无人机集群路径规划

# Section 1 引言

近年来，智能无人系统发展迅猛，出现了无人机、无人车、无人船、无人潜航器、机器人等一系列新产品。智能无人集群系统指若干无人系统根据任务分工，在一定时间、空间内协同完成复杂任务的整体系统。智能无人集群系统具有单个无人系统不可比拟的优势，在农业、制造业、交通、教育、医疗、军事、金融等多个领域具有广阔的应用前景。我们小组这次研究的是智能无人集群系统中应用最为广泛的无人机集群。

集群的研究起始于1959年法国生物学家Pierre Paul Grasse，研究发现昆虫之间存在高度结构化组织，能够群体协同完成远远超出个体能力的复杂任务,这种行为称为群集行为。群集指能够与其他个体以及周围环境交互作用的若干个体集合，如蚁群、鱼群、蜂群等等，它们的简单或微观行为的结合会导致更为复杂和宏观的行为，从而使整个群集行为整体上取得显著效果。

集群并不是对多个个体进行简单的连接和组合,而是使众多个体高效协作、紧密耦合,构成自组织、高稳定的分布式系统,激发个体智慧﹐汇聚群体智能。集群技术将大大提高个体行为的智能化程度，更好地完成单个个体无法完成的工作，通过群体信息共享，扩大对环境态势的感知,实现协同任务分配与协调，能够有效提高群体完成复杂任务的能力，并具有高效率、高容错性和内在的并行性等优点。

无人系统指平台上无需人工操作的物理信息系统，作用于物理世界来完成目标任务。无人系统是由机械、控制、计算机、通信、材料以及人工智能等多种技术融合而成的复杂系统，无人化和智能化是无人系统最显著的两个特征。无人系统的智能化是指在特定任务和环境下，无人系统“感知、认知、分析、沟通、计划、决策和执行”的“自主能力”。无人系统可在时间域和空间域根据环境、任务变化进行实时调整并做出判断，在无人或人工辅助情况下完成任务。

在实际应用上，单个无人机系统由于自身动力、功能和性能等方面的限制，无法单独完成复杂任务，如军事作战、地震等自然灾害需要多无人机系统协同任务执行。为解决单个无人系统的局限性问题，需以集群方式来解决。由此，智能无人机集群是指由一定数量的无人机、控制系统及人机界面组成，利用信息交互与反馈、激励与响应，实现相互间行为协同,适应动态环境，共同完成特定任务的智能联合系统。智能无人机集群不是无人机间的简单组合，而是通过必要的系统集成使之产生集群协同效应，从而具备执行复杂多变、危险任务的能力。因此，智能无人机集群既能最大限度地发挥无人系统的优势，提高整体的载荷能力和信息感知处理能力，又能避免单无人系统执行任务时被能力所限或任务效率不高的问题。

智能无人集群系统技术体系包括:系统架构、无人平台、通信组网、智能协同和效能评估等五个方面

系统架构:指从集群系统中各子系统的组成、关联性、交互模式等方面对系统的整体描述。可从信息交互、功能组件、系统部署、系统的关注者等多视角对智能无人集群系统架构进行描述,如从系统部署方式来看，可分为集中式、分布式和混合式。

无人平台:指遥控操作或者自主运作的无人驾驶平台。关键技术包括系统架构、平台本体、动力驱动、载荷接口、自主控制和自主学习等。

通信组网:实现智能无人集群系统各节点间以及系统与外部控制台间的信息交互，关键技术包括大容量、高可靠、抗干扰的传输技术和高效动态组网技术等。

智能协同:指智能无人集群系统通过共享信息联合完成任务的过程，关键技术包括路径规划、协同感知、导航定位、任务规划、协同控制、跨域协同和人机共融。

效能评估:是在一定条件下智能无人集群系统通过智能协同在规定时间内有效完成相应任务效果的综合评价，主要从智能无人集群的自主协同能力、系统鲁棒性、任务效能等方面进行定性和量化评价。



