

基于 PD 控制的四旋翼无人机着陆控制研究

宋志强^{1,2} 方武² 刘孝赵³

¹(江苏省智能服务工程技术研究开发中心 江苏 苏州 215009)

²(苏州经贸职业技术学院信息技术学院 江苏 苏州 215009)

³(苏州经贸职业技术学院机电技术学院 江苏 苏州 215009)

摘要 针对四旋翼无人机智能应用中的自主着陆问题,设计一种着陆控制算法。基于四旋翼无人机之动力学模型,设计双环 PD 控制算法,外环控制其位置,内环控制姿态。将外环产生的两个中间指令信号传递给内环,内环通过其内环控制律实现对两个指令信号的跟踪;通过调整内外环增益系数,使内环收敛速度快于外环收敛速度,保证闭环系统的稳定性。仿真结果验证了该控制方法的可行性和有效性。

关键词 PD 控制 四旋翼无人机 着陆控制 仿真

中图分类号 TP273 文献标志码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2020.09.054

LANDING CONTROL OF QUADROTOR UAV BASED ON PD CONTROL

Song Zhiqiang^{1,2} Fang Wu² Liu Xiaozhao³

¹(Intelligent Service Engineering Technology Research and Development Center of Jiangsu Province, Suzhou 215009, Jiangsu, China)

²(School of Information Technology, Suzhou Institute of Trade and Commerce, Suzhou 215009, Jiangsu, China)

³(School of Mechanical and Electrical Technology, Suzhou Institute of Trade and Commerce, Suzhou 215009, Jiangsu, China)

Abstract Aiming at the autonomous landing problem of quadrotor UAV intelligent application, we design a landing control algorithm. Based on the dynamic model of the quadrotor UAV, a double-loop PD control algorithm is designed. The outer loop controls its position, and the inner loop controls the attitude. The two intermediate command signals generated by the outer loop were transmitted to the inner loop, and the inner loop realized tracking of the two command signals through its inner loop control law. The stability of the closed-loop system was guaranteed by adjusting the gain coefficient of the inner and outer loop, so that the inner loop convergence speed was ensured to be faster than the outer loop convergence speed. The simulation results show that the control method is feasible and effective.

Keywords PD control Quadrotor UAV Landing control Simulation

0 引言

近年来,无人机(UAV)越来越多地应用于环保、电力、交通、测绘、安防、农业等民用领域。随着现代技术的进步,特别是人工智能技术的快速发展,未来无人机+行业应用的模式具有广阔的应用前景。目前无人机的智能化水平还有待提高,许多应用背后都有无人机操作员在控制无人机,要提高无人机的自动化和智能化水平,还需科研工作者进行大量研究。无人机的

自主着陆问题是无人机智能化应用必须解决的关键技术问题,相比无人机航路规划、导航等方面,自主着陆的研究还相对较少。

张建宏等^[1]针对固定翼无人机,采用在线稳定逆研究无人机自主精确着陆问题。高杨军等^[2]提出一种内外环混合迭代的滑模控制策略,双环都采用混合迭代滑模控制算法以克服滑模控制的缺点。豆清波等^[3]针对小型伞降无人机回收的特点,设计该类无人机全机着陆试验系统并进行着陆试验。许陈元等^[4]针对固定翼无人机在着陆过程中速度和下沉率不断增大的

问题,采用鲁棒伺服和 PID 相结合的控制方法设计着陆控制律并进行仿真实验。高九州等^[5]针对轮式无人机,根据自适应内模控制原理,以地速与下沉率为控制目标,设计着陆纵向飞行控制律。吴政隆等^[6]在分析固定翼无人机着陆阶段运行特性基础上,设计基于光流的自主着陆控制律,并用 Simulink 进行仿真。以上控制算法通常要依赖 GPS 导航或惯导系统。由于 GPS 的缺点,基于视觉的自主着陆吸引了大批研究人员^[7],张小正等^[8]基于视觉导航方法,设计圆环型地标并基于此地标研究无人机着陆位姿估计方法。

综上,在固定翼无人机的着陆算法设计方面已有较多研究,但对于多旋翼无人机自主着陆的研究还相对较少。多旋翼无人机在起飞和着陆时不需要跑道,且其可悬停的特性对于监测领域具有非常强的吸引力,因此,研究多旋翼无人机的自主着陆控制具有现实意义。对于强耦合性和非线性系统,线性 PD 控制是较为简单且行之有效的控制方法,其在工业机器人中已得到广泛应用,本文将 PD 控制应用于四旋翼无人机的着陆控制,具有工程实践意义。

