

Research on AI-based Robust Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Flight Control Systems

Qingxiao Zou¹ Xiaosong Liu² Zheng Wang¹

1. School of Electrical and Control Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221018, China
2. School of Physics and New Energy, Xuzhou University of Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221018, China

Abstract

Unmanned aerial vehicles (UAVs) have found extensive applications across diverse sectors and industries. Among the pivotal components of rotary-wing UAV systems, flight control algorithms stand out. Traditional flight control algorithms are plagued by shortcomings such as poor resistance to disturbances and low control precision. In this study, we propose a robust SE(3) flight control algorithm based on artificial intelligence. Our approach begins with modeling the dynamics of quadrotor UAVs and crafting precise error model functions. Through a blend of theoretical analysis, simulation, and experimental validation of UAV trajectory tracking precision, our developed flight control algorithm demonstrates a marked reduction in tracking errors and showcases commendable stability.

Keywords

Artificial Intelligence; quadrotor; flight control system; control algorithm

基于人工智能的无人机鲁棒飞控系统研究

邹庆晓¹ 刘小嵩² 王正¹

1. 徐州工程学院电气与控制工程学院, 中国·江苏 徐州 221018
2. 徐州工程学院物理与新能源学院, 中国·江苏 徐州 221018

摘要

自主无人机技术广泛用于各行各业各个领域。飞控系统是整个无人机的核心, 传统飞控算法存在抗干扰能力差、控制精度低的缺点, 本文提出基于一种基于人工智能的性能鲁棒的SE(3)飞控算法, 可以实现无人机在复杂环境下高精度轨迹跟踪。首先对四旋翼无人机的动力学模型进行建模, 设计精确的位置、姿态误差模型函数和性能鲁棒的控制率, 通过理论分析与仿真、实验测试对无人机飞控轨迹跟踪精度进行分析, 设计的飞控算法能够大幅降低跟踪误差, 具有较好的稳定性。

关键词

人工智能; 四旋翼无人机; 飞控系统; 控制算法

1 引言

随着无人机技术的快速发展, 无人机已经成为各行各业各个领域的重要工具。在这一技术革新的浪潮下, 飞控算法作为旋翼无人机系统的核心组成部分, 其性能对无人机的飞行稳定性和控制精度起着至关重要的作用。然而, 传统的飞控算法在面对外部干扰时往往表现上有了显著提升, 而且在控制精度和飞行稳定性方面也表现出抗干扰能力不足、控制精度不高等诸多缺点, 这不仅限制了无人机在复杂环境下的应用, 也影响了其在精细操作和任务执行方面的表现^[1]。为解决传统飞控算法所存在的问题, 论文提出了一种基于人工智能的性能鲁棒飞控算法。该算法结合人工智能领域的最新理论和技术, 通过对环境的实时感知与数据处理, 实现了

对外部干扰的快速响应和有效抑制。与传统算法相比, 论文设计的飞控算法不仅在抗干扰能力上有了显著提升, 取得了可观的进步。

2 四旋翼无人机动力学模型

无人机动力学模型对实现飞控算法的精确设计起到重要作用。定义世界坐标系 W 为惯性坐标系, 坐标系的原点为无人机上电时刻的位置, 坐标系统采用东北天 (ENU), 惯性坐标系与大地固定, 不会随无人机运动发生变化。机体坐标系原点位于无人机质心 (假设无人机质量分布均匀), 机体坐标系的 xyz 轴分布如图 1 所示。

四旋翼无人机的动力学模型可以分为位置动力学和姿态动力学, 用以描述无人机在环境空间中的位置和姿态的变化。采用牛顿公式和欧拉公式分别进行建模数学表达式如下:

【作者简介】邹庆晓 (1990-), 男, 中国江苏人, 硕士, 从事智能机器人与四旋翼无人机研究。

$$m\ddot{p} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{记作} \\ \text{作} \\ \text{作} \end{matrix} \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{matrix} \quad (1)$$

$$I \cdot \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \times I = \begin{bmatrix} l(f_2 - f_4) \\ l(f_3 - f_1) \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{记作} \\ \text{作} \\ \text{作} \end{matrix} \begin{matrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{matrix} \quad (2)$$

其中, $f_1 \sim f_4$ 为无人机的电机产生的推力; $M_1 \sim M_4$ 为推力产生的转矩; I 为机体的转动惯量, 转动惯量值可以通过实验测得; $\omega_x \sim \omega_z$ 为机体坐标系下的角速度。

