

局部通信下的无人机编队导航方法研究

马梓元, 龚华军

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 211100)

摘要: 无人机的编队与导航是无人机群执行各种复杂任务的基础, 在远距离、高海拔等大范围场景下及灾难救援等实际任务中, 无人机群的通信能力高度受限, 集中式的编队方法不具备实用性; 文章基于开源机器人操作系统 ROS 实现了无人机群的路径规划, 并结合一种纯分布式的群集控制方法, 实现了仅需要局部通信的无人机编队导航方法, 并通过无人机仿真实验进行了验证; 实验结果表明, 文章所提出方法能够支持无人机在局部通信下的编队与导航。

关键词: 无人机; 群体; 编队; 导航

Research of Swarm UAV Formation and Navigation under Local Communication

Ma Ziyuan, Gong Huajun

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: Formation and navigation are the basis for unmanned aerial vehicle (UAV) swarms to conduct complex tasks. In large scale and high altitude scenes, or performing realistic tasks like rescuing, the inter-swarm communication of UAVs is highly limited, which indicates centralized control is not applicable. In this paper, a path planning method for navigation is implemented based on robot operating system (ROS). By combining a purely distributed flocking control, UAV formation and navigation is achieved with only local communication. Experimental results with a robot simulator show the success of navigation and formation of a UAV swarm, validating the effectiveness of the proposed method.

Keywords: UAV; swarm; formation; navigation

0 引言

群体无人机在通信覆盖^[1]、灾难救援^[2]、军事行动^[3]等领域具有重要的应用前景。与单体无人机相比, 群体无人机具有故障容错性、任务并行性、功能分布性等优势, 从而能够支持更为复杂的任务, 具有重要的研究价值。无人机群导航是指根据目标的位置、速度等信息, 控制无人机群运动到目标区域的过程, 是无人机群执行各种复杂任务的基础和前提, 也是机器人领域亟待解决的核心问题。

无人机群的导航策略包括集中式控制和分布式控制两大类。集中式控制便于数学分析, 相比分布式控制具备更丰富的理论研究基础, 但在实际的大规模、大范围应用场景中, 无人机之间的相互通信高度受限, 群体的全局信息获取十分困难, 集中式控制面临严重的单点失效和网络拥塞问题而不具有实用性和可扩展性。因此, 无人机群的分布式引导控制研究具有重要的理论意义和实际意义^[4]。

分布式的群体编队导航控制是当前群体机器人研究的难点问题。文献 [5] 采用领航跟随法实现多机器人便对控

制, 该方法结合了领航跟随法控制简单、编队快速和星系动力学法编队稳定和动态均衡的优点, 实现了机器人快速编队和动态避障的性能要求。基于虚拟结构的编队控制方法的主要原理是把编队结构看作是虚拟的刚体结构, 其中, 实际中的每个机器人都对应一个虚拟刚体结构中的顶点。虚拟结构的顶点即代表着机器人在编队中期望的相对位置。算法的目标在于设计一个控制方法, 以使得所有机器人向指定方向运动, 同时尽可能保持完美的编队, 即保持其顶点位置构成的刚体虚拟结构始终维持不变^[6-8]。文献 [9] 中采用了虚拟机器人与人工势场法相结合的方法, 实现了多水下机器人的编队控制。基于行为的控制方法由一系列的行为构成, 不同的行为对应不同的目标, 例如避免碰撞、保持距离、向目标移动等等, 控制方法设计的核心是对行为的定义以及行为之间的协调机制, 这类方法的优点是设计较为简单, 能够兼顾各种行为, 缺点是难以进行稳定性分析等理论分析, 在复杂环境中, 机器人的行为具有不可知性^[10-11]。多机器人的编队既包括拓扑结构固定的编队, 也包括拓扑结构可变的编队。蜂群编队是拓扑结构可变编队的典型实例, 蜂群编队的机器人并不保持特定的拓扑结构, 其拓扑结构是可变的, 但该拓扑结构对应的图应是连通的, 并且机器人之间互相保持特定的期望距离, 该方法具有较好的应用效果。上述相关研究主要集中在分布式的群体编队, 却没有同时研究导航整个群体时所需要考虑的

收稿日期: 2019-06-19; 修回日期: 2019-07-10。

作者简介: 马梓元(1992-), 男, 汉, 江苏丹阳人, 硕士研究生, 主要从事先进飞行控制技术方向的研究。

龚华军(1964-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事先进飞行控制技术、光传飞控技术方向的研究。