1 四旋翼无人机动力学模型

四旋翼无人机是 MIMO 系统,其动力学模型^[9]可表示为:

$$\begin{cases} \ddot{x} = u_1(\cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi) - K_1\dot{x}/m \\ \ddot{y} = u_1(\sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi) - K_2\dot{y}/m \\ \ddot{z} = u_1\cos\phi\cos\psi - g - K_3\dot{z}/m \\ \ddot{\theta} = u_2 - \frac{lK_4}{I_1}\dot{\theta} \\ \ddot{\psi} = u_3 - \frac{lK_5}{I_2}\dot{\psi} \\ \ddot{\phi} = u_4 - \frac{lK_6}{I_3}\dot{\phi} \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x, y, z) 为 UAV 质心在惯性坐标系中的位置,后续仿真中假设 UAV 可通过自身携带的 GPS 获得位置信息; θ, ψ, ϕ 为无人机三个姿态的欧拉角,分别为俯仰角、偏航角和滚转角; g 为重力加速度; l 为无人机半径长度; m 为 UAV 之负载总质量; I_i 为围绕每个轴的转动惯量; K_i 为阻力系数。UAV 着陆控制目标为: $x \rightarrow x_d, y \rightarrow y_d, z \rightarrow 0, \phi \rightarrow 0$ 。

系统方框图如图 1 所示。外环产生指令信号 θ_d 和 ψ_d , 并将其传递至内环系统,采用双环控制方法设计内外环的控制律。

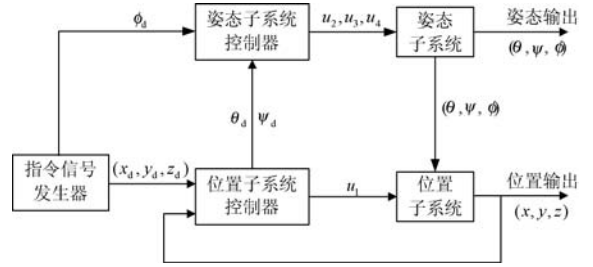


图 1 控制系统方框图

2 位置控制律设计

通过设计位置控制律 u_1 以实现 $x \rightarrow x_d, y \rightarrow y_d, z_d \rightarrow 0$, 其定义如下:

$$\begin{cases} u_{1x} = u_1(\cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi) \\ u_{1y} = u_1(\sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi) \\ u_{1z} = u_1\cos\phi\cos\psi \end{cases} \quad (2)$$

对于第一个位置子系统,采用基于前馈补偿的 PD 控制算法设计控制律:

$$u_{1x} = -k_{p1}x_e - k_{d1}\dot{x}_e + \ddot{x}_d + \frac{K_1}{m}\dot{x}_d \quad (3)$$

式中: $x_e = x - x_d$, 则 $\ddot{x}_e + (k_{d1} + K_1/m)\dot{x}_e + k_{p1}x_e = 0$ 。根据二阶系统 Hurwitz 判据,需要满足 $k_{p1} > 0, k_{d1} + K_1/m > 0$, 可取 $k_{p1} = 4.0, k_{d1} = 4.0$ 。

对于第二个位置子系统,同理设计 PD 控制律:

$$u_{1y} = -k_{p2}y_e - k_{d2}\dot{y}_e + \ddot{y}_d + \frac{K_2}{m}\dot{y}_d \quad (4)$$

式中: $k_{p2} = 4.0, k_{d2} = 4.0$ 。

对于第三个位置子系统,设计基于前馈和重力补偿的 PD 控制律:

$$u_{1z} = -k_{p3}z_e - k_{d3}\dot{z}_e + g + \ddot{z}_d + \frac{K_3}{m}\dot{z}_d \quad (5)$$

式中: $z_e = z - z_d$, 则 $\ddot{z}_e + (k_{d3} + K_3/m)\dot{z}_e + k_{p3}z_e = 0$, 要使系统稳定,可取 $k_{p3} = 4.0, k_{d3} = 4.0$ 。

