄板，单个尾翼长宽分别为 l_4 ， l_5 ，左右两边尾翼作为扑翼机的升降舵，由联动机构连接，同时偏转相同角度；机身尾翼组合体、左侧拍打翼、右侧拍打翼的质量分别为 m_1 ， m_2 ， m_3 ，其中 $m_2 = m_3$ ，拍打翼质心位于拍打翼几何中心，机身质心到拍打翼前缘的距离为 x_g ，全机总质量为 m 。需要说明的是，由于在较低的飞行速度下鸟类飞行的升力和推动力主要由翅膀扑动产生，为了方便分析，主要考虑扑翼机拍打翼扑动产生的气动力而忽略机身的气动力，因此由机身形状的不同而产生的对全机气动力的影响可以忽略。

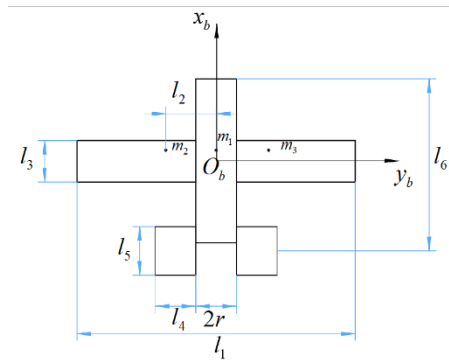


图 2.1 扑翼机简化模型

由于采用 Kane 方程可以避免方程中出现对静矩的求导项，容易将动力学方程化为标准形式，便于编程计算^[18]，采用 Kane 方程建立如下式所示的仿鹈鹕扑翼机纵向多刚体动力学模型：

$$\begin{aligned} m(\ddot{u} + q w) - 2 m_2(\dot{q} l_2 \sin \varphi + 2 q l_2 \dot{\varphi} \cos \varphi) \\ = -D \cos \alpha + L \sin \alpha - m g \sin \theta, \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} m(\dot{w} - q u) + 2 m_2[-\ddot{\varphi} l_2 \cos \varphi + (q^2 + \dot{\varphi}^2) l_2 \sin \varphi] \\ = -D \sin \varphi - L \cos \varphi + m g \cos \theta, \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} M_y = (I_{1y} + 2 I_{2y}) \ddot{\eta} - 2 \dot{\eta} \dot{l}_{2y} \\ + 2 m_2 l_2 \sin \varphi (\ddot{u} + q w - \dot{q} l_2 \sin \varphi - 2 q l_2 \dot{\varphi} \cos \varphi + g \sin \theta), \end{aligned} \quad (2.5)$$

式中： u, w 分别表示仿生扑翼机相对于地面参考系的速度在机体轴 x_b, z_b 方向的分量； q 为仿生扑翼机相对于地面参考系的俯仰角速度在机体轴上的分量； θ 为仿生扑翼机相对于地面坐标系的俯仰角； α 为仿生扑翼机的飞行迎角。 L, D, M_y 分别为仿生扑翼机所受的升力，阻力和俯仰力矩，其与仿生扑翼机飞行速度 V ，雷诺数，仿生扑翼机的飞行迎角 α 以及拍打翼扑动时的平均迎角 α_w 有关。 I_{1y} 为机身在 y_b 轴上的惯性矩， I_{2y} 为拍打翼在 y_b 轴上的惯性矩。该仿生扑翼机模型的几何参数和拍打翼的运动参数见表 1。当拍打翼固定不动时， $\varphi = \eta = \dot{\varphi} = \dot{\eta} = \ddot{\varphi} = \ddot{\eta} = 0$ ，公式(2.5)为传统的固定翼飞机的纵向动力学方程，与其相比较，公式(2.5)中包含

$\dot{\phi}$ 和 $\dot{\psi}$ 的项为拍打翼扑动引起的惯性力或力矩，包含 $\ddot{\eta}$ 的项为拍打翼扭转引起的惯性力矩，多出来的其他项为机身运动引起的拍打翼产生的惯性力或力矩。

机身与拍打翼在 y_b 轴上的惯性矩的计算公式如下：

$$I_{1y} = \frac{l_6 (2r)^3}{12} = \frac{0.36 \times 0.09^3}{12} = 2.1870 \times 10^{-5} m^4 \tag{2.6}$$

$$I_{2y} = \frac{l_3 \left(\frac{l}{2} - r\right)^3}{12} = \frac{0.36 \times \left(\frac{0.50}{2} - 0.045\right)^3}{12} = 2.5845 \times 10^{-4} m^4 \tag{2.7}$$

表 2.1 全机几何参数

参数	符号	单位	参数值
总质量	m	g	300
机身长	l	m	0.50
机身直径	$2r$	m	0.09
机身质心距机翼前缘距离	x_g	m	0.845
机翼展长	l_l	m	2.50
机翼机身质心距离	l_2	m	0.40
机翼弦长	l_3	m	0.36
机翼平均厚度	-	m	0.002
机翼质心距机翼前缘距离	-	m	0.40
机翼气动中心距机翼前缘距离	x_{ac}	m	0.184
单个尾翼长	l_4	m	0.25
单个尾翼宽	l_5	m	0.45
机身在 y_b 轴上的惯性矩	I_{1y}	m^4	2.1870×10^{-5}
机翼在 y_b 轴上的惯性矩	I_{2y}	m^4	2.5845×10^{-4}

2.3 仿生扑翼机集群编队飞行分析

在自然界中，如鹈鹕鸟等大型鸟类个体在集群飞行过程中将受到其他个体带来的气动涡流作用而影响其飞行性能。研究鸟群编队飞行的机理并将其应用到仿生扑翼机集群编队飞行具有重要的应用意义。有效利用这些气动作用，可以降低仿生扑翼机集群编队飞行过程中整体的能耗，提升仿生扑翼机个体的续航能力，从而提升整个仿生扑翼机集群的飞行效率。本节将基于鸟群编队飞行理论，从能量高效利用的角度分析集群编队飞行的机理，基于 Biot-Savert 定律，最终推算出仿生扑翼机集群编队飞行过程中个体之间的最优相对横向距离和纵向距离。

2.3.1 鹈鹕鸟群编队飞行机理分析

在鹈鹕鸟飞行过程中，随着翅膀上下拍打产生升力时，翅膀下表面的压强比上表面高，而翅膀的长度是有限的，下表面的高压气流会绕过两端翼尖，流向向上表面的低压区。当气流绕过翼尖时，在翼尖部分形成旋涡，这种旋涡的不断产生而又不断地向后流去形成涡流状

气体，通常将其称为翼尖涡流。在此涡流的内测会形成一股向下的气流，即为下洗气流；同时，在涡流外侧会形成一股向上的气流，即为上洗气流。上洗气流使得周围空气受流速影响产生压强差从而提供向上的升力，如果相邻鹈鹕鸟正好位于上洗气流产生的位置中，则可以充分利用其产生的升力，达到节省飞行能耗的目的。

当从鸟在相对于领头鸟合适的横向距离飞行时，从鸟可以借助领头鸟产生的上洗气流实现能量节省的目的。理论上，鸟类在飞行过程中产生于两侧翼尖涡流的距离为 $\pi b/4 \approx 0.785b$ （ b 为鸟的翼展）。如图 2.2 所示，当鹈鹕鸟飞行时，其两侧鸟翼下方气流发生变化，形成一对细长涡流，在尾涡内侧产生下洗气流，在尾涡外侧产生上洗气流。为了获得来自尾旋上洗气流能提供的最大升力，鸟群在飞行过程中个体之间应保持一定的横向距离，即为最优翼间距（ WTS_{opt} ），最优翼间距的公式如下：

$$WTS_{opt} = \frac{b}{2} \times \left(\frac{\pi}{4} - 1 \right) = -0.11b, \quad (2.8)$$

其中： b 为鸟的翼展。 $WTS_{opt} < 0$ 意味着从鸟的翅膀需要与领头鸟的翅膀在横向方向有一定的重叠，公式（2.6）计算表明重叠的范围占 11%^[19]。

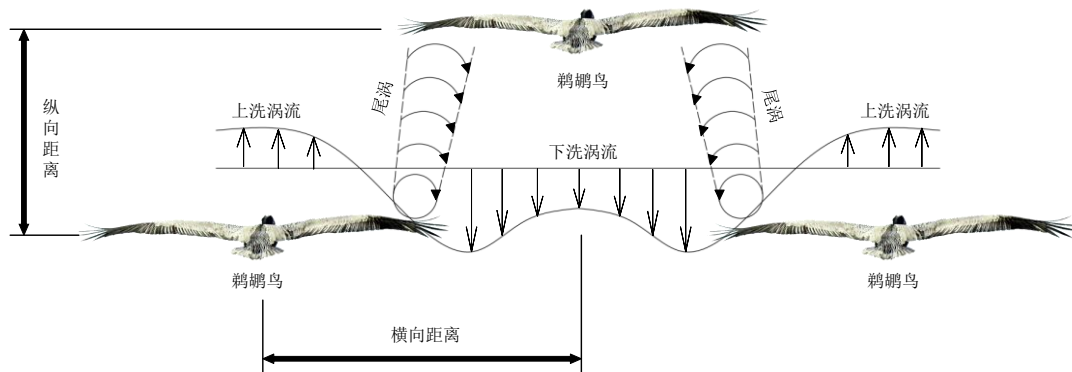


图 2.2 鹈鹕鸟间距与翼尖涡流示意图

由上述可知，从鸟所获得的额外升阻力主要与领头鸟之间的横向距离有关，为了达到高效利用能量的目的，从鸟必须与领头鸟保持最优翼尖横向距离。

2.3.2 仿生扑翼机集群行为阵型排布设计

受能量损耗、结构设计以及环境限制，为了达到高效利用能量的目的，提高仿生扑翼机个体的续航能力，仿生扑翼机集群在编队飞行过程中应采用合理的间距进行飞行。阵型排布的主要思路主要来源于鹈鹕鸟等大型鸟类群体在飞行过程中保持的最优翼尖横向距离。仿生扑翼机集群在整体飞行过程中，不同个体利用相邻个体在飞行过程中拍打机翼产生的翼尖涡流，利用其空气动能实现节省能量的目的。

假设 1.2: ①仿生扑翼机在飞行过程中扑翼频率不变；②仿生扑翼机飞行环境风速为零。

结合假设 1.2，由 2.2.1 中对鹈鹕鸟等大型鸟类飞行机理的分析可知，仿生扑翼机集群在飞行过程个体之间应保持最优翼尖横向距离，结合表 2.1 中本文所采用的仿生扑翼机的结构

参数，由公式（2.6），本文中仿生扑翼机之间的最优翼尖横向距离 Δs 为：

$$\Delta s = \left| \frac{l_1}{2} \times \left(\frac{\pi}{4} - 1 \right) \right| = 0.11l_1 = 0.275 \text{ m}, \quad (2.9)$$

仿生扑翼机之间的横向距离 Δx 为：

$$\Delta x = l_1 - \Delta s = 2.5 - 0.275 = 2.225 \text{ m}, \quad (2.10)$$

式中： l_1 为仿生扑翼机的机翼翼展，具体数值为 2.5m。

2.4 小结

本章对本课题用到的仿生扑翼机个体进行了空气动力学建模，并对仿生扑翼机集群编队飞行的合适距离进行了理论分析计算。实现高效节能的仿生飞行控制作为本文研究仿生扑翼机集群自组织行为基础，借鉴鹈鹕鸟集群飞行特征及其规律，将其应用到仿生扑翼机集群自组织行为研究中具有指导意义。

3 基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为模型研究

3.1 引言

集群自组织行为技术的研究起始于各界学者对自然界中生物群体行为和人类社会中社会性行为的观察、研究与总结。不存在外部指令,这些集群行为的实现基于集群中个体之间简单的交互规则,个体各尽其职而又协调地自动地形成有序结构,这就是自组织行为。而自组织行为使得集群产生出单一个体不具备的复杂样态,这就是涌现现象。如今,面对复杂化的应用场景、多样化的任务需求,受限于有限的额负载能力和续航时间,单架仿生扑翼机难以满足日渐复杂的应用场景和任务需求。而由多架仿生扑翼机组成的仿生扑翼机集群可以通过结合集群自组织行为技术,完成单一个体难以完成的复杂任务。由此,研究仿生扑翼机集群自组织行为技术是有意义的。

3.2 传统集群自组织行为模型

近三十年来,鸟群、鱼群、细菌群落等社会性生物的群体智能行为引起了相关学者们的高度关注。其中最为经典的莫过于 Reynold 等人于 1987 年提出的著名的 Boid 模型,该模型将集群自组织行为简化成了三个基本规则:

(1) 分离 (Separation), 即集群中每个个体受到其邻域内的其他个体的排斥力的矢量和, 以避免和附近的智能体碰撞;

(2) 聚合 (Cohesion), 即集群中每个个体受到其邻域内的其他个体的吸引力的矢量和, 以保持整个集群结构紧凑;

(3) 速度匹配 (Alignment), 即让集群中每个个体与其邻域内的其他个体的平均速度保持一致, 最终使整个集群的速度趋于一致。

在一致性理论的基础上, 匈牙利学者 Vicsek 等人提出了著名的 Vicsek 模型, 在这个模型可以重现许多自驱动粒子运动的统计特征。Vicsek 的想法非常简单, 自驱动粒子们为了避免“碰撞”, 其速度的方向是由其周围相邻个体运动的平均方向 (加上一定的噪声等因素) 决定的, 因此在模型中先通过对所有相邻个体的指向角度进行平均, 得到粒子的运动方向, 再依据这一运动方向, 更新系统的构象。在 Vicsek 模型中, 集群中的个体可以与其周围半径为 r 内的其他个体相互作用, 在仿真开始时, 个体位置和速度随机分布, 并且每个个体运动速度均为 v 且一直保持不变, 每一步的仿真时间为 Δt , 则个体的位置更新可以表示为:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t) \Delta t, \quad (3.1)$$

