|  |  |
| --- | --- |
| Inline Text Wrapping Picture |  |

硕士研究生学位论文阶段报告

学 号: 2022111249

姓 名: 孔玉婷

学 院: 智能工程与自动化学院

专业(领域): 控制科学与工程

研究方向: 模式识别与智能系统

导师姓名: 钱荣荣

北京邮电大学

2024 年 12 月 5 日

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 论文题目 | 面向时序多目标点跟踪的无人机轨迹规划技术 | | |
| 论文类型 | 应用研究 | 选题来源 | 国家自然科学基金项目 |
| 开题日期 | 2023-12-01 | 是否开题题目 | 否 |
| 论文开始日期 | 2023-12-01 | 报告日期 | 2024-12-05 |
| 报告地点 | 教三-812 | 报告时间 | 13:00 |
| **研究内容简介**   1. **选题背景**   **1.1研究目的**  随着信息时代的快速发展，无人机技术在多个领域展现出了巨大的应用潜力和价值。从目标跟踪到数据采集，再到应急救援，甚至军事作战，各种行业都在借助无人机提升效率和降低成本。然而，随着应用场景的不断扩展，无人机轨迹规划已成为一个关键问题。精确的轨迹规划不仅关系到无人机任务的执行效果，还直接影响到飞行安全、能源消耗、任务时效等多个方面。如何在复杂的环境中实现高效、精确的轨迹设计，确保无人机能够高效完成任务，已成为无人机技术发展的重要挑战之一。  时序多目标点跟踪，作为一种多目标轨迹规划问题，广泛存在于各种复杂的任务场景中。具体来说，在这一问题中，存在一个目标按照均匀的时间间隔，依次出现在特定的目标点位置，而无人机需要在规定的时刻到达并靠近目标点，对目标进行精确的跟踪、监测或进行无线通信等任务。这类问题不仅涉及到无人机在复杂三维空间中的飞行路径生成，还要求在规定的时间点内高效地访问多个目标点，确保无人机能够按照预定时序进行任务操作。这一问题的挑战性在于需要综合考虑目标点之间的相互影响、飞行路径的优化以及时序约束的满足，尽管该问题广泛存在于目标跟踪、有人/无人机协同、无线数据采集等多个任务场景中，但目前在实际操作中，仍然缺乏行之有效的轨迹规划方法。  因此，如何在无人机执行任务过程中，综合考虑时序目标点安排和目标间的相互影响，规划出既可靠又高效的飞行轨迹，以提高任务执行效率，成为解决时序多目标点跟踪问题的关键。  **1.2国内外研究现状**  1.2.1 轨迹规划算法  轨迹规划作为控制领域的一个经典问题，涉及如何在给定约束条件下，设计出一条从起点到终点的最优路径。由于其在目标跟踪、数据采集、应急救灾等多个领域的重要应用[1]-[5]，轨迹规划问题已经吸引了大量的研究。目前，无人机轨迹规划算法主要包括图搜索算法、优化算法、强化学习算法、插值算法等。  图搜索算法可以说是全局路径规划中最常见的算法，包括Dijkstra算法、A\*算法、RRT（Rapidly-Exploring Random Trees）算法、概率路线图（probabilistic roadmap, PRM ）算法等。在文献[6]中，Szczerba 等人提出的稀疏A\*算法是一种改进的A\*算法，该算法结合航迹的约束条件，裁剪搜索空间的多余节点，缩短了搜索时间。在文献[7]中，Matej等人提出了一种称为聚类拓扑 PRM (CTop-PRM) 的新方法，用于在 3D 杂乱环境中查找多个拓扑不同的路径。然而这些传统的全局路径规划算法通常是针对静态问题设计的，难以适应复杂动态问题。  目前在通信领域主要采用基于优化的轨迹规划算法，包括动态规划、分支定界和连续凸逼近算法等。例如，Jiang等学者[8]研究了多天线无人机系统上行链路中最大化总通信速率的最优飞行轨迹规划方法。Zhan 和 Lai[9]研究了多个物联网设备的通信调度和发射功率分配的联合优化，以及在无人机物联网系统上进行数据采集的无人机航迹优化问题，提出了一种联合优化方法，以最大限度地减少受无人机能量约束的所有设备的最大能耗。文献[10]和[11]分别针对移动中继系统和点对点节能系统对无人机轨迹设计进行了严格研究，其中应用顺序凸优化技术来解决非凸问题其中的轨迹优化问题。但研究仅关注单个无人机和单个地面用户的设置。对于支持多无人机和多用户的系统，文献[12]通过优化多用户通信调度和关联以及无人机的轨迹和功率控制，最大化下行链路通信中所有地面用户的最小吞吐量，并提出了一种有效的迭代算法，通过应用块坐标下降和连续凸优化技术来解决混合整数非凸优化问题。此类算法能够找到问题的最优解或次优解，但是时间复杂度是指数级的，求解难度很高，往往基于一系列假设和离散化进行求解，且求解的理论性质不明确。  近年来一些研究人员开始研究将无人机路径规划与强化学习相结合的轨迹规划方法。在文献[13]中，Dierks和Jagannathan提出了一种基于神经网络的无人机非线性控制器，该控制器通过在线学习无人机的动作形态，并输出反馈来实现路径规划。在文献[14]中，Nguyen等人设计了一种基于强化学习的无人机数据采集系统，通过训练方法优化无人机轨迹和吞吐量。在文献[15]中，Fu 等人研究了支持无线充电功能的无人机在执行任务中的应用，提出了一种基于强化学习的方法对无人机进行规划，使其从分散在物理环境中的传感器设备中采集传感器数据。