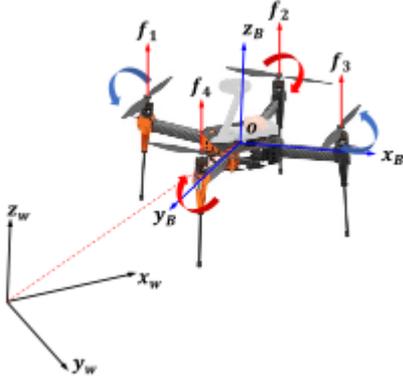


图 1 四旋翼无人机动力学模型

3 基于人工智能的双闭环智能 PID 控制器设计

PID (比例积分微分) 控制是最早发展起来的控制策略之一。由于其算法简单、稳定性好和可靠性高, 被广泛应用于工业过程控制, 并且目前在无人机领域也得到了普遍应用。对于线性系统的控制, 适合采用单级 PID 控制器, 但是无人机是多输入多输出、强耦合、非线性的欠驱动系统, 采用单级 PID 控制器无法取得良好的控制效果。在本文提出了基于 SE(3) 的双闭环串级 PID 链路, 流程如图 2 所示。

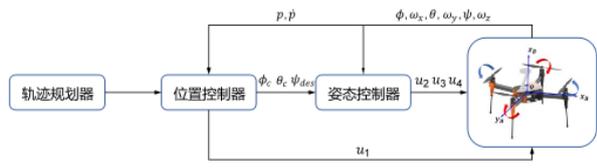


图 2 四旋翼无人机双闭环控制器控制架构

3.1 基于 SE(3) 的 PID 双闭环控制

普通单环反馈控制在系统出现误差时才进行调整, 无法有效预测或预先调整扰动, 因而抗扰性较差。为了解决这一问题, 我们引入了串级控制系统。该系统利用额外的测量单元和反馈回路形成第二个闭环, 快速感知和抵消系统扰动。这额外的测量单元需要更敏感, 更快速地感知扰动, 以便在系统产生较大误差之前快速修正误差并保持稳态。主测量单元与主控制器形成外环闭合回路, 而副测量单元和副控制器则形成内环闭合回路。外环控制角度, 内环控制角速度。外环主控制器与主测量结果一同接收期望值, 而内环副控制器则接收外环主控制器的输出和副测量结果。在无人机的控

制系统中, 为了快速感知和抵消干扰, 我们采用了双环串级反馈控制方法。主测量单元用于测量姿态角, 主控制器通过比例控制确定角速度期望^[2]。副测量单元用于测量角速度, 副控制器通过 PID 控制确定电动机的控制量。由于角速度变化更快, 我们采用双环串级反馈控制, 外环控制角度, 内环控制角速度。当无人机受到轻微扰动时, 副控制器能够快速感知角速度的变化, 并进行相应的 PID 控制, 从而保持稳态。

3.2 位置控制

在无人机控制系统中, 位置控制旨在精确控制无人机在空中的位置, 是实现无人机全自动飞行的基础。为了实现位置控制, 需要在本地坐标系下确定无人机的三维位置, 其中水平位置控制涉及 x 轴和 y 轴, 而高度控制涉及 z 轴, 这两种控制方法必须同时进行, 以确保无人机在三维空间内精确飞行。论文采用双环反馈控制方法来实现位置控制, 内环为速度控制环, 外环为位置控制环。位置期望是无人机希望到达的目标位置, 可以是任务点坐标、地面站指定的坐标或当前位置。测量位置是无人机当前位置的最优估计值, 通过卡尔曼滤波获得, 将位置期望和测量位置交给位置控制器。位置控制器外环是 P 控制器, 通过计算位置误差来输出速度期望, 使系统达到期望速度并保持稳定。速度期望是外环控制器的输出, 同时也是内环测量速度的输入。速度控制器是内环 PID 控制器, 通过计算速度误差输出姿态期望, 使用比例—积分—微分控制方法来实现, 其输入为速度期望, 输出为姿态角期望^[3]。

3.3 姿态控制

角度期望是无人机在姿态控制中期望达到的目标状态, 由遥控器、位置控制模块或地面站系统等提供。测量角度由状态估计模块计算得到, 包括俯仰、滚转和航向角, 通过陀螺仪积分和卡尔曼滤波得到。角度控制器为外环 P 控制器, 以角度误差为输入, 输出角速度期望。角速度期望是外环控制器的输出, 与内环测量角速度计算角速度误差后作为内环控制器的输入。测量角速度来自陀螺仪读数, 经卡尔曼滤波得到最优估计值。角速度控制器为内环 PID 控制器, 以角速度误差为输入, 输出角速度控制量。这个控制量需经过混合控制器调节后才能作为 PWM 信号输出给电调。

3.4 误差函数设计与分析

假设无人机要跟踪的轨迹为 $\sigma_T(T) = [r_T(T), \psi_T(T)]$, 其中 r 是未知, ψ 是偏航角。则位置误差和速度误差分别定义为:

$$e_p = r - r_T, e_v = \dot{r} - \dot{r}_T$$

则计算可得期望的无人机推力为:

$$F_{des} = -K_p e_p - K_v e_v + mgz_w + m\dot{r}_T$$

对于无人机姿态误差, 采用基于 SE(3) 的误差函数:

$$e_R = \frac{1}{2} (R_{des}^T R_B^W - R_B^{T_W} R_{des})^V$$

其中, V 表示从 $SO(3)$ 到 R^3 的 vee 映射。

4 仿真与实验分析

4.1 仿真实验

为了验证所设计的飞控算法的精度以及其在实际飞行环境中的稳定性，本研究利用 ROS (Robot Operating System) 机器人操作平台构建了仿真环境。通过 rviz 可视化工具进行实时轨迹显示，以便对飞行轨迹进行监测和分析。在实验中，我们选择了一条已知的曲线作为路径参考，具体来说，我们采用了图 3 中展示的双纽线曲线。在仿真环境中，四旋翼无人机按照设计的基于 SE(3) 的飞控算法进行路径跟踪。为了模拟真实飞行环境中的不确定性和干扰，我们在测试过程中向环境中引入了扰动。这些扰动可能包括风力、气流及其他外部干扰因素，这样可以更真实地评估飞行控制算法的鲁棒性和稳定性。

