

目录

- 1 课题来源及研究的目的和意义 1
 - 1.1 课题来源 1
 - 1.2 目的和意义 1
- 2 国内外在该方向的研究现状及分析 2
 - 2.1 关于过驱动无人机的研究 2
 - 2.2 敏捷四旋翼无人机上的 MPC 实现 2
 - 2.3 文献分析和总结 3
- 3 主要研究内容 3
 - 3.1 软硬件集成与验证 3
 - 3.2 控制器仿真与部署 4
 - 3.3 实验数据采集与分析 4
- 4 研究方案 5
 - 4.1 软硬件集成与验证的方案 5
 - 4.2 控制器仿真与部署的方案 5
 - 4.3 实验数据采集与分析的方案 6
- 5 进度安排，预期达到的目标 7
- 6 题已具备和所需的条件、经费 7
- 7 究过程中可能遇到的困难和问题，解决的措施 7
- 参考文献 8

1 课题来源及研究的目的和意义

1.1 课题来源

多旋翼无人机因其敏捷灵活的特性，近年来一直是移动机器人中的热点研究对象。随着感知、规划和控制相关技术的发展，学者们逐渐从对自由飞行的研究转向无人机与环境交互的探索。

在无人机与环境进行交互的场景下，相比于常见的欠驱动无人机，过驱动无人机由于可以在机体坐标系下产生完整的六自由度的合力和合力矩（wrench），且不存在姿态和位置上的耦合，所以是更有研究前景的对象；若是考虑到与操作臂和力传感器结合的需求，则更是如此。

在过驱动无人机中，综合性能较好的一种设计是在欠驱动六旋翼无人机的基础上，赋予每个旋翼矢量推力的能力。这种设计既考虑了飞行效率，也考虑到了全向完整性。尽管如此，与欠驱动型相比，它的机械机构更复杂、重量更大、动态建模和算法设计需要考虑的方面也更多。

目前在飞行控制器中广泛使用的是各式的串级 PID 算法，它们本质上都是基于误差的（reactive），虽然可以引入前馈补偿，但总是存在不可避免的被动和滞后，特别是对于轨迹跟踪这个特定目标而言。近年来，模型预测控制在轨迹跟踪上的性能普遍优于 PID 控制，且所谓“预测控制”的主动天性和基于优化的框架使设计者能更规范统一地综合考虑动态建模、各种约束条件以及更上层的优化目标。所以，采用模型预测控制的过驱动无人机更适合作为优秀的空中操作机器人的飞行平台。

模型预测控制的性能依赖模型的精度，但是完美的模型几乎是不可能获得的，再考虑到后期会使用此平台携带负载，故需要引入自适应的特性，结合目前并没有直接可用的成果这一事实，共同构成了本课题的研究动机。

1.2 目的和意义

课题目的是在 ROS2 框架下，使用 PX4 项目作为子模块，为六旋翼过驱动无人机设计一种自适应模型预测控制器。

控制器应尽可能输出底层控制量，如动力电机和矢量电机的角速度，因为底层嵌入式控制器对这些量的控制更加迅速敏捷。使用 ROS2 是为了和 PX4 的最新开发趋势相统一，降低开发的繁琐程度，同时利用上 ROS2 提供的更加优秀的实时性。

课题意义在于搭建高性能的飞行平台以及面向未来的、易用的开发框架，为后续的感知、规划、机械臂整合、视觉伺服以及统一架构智能的研究打下基础。

2 国内外在该方向的研究现状及分析

2.1 关于过驱动无人机的研究

苏黎世联邦理工学院（ETHZ）的 ASL 组是最早开始研究本课题中过驱动无人机的小组之一^[1]，他们的机器人被命名为 Voliro。文献[2]推导了动力学模型和基于伪逆的控制分配算法，并使用 PID 配合前馈控制实现了姿态和位置的解耦，同时提出了解决奇异位姿和线缆缠绕的方法。文献[3]的主要工作是推导了导数分配矩阵，利用控制分配方程组的零空间实现了线缆的反缠绕，并设计了实现了基于导数分配的 LQR 和 PID 两种控制器并获得了更好的控制效果。