角度的更新可以表示为:

$$\theta_i(t+1) = \langle \theta \rangle_r + \Delta \theta, \quad (3.2)$$

其中 $\langle \theta \rangle_r$ 表示在个体 i 通信范围 r 内群体中个体的平均速度 (包含个体 i)。平均方向角由 $\arctan[\langle \sin(\theta(t)) \rangle_r / \langle \cos(\theta(t)) \rangle_r]$ 。其中 $\Delta \theta$ 表示噪音, 是以均匀概率随机从 $[-\eta/2, \eta/2]$ 中取得的。同时还有三个随机参数: η 、 ρ 和 v , 其中 v 是粒子在两次相邻步长之间个体运动的距离。

在前人的研究基础上, Couzin 等人提出了更能真实描述动物运动的模型。为了更准确地

刻画动物的集体运动，Couzin 等人在模型中考虑了下面的一些细节：

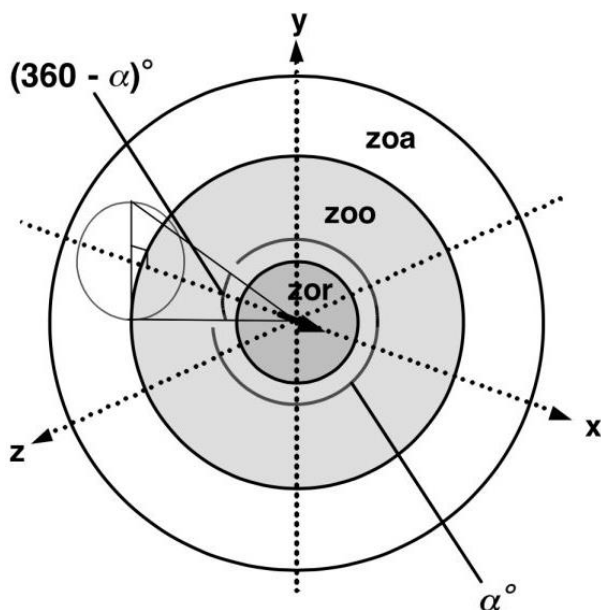


图 3.1 Couzin 模型图

（1）排斥区、取向区和吸引区：这三个区域分别对应 Boids 模型中的三个局部作用规则，在空间上按照距离粒子的中心的距离由近及远依次分布。如图 3.1 所示，粒子本身占据一定的体积，因此在一定的区域内可以视为粒子本身的领域（排斥区，zor），一旦其它粒子进入到这一区域，它将会马上倒退；而在这一区域之外，有一个取向区（zoo），这个区域主要影响粒子的速度方向，粒子受到在这一区域内的周围其它个体的影响而调整其速度方向；在更远的区域内存在着吸引区（zoa），因为群集的聚集倾向，因此距离较远的粒子会相互靠近。

（2）规则优先级：当粒子形成一个紧密的群集时，有可能一个粒子可能恰好位于一个粒子的排斥区，而又位于另一个粒子的取向区，在这种情况下，排斥永远处于最高的优先级，如果下一步粒子的运动会与其它粒子相撞，则马上退回，如果不会出现这样的情况，而是同时处于取向区和吸引区，则粒子下一步的运动可以是“速度受较近邻居影响而平均化”和“粒子被较远粒子吸引”两种规则的合成。

（3）视线范围：在 Couzin 的模型中，他们还考虑了粒子的“视线范围”，正如我们前进时无法看到身后的人那样，在取向区和吸引区内，要排除掉那些视线以外粒子的影响（如图中的 $(360 - \alpha)^\circ$ 所示）。

（4）急转弯的极限：粒子通常不会在很短的时间内发生急转弯，马上转过一个特别大的角度。通常，转过一个较大的角度会需要花费更多的时间，因此如果计算得到的前进方向与前一时刻粒子的前进方向差了一个较大的角度，即超过了单位时间内急转弯的最大极限角度 θ ，则其只能朝该方向转过 θ 角。

（5）随机噪声：在根据上述规则研究系统的演化时，同样可以考虑加入噪声的影响。

3.3 基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为技术模型

在对仿生扑翼机个体的动力学建模过程中不难发现,与多旋翼无人机不同,仿生扑翼机通过拍打两侧机翼提供向上的升力和向前的推力,因此,仿生扑翼机具有明确的运动朝向,且具有一定的速度改变最大极限角度。在实际应用场景中,环境的复杂性不能保证仿生扑翼机集群中个体之间即时通讯的流畅度,采用视觉传感器作为个体感知传感器,通过视觉分析周围个体的速度与距离即时判断自身环境更能满足当下仿生扑翼机的实际应用。与 Boid、Vicsek 等模型相比较, Couzin 模型视线范围、急转弯极限等细节更加贴近于仿生扑翼机个体的运动情况。基于上述原因,本课题在 Couzin 模型的基础上对仿生扑翼机集群自组织行为技术进行研究。

3.3.1 模型设置

对 m 维系统空间 R 中个体 i 的位置用 $q_i \in R^m$ 表示。对本文研究的仿生扑翼机集群,每个个体 i 满足动力学方程:

$$\begin{cases} \dot{q}_i = p_i \\ \dot{p}_i = u_i \end{cases}, \quad (3.3)$$

其中: $q_i, p_i, u_i \in R^m, i \in v, q_i$ 表示系统空间 R^m 中个体 i 的位置。

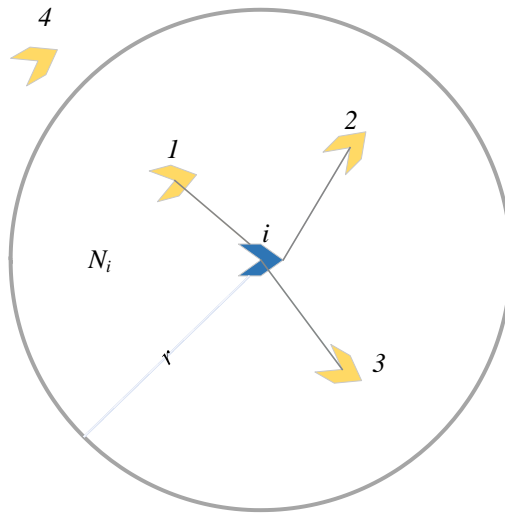


图 3.2 个体邻域

如图 3.2, 用 r ($r > 0$) 表示个体之间的感知距离, 对个体 i 感知范围内的相邻个体集表示为:

$$N_i = \{j \in v: \|q_j - q_i\| < r, j \neq i\}, \quad (3.4)$$

其中, $\|\cdot\|$ 表示二范数, 即欧几里得范数。将仿生扑翼机集群看作无向图, 用 $G(q) = \{v, \varepsilon(q)\}$ 表示, 图中的一个顶点代表集群中仿生扑翼机个体, 任意两个顶点之间形成一条边, 边的集合 $\varepsilon(q)$ 表示为:

$$\varepsilon(q) = \{(i, j) \in v \times v: \|q_j - q_i\| < r, i \neq j\} \quad (3.5)$$

建立基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为技术模型如图 3.3 所示, 图中, 黑色 V 形箭头表示仿生扑翼机个体, 灰色扇形区域表示仿生扑翼机的视觉感知范围, 视野距离为 d , 视野角度为 α 。三个圆形区域分别代表仿生扑翼机集群的排斥区、取向区、吸引区, 其中, 黄色区域 zor 表示排斥区, 其半径用 d_r 表示; 绿色区域 zoo 表示取向区, 其半径用 d_o 表示; 蓝色区域 zoa 为吸引区, 其半径用 d_a 表示。

此模型建立原则如下:

(1) 明确的视野范围: 仿生扑翼机个体具有明确的感知范围, 一定的视野距离与一定的视野角度;

(2) 局部信息交互: 仿生扑翼机个体对集群中其他个体的信息仅通过自身感知, 即通过视觉来感知周围环境, 集群中不具备全局通讯等全局信息交互功能;

(3) 具有明确的排斥区、取向区和吸引区: 仿生扑翼机集群在移动过程中, 个体具有明确的自我领域, 但有其他个体进入排斥区时, 仿生扑翼机会改变自身速度方向, 避免与其碰撞; 仿生扑翼机会观察取向区内其他个体的速度方向, 受该区域内可观测其他个体的影响而调整其速度方向; 最外层的区域为吸引区, 基于集群的聚集倾向, 仿生扑翼机通过判断吸引区中其他个体的距离来生成期望速度, 向其他个体靠近;

(4) 排斥优先级: 仿生扑翼机在由个体聚集为集群的过程中, 难免会遇到周围个体分别位于不同区域的情况, 本着避免个体之间发生碰撞的原则, 设定排斥为第一优先级; 如果周围个体分别同时处于取向区和吸引区, 仿生扑翼机个体的期望速度由“速度受较近邻居影响而平均化”和“个体被较远个体吸引”两种规则的合成。

(5) 最大速度转向角: 与多旋翼无人机不同, 仿生扑翼机通过拍打两侧机翼提供向上的升力和向前的推力, 因此, 设定仿生扑翼机具有明确的运动朝向, 且具有一定的速度改变最大极限角度, 即最大速度转向角。

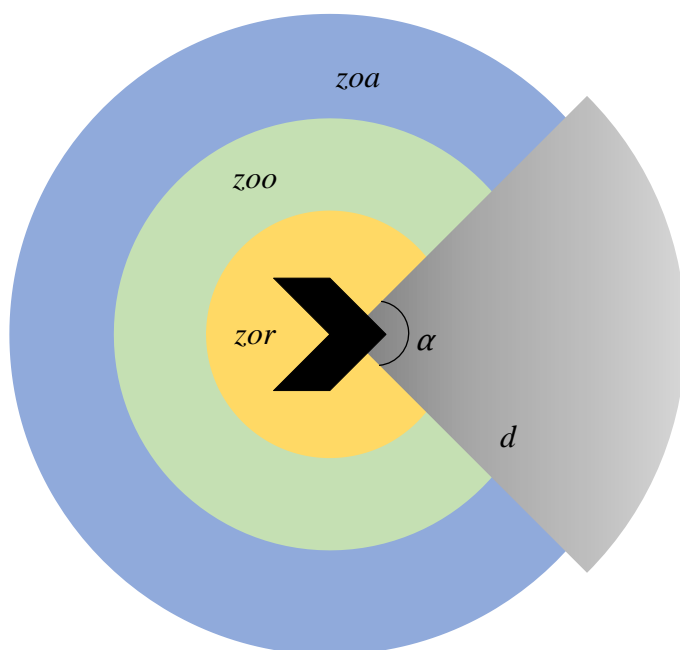


图 3.3 基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为技术模型

3.3.2 数学模型建立

该模型控制分为三个阶段分别对应于排斥区 zor, 取向区 zoo 和吸引区 zoa 三个区域。其中优先级最高的为排斥区 zor, 模型示意如图 3.3 所示, 其中黑色 V 形箭头为本节所研究的仿生扑翼机个体 i , 红色 V 形箭头为研究个体视野范围内的其他个体。

(1) 当仿生扑翼机个体 i 视野内的排斥区 zor 内有其他个体时, (忽略背后 $(360^\circ - \alpha)$ 范围内的个体), 其受到排斥区 zor 内其他个体的排斥, 其下一时刻的期望速度可以表示为:

$$v_r(t + \tau) = - \sum_{j \neq i}^{n_r} \frac{r_{ij}(t)}{|r_{ij}(t)|}, \quad (3.6)$$

其中, $r_{ij} = \frac{c_j - c_i}{|c_j - c_i|}$, c_i 和 c_j 分别表示个体 i 和 j 的位置矢量, n_r 表示位于个体 i 的排斥区 zor 内的其他个体的数量, τ 为单位时间间隔。

(2) 当仿生扑翼机个体 i 视野内的 zor 区域内没有其他个体时, 即 $n_r = 0$, 这时个体 i 对取向区 zoo 和吸引区 zoa 内的其他位于视野范围的个体做出反应。

对于取向区 zoo 内其他个体:

$$v_o(t + \tau) = \sum_{j=1}^{n_o} \frac{v_j(t)}{|v_j(t)|} \quad (3.7)$$

对于吸引区 zoa 内其他个体:

$$v_a(t + \tau) = \sum_{j \neq i}^{n_a} \frac{r_{ij}(t)}{|r_{ij}(t)|} \quad (3.8)$$

其中, n_o 和 n_a 分别为位于个体 i 可观测到的取向区 zoo 和吸引区 zoa 内的其他个体的数量, v_j 表示个体 j 的速度矢量。

最终下一时刻仿生扑翼机个体 i 的期望速度 $v_i(t + \tau)$ 定义为:

在视野范围内:

(1) 如图 3.3 中 a 所示, 若排斥区 zor 内有其他个体, 即 $n_r \neq 0$, 则:

$$v_i(t + \tau) = v_r(t + \tau) \quad (3.9)$$

(2) 若排斥区 zor 内没有其他个体, 即 $n_r = 0$, 则:

a. 如图 3.3 中 b 所示, 若取向区 zoo 内有其他个体, 吸引区 zoa 内没有, 即 $n_o \neq 0$ 且 $n_a = 0$, 则

$$v_i(t + \tau) = v_o(t + \tau) \quad (3.10)$$

b. 如图 3.3 中 c 所示, 若吸引区 zoa 区域内有其他个体, 取向区 zoo 内没有, 即 $n_a \neq 0$ 且 $n_o = 0$, 则

$$v_i(t + \tau) = v_a(t + \tau) \quad (3.11)$$

c. 如图 3.3 中 d 所示, 若 zoo 区域和 zoa 区域内均有其他个体, 即 $n_a \neq 0$ 且 $n_o \neq 0$, 则

$$v_i(t + \tau) = \frac{1}{2} [v_o(t + \tau) + v_a(t + \tau)] \quad (3.12)$$

确定下一时刻的期望速度 $v_i(t + \tau)$ 后, 仿生扑翼机个体 i 在下一时刻从当前速度 $v_i(t)$ 向期望速度 $v_i(t + \tau)$ 转动角度 θ , 这里的 θ 应该小于最大转动角度 θ_r 。