但是这种方法对于复杂的路径规划问题可能需要大量的训练时间和计算资源，而且结果往往是通过试验和迭代获得的，缺乏对路径规划过程的解释性。  插值算法是轨迹规划的一种经典算法，通过对已知数据点进行插值计算，例如样条插值、贝塞尔曲线等，生成平滑的轨迹路径。伯恩斯坦多项式在计算贝塞尔曲线时起到了关键的作用。伯恩斯坦多项式具有数值稳定性、高效计算和丰富的几何特性，可以用于计算轨迹的边界、极值、最小时间和空间间隔，以及与障碍物的碰撞检测。近年来，许多研究者在路径规划中使用伯恩斯坦多项式来实现各种路径约束，如最大速度、角速率和最小距离。在文献[16]中，Venanzio等人将最优运动规划问题表述为连续时间最优控制问题，并使用伯恩斯坦多项式在离散设置中近似其解。在文献[17]中，Calvin提出了一种使用伯恩斯坦多项式生成自主系统操作轨迹的方法并给出了开源实现。在文献[18]中，Fei等人提出了一种用于未知环境中自主导航的在线四旋翼运动规划框架，并使用伯恩斯坦多项式将轨迹表示为分段贝塞尔曲线，使轨迹的位置和高阶动态完全限制在安全区域内。可以看出，基于伯恩斯坦的轨迹规划算法具有计算速度快，可解释性强等特点，能够解决复杂环境中多智能体运动任务。本课题将基于此方法进行理论分析与轨迹规划研究。  2.2.2 任务分配策略  目前，国内外对于多机协同任务分配的理论研究很多，归纳总结大致有下面几类[19]：  （1）穷举法，将可行域内所有可行解一一列举，由于效率过低，但仅适合规模小、离散的问题，当规模变大，将会出现组合爆炸且不能满足实时要求。  （2）整数规划方法[20]，通过设定目标函数、约束条件，来求解任务分配问题。例如：匈  牙利法、分支定界法等。  （3）图论的方法[21]，把目标和无人机的特征用图示的方法表示出来，并用图论方法在目  标和无人机间建立连接，得到理想的任务分配方案。主要有偶图匹配模型与网络流模型两种经典模型。图论方法能够直观地反应目标和无人机的结构，但不适用较大规模问题的求解，有一定的局限性。  （4）启发式方法[22]，在规定的耗时内计算可接受的解或偏离较小的解。启发式算法主要有列表规划、聚类方法和智能优化方法三类。列表规划方法思路是对目标建立打击优先次序，按照次序为目标分配无人机；聚类方法是将位于关键路径点的目标进行聚类形成一簇，当目标簇与无人机数一致时停止聚类，多适用于机组资源分配；智能优化算法出现在上世纪 70 年代，通过现代智能算法求得任务分配方案，是目前应用较为广泛的算法。它计算简单快速，解的质量相对高，主要分为以下几种：①进化算法，它通过模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程，进而搜索最优解。算法的原理易懂、适用性广、鲁棒性强，同时全局解搜索能力较强,多用于解决多目标优化问题。②群智能算法，从模拟群居小动物自组织行为产生的一种求解方法，著名的有模拟蚂蚁群体觅食的蚁群算法、模拟鸟群觅食的粒子群算法和模拟蜂群觅食的人工蜂群算法，群智能算法解决大规模集中式问题中收敛速度较快，得到的任务分配方案质量较高，但往往容易陷入局部最优。③除此之外还有基于固体退火原理的模拟退火算法和具有生成和检测迭代过程的人工免疫算法等。启发式方法求解速度相对快，求出的解质量也相对高，然而延展性不强，启发式原则随目标和约束条件的改变而改变，同时即便启发式算法求解速度较快，但求出得解却不一定是最优的。  （5）市场算法，基于对经济学中市场机制的研究，出现了市场算法。其思想是编队中的有人机（或无人机）与其他无人机协商来实现任务分配，使得自身利益或整体利益的最大化。市场算法主要有合同网协议算法和拍卖算法两种。合同网协议算法是模仿商人交易谈判的一种算法 ,算法出于避免矛盾的出现，通过通信的方法进行商议来解决问题[23]。按照市场经济中“招标-投标-中标-签合同”机制，当有待解决的任务时，在系统中发布招标信息，其他无人机通过互相协商和竞争，对任务进行分配、调整和转移。拍卖算法是在拍卖规则下，购买方通过竞价的方式，实现资源配置的一种市场机制算法[24]。在任务分配问题中，无人机要打击的目标即拍卖品，对目标进行拍卖的有人机（或无人机）和参加竞拍的无人机分别根据收益函数和出价策略实现拍卖过程。拍卖算法可制定交易规则，买方和卖方在规则下交易，求解效率高，并且通常能求得接近最好的解。市场算法的优点是无人机不需要提前了解其他无人机的能力，分配效率高，适合动态环境下快速任务分配。  **二、研究内容**  本课题主要针对时序多目标点问题，分别研究单无人机和多无人机情况下的轨迹规划技术，为无人机在执行时序多目标点跟踪任务时，规划出可靠且高效的飞行轨迹，从而提高任务完成效率。针对单无人机系统执行时序多目标点跟踪任务，本课题将基于伯恩斯坦多项式设计无人机的飞行轨迹，并将飞行轨迹与通信性能进行联合分析；针对多无人机系统执行时序多目标点跟踪任务，本课题将在单无人机轨迹规划的基础上，考虑任务分配、碰撞避免等问题，进一步优化多无人机飞行轨迹。  **研究内容1:面向时序多目标点跟踪的单无人机轨迹规划**  随着无人机技术的迅速发展，无人机在军事、物流、环境监测、农业等领域的应用日益广泛。在这些应用场景中，往往需要无人机执行时序多目标点的跟踪任务，即要求无人机按顺序依次飞往一系列预定目标点，并实时进行目标点的跟踪与处理。如何为这些任务规划出高效且可靠的飞行轨迹，是实现无人机任务成功的关键。  尽管目前在无人机轨迹规划技术上已有一定的研究进展，但针对存在时序多目标点的跟踪问题，仍然缺乏行之有效的轨迹规划方法。