群体机动性。此外，多数理论研究仅开展了模拟仿真实验，而没有进行基于无人机实物的实际验证，缺乏实验验证无法保证方法的有效性，因此仍需寻找更好的方法。

人工势场法在多机器人的蜂群编队控制中有广泛的应用^[12-13]。通过在机器人之间引入人工势场，使得当机器人之间的距离大于期望值时二者产生引力，小于期望值时二者产生斥力，从而使得机器人之间保持期望的距离。人工势场法现在广泛应用于无人机路径规划、避障等方面^[14-15]，并且和模糊控制法等其他方法相结合。本文针对大规模、大范围的复杂应用场景环境，研究无人机群的分布式导航的关键技术与系统实现，提出一套新的完整的无人机分布式导航方法，通过在三维仿真平台的无人机实验，验证了本方法的有效性。

1 无人机群体分布式导航方法

为了实现无人机群体的分布式导航，本文首先将无人机群体看作一个整体，进行路径规划；然后基于文献[16]中的分布式群集控制算法，实现无人机的分布式编队控制；最后通过编队控制方法与规划路径的结合，实现无人机的分布式导航。

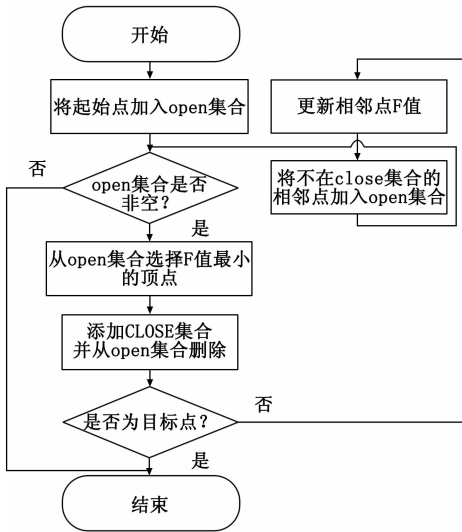


图 1 路径规划算法流程图

1.1 无人机群体路径规划

为无人机群体进行路径规划时，首先要有飞行场地的地图，基于飞行场地地图对无人机的路径进行规划等相关工作。在开源机器人操作系统 ROS 中，地图信息由二维栅格地图进行表示，整个地图被等分为若干栅格，地图的分辨率参数决定了该地图中每个栅格的长度和宽度，每个栅格由一个状态值描述，代表该栅格对应的区域可通行、不可通行或是信息未知。对于高分辨率的地图，其栅格面积较小，数量较多，因而能够更精确地表示地图的可通行信息，但存在计算量大的问题；低分辨率的地图则计算量较小，但对地图的描述不如高分辨率地图精确，因此地图的选择对于路径规划的影响较大。为有效解决这一问题，以

所有栅格作为顶点，连接所有相邻的可通行栅格，即可将二维栅格表示的地图转化为图的表示。

本文将群体看作一个整体进行规划，以无人机群的中心位置所在栅格作为路径规划的起点，以导航的目标点所在栅格作为路径规划的目标点，即可通过 A* 算法等图搜索算法求得群体的最短路径，其流程如图 1 所示。路径规划结果即图中两两相连的顶点构成的路径，可以再一一对应到地图的栅格。

在 ROS 的单体机器人路径规划中，为了确保机器人能够通过所规划出的路径，通常会在进行路径规划时设置机器人的半径参数 r ，将不可通过栅格（即障碍物）周围范围 r 的可通过栅格也认为是不可通过的，从而确保实际规划出的路径有足够空间供机器人通过。在为群体进行规划时，本文也引入了这种方法，根据群体的预估半径设置参数 r ，从而确保规划出的路径能够供整个无人机群体通过。

