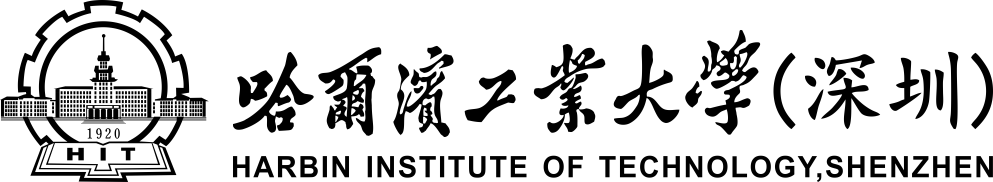
****

**毕业设计（论文）开题报告**

**题 目：过驱动飞行器的轨迹规划**

**专 业 自动化类**

**学 生 刘培焱**

**学 号 180310211**

**指导教师 陈浩耀 教授**

**日 期 2021年11月25日**

**哈尔滨工业大学（深圳）教务部制**

目 录

[1 课题来源及研究的目的和意义 1](#_Toc2407)

[1.1 课题来源 1](#_Toc5054)

[1.2 研究的目的和意义 1](#_Toc8407)

[2 国内外在该方向的研究现状及分析 2](#_Toc11232)

[2.1 研究现状 2](#_Toc4019)

[2.1.1 全/过驱动飞行器 2](#_Toc16803)

[2.1.2 多旋翼飞行器的轨迹规划 2](#_Toc3850)

[2.2 研究现状分析 3](#_Toc19166)

[3 主要研究内容 4](#_Toc568)

[3.1 全向六旋翼飞行器的建模 4](#_Toc22235)

[3.2 全自由度轨迹规划 4](#_Toc30543)

[3.3 轨迹规划算法的仿真验证与实物验证 4](#_Toc20363)

[4 研究方案 5](#_Toc7166)

[4.1 系统设计 5](#_Toc29020)

[4.1.1 飞行器动力学建模 5](#_Toc21138)

[4.1.2 轨迹规划 5](#_Toc5811)

[4.2 方案验证 8](#_Toc12279)

[4.2.1 仿真验证 8](#_Toc7264)

[4.2.2 实物验证 8](#_Toc13043)

[5 预期目标与进度安排 9](#_Toc3717)

[5.1 预期目标 9](#_Toc17891)

[5.2 进度安排 9](#_Toc2491)

[6 课题已具备和所需的条件、经费 10](#_Toc26569)

[6.1 实验室科研条件 10](#_Toc23179)

[6.2 经费保障 10](#_Toc32369)

[7 可能遇到的困难和解决措施 11](#_Toc30060)

[参考文献 12](#_Toc8935)

# 

# 课题来源及研究的目的和意义

## 课题来源

在过去的十年中，多旋翼无人飞行器（Multirotor UAV）的发展和应用取得了空前的繁荣与进步，成为一批成功从实验室走进人们日常生活应用中的机器人。在许多领域和场合，如航拍、种植、检修和各种军事任务中都能见到它们的身影。多旋翼无人机的成功主要得益于它们简单的机械结构和飞行的稳定性。但是现阶段常用的多旋翼无人机主要是以四旋翼为代表的欠驱动系统，这导致飞行器的位置、速度和姿态的控制间存在耦合，这就在一定程度上限制了飞行器的运动性能。

为了充分发掘多旋翼飞行器的潜力，近年来发展出了多种能将飞机的位置与姿态解耦的多旋翼飞行器，使得飞行器能做出更多复杂的运动。其中比较有代表性的是一种基于倾转旋翼（tilting propellers）的全向六旋翼飞行器（omnidirectional hexacopter），其采用矢量控制的方式，在传统固定臂六旋翼飞行器的基础上给每个机臂增加了一个旋转自由度，使其成为一个过驱动系统（over-actuated system)，每个旋翼都能在其倾转平面内提供任意方向的推力，使得该飞行器可以以任意姿态悬停和飞行。如此一来，飞行器在复杂环境中飞行的能力（如避障、穿越狭缝的能力）大大提高。

## 研究的目的和意义

由于全向六旋翼飞行器的位置和姿态可以独立控制，这就增加了规划的自由度，可以进行更灵活的运动规划，可以想到，这样的飞行器在复杂、狭小的环境中的避障穿越性能将会更好。在这个新平台上，传统轨迹规划的解决方案是否适用以及需要做哪些改进是值得一探究竟的。本课题重点研究全向六旋翼飞行器的轨迹规划（trajectory planning）的实现。通过深入研究各种运用在过驱动飞行器及传统欠驱动飞行器上的轨迹规划方法，并对其进行优化，使之能适用于全向六旋翼飞行器，为后续的研究打下基础。