而我们组研究的重点则是智能协调技术体系下无人机及无人机集群的路径规划。

# Section 2 无人机路径规划

路径规划是根据智能无人集群系统的工作环境、地理位置、威胁障碍、储能情况等因素，为每个无人系统执行所分配的任务建立可执行的轨迹安排。

智能无人集群系统路径规划的过程涉及众多因素，问题非常复杂，要考虑到特定的目标或者具体任务。从本质上来讲，智能无人集群系统协同路径规划是典型的多目标优化问题，在满足单系统轨迹可适用性要求的同时也要满足整个智能无人集群系统轨迹的协同性要求。目前智能无人集群路径规划常用的研究方法大致可以分为基于纯数学优化的规划方法、基于启发信息的人工智能优化算法和基于生物种群进化的群智能算法。

从数学角度分析，我们可以假设无人驾驶飞行器在一个具有障碍物的三维空间descript内飞行。整个空间可记作工作空间descript。令descript表示第descript个障碍物，则无人机可以移动的空间可记为：

descript

出发点descript和目标点descript均是descript中的元素，由此我们可以利用descriptdescriptdescript定义路径规划问题函数为：

descript

其中，descript，descript,对任意的descript都有descript。

同时，当我们给定成本函数descript后，我们可以定义最优路径descript使得：

descript

由此我们得到了无人机路径规划的数学定义。

## Subsection 1 路径规划与轨迹规划的区别与流行算法的介绍

从无人机集群的路径规划出发，我们小组找到了一篇该领域的综述性论文*A literature review of UAV 3D path planning*

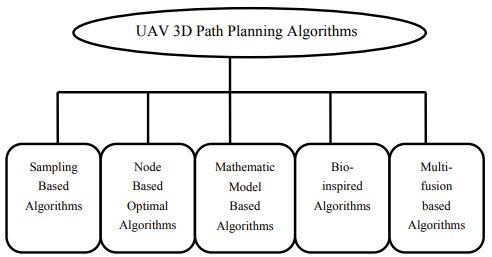
轨迹规划是指找到一条平滑连续的轨迹可以绕过障碍物移动。路径规划是时间、空间、能耗等综合下的最优路径。三维空间中的路径规划较二维空间而言需多考虑一个维度，因此其中存在相当多的结构约束和不确定性，特别是在如图所示的森林、洞穴、城市等复杂环境下。简单的二维路径规划算法无法处理复杂的三维环境，无人机导航的三维路径规划算法成为时下之需。



三维环境下的路径规划具有巨大的潜力。但是，与二维规划不同的是，三维环境下的路径规划难度随着动态约束和运动学约束的复杂化呈指数增长。为了在杂乱的环境中规划出一条无碰撞的路径，我们需要运用一些数学方法储存这些数据，并对数据进行建模与约束。因此，从最优化理论的角度来看，寻找一个3D完整路径是一个不存在共同的解决方案的非确定性多项式问题（NP-hard problem）。

Yang 将当下流行的算法分为基于抽样的算法、基于节点的算法、基于数学模型的算法基于生物启发的算法四类，并且提出了“基于多重融合算法”这一概念。





基于抽样的算法首先将环境作为一组节点进行抽样，然后通过“逐步逼近”或“深度优先搜索”等等过程将节点连接起来。找出所有可能的路径后开始搜索最优路径。这种方法结构简单且易于实现。因此，此算法适用于任一静态或动态的规划条件。

基于节点的算法抛弃了传统的描绘地图的方法转而只处理节点。这种算法通过处理节点信息的方法，将节点之间的距离转化为计算权值，进而直接搜索全局最优路径。这种方法可以与其他方法相结合以实现方法全局最优，适合在动态环境中规划路径。

基于数学模型的算法旨在通过一种典型的最优化模型描述整个运动空间。它以数学形式描述了几乎所有的动态和运动学约束，并将这些约束与损失函数紧密地绑定在一起。虽然这种方法的计算量总是很大，但随着计算机技术的进步，当代计算机的性能已经足够胜任计算数学模型，因此此方法的效率也随之提高。这些算法并不能实时计算，因此只适合离线工作。