时序多目标点跟踪问题不仅涉及到无人机在三维空间中的轨迹生成，还要求在特定的时间点，高效地完成目标点的访问，确保无人机能够在预定的时刻到达各个目标点进行任务操作。  为了解决这个问题，本课题提出了基于伯恩斯坦多项式的轨迹规划方法。伯恩斯坦多项式具有灵活的数学特性，能够精确描述路径的平滑性和连续性，并且易于调整控制点来改变飞行轨迹的形状。通过该方法，可以设计出符合无人机动态飞行约束的平滑轨迹。具体来说，伯恩斯坦多项式不仅能够提供精确的路径控制，还能在实际应用中，通过调整控制点优化路径长度、飞行时间等关键因素。  此外，无人机在飞行过程中常常需要依赖无线通信进行数据传输，包括任务信息、控制指令、监测数据等。这就要求在轨迹规划时，必须考虑通信链路的稳定性和可靠性。由于无人机的飞行轨迹会直接影响到通信质量，因此，本课题对飞行轨迹与通信性能进行分析，研究轨迹规划算法在通信方面的理论性质，给出了两个性能指标，用于评估无人机与目标点距离，以及与目标点处设备数据传输速率，为实际应用场景中的无人机轨迹规划提供指导和解决方案。  **研究内容2:面向时序多目标点跟踪的多无人机轨迹规划**  在多无人机系统中，当多个无人机按照基于伯恩斯坦多项式规划的轨迹执行时序多目标点跟踪任务时，问题的复杂度大大增加。因此需要综合考虑多个因素，确保任务的顺利执行与系统的高效运行。  首先，任务分配是多无人机系统中的关键问题之一。每架无人机的任务分配不仅依赖于目标点的分布，还需考虑无人机的当前位置、飞行能力、航程、负载能力等多个方面的约束，确保各无人机在任务执行过程中能够合理地分配目标点，避免资源的浪费和任务执行的重复性。同时，任务的时效性也是一个重要因素，某些目标点可能需要在限定时间内完成任务，基于时效性对任务进行动态调整和优化，能够提高系统的响应速度和整体效率。考虑全局的任务需求、目标点分布以及任务的时效性约束，进行全局轨迹规划，保证每架无人机能够在最短时间内完成分配的任务目标，避免任务执行中的冗余操作和不必要的绕行。  碰撞避免是多无人机系统中另一个重要的挑战。在多个无人机同时执行任务时，如何确保它们在有限的空域内相互避让，防止碰撞成为了飞行规划中的关键问题。为了有效解决这一问题，本课题将在轨迹优化过程中加入碰撞检测与避让算法，确保每架无人机在飞行时不仅要避开静态障碍，还需要实时计算与其他无人机之间的相对位置，并采取相应的避碰措施。这些措施可以包括调整飞行高度、改变飞行速度或修正飞行轨迹等，以确保多架无人机能够在不发生碰撞的前提下完成任务。为了解决这一问题，本课题提出一种混合策略。先通过全局路径规划生成初步轨迹，然后结合避障策略进行修正。做到既能够进行全局规划，又能在局部环境中进行避障。  **三、关键技术**  本课题的关键技术主要分为两个部分：面向时序多目标点跟踪的单无人机轨迹规划和面向时序多目标点跟踪的多无人机轨迹规划。  **3.1面向时序多目标点跟踪的单无人机轨迹规划**   1. 伯恩斯坦多项式   伯恩斯坦多项式（Bernstein Polynomial）是一类常用于逼近连续函数的多项式，在函数逼近、数值分析和计算机图形学中有着广泛的应用。特别适用于需要对连续函数进行逼近的情形，并且由于其简单的计算形式，也常用于计算机算法中进行图形渲染、曲线拟合等任务。  次伯恩斯坦基多项式定义为：  (1)  其中， ， 。  阶伯恩斯坦多项式 是  个次伯恩斯坦基多项式的线性组合，即：  (2)  其中称为伯恩斯坦控制点（或系数）。将上面给出的伯恩斯坦多项式的定义扩展到多项式的 n 维向量，并定义在扩展域 上，以如下形式表示:  (3)  其中， ，。  引理1：对任意连续函数,的阶伯恩斯坦近似是一个伯恩斯坦多项式向量，其计算方法如式(3)所示。然后，对于任意阶的近似 ，伯恩斯坦近似 满足：    其中， 是与 无关的正常数, ， 是上的连续模。  对于任意函数，其连续模定义为：    其中。   1. 无人机轨迹规划   考虑一个三维笛卡尔坐标系，假设存在个目标点，用集合表示。表示第个目标点。在时刻，，目标出现在目标点处。无人机在执行任务过程时，需要按照时序多目标点序列，对目标进行跟踪。  假设无人机以固定的高度  飞行，起飞点为，降落点为，并且在时刻  的水平位置坐标为，其中，为任务总时间。  为了利用伯恩斯坦丰富的几何特性，规划出合理的无人机飞行轨迹，我们将无人机的位置重写为伯恩斯坦形式    其中为控制点，为伯恩斯坦基多项式, 。  根据终点值特性，将伯恩斯坦多项式的首末控制点设定为无人机的起飞点和降落点。将目标点设置为伯恩斯坦多项式的第个控制点，以确保轨迹满足任务要求，即      根据式(6)得到实际的无人机飞行轨迹。根据公式定义计算伯恩斯坦多项式不是一种最优算法，因为它的时间复杂度很高，使用de Casteliau算法来计算(4)中伯恩斯坦多项式上的所有点以获得最终无人机飞行轨迹。  最后，通过理论推导给出了无人机与目标点距离和通信速率的评估表达式。  定理一：考虑一个按照式(4)进行轨迹规划的单无人机系统。存在时刻，使得无人机与任意目标点的距离和数据传输速率分别满足：        其中，是距离上界，是通信速率下界。      其中， 是上的连续模，是利用三次样条插值，将无人机的起飞点和降落点以及全部目标点的位置进行平滑连接所得曲线。为目标点处设备发射功率，为无人机接收器处的加性高斯白噪声功率，表示参考距离处的信道功率。  