假定满足控制律式(3) - 式(5)所需要的姿态角度为 θ_d 和 ψ_d , 为实现 θ 和 ψ 对 θ_d 和 ψ_d 的跟踪,需要求解 θ_d 和 ψ_d 。由式(2)可得:

$$\begin{bmatrix} u_{1x} \\ u_{2x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ \sin\phi & -\cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\theta_d\cos\psi_d \\ \sin\psi_d \end{bmatrix} u_1 \quad (6)$$

由 $u_{1z} = u_1\cos\phi\cos\psi_d$, 可得 $u_1 = \frac{u_{1z}}{\cos\phi\cos\psi_d}$, 将其代入式(6)可得:

$$\begin{cases} \psi_d = \arctan\left(\frac{\sin\phi\cos\phi \cdot u_{1x} - \cos^2\phi \cdot u_{1y}}{u_{1z}}\right) \\ \theta_d = \arcsin X, X = \frac{\cos\phi(\cos\phi \cdot u_{1x} + \sin\phi \cdot u_{1y})}{u_{1z}} \end{cases} \quad (7)$$

若 $X > 1$, 则取 $\theta_d = \pi/2$; 若 $X < -1$, 则取

$$\theta_d = -\pi/2。$$

3 姿态控制律设计

针对式(1)中的姿态子系统,设计 PD 控制律,使 $\theta \rightarrow \theta_d, \psi \rightarrow \psi_d, \phi \rightarrow \phi_d。$

取 $\theta_e = \theta - \theta_d$, 采用前馈补偿的 PD 控制算法设计如下控制律:

$$u_2 = -k_{p4}\theta_e - k_{d4}\dot{\theta}_e + \ddot{\theta}_d + \frac{IK_4}{I_1}\dot{\theta}_d \quad (8)$$

则有 $\ddot{\theta}_e + (k_{d4} + \frac{IK_4}{I_1})\dot{\theta}_e + k_{p4}\theta_e = 0$, 根据二阶系统 Hurwitz 判据,需满足 $k_{p4} > 0, k_{d4} + IK_4/I_1 > 0$, 取 $k_{p4} = 16, k_{d4} = 16。$

同理,设计第二个姿态控制律为:

$$u_3 = -k_{p5}\psi_e - k_{d5}\dot{\psi}_e + \ddot{\psi}_d + \frac{IK_5}{I_2}\dot{\psi}_d \quad (9)$$

式中: $\psi_e = \psi - \psi_d$, 取 $k_{p5} = 16, k_{d5} = 16。$

设计第三个姿态控制律为:

$$u_4 = -k_{p6}\phi_e - k_{d6}\dot{\phi}_e + \ddot{\phi}_d + \frac{IK_6}{I_3}\dot{\phi}_d \quad (10)$$

式中: $\phi_e = \phi - \phi_d$, 取 $k_{p6} = 16, k_{d6} = 16。$ 在式(8)和式(9)中,需要对中间指令信号 θ_d 和 ψ_d 求导,可采用有限时间收敛三阶微分器实现 $\dot{\theta}_d, \ddot{\theta}_d, \dot{\psi}_d, \ddot{\psi}_d$ [10]。

4 仿真

在 MATLAB R2017a 环境下进行仿真,对于模型式(1),各参数取值如表 1 所示。

表 1 被控对象仿真参数

参数	值	说明
m	2	无人机总质量
l	0.2	无人机半径长度
g	9.8	重力加速度
K_1	0.01	阻力系数 1
K_2	0.01	阻力系数 2
K_3	0.01	阻力系数 3
K_4	0.012	阻力系数 4
K_5	0.012	阻力系数 5
I_1	1.25	转动惯量 1
I_2	1.25	转动惯量 2
I_3	2.5	转动惯量 3

被控对象的初始状态取 $[3 \ 0 \ 2 \ 0 \ 10 \ 0]$, 角度初始状态取 $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \pi/6 \ 0]$ 。采用位置控制律式(3) - 式(5),姿态控制律式(8) - 式(10),取 $x_d = 10, y_d = 8, z_d = 0, \phi_d = 0$, 系统在没有干扰的理想状态下,四旋翼无人机着陆时三个位置的收敛过程如图 2 所示。