# 国内外在该方向的研究现状及分析

## 研究现状

正是由于多旋翼无人机的许多优点，如何充分发挥其潜力，提高其飞行自主性，是值得探索的。目前国内外已有不少相关研究成果，下面从全/过驱动飞行器和多旋翼轨迹规划两方面进行综述。

2.1.1 全/过驱动飞行器

目前已经有多种多旋翼无人机实现了全向飞行。2012年，Markus Ryll等人提出了一种可倾转旋翼的四旋翼无人机[1]，这种无人机的控制方式可以让它以最大25°的俯仰角悬停，尽管仍然对悬停姿态有限制，但这已经验证了利用倾转旋翼结构来独立控制无人机6个空间自由度的可行性；2015年，Sujit Rajappa等人研制了一种可倾转旋翼的六旋翼无人机[2]，每个旋翼都能绕着沿机臂和垂直于机臂两条轴倾转，是典型的过驱动飞行器；2016年，苏黎世联邦理工学院（ETHZ）研制出了Omnicopter[3]，它的8个旋翼都是固定的，但是采用了一种立体的几何构型，能够提供任意方向和任意动力的推力和扭矩。本课题拟使用的无人机平台借鉴了同样是由苏黎世联邦理工学院研发的VoliroX[4]飞行器的设计思路，采用倾转旋翼的方式来实现全向飞行。

2.1.2 多旋翼飞行器的轨迹规划

在多旋翼无人机的运动规划方面，特别是以四旋翼为代表的传统的欠驱动飞行器的轨迹规划技术已经有许多很成熟的解决方案。在2017年，香港科技大学（HKUST）提出了基于梯度的安全轨迹生成方法[5]，利用梯度信息实现四旋翼无人机在复杂未知的三维环境中的自动导航，并将无人机的运动规划问题分解为了前端轨迹搜寻和后端轨迹优化两部分；2019年Jesus Tordesillas提出了用于在未知环境中飞行的快速且安全的轨迹规划器FASTER[6]，大胆地在未知空间中预规划轨迹，并留有一条在已知自由空间中规划的备用轨迹来保证飞行安全，突破了传统方法只在已知自由空间中规划轨迹所带来的飞行速度限制；传统基于梯度的方法需要处理整个欧氏符号距离场（ESDF）地图来估计梯度大小和方向，而轨迹规划只涉及了地图的一个很小的子空间，这增加了很多冗余的计算量，针对这个问题，2021年浙江大学（ZJU）提出了EGO-Planner[7]——一个不依赖ESDF的规划器，只有在轨迹碰到新的障碍物时障碍物信息才会被存起来，这大大减少算法的复杂度，减少了计算时间和内存消耗。

以上列举的几种有影响力的成果都是基于欠驱动飞行器的，但是其采用的算法思路也同样适用于过驱动飞行器。直接基于过驱动和全驱动飞行器的轨迹规划的相关成果并不太多。2018年，Fabio Morbidi等人提出了用于双轴倾转旋翼六旋翼飞行器的节能轨迹生成方法[8]，通过求解一个显式考虑电机电气模型的优化控制问题得到一条指定边界点的节能轨迹，并做了数值验证，这篇文章重点着眼于节能而没有考虑避障等实际问题；2021年，Michael Pantic等人提出了基于流形网格的黎曼运动规划，应用于全向飞行器与曲面的交互场景[9]，没有探究全向飞行器的避障穿梭性能。

## 研究现状分析

从上述研究现状可以看出，在全/过驱动无人机的结构、建模和控制，以及传统欠驱动无人机的轨迹规划方面，已有丰富且成熟的研究成果，只不过全/过驱动飞行器的轨迹规划方面研究成果并不多，而且很多实用性不强，因此这种新型飞行器的自主飞行能力还有待提高。

为了丰富过驱动飞行器自主飞行方面的研究成果，本课题将开展过驱动飞行器轨迹规划的研究，拟解决将传统的基于欠驱动飞行器的轨迹规划方案应用到过驱动平台的问题。

# 主要研究内容

## 3.1 全向六旋翼飞行器的建模

为了给无人机规划出安全且高效的运行轨迹，要同时考虑无人机本身和环境带来的运动学和动力学约束。为了实现考虑这种运动学与动力学约束下的轨迹规划（kinodynamic planning），需要确定无人机系统的动力学模型，完成无人机在地图中的路径搜索以及轨迹优化，对无人机的飞行策略进行合理的计划，以保证轨迹的安全性和快速性。