通过距离上界可以评估无人机与目标点的最大距离，为无人机的操作范围、飞行任务规划、系统设计和通信质量提供了一个明确的界限。了解这一最大距离，不仅能够确保任务顺利完成，还能帮助设计和优化通信系统，提升任务的稳定性、安全性和效率。通信速率下界确保了无人机与目标点处通信设备之间的通信速率不会低于某个最小值，通过这一指标，可以评估系统在最坏条件下通信的稳定性和有效性。  **3.2面向时序多目标点跟踪的多无人机轨迹规划**  1）任务分配策略  任务分配是多无人机系统中确保任务高效执行的核心问题之一。其目的是合理地将多个目标点分配给不同的无人机，确保每个无人机能够高效地完成跟踪任务，并减少资源浪费。拍卖算法是一种通过竞价机制来合理分配任务给多个无人机的策略。该策略通常用于多无人机协同任务分配的场景，尤其适用于无人机群体在复杂环境中进行自主决策的应用，通过竞争性方式分配任务，优先选择能为系统带来最大收益的无人机与目标对接。  拍卖算法源自于传统的拍卖市场机制，其中任务被看作是拍卖的物品，无人机被看作是竞标者。在这一机制中，每个无人机会根据其自身的能力、任务要求和环境条件，对每个任务进行竞标，最终通过“拍卖”机制决定任务分配。  竞标过程是拍卖算法的核心步骤。每个无人机会根据任务的属性进行报价，报价可以基于以下几个因素：   1. 任务难度：任务距离、复杂度等，距离远或复杂的任务可能需要更高的报价。 2. 无人机的能力：无人机的载重、飞行速度、电池剩余电量等，能力更强的无人机可能会降低报价。 3. 时效性要求：一些任务可能对时间要求较高，造成报价的变化。   无人机会在任务拍卖中根据这些因素进行竞标，价格通常表示为完成任务的“代价”或“资源消耗”。无人机会根据自己的剩余资源（如电池电量、飞行距离）来选择出价合适的任务。拍卖过程中无人机会不断根据拍卖规则调整策略，尽量以最优的报价赢得任务。  2）局部避碰算法  在多无人机系统中，碰撞避免是确保飞行安全的关键问题。随着任务数量的增加和无人机的飞行复杂度，如何有效地避免碰撞是至关重要的。基于人工势场法（Artificial Potential Field, APF）的无人机碰撞避免是一种常见的路径规划方法，它通过模拟物体之间的相互作用来引导无人机避开障碍物并达到目标位置。人工势场法将目标点和障碍物看作“力源”，通过计算相互作用力来动态调整无人机的运动轨迹。  人工势场法主要是通过建立目标点和障碍物的势场模型，计算出每个位置的总“力”，然后根据这个力的方向调整无人机的运动。目标点被视为吸引源，无人机会受到一个指向目标的吸引力。这个力通常与无人机与目标的距离成反比。随着无人机靠近目标点，吸引力逐渐增大，最终引导无人机向目标点移动。障碍物则是排斥源，无人机在靠近障碍物时，会受到一个排斥力，避免无人机与障碍物发生碰撞。这个力通常与无人机与障碍物的距离成反比，距离越近，排斥力越大，迫使无人机远离障碍物。在每个位置，所有的力会叠加成一个总的势场力。无人机根据这个合力的方向调整运动。  **四、论文计划**  论文包括以下五个部分：第一部分是绪论，主要介绍论文的研究背景，研究现状和研究内容；第二部分为预备知识，给出无人机轨迹规划的基本模型和伯恩斯坦多项式的基本理论，为后续新方法的设计提供理论基础；第三部分为面向时序多目标点跟踪的单无人机轨迹规划设计，基于伯恩斯坦多项式进行无人机轨迹规划，并进行理论推导分析其理论性质；第四部分为面向时序多目标点跟踪的多无人机轨迹规划设计，首先设计一种任务分配方法，然后针对碰撞避免等问题进行轨迹优化；第五部分为总结与下一步工作展望。  **五、论文进度及目标**  在面向时序多目标点跟踪的单无人机轨迹规划中，本课题基于伯恩斯坦多项式进行轨迹规划，克服了传统算法在计算效率和理论精度上的瓶颈，优化了轨迹规划过程，大大提高了计算效率，避免了高时间复杂度的指数级增长，能够在较短时间内获得高质量的轨迹规划解。并进一步考虑了无人机飞行轨迹的通信性能优化，通过对飞行轨迹的系统性分析，给出两个性能指标——无人机与目标点的距离上界及通信速率下界。这一理论突破为提升无人机在复杂环境中的数据传输效率和稳定性提供了有力支撑，有助于减少信息传输中的丢包、延迟等问题，提升系统的整体可靠性和效率。  在面向时序多目标点跟踪的单无人机轨迹规划中，本课题预计首先基于拍卖算法设计一种任务分配策略，根据目标点的分布、无人机的当前位置、任务时效性等多种因素，进行最优的任务分配。然后通过全局路径规划生成初步轨迹，结合人工势场法等避障策略进行修正。做到既能够进行全局规划，又能在局部环境中进行避障。  论文具体进展如下:   |  |  |  | | --- | --- | --- | | 时间 | 研究内容 | 预期效果 | | 2023.09-2023.11 | 阅读无人机轨迹规划相关论文 | 对无人机轨迹规划有较为全面的理解 | | 2023.12-2024.03 | 进行单无人机轨迹规划与通信性能联合分析相关研究 | 完成单无人机轨迹规划并对系统通信性能进行推导 | | 2024.04-2024.06 | 进行多无人机任务分配和轨迹规划相关研究 | 完成多无人机任务分配和轨迹优化算法设计 | | 2024.07-2024.12 | 通过仿真实现面向时序多目标点跟踪的无人机轨迹规划研究 | 通过仿真验证所提方法对解决问题的有效性 | | 2025.01-2025.03 | 基于仿真结果调整方案，补充实验 | 完成论文撰写并准备毕业答辩 | | | | |