1.2 无人机分布式编队

文献 [4] 提出了一种针对多智能体系统的分布式群集控制方法，其中每个个体能够感知周围范围 R 内的相邻个体的位置和速度以向量 q 和向量 p 分别表示所有个体的位置和速度，则个体 i 的邻居集合为：

$$N_i = \{ j : \| q_j - q_i \| < R, j \neq i \} \quad (1)$$

通过邻居的位置和速度信息以及个体自身的位置和速度，该控制方法即可计算出个体的加速度并据此调整个体的速度。作者证明了通过该控制方法，所有个体能够渐进地收敛成一个群，具有相同的速度并且能够互相保持一定的间距。该控制方法如公式所示。

$$u_i = f_i^g(q) + f_i^d(q, p) + f_i^r(q_i, p_i, q_r, p_r) \quad (2)$$

其中： u_i 代表个体 i 的加速度，是控制算法的输出，它由三项相加所得，三项的具体信息如公式所示。

$$f_i^g(q) = \sum_{j \in N_i} \varphi_\sigma(\| q_j - q_i \|_\sigma) n_{ij}$$

$$f_i^d(q, p) = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(q)(p_j - p_i)$$

$$f_i^r = -c_1(q_i - q_r) - c_2(p_i - p_r) \quad (3)$$

文献 [5] 将第一项称为梯度项，通过人工势场法控制个体 i 与所有邻居的距离：当距离小于给定值时，这一项表现为斥力，当距离大于给定值时，这一项表现为引力，当距离等于给定值时，这一项为 0。第二项被称为一致项，通过一致性算法与相邻个体的速度保持一致。第三项被称为导航项，代表群体集结的目标，这里群体集结的目标被抽象为一个虚拟的领航者，具有位置 q_r 和速度 p_r ，是整个群体预先知道的共识信息。

通过在每架无人机上运行该控制算法，就能够使无人机在群体目标处群集，形成“蜂群”编队，即整个群中的无人机之间将保持特定的距离，同时以目标速度运行，最终是实现无人机群的整体编队控制。

1.3 无人机群体分布式导航

通过 1.1 节和 1.2 节，已经能够为整个无人机群体进行路径规划，并且群体能够分布式自组织形成编队，为了实

现无人机群体的导航, 还要使无人机编队沿着规划的路径进行运动。本文首先将路径规划结果中的每个路径点转化为具有位置和速度信息的虚拟领航者的序列 $L_1, L_2 \dots L_n$, 其中 n 为路径点的总数, 然后将 1.2 节中无人机群集控制第三项中的虚拟领航者替换为该序列, 从而实现无人机群体的分布式导航。

每个路径点对应的领航者的位置即是其对应栅格的中心点在地图中的位置, 除最后一点即目标点对应的领航者速度为 0 外, 其他路径点对应领航者的速度大小 v 可作为参数根据实际导航的需要进行设定, 其速度方向指向下一个路径点, 如公式所示。

$$p_{L_i} = \frac{q_{L_{i+1}} - q_{L_i} \cdot v}{q_{L_{i+1}} - q_{L_i}} \quad (4)$$

当无人机起飞后, 每架飞机即开始运行如 2.2 节所述的分布式编队控制算法, 整个群体的初始虚拟领航者是虚拟领航者序列的第一个, 即由路径起点对应的虚拟领航者, 其速度方向朝向路径上第二点对应的虚拟领航者, 该虚拟领航者以速度大小 v 进行运动。当该虚拟领航者抵达下一个路径点对应虚拟领航者的位置时, 虚拟领航者就更换为下一个路径点对应的虚拟领航者, 直到抵达最后的虚拟领航者, 即路径终点对应的虚拟领航者, 导航结束, 整个流程如图 2 所示。

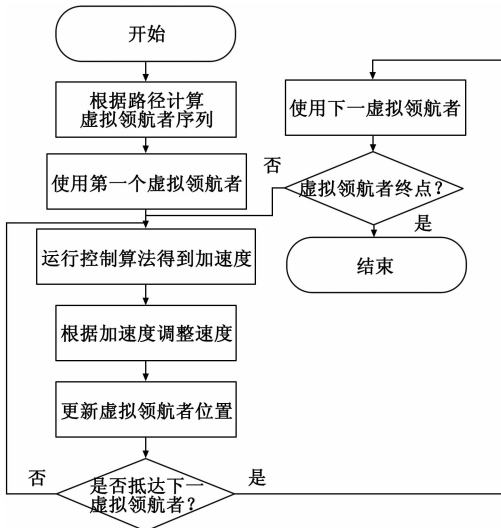


图 2 无人机群导航迭代流程图

2 实验平台搭建

2.1 二维仿真平台

利用 MATLAB 软件, 可以构建理想的仿真环境进行无人机编队导航的验证。由于四旋翼无人机可以垂直起降, 本文研究的重点是编队与导航方法, 本文将四旋翼无人机看作二维空间的质点模型, 即每架无人机用一个二维平面的质点表示, 具有的属性包括位置、速度和加速度, 如公式所示。