至此, 基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为技术的相关数学模型建立完毕。

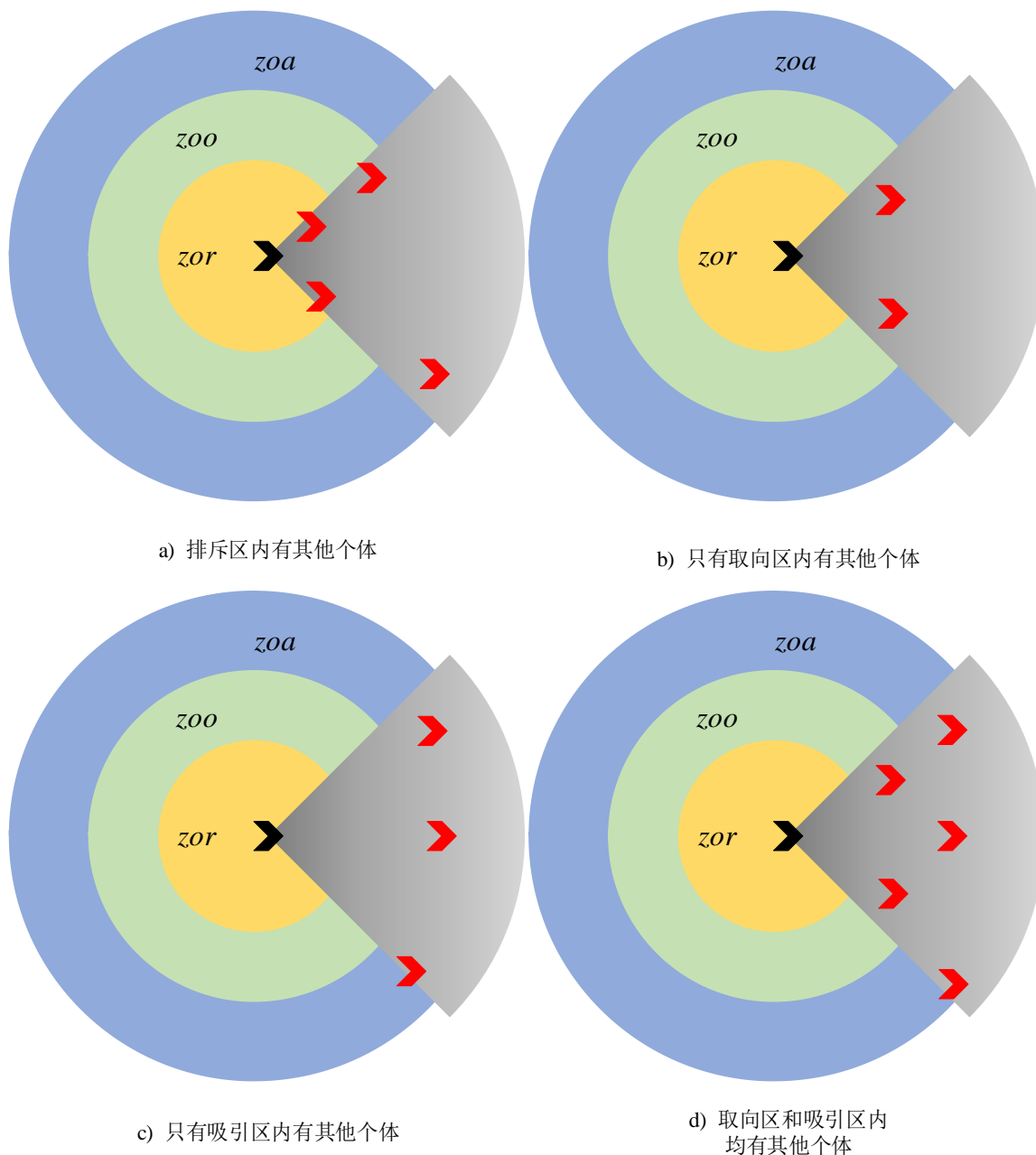


图 3.4 数学模型示意图

3.3.3 仿生扑翼机自组织行为算法设计

在建立了基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为数学模型以后, 本节将进一步在算法方面进行设计。基于 Couzin 模型的仿生扑翼机自组织行为算法步骤如下, 流程图如图 3.5 所示:

(1) 初始化: 在仿真实验三维空间中生成一定数量 n 的仿生扑翼机个体 i , 设定仿生扑翼机个体初始属性, 其初始属性包括: 随机的位置坐标 $P_i(x, y, z)$ 、随机的速度矢量 $\vec{v}_i(x, y, z)$ 、明确的视野距离 d 与视野角度 α 。随机生成的仿生扑翼机个体彼此之间有一定距离, 避免仿生扑翼机在一开始发生碰撞影响后续实验结果。

(2) 环境分析: 初始化完成后, 仿生扑翼机个体对周围环境通过视觉感知这一局部信息交互的形式进行环境分析。仿生扑翼机个体判断自身视野范围内相邻个体的数量、间隔距离与速度大小;

(3) 排斥优先: 当仿生扑翼机个体对周围环境分析后, 按照排斥优先原则, 优先处理排斥区 zor 内存在其他个体的情况, 仿生扑翼机个体按排斥区控制规律 (公式 3.6) 生成排斥速度, 规避与相邻个体发生碰撞的风险;

(4) 群体聚集: 排除掉排斥区内情况后, 对仿生扑翼机个体取向区 zoo 内存在其他个体的情况, 按取向区控制规律 (公式 3.7), 通过平均化取向区 zoo 内其他个体的速度生成取向速度; 对个体吸引区 zoa 内存在其他个体的情况, 按吸引区控制规律 (公式 3.8), 通过结合彼此之间的距离, 生成吸引速度向其他个体靠近, 保持集群的结构紧凑; 对排斥区 zoo 和吸引区 zoa 均存在其他个体的情况, 按综合控制规律 (公式 3.12) 生成综合期望速度。

(5) 时间遍历: 当设定模拟时间尚未结束时, 算法循环步骤 2、3、4, 算法循环直至模拟时间结束。

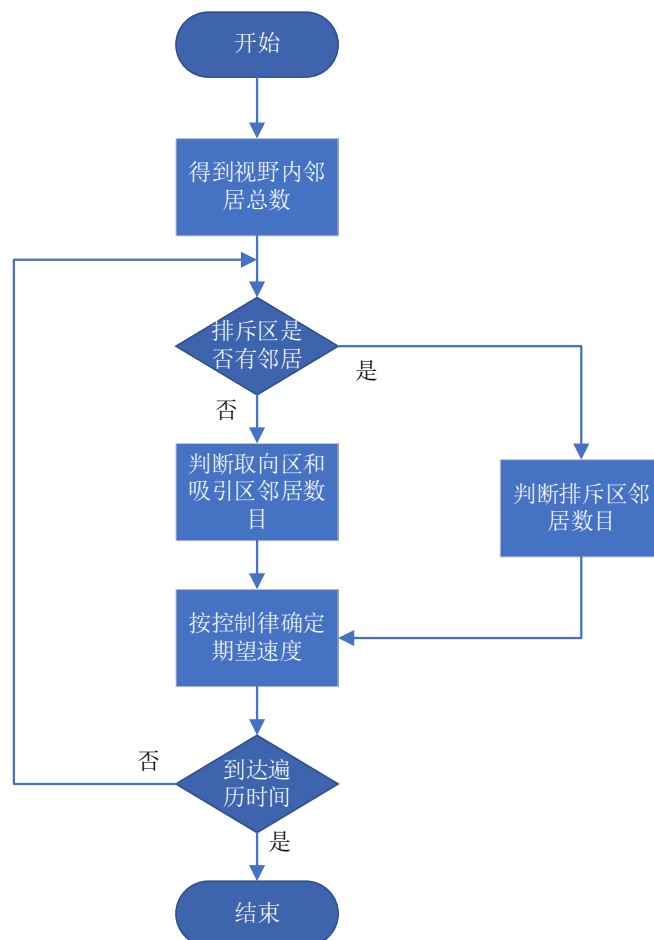


图 3.5 基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为算法流程图

基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为的算法示意图如图 3.6 所示。

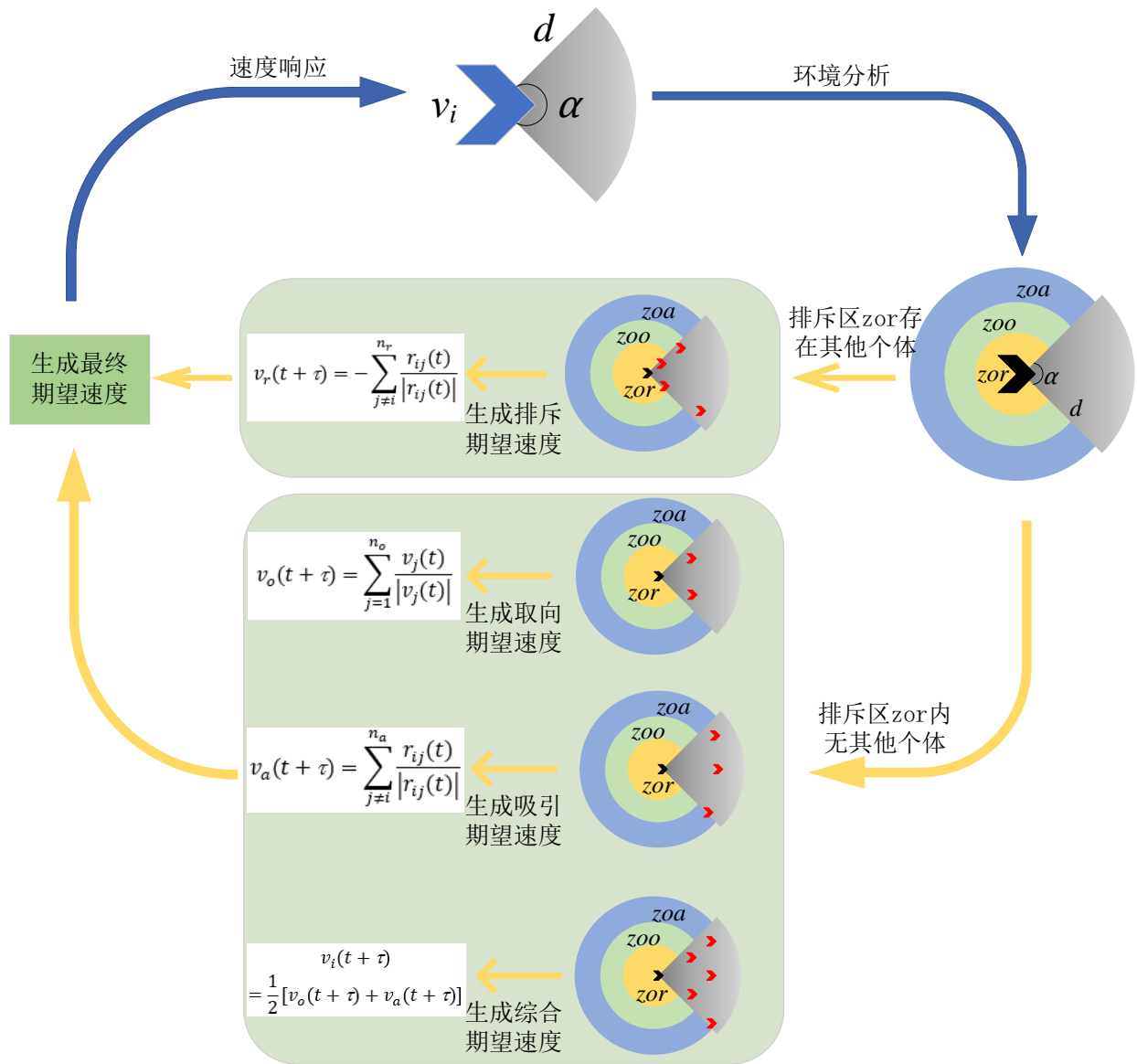


图 3.6 基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为算法示意图

参考基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为的算法示意图和流程框架图，算法的设计思路和相关控制规律的使用逻辑均被明确，下面详细介绍基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为的伪代码如算法 1 所示：