|  |
| --- |
| **论文进展情况**  **一、报告工作计划**  完成开题报告后，根据开题报告中所写的论文主要研究内容和技术路线，论文阶段报告工作计划如下：   * + - 2023.11.1-2024.2.28阅读无人机轨迹规划相关论文，对无人机轨迹规划有较为全面的理解；     - 2024.3.1-2024.5.31进行无人机轨迹规划与理论性质分析相关工作，完成单无人机轨迹规划并对系统性能指标进行推导；     - 2024.6.1-2024.9.30进行多无人机任务分配和轨迹规划相关研究，完成多无人机任务分配和轨迹优化算法设计；     - 2024.10.1-2024.11.31通过仿真实现面向时序多目标点跟踪的无人机轨迹规划研究，通过仿真验证所提方法对解决问题的有效性；     - 2024.12.1-2025.1.31基于仿真结果调整方案，补充实验，完成论文撰写并准备毕业答辩；   **二、实际进展情况**  在面向时序多目标点跟踪的单无人机轨迹规划中，本课题提出了基于伯恩斯坦多项式的轨迹规划方法。根据实际任务需要设计时序多目标点序列，再基于伯恩斯坦多项式进行轨迹规划。为无人机在执行时序多目标点跟踪任务时，规划出可靠且高效的飞行轨迹，从而提高任务完成效率。并对飞行轨迹与通信性能进行分析，研究轨迹规划算法在通信方面的理论性质，给出了两个性能指标，用于评估无人机与目标点距离，以及与目标点处设备数据传输速率，为实际应用场景中的无人机轨迹规划提供指导和解决方案。仿真结果验证了所提方法的有效性和理论分析的正确性。  在面向时序多目标点跟踪的多无人机轨迹规划中，首先需要进行任务分配，接下来还需要解决多无人机间的碰撞避免等问题，对无人机飞行轨迹进一步优化。以确保整个任务的顺利执行与系统的高效运行。本课题已完成任务分配以及碰撞避免方法的调研工作，准备进行相关方法的选择。目前对拍卖算法和人工势场法的学习和使用正在进行中，尚未确定具体的策略设计。 |
| **工作成果**  **一、已完成学位论文工作的内容**  在面向时序多目标点跟踪的单无人机轨迹规划中，本课题提出了基于伯恩斯坦多项式的轨迹规划方法。根据实际任务需要设计时序多目标点序列，再基于伯恩斯坦多项式进行轨迹规划。为无人机在执行时序多目标点跟踪任务时，规划出可靠且高效的飞行轨迹，从而提高任务完成效率。并对飞行轨迹与通信性能进行分析，研究轨迹规划算法在通信方面的理论性质，给出了两个性能指标，用于评估无人机与目标点距离，以及与目标点处设备数据传输速率，为实际应用场景中的无人机轨迹规划提供指导和解决方案。仿真结果验证了所提方法的有效性和理论分析的正确性。  在面向时序多目标点跟踪的多无人机轨迹规划中，本课题已完成任务分配以及碰撞避免方法的调研工作，准备进行相关方法的选择。目前对拍卖算法和人工势场法的学习和使用正在进行中，尚未确定具体的策略设计。  二、**取得的阶段性成果**  2.1 面向时序多目标点跟踪的单无人机轨迹规划  该部分介绍所提基于伯恩斯坦多项式轨迹规划算法的实现、理论推导以及仿真验证结果。  2.1.1 基于伯恩斯坦多项式的轨迹规划算法设计  首先，针对目标跟踪、有人/无人机协同、无线数据采集等场景的不同需求，获取不同时序目标点序列S。在目标跟踪场景下，例如跟踪地面移动车辆、人员或河面目标等，根据对目标运动规律的预测，预判目标在未来时刻的位置，将预测得到的目标位置按照时间均匀划分，作为时序目标点序列，进行无人机的轨迹规划。在有人/无人机协同场景下，基于有人机飞行轨迹提取时序多目标点序列，进行无人机轨迹规划，确保无人机与有人机之间的协调与通信，以实现协同任务的高效执行。对于无线数据采集场景，将地面传感器的水平位置设为时序目标点序列，进行无人机轨迹规划，确保数据采集的完整性和高效性。  根据终点值特性将无人机的起飞和降落点设置为伯恩斯坦多项式的第一个和最后一个控制点，以确保轨迹的端点满足任务要求。将时序多目标点序列 设置为剩余的控制点，生成伯恩斯坦多项形式的无人机轨迹。根据公式定义计算伯恩斯坦多项式不是一种最优算法，因为它的时间复杂度很高，所以使用de Casteliau算法来计算伯恩斯坦多项式上的所有点以获得最终无人机飞行轨迹。    图2-1 轨迹规划算法  2.1.2 理论分析与推导  通过对飞行轨迹的系统性分析，给出无人机与目标点距离和通信速率的评估表达式。可以根据这两个指标评估无人机轨迹规划的效果，从而确保无人机能够在目标点周围以高精度完成任务，并保证信息的实时传输与稳定通信。  2.1.3仿真验证  为验证所提方法的有效性和理论分析的正确性，以无线数据采集场景为例，进行如下仿真。  考虑一个有13个传感器节点的单无人机无线数据采集系统，这些传感器节点根据地理特征分布（以沿河流分布为例）在的二维区域内。假设无人机飞行高度为固定高度。接收机噪声功率假设为 。参考距离处的信道功率增益设置为。传感器上行发射功率。  图2-2展示了无人机飞行路径。无人机从起点出发，依次靠近每个传感器进行数据采集，最后在终点降落。其中红色曲线为本课题所提出方法获得的无人机路径，蓝色曲线为根据样条插值获得的无人机路径，并给出了路径长度。图2-3展示了两种方法获得路径的曲率变化情况。可以看到，本文方法生成的路径不仅长度更短，而且在飞行过程中的曲率变化也更为平滑，显示出较高的路径效率和飞行安全性。