文献[4]首次在 Voliro 上实现了模型预测控制（Model Predictive Control, MPC），使用了 EKF 对合力和力矩（wrench）的扰动进行观测，但是最终控制性能和一个参数合适的 PD 控制器相当，并没有显著提升。在[5]和[6]中，作者使用了基于高斯过程的离线辨识来捕捉未建模动态，使得姿态追踪性能的明显提高。他们接着研究了多飞行模式下对不同目标进行追踪的 MPC：文献[7]提出了自由飞行、末端不动、追踪末端的运动和力，这三种模式下的控制方案和切换逻辑。这篇文献中并没有使用文献[3]所推导的导数分配矩阵，而是沿用了文献[2]中的基本分配矩阵；MPC 的输出为合力和力矩，依靠分配矩阵映射到动力电机的转速和驱动电机臂倾转的矢量舵机的转角。

上述成果对于本课题要研究的无人机构型而言是开创性的，可作为衡量后续工作效果的基准线（baseline）。

国内有实验室尝试使用自抗扰控制中的扩张状态观测器（ESO）来提高控制器的性能。文献[8]在四旋翼倾转型过驱动构型上使用 ESO 将未建模动态和建模误差以及外界扰动合为一项总扰动进行估计，并在 PD 控制器的基础上做补偿。作者在仿真中追踪轨迹得到了不错的结果；虽然仿真数据很漂亮，但是缺少实物实验，故真实效果有待验证。

文献[9]提出了在 MPC 框架下同时解决局部路径规划和跟踪的方法，控制器直接输出动力电机的加速度；其工作还包括动力电机动态的辨识。此文使用的实验平台较新颖，方法符合近年来流行的统一框架（unified framework）研究趋势^{[10][11]}。

2.2 敏捷四旋翼无人机上的 MPC 实现

较早的一篇文献是[12]，此文将 MPC 与在线系统辨识相结合，提出了基于学习的 MPC（LBMPC），LBMPC 可根据实际观测数据更新模型参数，捕捉未建模动态以及模型误差；相比于没有更新模型的 MPC，LBMPC 方法的性能更好，这

也再一次验证了 MPC 的性能好坏依赖于建模的精确程度的论点。

苏黎世大学（UZH）的 RPG 组最近在高速无人机上使用了类似的方法^[13]，同样是从数据中获取模型误差；但[13]更接近[4]、[5]、[6]的组合，并没有在线更新模型参数，而是先用第一性原理建模得到的模型（名义模型）进行采样，然后学习出一个高斯过程用于补偿；这种方法比名义模型的 MPC 效果好不少，特别是在空气动力学效果显著的高速情况下。

几乎所有类似[13]这种依赖于数据采集和离线辨识的方法都很难在有额外负载和外界干扰（阵风，电池电压下降等）的情况下保持良好的性能，毕竟它们只是一定程度上解决了模型误差的问题。基于这个痛点，RPG 组提出了[14]，将 MPC 和 L1 自适应控制器串联（L1-MPC），在无需事先收集数据进行学习的情况下实现了令人满意的追踪效果以及抗干扰能力。L1-MPC 计算更新一次需要的时间明显比[13]短；作者还提到了 INDI-MPC^[15]，并将其与 L1-MPC 进行对比，得出的结论是：在模型精确且没有附加干扰的情况下 INDI-MPC 略有优势，但是若要考虑附加干扰，那么 L1-MPC 性能显著好于 INDI-MPC。

文献[14]结尾处表示 L1-MPC 的劣势在于 MPC 与 L1 控制器的串联结构可能会隐式地破坏约束条件。文章指出未来工作是使用自适应控制领域的不确定性估计方法在线更新模型参数的方法，与[12]的思路类似。