生物启发算法是一种启发式算法。它能够很好地处理复杂的非结构约束和其他NP问题。这种算法通过突变来优化路径，但突变过程需要较长的迭代时间。因此，这种算法只能离线工作。

基于多融合的算法将多种算法的优点融合在一起，以实现全局最优和代价最小。此算法通常同时考虑节约时间和信息，有时把几种相对简单的方法结合起来形成一个相对更好的执行方法，因此适合在线实现。

表格：Yang 所认为的不同算法的属性。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 算法类别 | 对应算法 | 时间复杂度 | 环境 | 是否实时 |
| 基于抽样的算法 | Voronoi , RRT , PRM, K-PRM , S-PRM , Visibility Graphs , Corridor Map, DDRRT , RRT\* | descript | 静态和动态 | 是 |
| 基于节点的算法 | Dijkstra’s Algorithms , A\* , D\*, LPA , Theta\* , Lazy Theta\* , D\*-Lite , Harmony Search | descript | 静态和动态 | 是 |
| 基于数学模型的算法 | Optimal Control , Mixed- Integer Linear Programming , Binary Linear Programming, Non-linear Programming | 取决于多项式方程 | 静态和动态 | 否 |
| 基于生物启发的算法 | NN , genetic algorithm , memetic algorithm, particle swarm optimization , ant colony optimization, shuffled frog leaping algorithm | descript | 静态 | 否 |
| 基于多重融合的算法 | VVP, PRM Node based, optimal algorithms ,GIS-MCDA algorithms ,visibility graph Node based optimal algorithms , visibility graph ,Geodesics algorithm | descript | 取决于算法 | 是 |