图2-4和图2-5分别展示了在整个无线数据采集任务中，无人机与各个传感器节点间距离的变化情况和数据传输速率的变化情况。当无人机逐渐靠近某个传感器节点时，与该节点的距离减小，数据传输速率显著提升，而当无人机开始远离该节点时，距离逐渐增大，传输速率则相应下降。尽管如此，距离最小值始终低于给出的距离下界、数据传输速率的最大值始终高于给出的速率下界。图2-6更清晰地展示了这一点。  以有人/无人机协同执行任务为例，进行如下仿真。  考虑一架无人机跟随有人机执行任务，为满足无人机与有人机间的通信需求，要求整个任务期间，无人机与有人机间距离在任务需要的距离范围内。图2-7和图2-8分别展示了在整个任务期间，无人机与有人机间距离的变化情况和数据传输速率的变化情况。同样可以看出，距离始终低于给出的距离下界、数据传输速率始终高于给出的速率下界。    图2-2 无人机飞行轨迹    图2-3 无人机飞行轨迹曲率变化对比    图2-4 无人机与传感器节点距离变化    图2-5 无人机与传感器节点数据传输速率变化    图2-6 数据传输速率最大值与下界    图2-7 有人/无人机距离变化    图2-8 有人/无人机数据传输速率变化  **三、主要创新点**  **创新点1：针对时序多目标点跟踪问题，提出基于伯恩斯坦多项式的轨迹规划方法，并进行理论分析**  在面向时序多目标点跟踪的单无人机轨迹规划中，本课题基于伯恩斯坦多项式进行轨迹规划，克服了传统算法在计算效率和理论精度上的瓶颈，优化了轨迹规划过程，大大提高了计算效率，避免了高时间复杂度的指数级增长，能够在较短时间内获得高质量的轨迹规划解。并进一步考虑了无人机飞行轨迹的通信性能优化，通过对飞行轨迹的系统性分析，给出两个性能指标——无人机与目标点的距离上界及通信速率下界。这一理论突破为提升无人机在复杂环境中的数据传输效率和稳定性提供了有力支撑，有助于减少信息传输中的丢包、延迟等问题，提升系统的整体可靠性和效率。  **创新点2：针对多无人机轨迹规划，设计任务分配策略和碰撞避免算法**  在面向时序多目标点跟踪的单无人机轨迹规划中，本课题预计首先基于拍卖算法设计一种任务分配策略，根据目标点的分布、无人机的当前位置、任务时效性等多种因素，进行最优的任务分配。然后通过全局路径规划生成初步轨迹，结合人工势场法等避障策略进行修正。做到既能够进行全局规划，又能在局部环境中进行避障。  **四、已发表的与学位论文相关的学术论文**  [1] Y. Kong, J. Yang, H. Xu, et al., UAV Trajectory Planning for Wireless Data Acquisition: A Bernstein-Polynomial Approach, China Automation Congress, 2024. （CAC会议，第一作者）  [2] J. Yang, Y. Kong, H. Su, et al., Combining Centralized and Decentralized Federated Learning: An Integrated Framework, China Automation Congress, 2024. （CAC会议，第二作者）  [3] S. Zhang, C. Wang , P. Lin, Y. Kong, et al., Dynamic Routing for Formation-Control Multi-Agent Systems: A Joint Control-Communication Framework, Chinese Control Conference, 2023. （CCC会议，第四作者）  [4] 北京邮电大学. 一种基于通信网络的联邦学习方法、装置[P]. 申请号: 202411538491.5, 2024-10-31. （发明专利, 第二学生作者, 申请中）  [5] 北京邮电大学. 多智能体系统连通性的检测方法和装置[P]. 中国专利: CN116866155A, 2023-10-10. （发明专利, 第五作者, 已授权） |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **计划及进度安排**  针对研究内容一，对无人机轨迹规划方法进行了深入调研，重点掌握了常用的轨迹规划算法。针对时序多目标点跟踪问题，提出了基于伯恩斯坦多项式的轨迹规划算法。通过对所规划飞行轨迹的系统性分析，给出两个性能指标——无人机与目标点的距离上界及通信速率下界。仿真结果验证了所提方法的有效性和理论分析的正确性。  针对研究内容二，对多无人机系统任务分配和碰撞避免问题进行了深入调研，系统了解了常用算法的原理和代码实现。基于这些研究成果，设计专门用于时序多目标点跟踪问题的任务分配算法和轨迹优化算法，并通过仿真完成对所设计方法有效性的验证。  论文后期的计划与进度安排如下:   |  |  |  | | --- | --- | --- | | 时间 | 研究内容 | 预期效果 | | 2024.12.5-2025.1.31 | 研究多无人机系统轨迹规划问题，设计可靠的任务分配方法和轨迹优化算法 | 得到仿真结果，完成毕业论文初稿的撰写工作 | | 2025.2.1-2025.5.30 | 修改毕业论文，准备毕业答辩 | 毕业论文修改完毕，答辩材料准备完毕 | |