2.3 文献分析和总结

在上文所述两个分区中都有侧重于特定方面的优秀成果值得参考。但是，将“自适应控制”、“模型预测控制”、“底层控制量”以及“统一架构”结合考虑则还是未被前人涉足的疆域，也正是本项目试图探索的方向。

3 主要研究内容

3.1 软硬件集成与验证

硬件设计主要内容是实现矢量推力的机构设计，要求可靠精确，尽量减少附加的质量和转动惯量。

仿真方面，本课题使用 Gazebo 作为仿真软件，需根据 Solidworks 工程图构建高精度的模型描述文件。描述文件中还需添加执行器插件，除了 PX4 工程提供的基础插件外，需要自己实现控制关节的插件。同时，为了实现高精度的仿真，电机旋翼模型参数的辨识是必要的。

在 ROS2 框架下，使用 PX4 项目作为子模块的具体实现方式为：将机载电脑作为主要运算平台，嵌入式控制器仅作为传感器驱动，运行基础状态估计算法，并作为输出电子调速器信号的驱动。后续有需求则可以使用 USB 接口的电子调

速器以获得更精确的执行器输出和反馈。

目前流行的智能无人机开发框架是 ROS，依赖 MAVROS 和 MAVLINK。实际开发体验较繁琐，且某些老旧特性使得这种框架不太适应目前发展趋势和未来需求；另一方面，转移到新框架 ROS2 下需要额外的学习和代码实现，所以是不可忽视一部分工作。

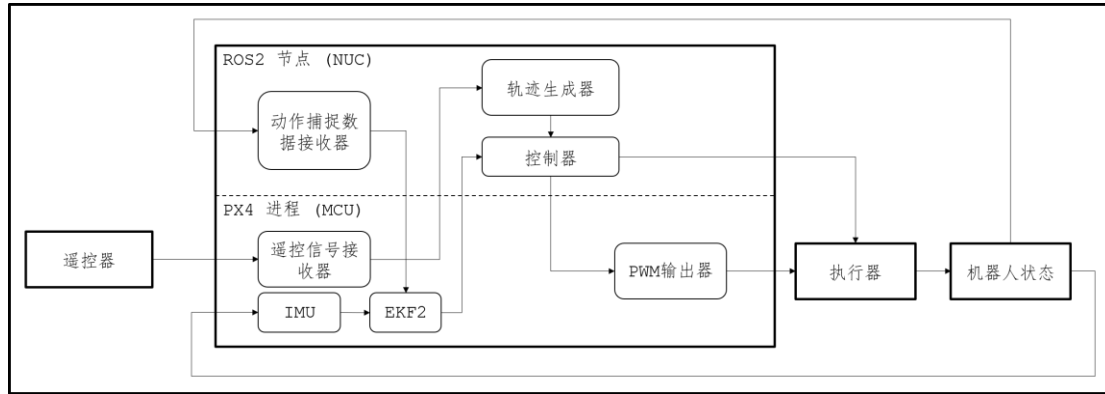


图 1. 系统整体架构

3.2 控制器仿真与部署

PID 控制器相关内容主要为参考 ETHZ 的工作[2]，在自己搭建的无人机硬件上实现控制分配和基于 PID 的控制。在这个过程中应利用新框架的优势，记录开发文档便于后续开发。此部分主要工作是以 ROS2 节点的形式复现[2]中的控制器，配合上一步中的成果，用高精度模型在仿真中验证效果，然后在实物上进行部署并实验。

自适应 MPC 需要参考[4]和[14]的方法，综合考虑底层执行器动态以及各种可能的约束条件，推导适用于本课题的方案并实现。实现 MPC 的重点是在考虑执行器动态、机臂倾转角度限制、自适应等目标下建立合理的模型。较好的参考起点是文献[4]和[14]。在此之前要系统地学习 MPC 的基本原理和 ACADOS、CERES 等优化工具的使用方法。