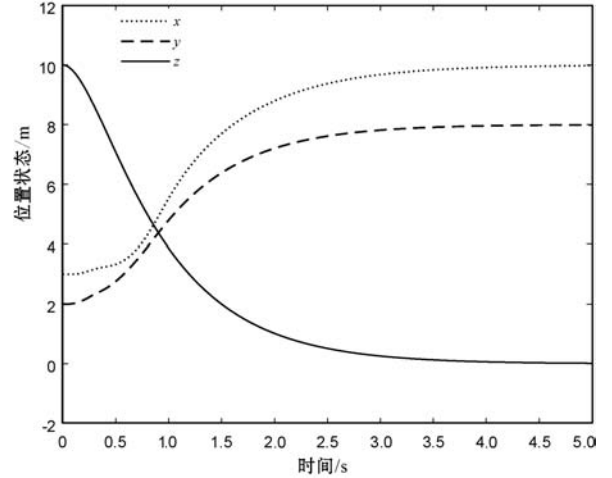


图 2 x, y, z 三个位置状态收敛曲线

系统在没有干扰的理想状态下,四旋翼无人机着陆时三个姿态的收敛过程如图 3 所示。

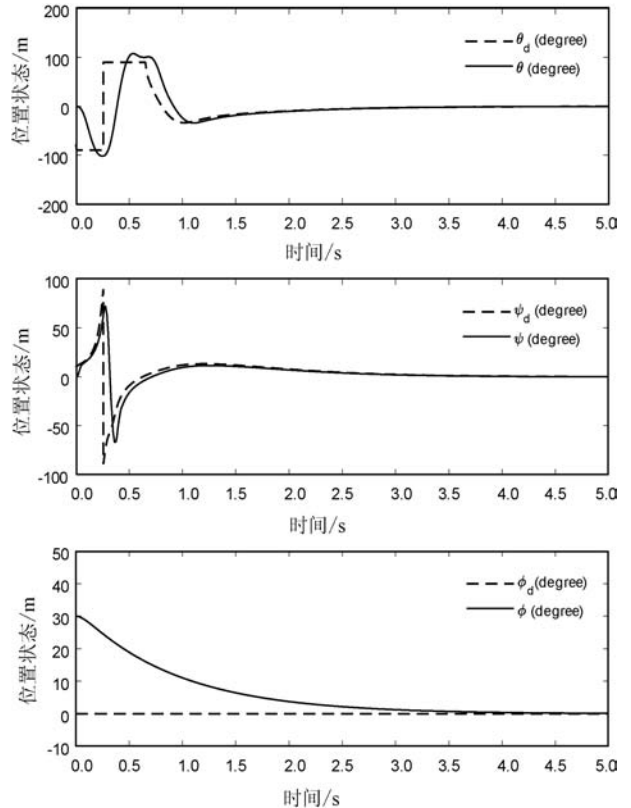


图 3 三个姿态收敛曲线

从收敛曲线可看出,四旋翼无人机着陆于 $(10, 8, 0)$, 着陆过程平稳,收敛速度较快,三个位置收敛于期望值,没有出现超调现象。采用内环收敛速度大于外环收敛速度的方法,可保证闭环系统稳定性。

仿真时,若系统中存在有限带宽白噪声,则四旋翼

无人机着陆时三个位置的收敛过程如图4所示。

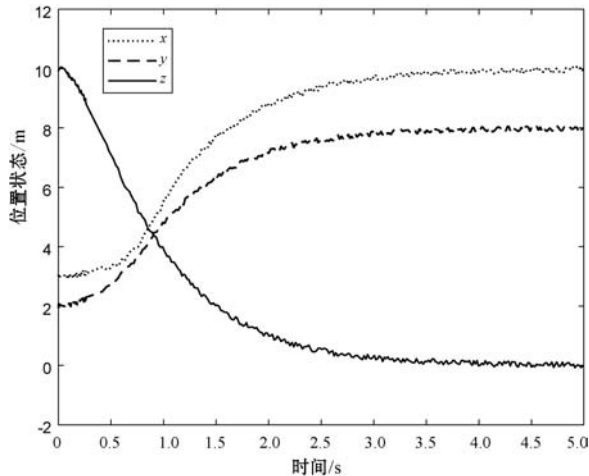


图4 系统存在白噪声时 x 、 y 、 z 三个位置状态收敛曲线

从收敛曲线可看出,引入白噪声后,系统位置状态曲线总体收敛,存在超调但幅度较小,最终四旋翼无人机着陆于(10,8,0)附近。从仿真结果可看出,在系统存在扰动的情况下,双环PD控制算法也具有实用性。