$$\begin{cases} \dot{q} = p \\ \dot{p} = u \end{cases} \quad (5)$$

其中: q 代表无人机的位置向量, p 代表无人机的速度向量, u 代表无人机的加速度向量, 这样, 无人机的运动学模型就被建模为二阶积分模型。

仿真模拟按照时间步进行, 每个时间步的长度使 0.01 秒。在每个时间步中, 根据控制算法计算出的无人机的加速度, 对无人机的速度进行更新, 后再根据速度更新无人机的位置, 最后根据无人机的位置画出圆圈即可表示无人机, 画出箭头即可可视化无人机的速度大小。

2.2 三维机器人仿真平台

Gazebo 是支持开源机器人操作系统 ROS 的三维机器人仿真器, 通过内置的物理引擎对机器人的运动学进行仿真, 同时进行包括碰撞检测与响应在内的各种物理过程计算, 仿真实验效果贴近真实场景, 是 ROS 开源社区使用的主流三维仿真器, 提供了多种环境模型和机器人模型, 并且支持通过插件的方式开发新的模型。

本文选取的无人机模型来自于 ROS 开源软件包 `hector_quadrotor`, 实验过程中仅在起飞时发送垂直方向速度指令, 开始编队导航后仅发送水平面的速度指令。该无人机模型以水平面的两个正交的平移速度为控制输入, 本文为每一架飞机运行一个进程, 按照 0.1 秒的时间步迭代执行控制算法, 计算出加速度后按照时间步计算出相应速度指令, 发送消息控制各自对应的无人机模型。

3 实验验证

3.1 二维仿真实验

为了验证所提出的导航方法的有效性, 本文首先在 MATLAB 中进行了理想情况下的二维仿真实验, 随机初始化 50 架无人机, 如图 3 所示。其中, 圆圈代表无人机, 红色的箭头代表无人机的当前速度, 连接无人机的黑色边代表对应的两架无人机在通信范围之内。

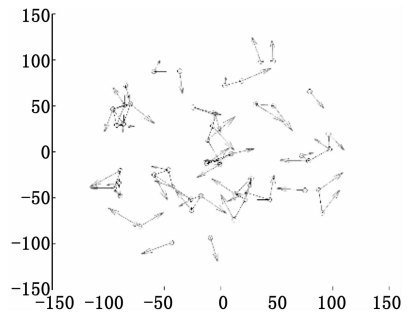


图 3 MATLAB 仿真实验初始设置

在实验过程中, 整个群体的规划路径如图 4 (a) 中的黑色粗线所示, 50 架无人机的运动轨迹如如图 4 (a) 中红色轨迹所示, 实验过程中的群体编队行动过程如图 4 (b) 至 4 (d) 所示。

如图 4 所示, 实验结果表明, 无人机群体能够根据 2.2 节所述的控制方法形成规则的编队, 与此同时整个群体能够沿规划的路径进行运动, 实现了导航的目标, 仿真结果验证了该方法的有效性。

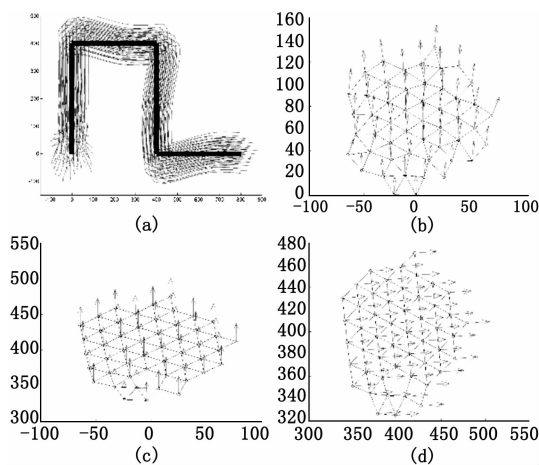


图 4 MATLAB 仿真实验结果

3.2 四旋翼无人机仿真实验

为了进一步验证本文提出方法的实用性, 本文在 Gazebo 仿真器中设置了实验场景, 针对 20 架四旋翼无人机开展导航实验, 其场景如图 5 所示, 整个场地时边长为 150 米的正方形。