3.3 实验数据采集与分析

此部分内容包括设计参考轨迹进行仿真和实物实验，收集和分析数据，对比 PID 控制器和 MPC 在不同轨迹下的性能，以及与前人工作成果进行比较。测试轨迹可参考[3]和[14]，或与规划相关课题的成果对接。在这些轨迹下对比 PID 和 MPC 控制器的效果，引入速度和角速度变量、额外负载和风阻等。除了动态轨迹，还应展开定点悬停实验，以展示不同算法在不同场景下的性能差异。

4 研究方案

4.1 软硬件集成与验证的方案

迁移到 ROS2 后不用再依赖于 MAVLINK，机载电脑和 PX4 的 MCU 间通信更方便，但伴随的工作是 Gazebo 关节控制插件的迁移、舵机驱动节点的迁移、视觉定位包的迁移等。所以工程的迁移必须在最开始完成，以支持后续的研究和开发。

为避免 PX4 代码官方开发进度对本项目的影响，并考虑到后续 MPC 运行在机载电脑上的要求，故要搭建一个框架方便在机载电脑上运行控制算法，而 MCU 仅作子模块使用。要做的工作包括但不限于：学习 ROS2 功能包的写法、修改 PX4 固件启动脚本和 PWM 输出模块的源码、定义机载电脑与 MCU 通信的消息类型等。

4.2 控制器仿真与部署的方案

本项目的目标为实现自适应 MPC 并与 PID 控制器对比控制效果，所以自适应 MPC 和 PID 均为需要实现的控制器。仿真主要依靠 PX4-SITL，实机部署则在 PX4-SITL 的基础上针对真实硬件进行修改即可。

PID 控制器是基准线，可参考文献[4]中的公式，在 ROS2 节点中实现：

$$\mathbf{F}_d = m \left(\mathbf{R}^T (-k_p \mathbf{e}_p - k_v \mathbf{e}_v + \ddot{\mathbf{x}}_{sp} + \mathbf{g}) + (\boldsymbol{\omega}_b \times \mathbf{R}^T \dot{\mathbf{x}}_b) \right) \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\tau}_d = \mathbf{J}_b (-k_R \mathbf{e}_R - k_\omega \mathbf{e}_\omega) + (\boldsymbol{\omega}_b \times \mathbf{J}_b \boldsymbol{\omega}_b) + (\mathbf{x}_{COG} \times \mathbf{F}_d) \quad (2)$$

其中 \mathbf{F}_d , $\boldsymbol{\tau}_d$ 为期望合力和和力矩； \mathbf{R} 为表示飞行器姿态的旋转矩阵； \mathbf{e}_p , \mathbf{e}_v , \mathbf{e}_R , \mathbf{e}_ω 分别为相对于世界坐标系的位置、速度、姿态、角速度误差； k_p , k_v , k_R , k_ω 分别为对应的系数。 $\ddot{\mathbf{x}}_{sp}$ 是加速度设定值； \mathbf{g} 为重力加速度常数； $\boldsymbol{\omega}_b$, $\dot{\mathbf{x}}_b$ 为机体坐标系下的角速度和线速度； m , \mathbf{J}_b , \mathbf{x}_{COG} 为质量、转动惯量和质心在机体坐标系下的位置。反馈数据来源于外部动作捕捉和 PX4 中的 EKF2 进程，数据通讯由 DDS 中间件提供支持。期望合力和力矩由控制分配算法映射到动力电机转速 $\boldsymbol{\Omega}$ 和倾转舵机位置 $\boldsymbol{\Phi}$ 。

基础 MPC 可以描述为一个以非线性系统动态模型为约束条件之一的优化问题。记需要追踪的系统状态为 $\mathbf{X} = [\mathbf{p}, \mathbf{v}, \mathbf{f}, \mathbf{q}, \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\tau}]^T$ ，分量是世界坐标系下的位置、速度、合力、四元数、角速度、合力矩，且状态的误差向量记为 \mathbf{E} 。记无人机系统输入为 $\mathbf{U} = [\boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Phi}]^T$ ，分别是动力电机角速度和倾转舵机角速度。则常用的一