5 结语

无人机的自主着陆问题是无人机智能化应用必须解决的关键技术问题。四旋翼无人机是行业应用中最为典型的机种,其动力学模型具有多输入多输出、强耦合的特点,针对其模型,设计基于双环的PD控制的着陆算法,外环控制位置,内环控制姿态。将外环产生的中间指令信号 θ_d 和 ψ_d 传递给内环,内环通过内环控制律实现对两个指令信号的跟踪,通过调整内外环增益系数保证闭环系统的稳定性。PD控制器在工程上容易实现,可用于实时性较高的场合。

参考文献

- [1] 张建宏,张平. 无人机自主精确着陆控制律设计及仿真研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(3):743-748.
- [2] 高杨军,孙秀霞,刘宇坤,等. 无人机自主着陆的双环混合迭代滑模控制[J]. 飞行力学,2013,31(6):521-525.
- [3] 豆清波,杨武刚,牟让科,等. 无人机全机着陆试验系统设计及应用[J]. 机械科学与技术,2014,33(1):146-150.
- [4] 许陈元,李春涛. 无人机快速着陆控制律设计及仿真验证[J]. 计算机仿真,2016,33(7):141-146.
- [5] 高九州,贾宏光. 无人机自主着陆纵向控制律设计[J]. 光学精密工程,2016,24(7):1799-1806.
- [6] 吴政隆,李杰,关震宇,等. 基于光流的固定翼小型无人机自主着陆控制[J]. 系统工程与电子技术,2016,38(12):2827-2834.
- [7] Polvara R, Sharma S, Wan J, et al. Vision-based autonomous

landing of a quadrotor on the perturbed deck of an unmanned surface vehicle[J]. Drones,2018,2(2):1-18.

- [8] 张小正,周鑫,陈丽娟,等. 无人机视觉着陆位姿参数估计方法[J]. 电光与控制,2017,24(5):26-29.
- [9] Xu R, Özgüner ü. Sliding mode control of a class of underactuated systems[J]. Automatica,2008,44(1):233-241.
- [10] 王新华,刘金琨. 微分器设计与应用——信号滤波与求导[M]. 北京:电子工业出版社,2010.

(上接第295页)

能配电终端实现签名算法,并通过长时间运行测试,期间并未出现运行不稳定以及相关安全问题,证实方案具有较高的稳定性和实用性,并且方案基于国密SM9签名算法,具有较强的安全性。今后,配电网分布式控制对数据交互的安全性和性能会有更高的要求,而本文仅采用国密算法对数据进行安全性认证,因此,下一步工作将研究高效安全的密码学方案并运用于配电网分布式控制。

参考文献

- [1] 美国中央情报局称黑客曾攻破多国电网[EB/OL]. <https://www.cnbeta.com/articles/tech/47475.htm>,2008.
- [2] Liang G, Weller S R, Zhao J, et al. The 2015 ukraine blackout: implications for false data injection attacks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(4):3317-3318.
- [3] 黑客攻击美国电网引恐慌[EB/OL]. http://www.sohu.com/a/195328945_472929,2017.
- [4] Lamport L. Constructing digital signatures from a one-way function[R]. SRI International,1979:1-7.
- [5] 郭非,曹珍富. 一种基于身份的智能电网认证模式[J]. 黑龙江大学自然科学学报,2012,29(2):152-159.
- [6] 王爽,程晓荣. 身份认证和访问控制在智能电网中的应用[J]. 计算机光盘软件与应用,2013,16(20):109-110.
- [7] 李玉,范叶平,金在全,等. 电网核心业务可信身份认证框架体系研究[J]. 微型电脑应用,2018,34(4):37-41.
- [8] 卢昕,程雨诗,张天晨,等. 面向配电网分布式控制的轻量级身份认证技术[J]. 浙江大学学报(工学版),2018,52(6):1177-1184,1193.
- [9] 袁峰,程朝辉. SM9 标识密码算法综述[J]. 信息安全研究,2016,2(11):1008-1027.
- [10] 汪朝晖,张振峰. SM2 椭圆曲线公钥密码算法综述[J]. 信息安全研究,2016,2(11):972-982.
- [11] Shamir A. Identity-based cryptosystems and signature schemes[J]. Workshop on the Theory & Application of Cryptographic Techniques,1984,21(2):47-53.