算法 1 基于 Couzin 模型的仿生扑翼机自组织行为算法

- 1: 仿生扑翼机的数量 n ，仿生扑翼机的视觉范围角度 α
- 2: 仿生扑翼机 i 的当前位置坐标 $P_i(x, y, z)$ ，仿生扑翼机 i 的当前速度向量 $\vec{v}_i(x, y, z)$
- 3: 排斥区半径 d_r ，取向区半径 d_o ，吸引区半径 d_a
- 4: **for** $i = 1 \rightarrow n$ **do**

```

5:   for  $j \neq i \rightarrow n$  do
6:      $\vec{P}_{ij}(x, y, z) \leftarrow P_i(x, y, z) - P_j(x, y, z)$ 
7:      $\alpha_{ij} \leftarrow \text{atan2}((\vec{P}_{ij}(x, y, z) \times \vec{v}_i(x, y, z)).\text{norm}(), \vec{P}_{ij}(x, y, z) \cdot \vec{v}_i(x, y, z))$ 
8:     if  $\alpha_{ij} < \alpha/2$  then
9:        $m_i \leftarrow \sum j$  //  $m_i$ 为仿生扑翼机  $i$  视野范围内相邻个体的数量
10:    end if
11:    if  $|\vec{P}_{ij}(x, y, z)| < d_r$  then
12:       $n_r \leftarrow \sum j$ 
13:    end if
14:    if  $d_r < |\vec{P}_{ij}(x, y, z)| < d_o$  then
15:       $n_o \leftarrow \sum j$ 
16:    end if
17:    if  $d_o < |\vec{P}_{ij}(x, y, z)| < d_a$  then
18:       $n_a \leftarrow \sum j$ 
19:    end if
20:  end for
21:  while  $m_i > 0$  do
22:    if  $n_r > 0$  then
23:       $\vec{V}_i \leftarrow -\sum_{j \neq i}^{n_r} \frac{\vec{P}_{ij}(x, y, z)}{|\vec{P}_{ij}(x, y, z)|}$ 
24:    else if  $n_o > 0 \ \&\& \ n_a = 0$  then
25:       $\vec{V}_i \leftarrow \sum_{j=1}^{n_o} \frac{\vec{v}_j(x, y, z)}{|\vec{v}_j(x, y, z)|}$ 
26:    else if  $n_o = 0 \ \&\& \ n_a > 0$  then
30:       $\vec{V}_i \leftarrow \sum_{j \neq i}^{n_a} \frac{\vec{P}_{ij}(x, y, z)}{|\vec{P}_{ij}(x, y, z)|}$ 
31:    else if  $n_o > 0 \ \&\& \ n_a > 0$  then
32:       $\vec{V}_i \leftarrow \frac{1}{2} (\sum_{j \neq i}^{n_a} \frac{\vec{P}_{ij}(x, y, z)}{|\vec{P}_{ij}(x, y, z)|} + \sum_{j=1}^{n_o} \frac{\vec{v}_j(t)}{|\vec{v}_j(t)|})$ 
33:    else
34:       $\vec{V}_i \leftarrow \vec{v}_i(x, y, z)$ 
35:    end if
36:  end while
37: end for
38: return  $\vec{V}_i$  //  $\vec{V}_i$ 是仿生扑翼机  $i$  的期望速度

```

3.3.4 算法验证

建立相关模型及算法后,本课题在 Spyder (Anaconda3) 平台上采用 Python3 语言对上述算法进行了调试运行验证,其结果如图 3.7 所示。

本次调试采用 8 个深蓝色粒子拟作为 8 台仿生扑翼机个体,浅蓝色箭头表示仿生扑翼机个体的速度大小和速度方向,速度越大的箭头越长,箭头所指方向为仿生扑翼机当前运动方向。

如图 3.7, $t=0s$ 时,初始化仿生扑翼机集群,在三维空间中随机生成 8 个深蓝色粒子,随机生成粒子的位置坐标与速度矢量,随后按照算法 1 开始算法调试运行;

当调试程序运行至 25s 时,从图中可以看到,三维空间中相邻粒子受自组织行为规则逐渐聚集,能明显观测到 8 个深蓝色粒子分别聚集成 2 个小集群,通过不同粒子浅蓝色箭头的朝向和长短可以看出,在同一集群中,相邻粒子之间速度矢量的大小与方向相近,说明集群受吸引区控制规律和取向区控制规律作用。可以观测到,与 $t=0s$ 时相比,左侧相对靠近的 5 个个体最终形成小集群时只有 3 个个体,通过两步对比认为,该情况的出现为粒子受视觉范围规律作用的原因,部分粒子由于初始运动方向的原因,未能观测到位置相距较近但处于视野盲区的个体,因此出现图中情况;

当调试程序运行至 50s 时,从图中可以看到,有 6 个粒子自组织聚集为集群,通过不同粒子浅蓝色箭头的朝向和长短可以看出,该集群中 6 个粒子速度矢量的大小与方向相近。而另外两个粒子虽然与集群有一定的距离,且集群处于粒子的视野盲区,但集群整体的运动方向是向粒子靠拢的,避免了单向视野信息导致集群分离的情况;

当调试程序运行至 100s 时,从图中能明显观测到 8 个深蓝色粒子聚集为同一集群,集群中个体之间彼此保持一定距离,保持了集群结构的紧凑,且集群中所有个体具有近似相同的速度矢量,集群向同一方向以相似的速度保持运动结构的稳定性,可以认为仿生扑翼机集群的自组织行为得以涌现。

从以上算法调试过程能看出,在算法运行前期,粒子受吸引区规律,向视野范围中相近粒子靠拢,从单一粒子向集群结构靠齐;随着粒子之间彼此距离变小,粒子靠排斥优先的原则,受排斥区规律控制,彼此之间保持在一定距离,形成一定稳定结构的集群;受取向区控制规律,同一集群具有相近的运动方向与相似的运动速度,避免了集群出现结构分散或内部碰撞的情况,保证了集群结构的稳定性。

总的来看,本次算法调试验证了粒子受上述提出控制规律的作用下具有良好的自组织行为趋向,基于视觉感知的局部信息交互方式在集群过程中仍能保证个体之间对周围环境的感知分析,最终,初始状态有着不同运动状态的粒子在该算法模型的控制下,自组织聚集为同一集群,集群中个体具有相近的运动方向与相似的运动速度,自组织行为得以涌现。综上,通过算法调试的结果与分析认为,本课题对基于 Couzin 模型的仿生扑翼机自组织行为技术模型设计较为成功。

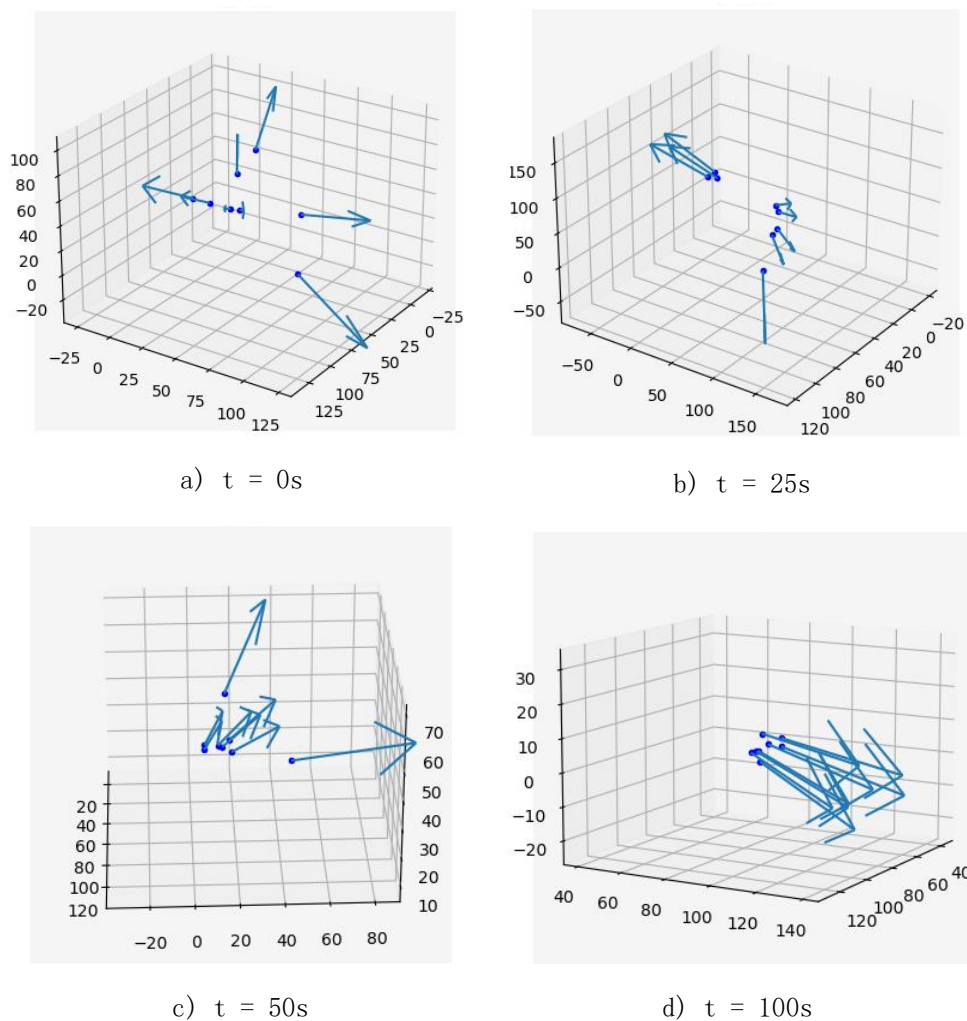


图 3.7 基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群算法调试图

3.4 小结

本章介绍了三种传统集群自组织行为模型，通过对比，最终选用了 Couzin 模型作为仿生扑翼机集群自组织行为技术的研究模型。在其基础上，本章建立了在空旷环境中基于局部交互的仿生扑翼机集群自组织行为技术模型，提出了相关的算法并对其进行了编程调试验证，调试结果表明该模型具有可行性，可以促使仿生扑翼机集群实现自组织行为。

4 基于视野范围的仿生扑翼机自组织行为技术优化算法

4.1 引言

在上章对集群自组织行为技术的研究中,通常默认集群中个体之间的感知是即时且畅通无阻的。然而在实际应用场景中,受传感器感知距离、实际环境复杂性、外界即时干扰介入等因素的影响,以往的集群自组织行为技术难以直接应用于仿生扑翼机集群。针对上述问题,考虑到仿生扑翼机的负载能力与续航能力,本课题选用视觉感知作为仿生扑翼机不同个体之间的感知方法,在本章对实际复杂环境中存在障碍物这一情况在 Couzin 模型的基础上提出了一种集群自组织行为技术优化算法。

4.2 基于避障性的自组织行为优化算法

在自然界中,鱼群在水里游动过程中难免会遇到礁石,鸟群在编队飞行过程中不得不绕开原定路径上的树木;在实际生活中,群体无人机表演已经广泛商用,然而如何在高楼大厦中穿梭而保持编队表演成为一大难点。考虑到上述问题,本节将参考自然界中生物的避障性,在 Couzin 模型的基础上提出一种针对复杂环境仿生扑翼机集群自主避障的自组织行为技术优化算法。

4.2.1 集群避障性原因分析

仿生扑翼机集群在空旷环境(无障碍物环境)中飞行时,初始化其状态,随机生成集群中每个个体的速度大小与速度方向,其加速度为零,个体随机分布在指定空间中,如图 4.1 所示。图中圆圈代表集群中的仿生扑翼机个体,箭头所指方向表示该个体的运动方向,箭头的长度表示该个体的速度大小。箭头越长表示该个体运动速度越大。

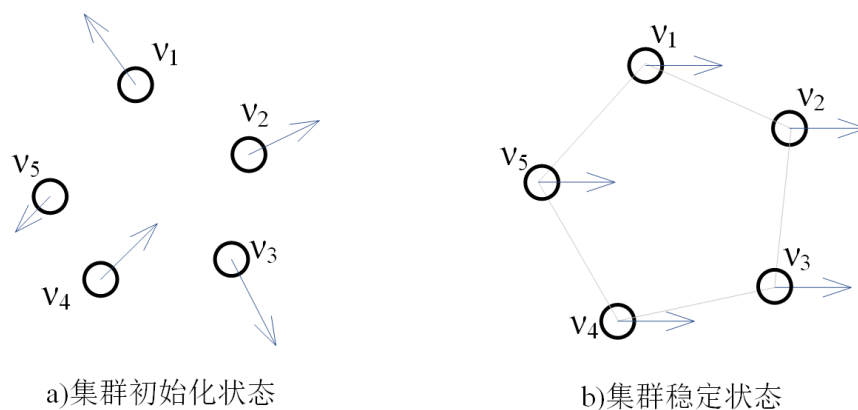


图 4.1 集群运动状态图

在自组织行为技术的交互规则作用下,集群中个体结合相邻个体之间的距离重新评估自身状态,改变自身运动速度大小与移动方向,最终集群达到稳定状态。此时,集群中不同个体具有相同大小的运动速度以及一致的运动方向。

然而,在实际复杂环境中,仿生扑翼机集群在群体移动过程中难免会遇到障碍物,由于集群中不同个体相对于障碍物所处的位置不同其受到障碍物的影响也不同,当面临障碍物时,不同的响应将导致不同个体的速度不同,集群中接近障碍物的个体可能会出现撞上障碍物的情况,出现个体损坏的情况。图 4.2 展示了集群在观测到障碍物的瞬间,不同个体之间的运动状态图。个体 2 与个体 3 在检测到障碍物后,如果个体继续按照原定移动方向继续向前飞行,势必将撞上障碍物。为了避免这一情况,个体应考虑障碍物对个体的影响。如图 4.2 中红色箭头所示,障碍物对个体 2 和 3 分别产生排斥力 F_2 与 F_3 ,排斥力方向从障碍物中心点指向个体 2 和个体 3 所在的位置。与多旋翼无人机不同,仿生扑翼机在飞行过程中具有明确的正方向,对转向、调头等移动方式的实现需要一定的转弯半径空间;而且,考虑到仿生扑翼机的视野范围问题,当个体 2 观测到障碍物而个体 1 没有观测到时,如果个体 2 按照排斥力 F_2 方向直接远离障碍物,难免会与保持原定飞行状态的个体 1 发生碰撞。因此,针对上述两种情况,在此提出一种基于视野范围、适用于仿生扑翼机集群的避障性自组织行为技术算法。