种目标函数可以用二范数来构造：

$$\sum_{k=0}^{N-1} (\mathbf{E}_k^T \mathbf{Q} \mathbf{E}_k + \mathbf{U}_k^T \mathbf{R} \mathbf{U}_k) + \mathbf{E}_N^T \mathbf{Q}_N \mathbf{E}_N \quad (3)$$

其中 N 为每一步优化中的迭代次数。优化目标是找到一组 \mathbf{U}_k 使得目标函数取值最小。优化问题的约束则可以设置为：

$$\dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \quad (4)$$

$$\mathbf{X}_0 = \mathbf{X}(t) \quad (5)$$

$$\mathbf{U}_k \in [\mathbf{U}_{\min}, \mathbf{U}_{\max}] \quad (6)$$

式(4)、(5)、(6)分别为系统动态、初始条件、输入的限制范围。因为是离散化处理，实际计算的时候系统动态应该转化为差分方程并用龙格-库塔法更新迭代，具体的优化求解可以用 ACADOS 完成。目标函数可以包含更多的优化目标，所以在这个框架下考虑更复杂的问题也较为方便。工作重点在于合理地推导出可用的系统动态模型，即式(4)。

关于自适应的实现，直接在系统动态模型(4)中包含总误差项并用 EKF 进行估计，效果并不好^[4]，而用高斯过程进行离线学习较为麻烦，所以重点探索方向应该是与自适应控制器结合。一种验证过的方法是在 MPC 模块后面串联一个 L1 自适应控制器^[14]，但这种方法有可能会隐式地破坏约束条件；文章作者也指出可以使用自适应控制领域的不确定性估计方法作为改进。故在实现自适应特性这一点上，可以先复现 L1 串联方法，然后进一步研究文章提及的改进方法并实现。

4.3 实验数据采集与分析的方案

轨迹的设置要契合过驱动无人机平台的全向性，充分探索状态向量空间。具体设计可参考文献[4]和[14]中的轨迹，或与规划相关课题的成果对接。工程上实现方式为写一个轨迹生成器 ROS2 节点。

为了方便初步仿真验证，轨迹生成器要有根据摇杆或键鼠输入生成轨迹的功能，即读取用户输入并生成一条可执行轨迹 \mathbf{X}_t ，作为控制器的参考轨迹输入。为了适配 PID 控制方式进行平行测试，轨迹生成器还需要包括不断更新 PID 控制器设定点的工作模式。

5 进度安排，预期达到的目标

至 2021 年 12 月 1 日完成 ROS2 下开发框架的搭建。

至 2021 年 12 月 15 日在仿真中复现基于 PID 的控制器。

至 2021 年 12 月 31 日在实物上完成 PID 控制器的部署。

至 2022 年 3 月 1 日在实物上实现自适应 MPC。

至 2022 年 4 月 1 日设计实验，获取数据。

至 2022 年 5 月 1 日完成论文撰写。

6 题已具备和所需的条件、经费

研究本课题需要：用仿真的计算机设备、过驱动六旋翼无人机实体和机载计算设备、室内高精度定位系统以及试验场地。上述需求在网络机器人与系统实验室 G305 均能被满足。经费充足。

目前已在 PX4 源码中实现：控制分配算法、奇异位姿处理、机臂线缆缠绕限制约束。已用 ROS1 和 Gazebo 配合实现了关节的位置和速度控制插件。

仿真方面，已获取高精度和简化版的模型描述文件；简化版的模型已在仿真中基于 PID 控制器实现全姿态稳定飞行和姿态-位置的解耦。

用于实物实验的实体机器人飞行平台也已经搭建完毕，电气测试均正常。工程图和仿真用描述文件均在私有仓库中有备份。



图 2. Solidworks 装配体（左），Gazebo 仿真模型（中），机器人实物（右）

7 究过程中可能遇到的困难和问题，解决的措施

代码复现工作量大：多借鉴现有参考方案，或发邮件给原文作者试图获取源码。PX4 项目源码更新频繁且改动大：核心部分不写在 PX4 的源码中，而是写在机载电脑上作为 ROS2 节点。过驱动六旋翼的建模复杂：多看论文，多与老师和同学交流。