## 3.2 全自由度轨迹规划

根据飞行器的运动学与动力学约束以及地图信息，利用图搜索算法或基于采样的搜索算法完成前端路径查找的任务，利用优化算法完成后端轨迹生成的任务，最终得到一条飞行器能执行的平滑且安全的最优轨迹。

## 3.3 轨迹规划算法的仿真验证与实物验证

完成轨迹规划的前后端任务可以有多种不同的算法。借助计算机探究比较各种算法的特点、性能和可行性；构建出轨迹规划系统后，分别在仿真器和实物飞机上验证效果。

# 研究方案

4.1 系统设计

4.1.1 飞行器动力学建模

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) | (b) |
| 图1：（a）坐标系与电机编号（b）旋翼单元坐标系 | |

飞行器的坐标系定义、旋翼旋转方向及旋翼编号如图1所示[10]。其中*I*系为世界惯性坐标系（world inertial frame），*B*系为机体固连坐标系（body-fixed frame），*Ri*系为旋翼*i*的坐标系（rotor unit frame,i=1,...,6），*Ri*可以相对集体绕绕机臂旋转，转角为*αi*，飞行器动力学模型用Newton-Euler方程描述如下[11]：

 （4-1）

式中***F***和***τ***分别为飞行器所受合力与合转矩，***v***为飞行器质心相对惯性系的速度，***ω***为机体相对惯性系的角速度，*m*为飞行器总质量，***J***为飞行器惯性矩阵，下标*b*表示对应向量和惯性矩阵是在机体坐标系中表示的。

4.1.2 轨迹规划

规划模块处于无人机软件框架中的中间位置，其接收传感器和定位模块发来的上游信息（如地图等），输出一条安全、平稳、舒适的轨迹给到控制模块，因此起到了一个承上启下的作用，可以说是影响无人机自主飞行性能最重要的一环。无人机规划问题可以分为两个步骤：

（1）前端路径查找（front-end path searching）：利用地图信息在空间中搜寻出一条可行的路径，路径由一系列路径点组成，是对飞行器运动的纯几何描述。因此路径查找工作在离散、低维的空间中。

（2）后端轨迹生成（back-end trajectory generation）：在前端找到的可行路径的基础上，根据动力学和运动学约束，通过拟合、优化的方法得到一条具备时间律的连续、平滑且安全的轨迹输入到飞行器的控制器中。因此轨迹生成工作在连续、高维的空间中。

4.1.2.1 前端路径查找

前端负责粗粒度的路径查找，找到一条初始的可行路径。在路径查找中依据的一般是上游传感器获得的周遭环境的栅格地图，这是一种离散的数据结构，在其中搜索路径一般有两类方法：基于图搜索的方法和基于采样的方法。

基于图搜索的方法将栅格地图表示为图（graph）的数据结构，实际应用中可以根据不同场景构建出无向图、有向图、权重图等等。深度优先搜索（DFS）和广度优先搜索（BFS）是两种最基础的图搜索算法。相同的场景下，BFS可以给出一条最短路径，而DFS虽然速度很快，但随机性很大，无法给出一条最优路径，所以目前的主流基于图搜索的规划算法，原理其实都是基于BFS延伸出来的。而BFS的缺点在于，其遍历的无效节点过多，从而导致搜索效率太慢。针对这一缺陷，就引入了终点信息，从而使得搜索的目标更明确，避免过多的无效搜索。还有两种常用的算法：Dijkstra算法和A\*算法，Dijkstra算法可以处理带权重边的地图，与BFS不同之处在于，BFS是按照人为预先定义好的顺序访问容器中的节点，而Dijkstra算法是访问当前容器中累计成本g(n)最低的节点。Dijkstra可以保证当它发现目标节点后，回溯出的路径一定是最小代价的路径，即具有完备性。但Dijkstra不知道目标节点的位置，只能保证每一步扩展过的节点累计代价是最小的，它必须向所有方向扩展，目的性不强，算法效率不高。为了改善这个缺点，A\*算法在成本上增加了启发式函数（heuristic function）*h*(*n*)，表示从当前节点n到终点的成本，算法每次都访问当前容器中成本*f*(*n*)=*g*(*n*)+*h*(*n*)最低的节点，因此A\*算法在保证了最优性的同时，加入了目标节点的信息，提升了搜索效率。