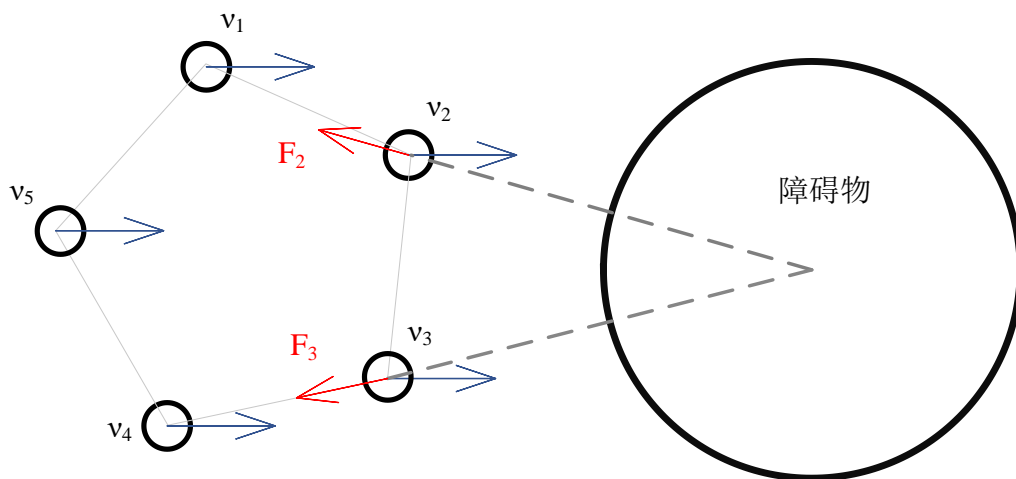


图 4.2 集群遇障运动状态图

4.2.2 个体避障策略

根据上述情况,在提出个体避障策略前需要明确几点:

- (1) 仿生扑翼机个体通过视觉感知周围环境;
- (2) 仿生扑翼机个体具有明确的视野范围,如视野角、观测距离等;
- (3) 仿生扑翼机对调头、转向等移动方式的实现需要一定的转弯半径,即仿生扑翼机的速度旋转角度 θ 不能超过最大旋转角度 θ_r 。

如图 4.3,仿生扑翼机个体具有明确的视野范围。黑色 V 形箭头表示仿生扑翼机,具有明确的朝向指示,灰色扇形区域表示仿生扑翼机的视野范围,其中, d 为仿生扑翼机个体视野距离, α 为仿生扑翼机个体视野角度。当仿生扑翼机个体观测到障碍物时,个体会基于与

障碍物的距离计算出一个排斥速度，结合自身目前的运动速度生成下一时刻的期望速度，从而避免与障碍物发生碰撞。如图 4.5 所示，蓝色箭头表示个体当前运动速度矢量 u ，红色箭头表示个体观测到障碍物后计算出的排斥速度矢量 f ，绿色箭头则为个体的下一时刻期望速度 u' ，其中 $u' = f + u$ 。当然，该排斥速度向量的优先级应高于集群自组织行为，这样设定的原因如下：

- (1) 保证个体不会保持集群原有移动状态与障碍物发生碰撞，使其独立于集群；
- (2) 观测到障碍物的个体其速度控制规律独立于集群，率先发生运动状态的变化，后续尚未观测到障碍物的个体根据前述个体的即时速度及时修正自身速度大小与方向。

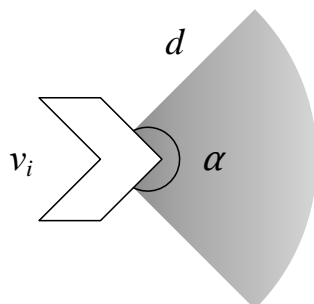


图 4.3 仿生扑翼机个体视野表示图

如此，“前方有障碍物”这一感知信息在仿生扑翼机集群中实现浪涌式交互，相邻个体之间实现感知共融，尚未观测到障碍物个体间接得到“前方有障碍物”这一信息，仿生扑翼机集群将涌现出避障这一自组织行为。

4.2.3 基于避障性的自组织行为技术模型

本节将基于 Couzin 模型提出一个具有避障性的改进。我们采用人工场势函数的形式在原有控制规律中加入系统的感知域即视野模型，对障碍物，我们采用斥力势函数来表示其对仿生扑翼机个体的影响：

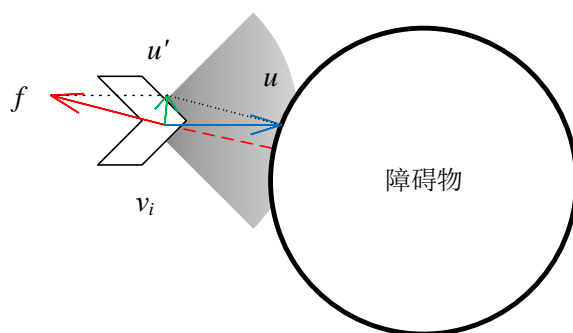


图 4.4 个体避障示意图

$$U_{rep}(i) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{D(i)} - \frac{1}{Q^*}\right)^2, & D(i) \leq Q^*, \\ 0, & D(i) > Q^* \end{cases} \quad (4.1)$$

其中, $D(i)$ 表示个体 i 与其最近障碍物的距离, η 表示斥力增益, Q^* 表示障碍物的作用距离阈值, 大于此距离的障碍物不会对仿生扑翼机产生斥力影响。

基于上述, 提出基于避障性的自组织行为技术模型描述如下:

$$\vec{d}_i(t + \tau) = \vec{d}_i(t) + \frac{1}{m} \cdot \tau \cdot \sum_{j=1}^n \nabla U_j(i), \quad (4.2)$$

其中, $\vec{d}_i(t)$ 为在 t 时刻时个体 i 的速度矢量, τ 为时间间隔, m 为个体质量, $\nabla U_j(i)$ 为障碍物 j 对个体 i 的斥力。

4.2.4 算法设计

对仿生扑翼机集群进行基于的避障性自组织行为技术提出之前, 需要明确以下几点:

(1) 与传统 Couzin 模型相同, 集群中无领导者、个体之间完全相同无差异、集群中个体之间只存在局部交互;

(2) 仿生扑翼机在运动过程中具有明确的朝向与视野范围, 速度改变具有明确的最大旋转角;

(3) 障碍物不会凭空出现, 且障碍物相对于仿生扑翼机集群绝对静止;

(4) 仿生扑翼机个体的避障性原则应处于最高优先级。

基于上述几点, 算法详细步骤如下:

(1) 初始化: 在三维空间中生成一定数量 n 的仿生扑翼机个体 i , 设定仿生扑翼机个体初始属性, 其初始属性包括: 随机的位置坐标 $P_i(x, y, z)$ 、随机的速度矢量 $\vec{v}_i(x, y, z)$ 、明确的视野距离 d 与视野角度 α , 随机位置生成障碍物, 障碍物具有明确的碰撞属性和实体体积。随机生成的仿生扑翼机个体彼此之间、与障碍物之间有一定距离, 避免仿生扑翼机在一开始发生碰撞影响后续实验结果。

(2) 环境分析: 初始化完成后, 仿生扑翼机个体对周围环境通过视觉感知这一局部信息交互的形式进行环境分析。仿生扑翼机个体判断自身视野范围内障碍物情况、相邻个体的数量、间隔距离与速度大小;

(3) 避障性原则: 当仿生扑翼机个体在视觉范围内发现障碍物时, 应优先生成避障速度 (公式 4.2), 改变运动方向绕开障碍物, 避免与障碍物发生碰撞。

(4) 排斥优先: 在感知到周围环境中运动方向没有障碍物后, 按照排斥优先原则, 优先处理排斥区 zor 内存在其他个体的情况, 仿生扑翼机个体按排斥区控制规律 (公式 3.6) 生成排斥速度, 规避与相邻个体发生碰撞的风险;

(5) 群体聚集: 排除掉排斥区内情况后, 对仿生扑翼机个体取向区 zoo 内存在其他个体的情况, 按取向区控制规律 (公式 3.7), 通过平均化取向区 zoo 内其他个体的速度生成取向速度; 对个体吸引区 zoa 内存在其他个体的情况, 按吸引区控制规律 (公式 3.8), 通过结合彼此之间的距离, 生成吸引速度向其他个体靠近, 保持集群的结构紧凑; 对排斥区 zoo 和