参考文献

- [1] Mahmoud Hamandi, Federico Usai, Quentin Sablé, Nicolas Staub, and Marco Tognon, “Design of Multirotor Aerial Vehicles: A Taxonomy Based on Input Allocation,” 2021. *ffhal-02433405v2*.
- [2] K. Bodie, Z. Taylor, M. Kamel, and R. Siegwart, “Towards Efficient Full Pose Omnidirectionality with Overactuated MAVs,” *Proceedings of the 2018 International Symposium on Experimental Robotics*, p. 8595, 2020.
- [3] Mike Allenspach, Karen Bodie, Maximilian Brunner, Luca Rinsoz, Zachary Taylor, Mina Kamel, Roland Siegwart and Juan Nieto, “Design and optimal control of a tiltrotor micro-aerial vehicle for efficient omnidirectional flight,” *The International Journal of Robotics Research* 2020, Vol. 39(10-11) 1305–1325.
- [4] M. Brunner, K. Bodie, M. Kamel, M. Pantic, W. Zhang, J. Nieto, and R. Siegwart, “Trajectory Tracking Nonlinear Model Predictive Control for an Overactuated MAV,” in *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2020, pp. 5342–5348.
- [5] Weixuan Zhang, Maximilian Brunner, Lionel Ott, Mina Kamel, Roland Siegwart, and Juan Nieto, “Learning dynamics for improving control of overactuated flying systems,” *arxiv*.
- [6] Weixuan Zhang, Marco Tognon, Lionel Ott, Roland Siegwart, and Juan Nieto, “Active Model Learning using Informative Trajectories for Improved Closed-Loop Control on Real Robots,” *arxiv*.
- [7] Lazar Peric, Maximilian Brunner, Karen Bodie, Marco Tognon, and Roland Siegwart, “Direct Force and Pose NMPC with Multiple Interaction Modes for Aerial Push-and-Slide Operations,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation* 2021.
- [8] Kaiwen Lu, Zhong Yang, Luwei Liao, Yuhong Jiang, Changliang Xu, Hao Xu, and Qiuyan Zhang, “Extended state observer-based robust control of an omnidirectional quadrotor with tiltable rotors,” *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 2021, Vol. 43(5) 1143–1155.
- [9] Davide Bicego, Jacopo Mazzetto, Ruggero Carli, Marcello Farina, Antonio Franchi, “Nonlinear Model Predictive Control with Enhanced Actuator Model for Multi-Rotor Aerial Vehicles with Generic Designs,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems* (2020) 100:1213–1247.
- [10] Michael Neunert, Cedric de Crousaz, Fadri Furrer, Mina Kamel, Farbod Farshidian, Roland Siegwart, Jonas Buchli, “Fast Nonlinear Model Predictive Control for Unified Trajectory Optimization and Tracking,” *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- [11] Davide Falanga, Philipp Foehn, Peng Lu, and Davide Scaramuzza, “PAMPC: Perception-Aware Model Predictive Control for Quadrotors,” *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- [12] Patrick Bouffard, Anil Aswani, and Claire Tomlin, “Learning-Based Model Predictive Control on a Quadrotor: Onboard Implementation and Experimental Results,” *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- [13] Guillem Torrente, Elia Kaufmann, Philipp Fohn, Davide Scaramuzza, “Data-Driven MPC for Quadrotors,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, Preprint, Feb 2021.
- [14] Drew Hanover, Philipp Foehn, Sihao Sun, Elia Kaufmann, Davide Scaramuzza, “Performance, Precision, and Payloads: Adaptive Nonlinear MPC for Quadrotors,” *arxiv*.
- [15] S. Sun, A. Romero, P. Foehn, E. Kaufmann, and D. Scaramuzza, “A comparative study of nonlinear mpc and differential-flatness-based control for quadrotor agile flight,” *arXiv preprint arXiv:2109.01365*, 2021.