下面将着重讲解其中的几种代表性算法。

## Subsection 2 基于抽样的优化算法与基于节点的优化算法

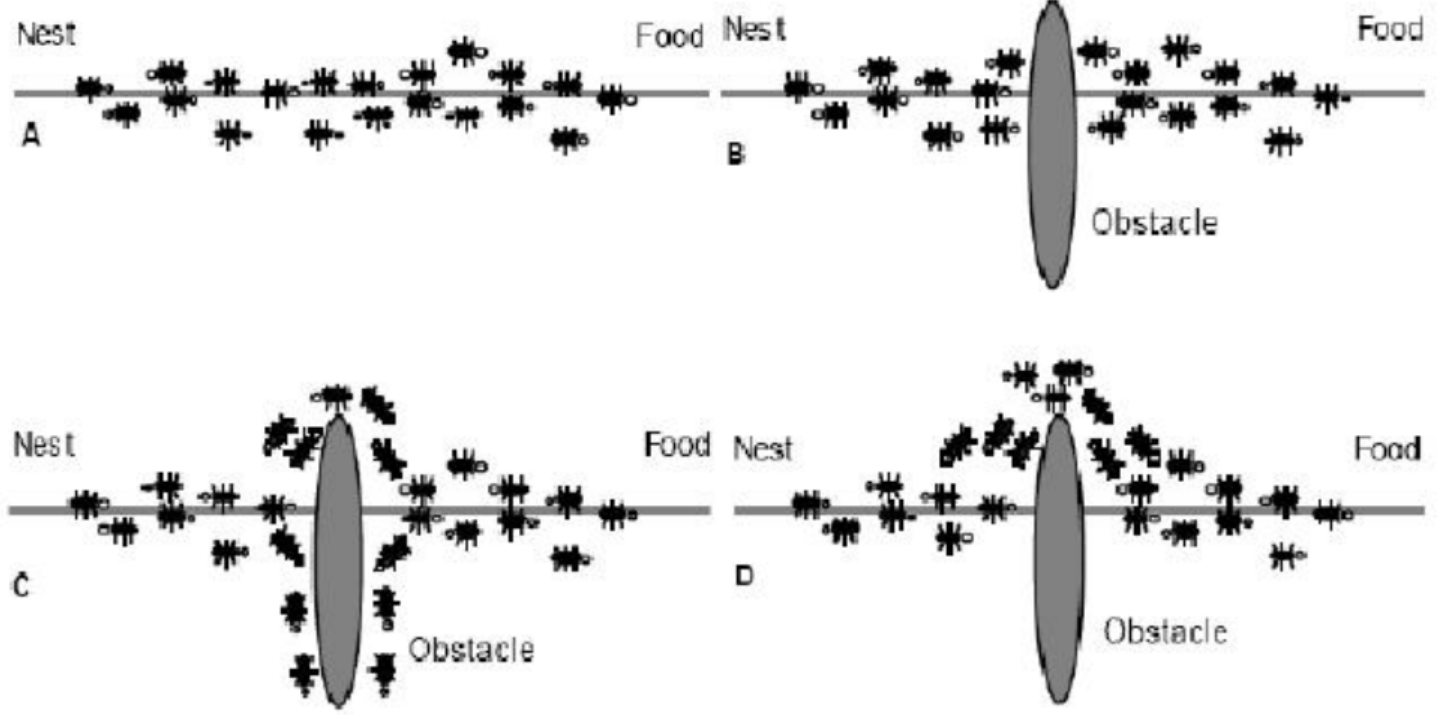
## Subsection 3 基于生物启发的优化算法

1. [Ant colony optimization | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4129846)
2. [UAV path planning method based on ant colony optimization | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5498477)
3. [基于计算智能的无人机路径规划调查 - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705118302636)

生物优化算法起源于模仿生物行为来对路径进行规划，该路径规划的方法省略了构建复杂环境模型的过程，是一种稳定的收敛到目标的强搜索方法。在生物启发的优化算法中，存在多种不同的道路，例如：遗传算法、模因算法、蚁群算法、蛙跳算法等等。求解路径规划可分为精确算法和人工智能算法，精确算法基于严格的数学手段，在可求解的情况下解的质量较好，但算法严格，运算量大，在大规模的问题上几乎无法求解，而人工智能算法基本在可接受的时间里找到可接受的满意解，此情况中基于生物启发的优化算法就属于人工智能算法。在此小节之中，我将会简单讲解生物启发算法蚁群算法以及优化后的精英蚁群算法。

蚁群算法的基本原理

1. 蚂蚁在路径上释放信息素
2. 碰到还没走过的路口，随机挑选一条路走。同时释放与路径长度相关的信息素，信息素浓度与路径长度成反比。
3. 后来的蚂蚁碰到路口时选择信息素浓度较高的路径
4. 最优路径上的信息素浓度越来越大
5. 最终找到最优寻食路径



在无人机路径规划中使用蚁群算法则需先获取环境情况，将其进行一个简单建模，确定起点与终点，开始进行蚁群算法的迭代，经过多次迭代后所获得的信息素浓度最高的那一条路径即为最优路径。

然而我们通过蚁群算法的规则可以知道，当问题的规模很大的时候，蚁群算法的性能会急速下降，并且解的总质量提高了，但是解元素之间的差异减少了，导致选择概率的差异随之减小，搜索过程会集中在目前最优解附近，而不一定是全局的最优解。对此提出了一些优化算法。

一种是精英蚁群算法，通过给本次迭代最优解赋予额外信息素的方式，可以加快算法的收敛，本次迭代中寻找到最优解的即为精英蚂蚁。

另一种是基于优化排序的蚂蚁系统，在普通的蚂蚁系统上给信息素的释放加上了一个权值，只有生成了至今最优路径的蚂蚁和路径长度排名靠前的蚂蚁才被允许释放信息素，且排名越靠前的蚂蚁可以释放的信息素越多，这样就有效避免蚂蚁集中于当前最优线路导致其他对全局最优线路搜寻的忽视。