吸引区 z_{oa} 均存在其他个体的情况，按综合控制规律（公式 3.12）生成综合期望速度。

（6）时间遍历：当设定模拟时间尚未结束时，算法循环步骤 2、3、4、5，算法循环直至模拟时间结束。

算法流程图如图 4.5 所示，算法示意图如图 4.6 所示。

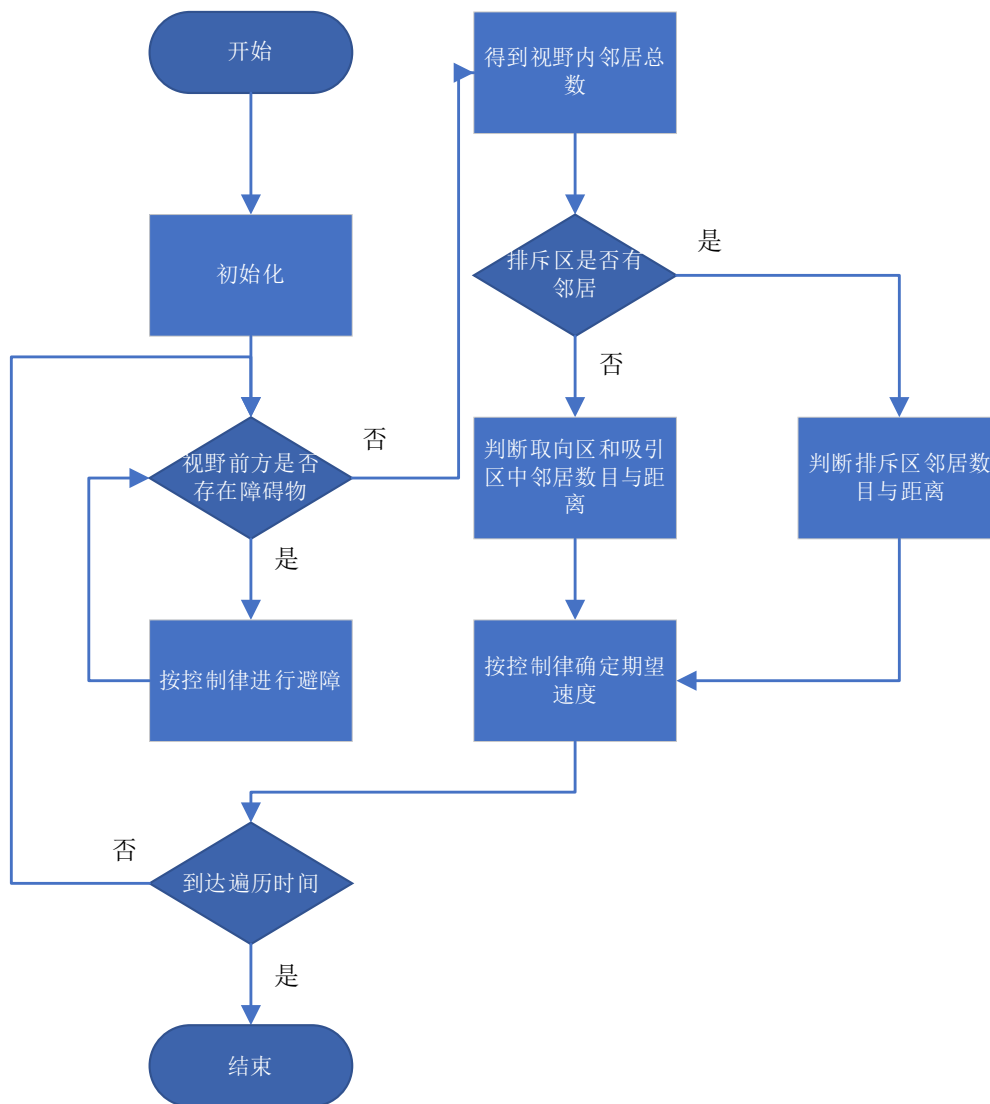


图 4.5 避障性算法流程图

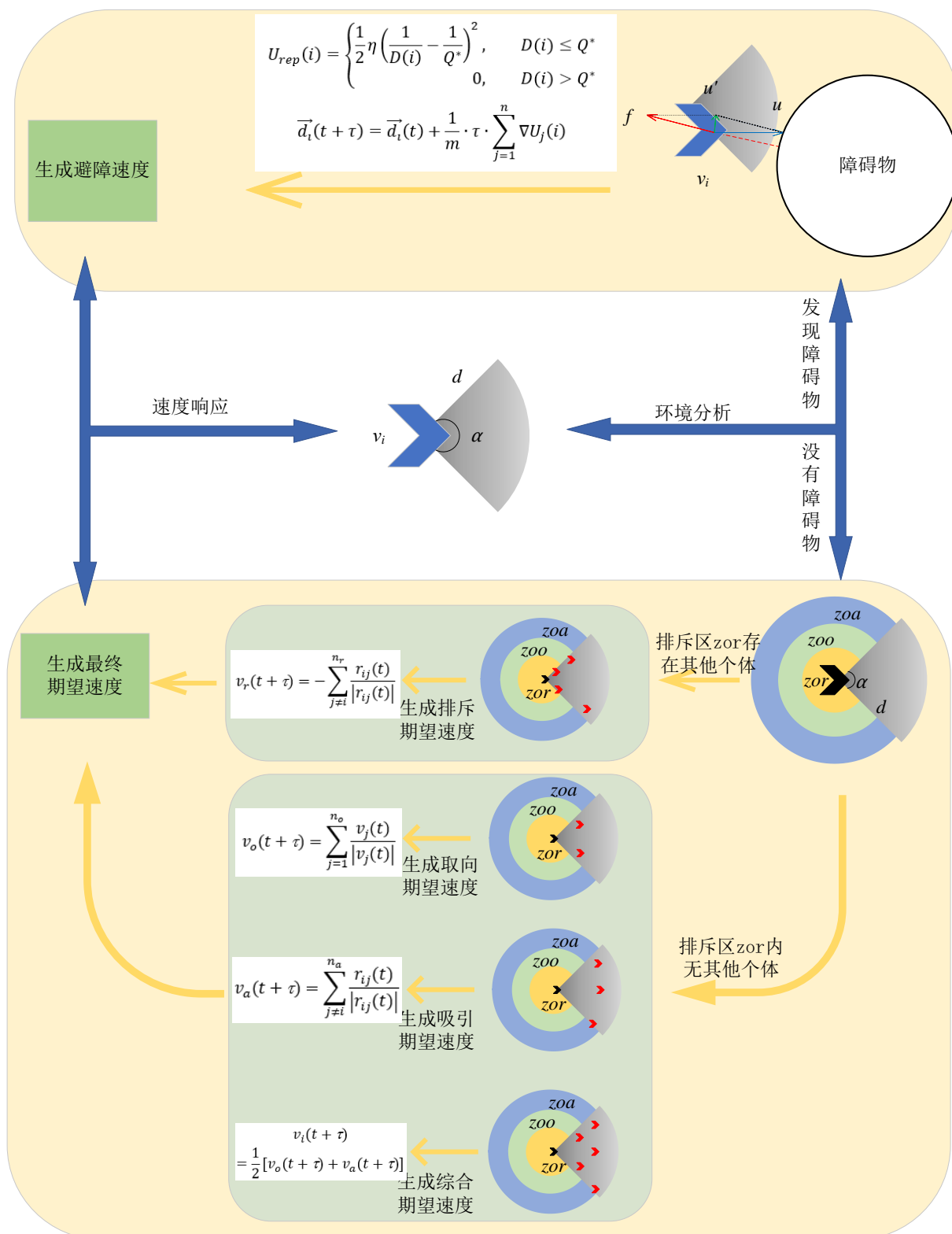


图 4.6 基于避障性的仿生扑翼机自组织行为技术算法示意图

算法优化部分的伪代码如算法 2 所示：

算法 2 基于避障性的仿生扑翼机自组织行为优化算法

```

1:  仿生扑翼机的数量  $n$ ，仿生扑翼机的视觉范围角度  $\alpha$ 
2:  仿生扑翼机  $i$  的当前位置坐标  $P_i(x, y, z)$ ，仿生扑翼机  $i$  的当前速度向量  $\vec{v}_i(x, y, z)$ 
3:  障碍物位置坐标距离  $P_j(x, y, z)$ ，斥力增益  $\eta$ ，避障作用距离阈值  $Q^*$ ，时间跨步  $\tau$ 
4:  仿生扑翼机质量  $m$ ，算法 1 生成的期望速度  $\vec{V}_i(t)$ 
5:  for  $i$  do
6:     $\vec{P}_{ij}(x, y, z) = P_i(x, y, z) - P_j(x, y, z)$ 
7:    if  $|\vec{P}_{ij}(x, y, z)| < Q^*$  then
8:       $U_{rep}(i) \leftarrow \frac{1}{2}\eta \left( \frac{1}{D(i)} - \frac{1}{Q^*} \right)^2$  //  $U_{rep}(i)$  为仿生扑翼机  $i$  所受斥力势能
9:    else
10:      $U_{rep}(i) = 0$ 
11:    end if
12:     $\vec{V}_i(t + \tau) \leftarrow \vec{V}_i(t) + \frac{1}{m} \cdot \tau \cdot \sum_{j=1}^n \nabla U_j(i)$ 
13:  end for
14: return  $\vec{V}_i(t + \tau) / |\vec{V}_i(t + \tau)|$  是仿生扑翼机  $i$  的避障期望速度

```

4.3 小结

本章在第三章的基础上，结合实际环境的复杂性，通过分析仿生扑翼机个体避障策略，建立了相关的数学模型以及算法模型，提出了基于避障性的仿生扑翼机集群自组织行为模型。结合实际情况的仿生扑翼机集群自组织行为模型具有明确的研究意义，更有利于相关技术的实体化。

5 系统仿真设计与实验

前面章节阐述了课题研究的理论部分，本章将在前述的基础上，在 NetLogo 平台搭建仿真环境，针对上述不同的模型算法，用 NetLogo 平台进行仿真实验，验证上述仿生扑翼机自组织行为技术模型算法的可行性。

5.1 仿真实验环境

本课题系统仿真实验在 Windows 环境中进行，具体参数如表 5-1 所示：

表 5.1 仿真实验环境及参数表

设备	数量	硬件参数	软件参数
笔记本电脑 (仿真平台)	1	Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @2.20GHz,24GB RAM Intel(R) UHD Graphics 630 NVIDIA GeForce GTX 1060	NetLogo 6.2.2 NetLogo 3D 6.2.2

本课题系统仿真实验主要在 NetLogo 系列软件中进行仿真验证。仿真实验中相关实验参数与步骤将在后面章节详细说明。

NetLogo（图 5.1）是一个用来对自然和社会现象进行仿真的可编程建模软件，它是由美国西北大学的 Uri Wilensky 在 1999 年发起的，由连接学习和计算机建模中心（CCL）负责持续开发。

软件提供一个可用于建模的 2 维或 3 维环境，用户通过基于 Java 的 NetLogo 编程语言，搭建仿真环境，构建自然或社会群体，通过编写控制算法对自然界或社会中群体行为进行仿真模拟。

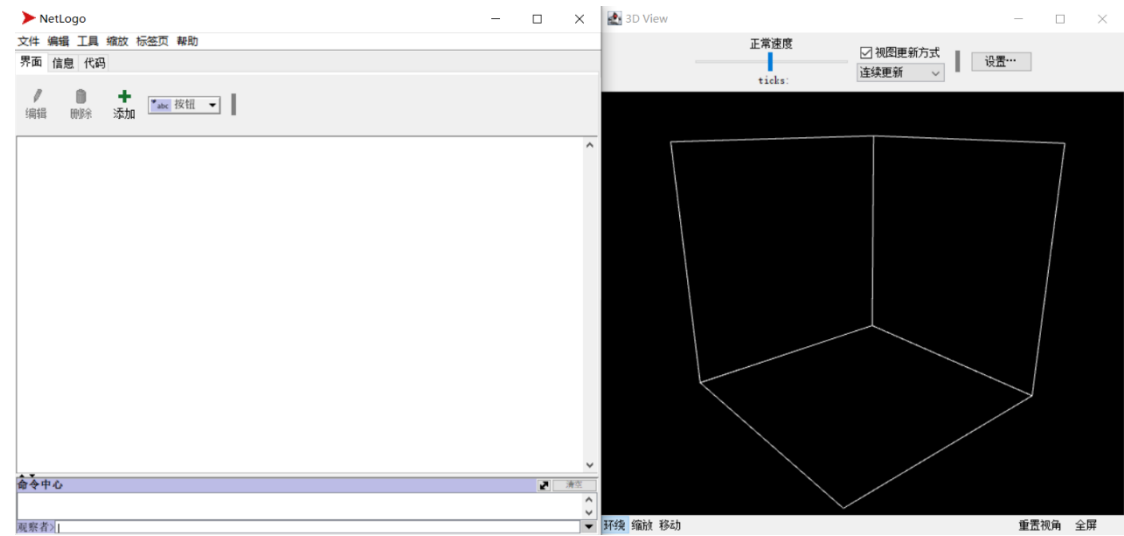


图 5.1 NetLogo 平台

5.2 环境搭建

对基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为模型的仿真实验环境如图 5.2 a) 所示，在 NetLogo 三维环境中生成一个 $24*24*24$ （单位：一个方块长度）的空间。其中，棕色系方块表示空间底部，浅蓝色系方块表示空间顶部，绿色系方块表示空间四周边界，空间边界不具备明确的碰撞属性。

对基于避障性的放生扑翼机集群自组织行为模型的仿真实验环境如图 5.2 b) 所示，在空旷环境的基础上，在三维空间中随机位置生成 20 个 $3*3$ 的深蓝色系方块拟作为实际复杂环境空间中的障碍物，障碍物具有明确的碰撞属性。

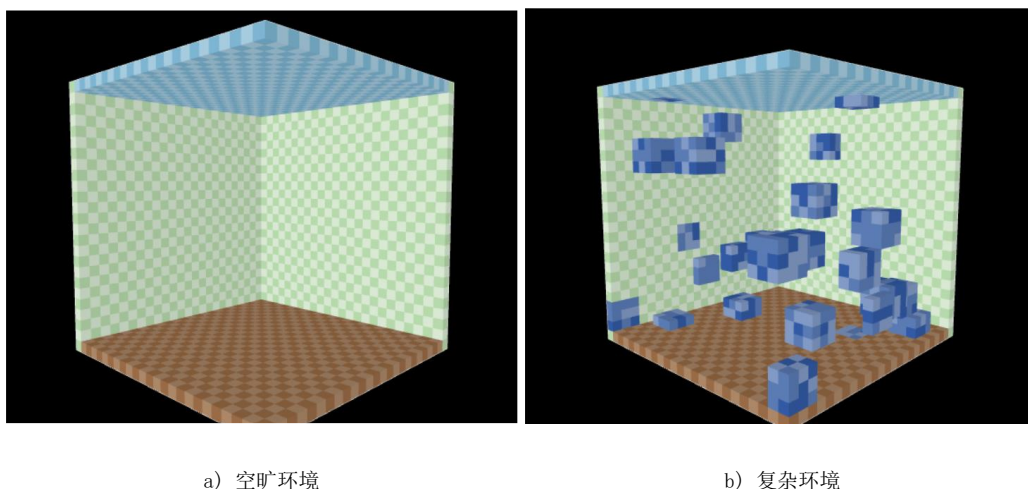


图 5.2 实验环境

5.3 基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为技术仿真

5.3.1 仿真环境设定

进行仿真实验之前，对仿生扑翼机集群自组织行为进行仿真实验参数设定，仿真实验参数如表 5.1 所示。

考虑到仿生扑翼机所能搭载的视觉传感器^[20]，设定仿生扑翼机个体的视野角度 α 为 90° ，视野距离为 3 个单位方块长度。由第二章中对仿生扑翼机集群行为阵型的设计，设定排斥区、取向区、吸引区半径如表 2.1 所示。结合实际情况，设定仿生扑翼机个体的运动参数：最大速度、最大加速度、最大速度转向角如表 2.1 所示。

为了较为真实地模拟实际应用场景中的碰碰行为，在实验中对仿生扑翼机进行了“坠机”设定，当仿生扑翼机个体之间相互碰撞时，发生碰撞的仿生扑翼机会“坠落”到空间底部。

表 5.1 基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为技术仿真实验参数表

参数名称	参数符号	参数数值	单位（符号）
仿生扑翼机个体数量	n	50	个
仿生扑翼机个体大小	l	0.75	一个单位方块长度（ x ）
仿生扑翼机个体视野距离	d	3.0	一个单位方块长度（ x ）
仿生扑翼机个体视野角度	α	90	度（ $^{\circ}$ ）
排斥区半径	d_r	1.34	一个单位方块长度（ x ）
取向区半径	d_o	2.50	一个单位方块长度（ x ）
吸引区半径	d_a	5.00	一个单位方块长度（ x ）
最大加速度	a_{max}	1.0	一个单位每平方秒（ x/s^2 ）
最大速度	v_{max}	3.0	一个单位每秒（ x/s ）
最大速度转向角	θ_{max}	120	度（ $^{\circ}$ ）

5.3.2 仿真实验

（1）实验初始化：

如图 5.3 所示，在三维空间中随机位置坐标生成 50 个紫色 V 形粒子，拟作 50 台仿生扑翼机个体，粒子具有明确的碰撞属性。生成过程中，粒子不会生成在边界方块内，粒子的初始速度大小、位置坐标、运动方向朝向均随机生成，粒子的初始加速度为 0。

此时，环境中坠机数量为 0。

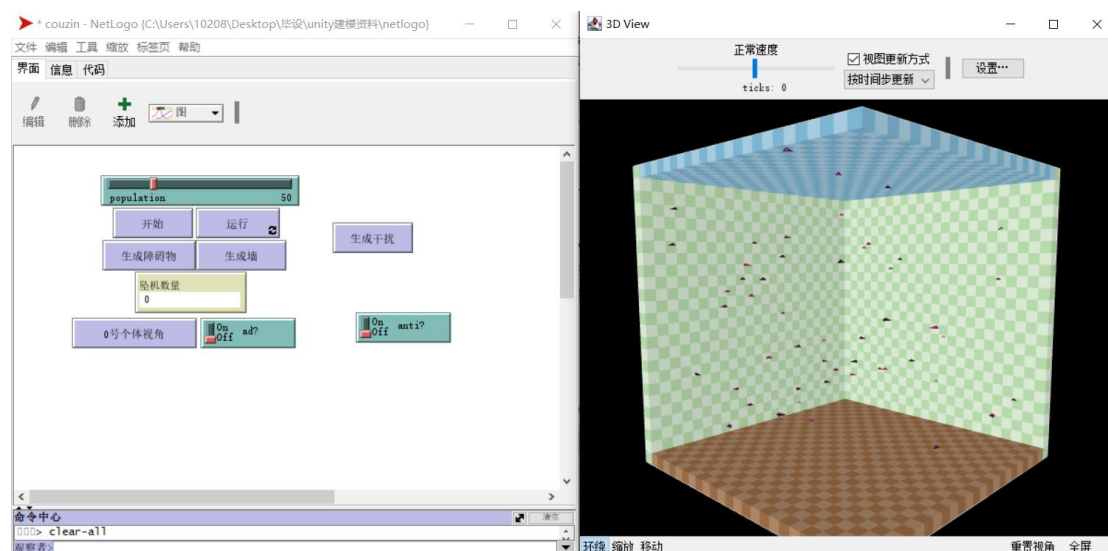
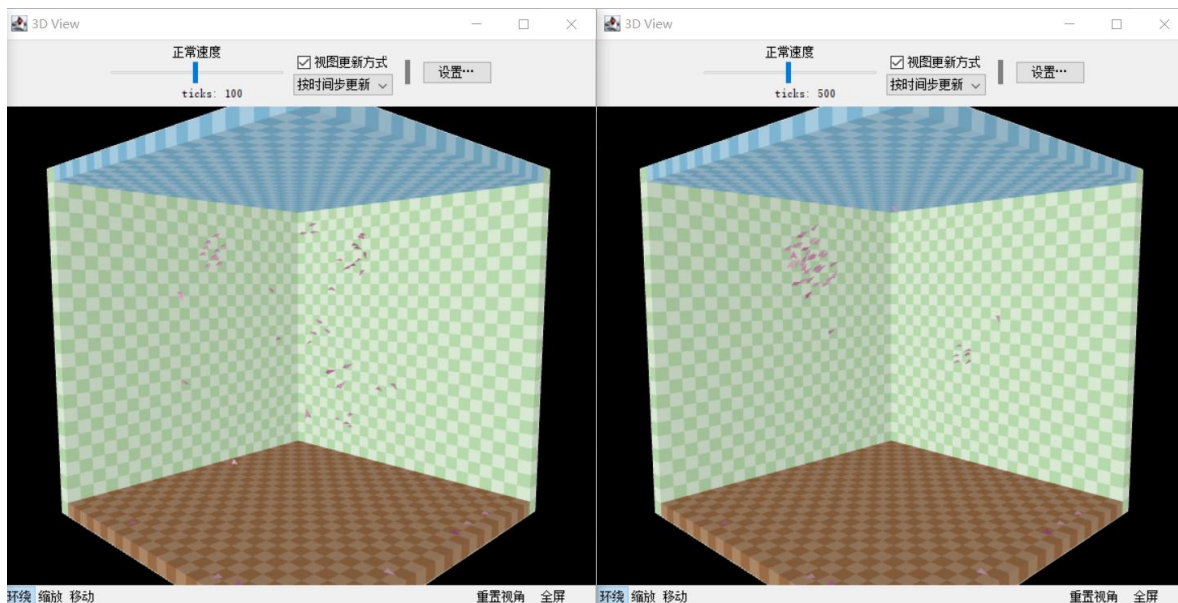