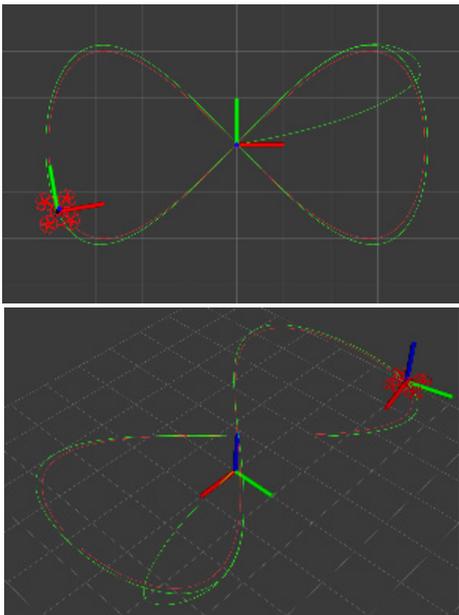


图 3 ROS 仿真环境飞控算法测试

实验结果表明，所设计的飞控算法在面对环境扰动时仍能够有效地维持飞行器在给定路径上的跟踪性能。具体来说，轨迹的跟踪效果较好，四旋翼飞行表现出良好的稳定性和控制性能。这表明所提出的飞控算法在面对复杂的飞行环境和不确定性时具有一定的适应能力和鲁棒性，能够实现可靠的路径跟踪任务。

4.2 飞行实测

为了更全面地评估我们设计的四旋翼飞控算法在实际应用中的控制效果，我们特地搭建了一台无人机进行实地飞行测试。这台无人机装备了多种传感器，包括机载电脑、D435 相机、T265 追踪相机和 GPS 等，这些传感器的组合使得无人机能够在室内和室外环境中都能够进行精准导航。在室内环境下，我们采用了 SLAM 实时定位与建图技术，它能够使得无人机在没有 GPS 信号的情况下也能够进行精确的定位。在飞行测试中，我们不仅仅关注了无人机的飞行轨迹，更加重视的是理论轨迹与实际飞行轨迹之间的偏差。

通过比较这两者的差异，我们可以量化无人机在 xyz 三个轴上的最大跟踪误差。这一指标对于评估飞控算法的性能至关重要，因为它直接反映了算法在实际飞行中的控制精度和稳定性。通过测试无人机轨迹的理论值与实际飞行值的偏差，即可得到无人机在 xyz 三个轴最大跟踪误差，得到的跟踪数据如表 1 所示。无人机平台如图 4 所示。

表 1 飞行系统跟踪误差测试

指标	数值
四旋翼飞行距离	104.32m
X 方向最大偏差	0.245m
Y 方向最大偏差	0.351m
Z 方向最大偏差	0.739m
轨迹最大偏差	0.319



图 4 无人机平台

此外，我们还将对飞行过程中无人机的姿态控制、飞行高度控制以及速度控制等方面进行深入分析。这些参数的稳定性和准确性同样对于评估飞控算法的性能至关重要。通过细致地观察和分析这些数据，我们可以更好地理解算法在实际飞行中的表现，并且为进一步的研究和开发工作提供有益的指导和建议。

5 结语

总的来说，本研究设计了一种基于人工智能的 SE(3) 性能鲁棒的四旋翼飞行控制系统，通过基于 ROS 机器人操作平台的仿真和实物测试，结合实时图像显示和扰动引入，对设计的飞控算法进行了全面的验证和评估。实验结果表明，该算法能够在不确定和干扰的飞行环境中实现良好的路径跟踪效果，为无人机的自主飞行和控制提供了有效的解决方案。未来的工作可以进一步优化算法，提高其在更复杂环境下的适应性和鲁棒性，从而更好地满足实际应用中的需求。

参考文献

- [1] 张唯一,冉腾辉,石萌,等.基于PixHawk飞控的四旋翼无人机清洁系统设计[J].中国新技术新产品,2023(3):20-22+36.
- [2] 胡徐胜,郑睿,陶彬彬.四旋翼无人机飞控系统设计[实现][J].廊坊师范学院学报(自然科学版),2021(4):46-50.
- [3] 姚光乐,王守雷.Pixhawk飞控系统的四旋翼无人机室内飞行技术研究[J].电子世界,2021(7):86-88.