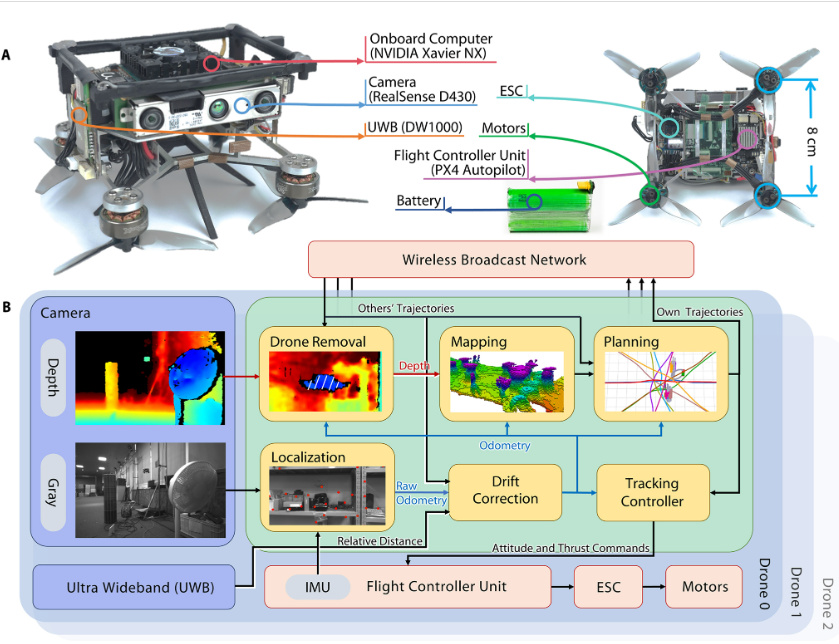
整个生物优化的启发算法类似于机器学习人工智能中的算法，我对此的了解并不是很深也不一定正确，这方面算法相关内容也非常欢迎人智的同学来进行一些补充。传统的CI方法可能已经达到了瓶颈阶段。相比之下，随着深度学习技术的发展，越来越多的研究人员开始将机器学习和深度学习技术应用于无人机路径规划。[3]

## Subsection 4 集群路径规划

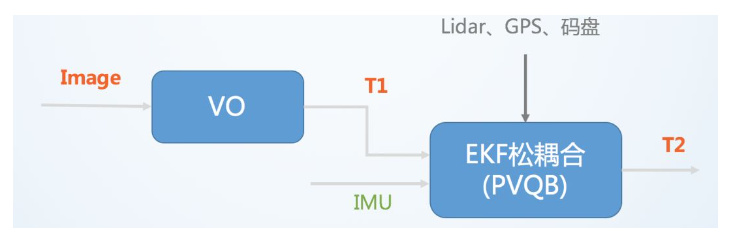
[野外的微型飞行机器人群](https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.abm5954)

在上述几个subsection我们已经具体阐述了单个无人机系统路径规划的几种算法，但想要做到无人机集群的路径规划，在原有的单个无人机路径规划的基础上，还需要解决无人机间的相互避障、轨迹共享等一系列重要问题。

为此，我们小组查询了一篇关于无人机集群路径规划的论文*Swarm of micro flying robots in the wild。*该论文提出了一种基于轨迹规划的鸟类导航方法，通过模仿鸟类飞行特点来指导无人机集群的路径规划，拥有更高的最佳性和灵活性。因此，提高了任务效率和可扩展性。

鸟类能够在森林中自由飞行，同时避开障碍物和其他移动的生物，在短程导航中，鸟类主要依靠眼睛及其前庭系统。受此启发，作者们开发了改进的视觉惯性里程计，在每架无人机上独立运行的视觉惯性测距仪，使每架无人机都配备了完整的感知、定位、规划和控制功能，以实现航空群定位，并由广播网络共享轨迹松散耦合。然而，累积里程数漂移可能导致无人机在继续报告时发生碰撞，保持安全距离，因此作者们开发了一种分散漂移校正算法，通过最小化机载超宽带(UWB)传感器测量的相对距离误差。

视觉惯性里程计（VIO），有时也叫视觉惯性系统，是融合相机和IMU（惯性测量单元）数据实现SLAM的算法（实现机器人定位、建图、路径规划的一种算法），根据融合框架的不同又分为松耦合和紧耦合，本论文选择的是松耦合。