还有一类是基于采样的路径搜索方法。在无人机路径搜索中常用RRT(Rapidly-exploring Random Tree)算法，这种算法的思想是快速扩张一群像树一样的路径以探索（填充）空间的大部分区域，伺机找到可行的路径，之所以选择“树”是因为它能够探索空间。RRT算法最大的优点就是快速性，但是由于目的性较弱，生成的轨迹通常质量不高，例如包含棱角、不够平滑和远离最优轨迹，为改善这些不足，又派生出了Bidirectional RRT、RRT\*等算法。前述基于图搜索的规划算法总是能够给出一个全局范围内的最优解，而以此为代价的就是当地图过大，规划的维度过高时，它的搜索效率就会变得很慢。在某些场景下，我们不一定需要规划出的路径是全局最优解，只要是可行解就能满足我们的需求，而我们的关注点主要放在效率上，我们就可以为了效率牺牲最优性，这时我们就采用基于采样的路径搜索方法。

4.1.2.2 后端轨迹生成

前端规划给出的路径往往都是比较曲折的，即便使用考虑了飞行器动力学约束的Hybrid A\*和kinodynamic RRT\*[12]等算法，也无法给出适合控制模块直接跟踪并满足舒适条件的路径。这也是为什么要引入后端轨迹优化的原因。后端轨迹优化后的路径有以下优点：（1）更适合控制模块直接进行跟踪，并且容易达到较好的舒适效果；（2）更能节省耗能，避免了无效的能量浪费；（3）时间利用率上往往也能得到很大的提升。

无人机的轨迹优化常用最小化加加加速度（minimum snap）[13]的方法，根据微分平坦理论[14]，作为研究对象的倾转六旋翼飞行器的平坦输出即为其位置加姿态，则轨迹可表示为：

***p***(*t*) = [*x*(*t*) *y*(*t*) *z*(*t*) *φ*(*t*) *θ*(*t*) *ψ*(*t*)]T=[***r***T(*t*)***e***T(*t*)] （4-2）

则轨迹优化即为求解下述约束规划问题：

 （4-3）

如果要最小化加加加速度，则取相应k值为4；所满足的约束为运动学、动力学约束，例如指定时间点处的位姿及其各阶导数、飞行走廊约束和飞行器最大速度及加速度等。

4.1.2.3 模块实现

本课题拟将轨迹规划部分实现为ROS[15]功能包，通过MAVLink消息或RTPS消息与飞行控制器通信。飞行控制器拟采用Pixhawk系列开源飞控，运行PX4开源自动驾驶软件[16]。

4.2 方案验证

4.2.1 仿真验证

本课题中设计的轨迹规划算法拟首先在仿真平台上验证效果，仿真平台拟选择Gazebo，配合PX4的软件在环（software-in-the-loop）仿真功能以及ROS接口进行仿真。地图信息拟事先给出，暂不考虑使用实时建图。

4.2.2 实物验证

本课题拟搭建一架全向六旋翼飞行器用于轨迹规划算法的实物验证。

# 预期目标与进度安排

5.1 预期目标

（1）建立过驱动飞行器的动力学模型和动力学约束

（2）根据模型和约束选择合适的前端搜索算法、后端优化的目标函数和约束式以及合适的优化算法，并编程实现整个规划模块。

（3）将规划模块部署到仿真平台，完成仿真验证。

（4）若实物飞行器搭建顺利，则将规划模块部署到实物平台，完成实物验证。

5.2 进度安排

（1）2020.11-2021.1 温习数学、力学、机器人学等基础知识，深入学习飞行器路径规划、优化算法相关知识，广泛研读相关文献，熟悉ROS开发和Gazebo仿真，熟悉PX4软件架构及二次开发。调试实物飞行器使之能够正常飞行。

（2）2021.1 -2021.2 完成轨迹规划模块的初步构建与编写。

（3）2021.2 -2021.4 完成仿真验证，并不断对轨迹规划模块进行调试和修改；若届时硬件条件允许，完成实物验证。收集实验数据。

（4）2021.4-2021.6 分析数据撰写论文。

# 课题已具备和所需的条件、经费

## 实验室科研条件

哈尔滨工业大学(深圳)网络机器人与系统实验室承担了数十项国家级与省部级及市级重点项目的研发，其中包括多项与多旋翼无人机相关的关键基础，积累了许多相关软硬件资源与经验，为本课题的顺利开展奠定了良好的基础。