| **问题及整改方案**  依据开题报告中论文工作的相关内容，论文后期工作还存在以下问题：针对研究内容一，现有的轨迹规划算法尚有进一步优化空间，特别是处理大量目标点时，算法性能仍需改进。对于研究内容二，已初步设计了任务分配算法和碰撞避免算法架构，但算法设计仍需进一步完善。  整改方案：针对研究内容一，在现有轨迹规划算法的基础上提出改进方案，以提升算法性能；对于研究内容二，基于当前的算法框架，进一步完善算法的细节设计，同时验证所提算法的有效性，之后对已有实验相关数据进行对比整理。  最后整理现有材料，在2025年2月之前完成大论文初稿，在后续过程中丰富文章内容，4月之前完成大论文的整体撰写工作。 |

|  |
| --- |
| **参考文献**   1. B. Li, Z. Fei, Y. Zhang, UAV Communications for 5G and Beyond: Recent Advances and Future Trends. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 2241-2263. 2. Q. Wu, J. Xu, Y. Zeng, et al. A Comprehensive Overview on 5G-and-beyond Networks with UAVs: from Communications to Sensing and Intelligence. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(10): 2912-2945. 3. A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, Internet of Things for Smart Cities. IEEE Internet of Things Journal, 2014, 1(1): 22-32. 4. J. Li, H. Zhao, H. Wang, Joint Optimization on Trajectory, Altitude, Velocity, and Link Scheduling for Minimum Mission Time in UAV-aided Data Collection. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(2): 1464-1475. 5. X. Li, J. Tan, A. Liu, A novel UAV-enabled Data Collection Scheme for Intelligent Transportation System Through UAV Speed Control. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(4): 2100-2110. 6. R. Szczerbar, P. Galkowski, and I. Glicktein, Robust Algorithm for Real-time Route Planning. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3): 869-878. 7. N. Matej, P. Robert, and V. Vojtech, CTopPRM: Clustering Topological PRM for Planning Multiple Distinct Paths in 3D Environments, IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(11): 7336-7343. 8. F. Jiang, and L. Swindlehurst, Optimization of UAV Heading for the Ground-to-air Uplink. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(5): 993-1005. 9. C. Zhan, and H. Lai, Energy Minimization in Internet-of-things System Based on Rotary-wing UAV. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(5): 1341-1344. 10. Y. Zeng, R. Zhang, and J. Lim, Throughput Maximization for UAV-enabled Mobile Relaying Systems. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(12): 4983-4996. 11. Y. Zeng and R. Zhang, Energy-efficient UAV Communication with Trajectory Optimization, IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(6): 3747–3760. 