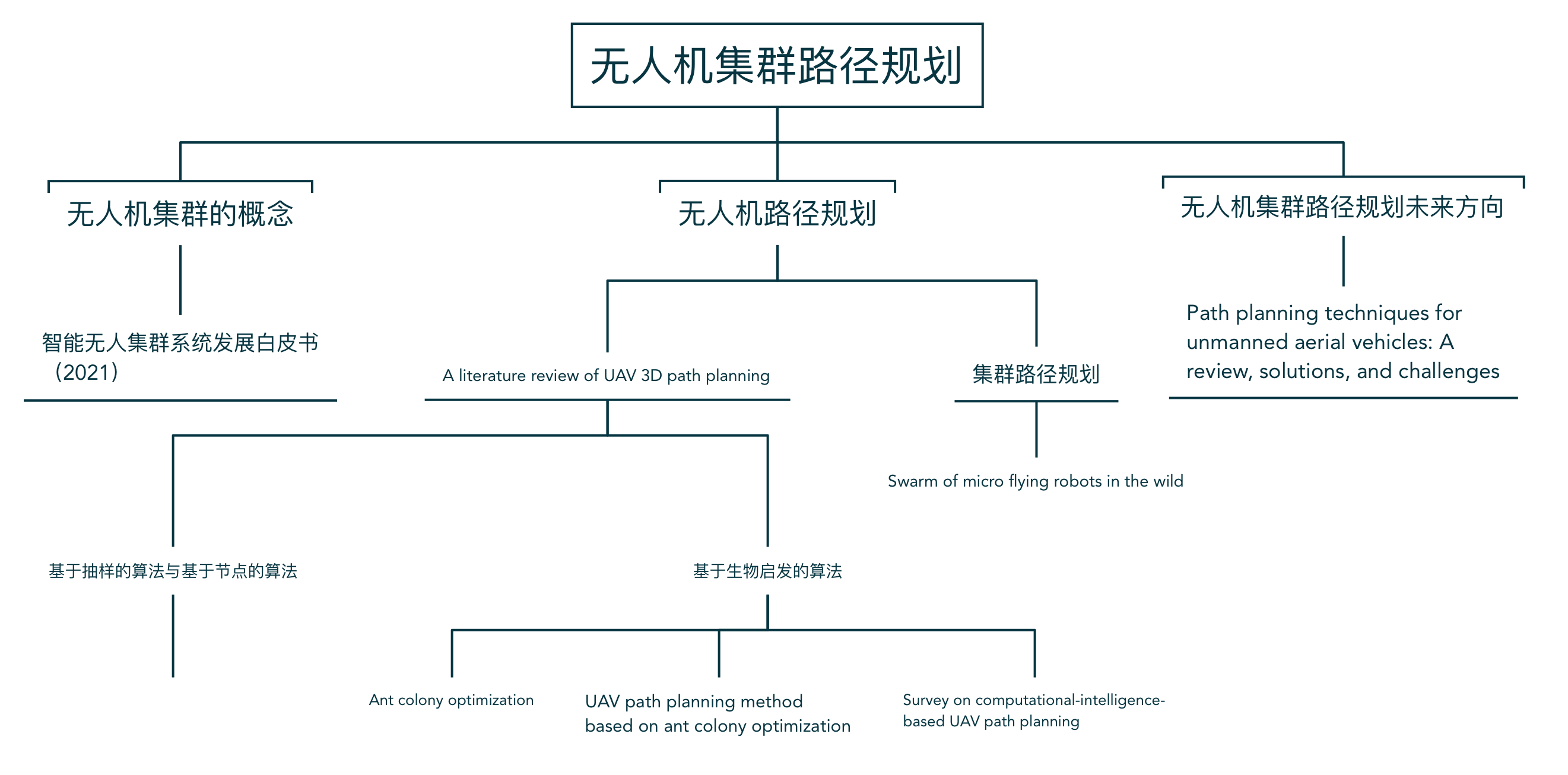


此外，鸟类可以同时调整路径和速度以避免碰撞，同时考虑飞行时间和平滑度以节省能量，因此作者们提出了具有多个目标的时空轨迹联合优化。除了参考小鸟的能力之外，作者们还进一步利用了电动人工系统的优势，该系统的特点是高保真无线通信用于轨迹共享，高速计算用于快速规划，一次来保障无人机集群的整体路径规划。