哈尔滨工业大学(深圳)网络机器人与系统实验室的课题组可提供完整的飞行器搭建材料、飞控软硬件及学习资料。

目前实验室已经搭建出可倾转旋翼的全向六旋翼飞行器仿真平台，可在仿真环境中顺利进行飞行控制；实物平台已初步搭建完成，接下来将进行调试，使之能够正常飞行。

## 经费保障

实验室可为本课题提供充足经费。

# 可能遇到的困难和解决措施

课题进行需要学习的知识较多，涉及飞行器的运动学、矩阵分析、路径搜索、优化等知识，可能存在的困难包括

1. 轨迹规划方案选择。现今已有的多旋翼飞行器运动规划的不同解决方案有很多，并且大多是基于欠驱动四旋翼飞行器提出的，且各有利弊，所以方案的甄选以及移植到过驱动平台的过程可能会有困难。
2. 仿真及实物平台的搭建与调试。仿真平台及实物平台的搭建步骤繁杂，属于课题中比较耗时的一环。
3. 搜索及优化过程的计算量过大，可能导致性能问题。

为了提高课题进展速度和效率，保证学习质量，采取边推研读论文边推导再实验验证的方法进行主要知识的系统学习。具体采取以下方案：

（1）加强机器人学、矩阵分析、理论力学、数学规划等知识的学习，提高理论水平；

（2）充分调研国内外最新研究成果和技术手段，扩展知识面并吸收最新研究成果，避免闭门造车；

（3）应该多与他人进行讨论交流，避免盲目试错，并且充分结合所学知识和实际应用，大胆且合理地对已有方案进行借鉴与改进。

（4）需要多搜索相关资料，汲取他人的经验；搭建实物时还需要谨慎制定方案，避免不必要的资源浪费。

# 参考文献

1. Ryll M, Bülthoff H H, Giordano P R. Modeling and control of a quadrotor UAV with tilting propellers[C]//2012 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, 2012: 4606-4613.
2. Rajappa S, Ryll M, Bülthoff H H, et al. Modeling, control and design optimization for a fully-actuated hexarotor aerial vehicle with tilted propellers[C]//2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, 2015: 4006-4013.
3. Brescianini D, D'Andrea R. Design, modeling and control of an omni-directional aerial vehicle[C]//2016 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, 2016: 3261-3266.
4. Kamel M, Verling S, Elkhatib O, et al. The voliro omniorientational hexacopter: An agile and maneuverable tiltable-rotor aerial vehicle[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2018, 25(4): 34-44.
5. Gao F, Lin Y, Shen S. Gradient-based online safe trajectory generation for quadrotor flight in complex environments[C]//2017 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). IEEE, 2017: 3681-3688.
6. Tordesillas J, Lopez B T, How J P. Faster: Fast and safe trajectory planner for flights in unknown environments[C]//2019 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). IEEE, 2019: 1934-1940.
7. Zhou X, Wang Z, Ye H, et al. EGO-Planner: An ESDF-free Gradient-based Local Planner for Quadrotors[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 6(2): 478-485.
8. Morbidi F, Bicego D, Ryll M, et al. Energy-efficient trajectory generation for a hexarotor with dual-tilting propellers[C]//2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2018: 6226-6232.
9. Pantic M, Ott L, Cadena C, et al. Mesh Manifold Based Riemannian Motion Planning for Omnidirectional Micro Aerial Vehicles[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(3): 4790-4797.
10. Elkhatib O. Control allocation of a tilting rotor hexacopter[D]. ETH Zurich, 2017.
11. Bodie K, Taylor Z, Kamel M, et al. Towards efficient full pose omnidirectionality with overactuated mavs[C]//International Symposium on Experimental Robotics. Springer, Cham, 2018: 85-95.
12. Webb D J, Berg J. Kinodynamic RRT\*: Optimal motion planning for systems with linear differential constraints[J]. arXiv preprint arXiv:1205.5088, 2012.
13. Mellinger D, Kumar V. Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors[C]//2011 IEEE international conference on robotics and automation. IEEE, 2011: 2520-2525.
14. Van Nieuwstadt M J, Murray R M. Real‐time trajectory generation for differentially flat systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC‐Affiliated Journal, 1998, 8(11): 995-1020.
15. Quigley M, Conley K, Gerkey B, et al. ROS: an open-source Robot Operating System[C]//ICRA workshop on open source software. 2009, 3(3.2): 5.
16. Meier L, Honegger D, Pollefeys M. PX4: A node-based multithreaded open source robotics framework for deeply embedded platforms[C]//2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, 2015: 6235-6240.