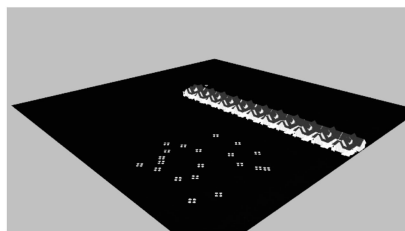


图 5 四旋翼无人机仿真实验场景

20 架四旋翼无人机被随机初始化在一排建筑物的左侧, 设置的导航的目标是让四旋翼无人机群形成规则的编队飞往建筑物的右侧, 利用本文提出的方法进行导航控制, 导航实验结果如图 6 所示, 20 架四旋翼无人机准确按照既定目标准确飞往了建筑物的右侧。

在 Gazebo 中, 通过物理引擎仿真四旋翼无人机的运动, 其速度控制器和传感器都是非理想、有误差的, 实验结果表明, 本文提出的无人机群体导航方法在这种非理想条件下, 仍然能够控制无人机群导航到目标点, 验证了本文所提出导航方法的实用性和有效性。

4 结束语

本文考虑现实任务场景中通信受限的实际情况, 在无人机之间仅进行局部通信的前提下, 设计并实现了一套无人机的编队与导航方法。首先基于开源机器人操作系统 ROS 实现了对无人机群的路径规划, 然后将路径规划与一种多智能体系统群集的控制方法相结合, 从而使无人机能够仅仅依据局部的邻域信息, 一边形成蜂群编队一边导航到目标位置。最后, 通过在 MATLAB 的二维理想化环境和 Gazebo 三维机器人仿真器环境中进行仿真实验, 验证了所提出方法的有效性, 实现了无人机群的编队与导航。但是,

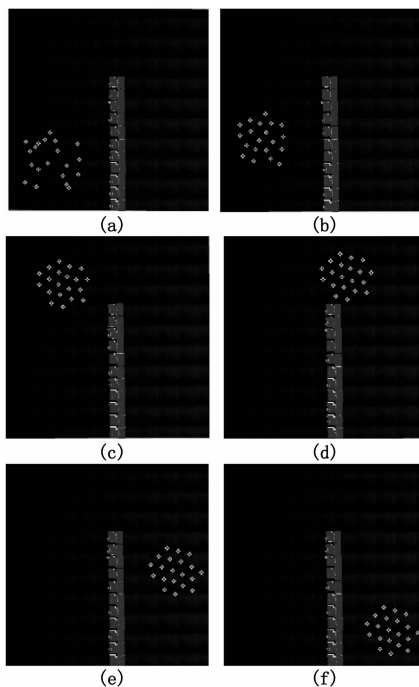


图 6 四旋翼无人机仿真实验结果

目前的方法尚未考虑动态的障碍物躲避和路径的重规划等问题, 解决这些问题是下一步研究的内容。

参考文献:

- [1] 肖祎杰. 无人机应急通信覆盖的研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.
- [2] 王鼎鸿, 高 嵩, 邹海春. 无人机搜索救援系统中机载探测器设计 [J]. 电讯技术, 2014, 54 (9): 1204 - 1209.
- [3] 李岳龙, 李旭阳. 无人机在军事领域的发展前景 [J]. 科学技术创新, 2018 (12): 59 - 60.
- [4] 陈炎财. 群体无人机分布式协同控制方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [5] 高 杨, 张华飞. 基于领航跟随法和星系动力学的多机器人编队控制 [J]. 厦门大学学报 (自然版), 2013, 52 (1): 14 - 18.
- [6] Beard R W, Lawton J, Hadaegh F Y. A feedback architecture for formation control [A]. Proceedings of the American Control Conference, 2000. IEEE [C]. 2002 (6): 4087 - 4091.
- [7] Tan K H, Lewis M A. Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control [J]. Autonomous Robots, 1997, 4 (1): 132 - 139.
- [8] Lewis M A, Tan K H. High Precision Formation Control of Mobile Robots Using Virtual Structures [J]. Autonomous Robots, 1997, 4 (4): 387 - 403.
- [9] 潘无为, 姜大鹏, 庞永杰, 等. 人工势场和虚拟结构相结合的多水下机器人编队控制 [J]. 兵工学报, 2017, 38 (2): 326 - 334.
- [10] Balch T, Arkin R C. Behavior-based formation control for multirobot teams [J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1998, 14 (6): 926 - 939.