# Section 3 总结

1. [无人机的路径规划技术：综述，解决方案和挑战 - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366419308539)

## Subsection 1 文章结构及论文关系

在本篇文章中，我们从智能无人集群系统白皮书入手，着重讲述了无人机路径规划问题，并探究了无人机路径规划研究的工作意义与未来方向。整体结构如图所示：先放个图凑数。

在研究路径规划论文时，我们以 *A literature review of UAV 3D path planning* 作为出发点研究单体无人机路径规划的流行算法，并深入研究了基于抽样的算法、基于结点的算法与基于基于生物启发的算法。

在研究单体无人机路径规划的基础上，我们以 *Swarm of micro flying robots in the wild* 为切入点进一步研究了无人机集群路径规划问题，探究其多飞行器合作与规划的机理与感知外界的机理。

最后，我们结合 *Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges* 探讨了无人机路径规划研究的工作意义与未来方向，并对本论文的缺陷加以总结。

## Subsection 2 工作意义

无人机及无人机集群路径规划算是一个新兴的话题，但是传统的路径规划已经是一个传统的经典研究，学界多年的深耕使得此方向上已经有了诸多成熟的结论。目前的一个重要研究方向就是基于传统优秀算法与无人机实际情况相结合来构建无人机特属路径规划算法，如将传统算法扩展至三维立体空间中进行规划、结合无人机能量能源通信等特性进行算法优化等等

这个方向也是我们小组四位同学共同的兴趣，基于我们这样一个专业，我们选择从一个更加底层的视角对其进行了解，尤其是无人机及无人机集群的路径规划，查阅多篇文章后得出此文，旨在以当前身边同学为报告听众，做出一个此方向的基本科普，使同学们在此方向上可以得到一个较为全面的了解，同时也对其中个别算法进行更为深入的讲解，满足部分同学进一步深入了解的需求。

## Subsection 3 未来研究[1]

1. 更加高效的路径规划：虽然当前关于无人机路径规划的文献中已经存在了许多研究建议，但是在此方向上仍然存在着诸多挑战和问题，空对地无人机网络通信等需要更有效的路径规划。
2. 节能：能耗是无人机的瓶颈，可选使用锂电池进行系统操作，氢燃料电池用于延长飞行时间等方式。同时为了提高无人机的能效，在路径规划的过程中需要将能耗作为一个重要的考量目标。
3. 通信：无人机网络由于其特殊性，传统路由协议无法正常工作，所以无人机专属低功耗高适用通信协议以及对其的持续优化是必须的。
4. 与物联网的结合：当前物联网发展迅速，无人机可以作为物联网终端的一环与物联网系统进行接入，从而获得更多信息，以优化无人机路径规划。
5. 灾害管理路径规划：在用于灾害管理的无人机路径规划中，检索到的文章大多只关注灾后阶段，未来的研究可以集中在使用无人机的灾前准备和响应规划上。

## Subsection 4 欠缺之处

1. 鉴于我们目前的知识水平有限，无法对论文中核心的算法公式及场景设计做出一个完整正确的了解，所以此文中未能涉及诸多优秀算法的核心设计，专业性方面可能略有欠缺，这是我们难以避免的，我们已经尽当下所能去了解这个方向以及所阅读论文的全貌，如果有错误及欠缺的地方还请大家多包容。
2. 本次调研时间有限，未能对此方向的所有优秀论文进行一个完善的统计调研，对一些方面的研究难免会有欠缺，同时也会有研究不够深入的情况，我们欢迎各位老师与同学积极提出我们的欠缺之处，我们会认真听取大家的意见并做出改进。