12. Q. Wu, Y. Zeng, and R. Zhang, Joint Trajectory and Communication Design for Multi-UAV Enabled Wireless Networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018,17(3): 1538-1542. 13. T. Dierks, and S. Jagannathan, Output Feedback Control of a Quadrotor UAV Using Neural Networks, IEEE Transactions on Neural Networks, 2010, 21(1): 50-66. 14. K. Nguyen, T. Duong, and T. Do-duy, 3D UAV Trajectory and Data Collection Optimization via Deep Reinforcement Learning. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(4): 2358-2371. 15. S. Fu, Y. Tang, and Y. Wu, Energy-efficient UAV-enabled Data Collection via Wireless Charging: A Reinforcement Learning Approach. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(12): 10209-10219. 16. C. Venanzio, K. Isaac, W. Claire, and H. Naira, Optimal Multivehicle Motion Planning Using Bernstein Approximants, IEEE Transactions on Automatic Control, 2021, 66(4): 1453-1467. 17. K. Calvin, C. Venanzio, BeBOT: Bernstein Polynomial Toolkit for Trajectory Generation, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2019, 3288-3293. 18. F. Gao, W. Wu, L. Lin, and S. Shen, Online Safe Trajectory Generation For Quadrotors Using Fast Marching Method and Bernstein Basis Polynomial, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2018, 344-351. 19. 陈侠,乔艳芝. 无人机任务分配综述, 沈阳航空航天大学学报,2016, 33(06): 1-7. 20. A. M. Task Assignment Algorithms for Teams of UAVs in Dynamic Environments, Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2004. 21. 马巧云. 基于多 Agent 系统的动态任务分配研究, 华中科技大学, 2006. 22. S. Rasmussen, P. Chandler, J. MITCHELL. Optimalvs. Heuristic Assignment of Cooperative Autonomous Unmanned Air Vehicles, AIAA -2003-5586. Reston: AIAA, 2003． 23. 张海俊,史忠植.动态合同网协议.计算机工程, 2004, (21): 44-46+57. 24. A. Woosun, C. Park, K. Pattipati. HMM and Auction-based Formulations of ISR Coordination Mechanisms for the Expeditionary Strike Group Missions, Proceedings of the 14th International Command and Control Research and Technology Symposium, 2009. |
| |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | | 姓 名 | 职 称 | 职务 | 导师类型 | 工 作 单 位 | | 周慧玲 | 教授 | 组长 | 博、硕导 | 北京邮电大学 | | 唐玲 | 高级工程师 | 成员 | 硕导 | 北京邮电大学 | | 钱荣荣 | 副教授 | 成员 | 博、硕导 | 北京邮电大学 | |  |  |  |  |  | |  |  |  |  |  |   **评审小组** |

|  |
| --- |
| **导师评语** |
| 导师：  日期： 年 月 日 |
| **阶段报告小组意见：** |
| 负责人：  日期： 年 月 日 |
| **学院意见：** |
| 负责人：  日期： 年 月 日 （签章） |