图 5.3 仿真实验初始化

（2）实验运行：

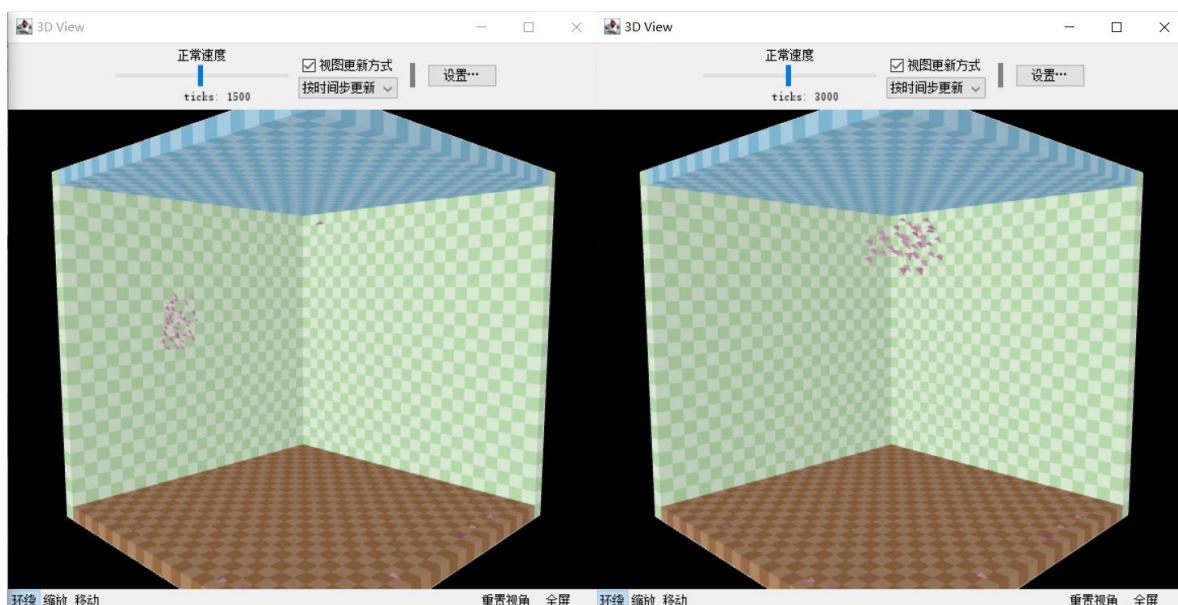
按第三章中提出的基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为模型对 NetLogo 中拟

作为仿生扑翼机个体的紫色 V 形粒子进行集群控制。为了方便观测集群中个体速度，V 形粒子的朝向表示个体的运动方向，粒子颜色的深浅会随个体速度的大小发生变化，速度越大其颜色越深；



a) ticks = 100

b) ticks = 500



c) ticks = 1500

d) ticks = 3000

图 5.4 基于 Couzin 模型的仿真扑翼机集群自组织行为模型实验图

如图 5.4 a) 所示，当软件环境时间步 (ticks) 运行到 100 时，受控制规律影响，个体之

间相互聚集，形成几个小集群分布于空间中。

如图 5.4b) 所示，当软件环境时间步运行到 500 时，同图 5.4a) 相比，除了少数个体，环境中大部分个体形成一大一小两个集群分布于空间中，可以看到同一集群中个体之间的运动方向相近，速度大小相似。

如图 5.4c) 所示，当软件环境时间步运行到 1500 时，可以观测到只有一个个体尚在集群之外，其余个体形成一个集群，集群中个体之间的运动方向相近，速度大小相似。

如图 5.4d) 所示，当软件环境时间步运行到 3000 时，环境中尚未发生“坠机”的个体均处于同一集群中，集群中个体具有相近的运动方向以及相似的速度大小。

至此，结束仿真实验。

(3) 实验分析：

通过上述仿真实验，与初始化时仿真环境比较不难看出仿真实验过程中空间中有少数“坠落”到底部的紫色粒子，说明发生了仿生扑翼机个体碰撞现象。对此，本课题生成了对“坠机”的监视图，如图 5.5 所示。监视图横坐标为时间步 (ticks)，单位为 1 步，纵坐标为坠机数量，单位为 1 个。由监视图可以发现，坠机数量在实验开始时发生了激增，在数值激增到 10 后坠机数量随时间步变化并无变化。分析认为，由于仿真实验过程中，开始时个体的速度、位置坐标等属性为随机生成，难免存在随机生成时个体之间相距过近来不及生成排斥速度而发生碰撞的情况。

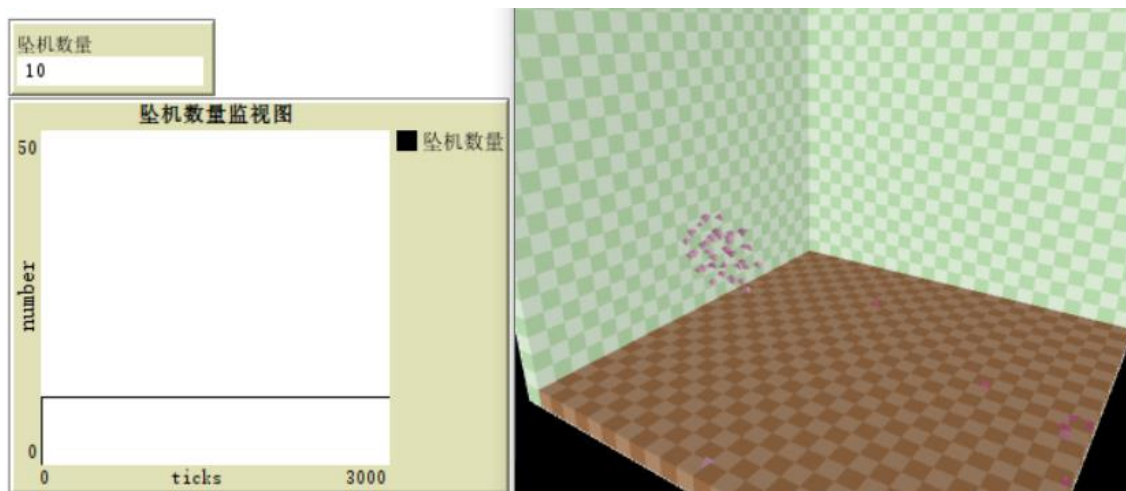


图 5.5 坠机数量监视图

在此以后，本课题重复了 5 次仿真实验验证在后续实验过程中是否存在坠机数量的变化，确保实验的准确性，避免偶然性。实验数据如表 5.1 所示。

在重复多组仿真实验后，可以发现，坠机数量的激增时间均在实验刚开始时 (ticks=0)，且在实验后续进行过程中，坠机数量没有发生变化。因此，从多组仿真实验结果来看，上述的坠机情况的分析是合理的。

表 5.2 基于 Couzin 模型的仿真扑翼机集群自组织行为仿真实验数据表

实验序号	坠机数量（个）	激增所处时间	后续有无坠机情况
1	10	ticks = 0	无
2	7	ticks = 0	无
3	7	ticks = 0	无
4	5	ticks = 0	无
5	4	ticks = 0	无

综上所述，仿生扑翼机个体在仿真实验过程中，按照基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为模型，自行聚集为统一集群，具有相近的速度方向与相似的速度大小，集群自组织行为得以涌现。因此，认为基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为技术是理论可行的

5.4 基于避障性的仿生扑翼机集群自组织行为优化算法仿真

本节将在第三节的基础上，结合第四章提出的基于避障性的仿生扑翼机集群自组织行为优化模型，对仿生扑翼机集群的避障性进行仿真实验。

5.4.1 仿真环境设定

基于第三节仿真实验的环境，在空间中随机位置添加了 20 个蓝色障碍物，蓝色障碍物与空间中的边界均具有明确的碰撞属性。仿生扑翼机个体与蓝色障碍物或空间边界发生碰撞后均会“坠机”，掉入空间底部。仿真实验其他设定同 5.3.1 相同。

5.4.2 仿真实验

- (1) 实验初始化：
- 如图 5.6 所示，在三维空间中随机位置坐标生成 50 个紫色 V 形粒子，拟作 50 台仿生扑翼机个体，粒子具有明确的碰撞属性；随机坐标生成 20 个蓝色方块，拟作为障碍物。生成过程中，粒子不会生成在边界或障碍物方块内，粒子的初始速度大小、位置坐标、运动方向朝向均随机生成，粒子的初始加速度为 0。
- 此时，环境中坠机数量为 0。

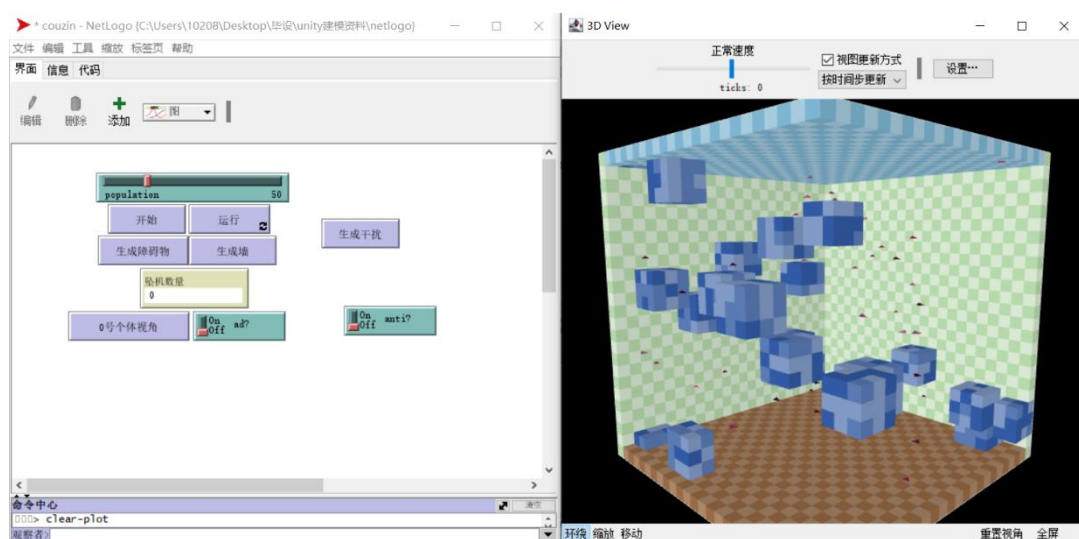


图 5.6 基于避障性的仿生扑翼机集群自组织行为实验初始化

(2) 实验运行:

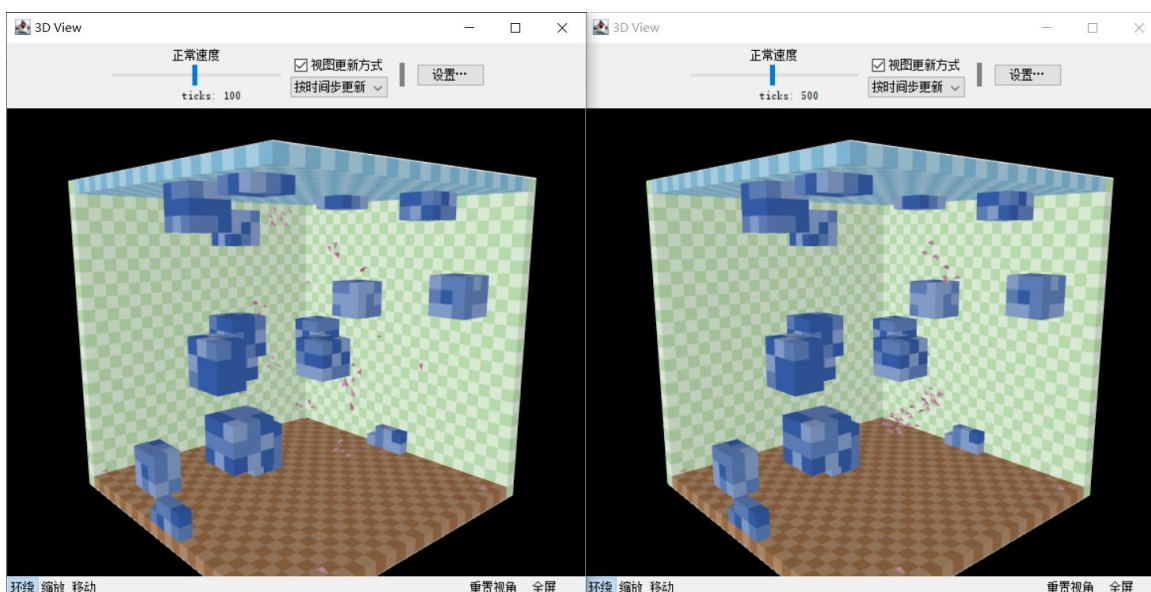
按第四章中提出的基于避障性的仿生扑翼机集群自组织行为优化模型对 NetLogo 中拟作为仿生扑翼机个体的紫色 V 形粒子进行集群控制。

如图 5.7 a) 所示, 当软件环境时间步 (ticks) 运行到 100 时, 受控制规律影响, 个体之间相互聚集, 形成几个小集群分布于空间中;

如图 5.7 b) 所示, 当软件环境时间步运行到 500 时, 同图 5.7 a) 相比, 除了少数个体, 环境中大部分个体形成一大一小两个集群分布于空间中, 可以看到同一集群中个体之间的运动方向相近, 速度大小相似, 且集群在运动过程中明显绕开障碍物;

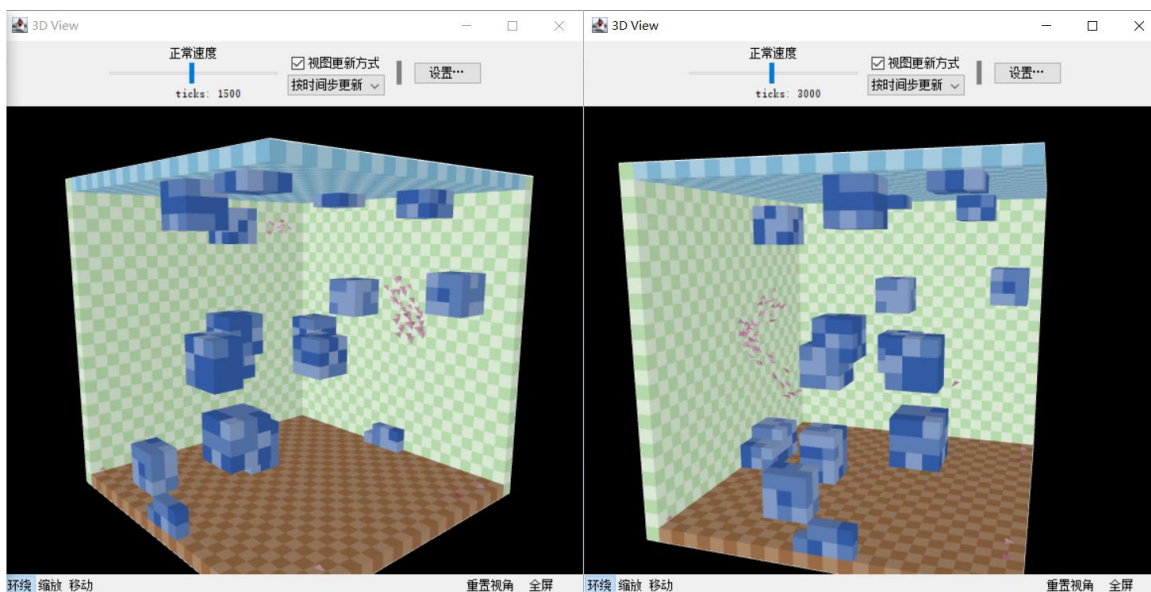
如图 5.7 c) 所示, 当软件环境时间步运行到 1500 时, 个体分布情况与时间步运行到 500 时情况相似;

如图 5.7 d) 所示, 当软件环境时间步运行到 3000 时, 环境中尚未发生“坠机”的个体均处于同一集群中, 集群中个体具有相近的运动方向以及相似的速度大小, 且集群在运动过程中明显绕开障碍物。



a) ticks = 100

b) ticks = 500



c) ticks = 1500

d) ticks = 3000

图.5.7 基于避障性的仿生扑翼机自组织行为模型实验图

(3) 实验分析:

“坠机”数量监视图如图 5.8 所示。监视图横坐标为时间步 (ticks)，单位为 1 步，纵坐标为坠机数量，单位为 1 个。由监视图可以发现，坠机数量在实验开始时发生了激增，在数值激增到 6 后坠机数量随时间步变化并无变化。分析认为，该情况与 5.3 相同，个体随机生

成位置与障碍物、空间边界太近、或个体生成时彼此之间距离太近，个体来不及“避让”而发生碰撞。而在后续的仿真实验过程中，在仿生扑翼机个体在自组织聚集为集群过程中，再无新的“坠机”情况发生。

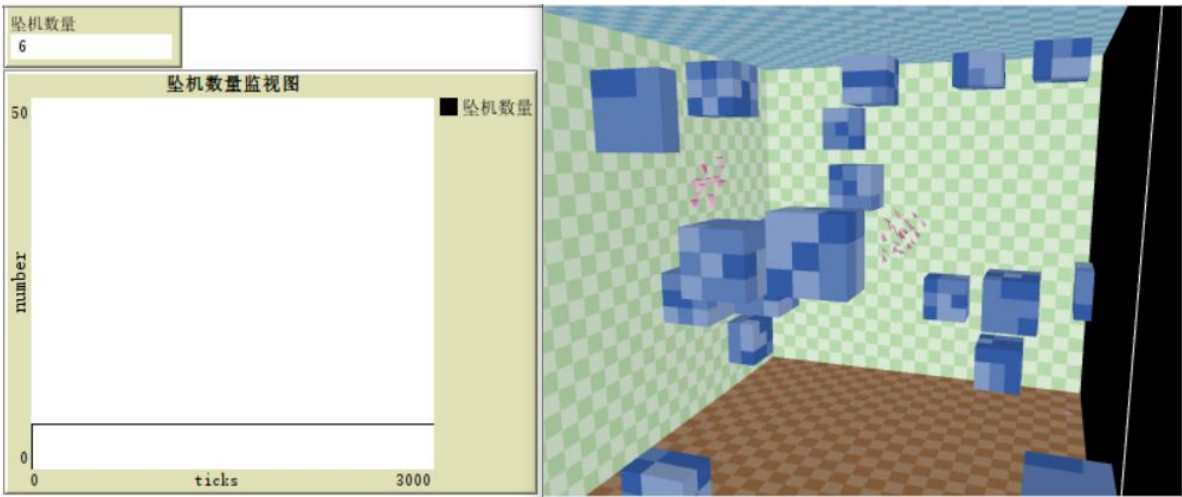


图 5.8 坠机数量监视图

同 5.3，对基于避障性的仿生扑翼机集群自组织行为模型进行多组仿真实验，确保实验的准确性，避免偶然性。实验数据如表 5.1 所示。

表 5.2 基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为仿真实验数据表

实验序号	坠机数量（个）	激增所处时间	后续有无坠机情况
1	6	ticks = 0	无
2	8	ticks = 0	无
3	4	ticks = 0	无
4	6	ticks = 0	无
5	2	ticks = 0	无

在重复多组仿真实验后，可以发现，坠机数量的激增时间均在实验刚开始时（ticks=0），且在实验后续进行过程中，坠机数量没有发生变化。因此，从多组仿真实验结果来看，上述的坠机情况的分析是合理的。

综上所述，仿生扑翼机个体在仿真实验过程中，按照基于避障性的仿生扑翼机集群自组织行为优化模型，在具有复杂障碍物分布的环境中，避开障碍物自行聚集为统一集群，具有相近的速度方向与相似的速度大小，集群自组织行为得以涌现。因此，认为基于避障性的仿生扑翼机集群自组织行为优化模型是理论可行的。

6 结论与展望

6.1 结论

本文主要研究了基于局部信息交互的仿生扑翼机集群自组织行为技术,通过 NetLogo 平台进行仿真实验验证其可行性。文中首先建立了仿生扑翼机个体与集群的空气动力学模型,计算了高效节能的编队飞行距离;随后,本文介绍了三种传统集群自组织行为模型,在比较分析后,选用视觉交互作为局部信息交互形式,提出了基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为模型,详细阐述了其数学模型,控制规律,算法设计并利用 Python3 语言进行了验证;然后,为了切合实际应用场景的复杂性,本文在前述基础上提出了基于避障性的仿生扑翼机集群自组织行为模型,详细说明了其数学模型,控制规律及其算法设计;最后,在 NetLogo 平台建立仿真实验环境,通过仿真实验验证了上述提出的两种具有高效节能功能的基于局部信息交互的仿生扑翼机自组织行为模型的可行性。本文主要的研究成果如下:

- (1) 对仿生扑翼机个体及其集群进行了空气动力学建模,得到其相关参数以及集群高效节能飞行合适的间隔距离;
- (2) 选用视觉交互作为局部信息交互形式,在 Couzin 模型基础上提出了基于局部信息交互的仿生扑翼机集群自组织行为模型;
- (3) 在上述模型基础上,结合实际应用环境的复杂性,提出了基于避障性的仿生扑翼机集群自组织行为模型;
- (4) 在 NetLogo 平台搭建了仿真实验环境,通过仿真实验验证了本文提出的基于 Couzin 模型的仿生扑翼机集群自组织行为模型和基于避障性的仿生扑翼机集群自组织行为模型两种模型的可行性。

6.2 展望

尽管所提出的两种仿生扑翼机集群自组织行为模型的仿真实验效果基本达到了预期的要求,但本课题也还有需要进一步研究的地方:

- (1) 对仿生扑翼机个体的负载能力与续航时间不足等问题,如果能优化个体设计结构,在保证结构强度的基础上需用更轻盈的材料,相信在今后的应用中会更加满足实际需求;
- (2) 在仿生扑翼机集群自组织行为技术方面,研究仅限于仿真实验层面,在实际应用中,环境的复杂性,个体搭载传感器的感知能力,集群间的信息交互能力等方面尚有更为复杂的难题,将理论算法在实际环境中应用是下一步研究重点;
- (3) 集群高效节能的编队飞行距离仅限于理论计算层面,在实际环境中测试研究其能耗,得到合适的高效节能的仿生扑翼机自组织行为模型也同样具有重要的研究意义。

参考文献

- [1] M. Keennon, K. Klingebiel and H. Won. Development of the Nano hummingbird: a tailless flapping wing micro air vehicle. In: Proceedings of the 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston, USA: AIAA, 1–24, 2012.
- [2] Z. Jackowski. Design and Construction of an Autonomous Ornithopter. Doctoral thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [3] D. Mackenzie. A flapping of wings. Science, 335(6075): 1430–1433, 2012.
- [4] E. Pan, H. Xu, H. Yuan, J Peng and W Xu. HIT-Hawk and HIT-Phoenix: Two kinds of flapping-wing flying robotic birds with wingspans beyond 2 meters. Biomimetic Intelligence and Robotics, pp, 10002, 2021.
- [5] D. Peter, MC. Hsieh and A. Torrero. A State-Space Airloads Theory for Flexible Airfoils. Journal of the American Helicopter Society, 52(4): 329–342, 2007.
- [6] 尹翌, 贺威, 邹尧, 穆新星, 孙长银. 基于“雁阵效应”的扑翼飞行机器人高效集群编队研究[J]. 自动化学报, 2021, 47(06): 1355-1367.
- [7] 邱华鑫, 段海滨, 范彦铭. 基于鸽群行为机制的多无人机自主编队[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1298-1304.
- [8] 邓婉, 王新民, 王晓燕, 肖亚辉. 无人机编队队形保持变换控制器设计[J]. 计算机仿真, 2011, 28(10): 73-77.
- [9] 段海滨, 邱华鑫, 范彦铭. 基于捕食逃逸鸽群优化的无人机紧密编队协同控制[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(06): 559-572.
- [10] CW. Reynolds. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. Acm Siggraph Computer Graphics, 21(4): 25-34, 1987.
- [11] T. Vicsek, A. Czirok, E. Ben-Jacob, I. Cohen and O. Shochet. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. Physical Review Letters, 75(6): 1226-1229, 1995.
- [12] I. Couzin, J. Krause, R. James, GD. Ruxton and NR. Franks. Collective memory and spatial sorting in animal groups. Journal of Theoretical Biology, 218(1): 1-11, 2002.
- [13] 俞辉, 王永骥, 程磊. 基于有向网络的智能群体群集运动控制[J]. 控制理论与应用, 2007(01): 79-83.
- [14] 程磊, 俞辉, 吴怀宇, 王永骥. 一类有序化多移动机器人集群运动控制系统[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(06): 1117-1120+1127.
- [15] 王冬梅, 方华京. 基于虚拟领航者的智能群体群集运动控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008(10): 5-7.
- [16] 段海滨, 李沛. 基于生物群集行为的无人机集群控制[J]. 科技导报, 2017, 35(07): 17-25.
- [17] M. Dietl and E. Uarcia. Stability in ornithopter longitudinal flight dynamics. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 31(4): 1157- 1162, 2008.

- [18] 张杰, 吴森堂. 一种变体飞行器的动力学建模与动态特性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 14(1):58-64, 2015.
- [19] 刘成功. 无人机仿生紧密编队飞行控制技术研究[D]. 硕士学位论文, 南京航空航天大学, 2009.
- [20] 孙家弼. 仿生飞行颈眼系统的位姿估计与运动控制研究[D]. 硕士学位论文, 哈尔滨工业大学, 2020.

谢辞