

颜家彬, 龙长江, 李善军. 农用多旋翼飞行器串级分数阶 PID 控制[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(5): 153-158.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2020.05.021

农用多旋翼飞行器串级分数阶 PID 控制

颜家彬, 龙长江, 李善军

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

摘要 为提高农用无人机动态性能, 基于传统串级整数阶 PID 控制算法, 提出一种串级分数阶 PID 控制算法。以四旋翼无人机为研究对象建模, 并利用遗传算法对串级整数阶 PID 和串级分数阶 PID 参数进行整定, 得到最优控制后采用 MATLAB/SimuLink 仿真分析, 证明串级分数阶 PID 控制效果优于串级整数阶 PID。以四旋翼无人机实物为对象进行试验, 测试结果表明, 串级分数阶 PID 比串级整数阶 PID 的调节时间缩短了 0.24 s, 总体性能更优, 表明仿真结论可靠。研究结果表明, 串级分数阶 PID 控制算法可用于农用无人机的飞行控制。

关键词 农用无人机; 飞行控制; 串级分数阶 PID; 参数整定; 植保机械; 串级 PID

中图分类号 V 249.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2020)05-0153-06

多旋翼无人机由于结构简单、操作方便、机动灵活、能稳定悬停以及起降方便等特点被广泛应用于播种、喷药、施肥、授粉等农业生产作业中^[1-2]。农业植保无人机不同于其他领域的飞行器, 在作业过程中需要贴近植株飞行, 最佳飞行高度只有 3~5 m^[3], 因此需要快速完成飞行姿态的调节, 以免调节性能不良或者操作失误出现坠毁事故。最初的飞控算法只针对角度信息进行反馈控制, 为使飞行更加平稳、动态性能得到改善, 需要进一步加入角速度控制信息, 因此, 采用 2 个 PID 控制器内外嵌套, 分别对角度和角速度进行反馈控制的控制方法成为目前最常用于飞行控制的串级整数阶 PID 算法^[4]。

分数阶 PID 控制器将 PID 控制器的阶次从整数推广到分数领域, 由于在原有的整数阶 PID 控制器基础上增加了 2 个参数变量, 因此控制器更加灵活, 控制效果更好^[5]。由于数值计算手段的约束, 最初分数阶 PID 控制器在实际中应用较少, 随着计算机运算能力的提高, 它在各个领域的应用得到迅速发展。薛定宇^[6]通过对分数阶控制系统的详细分析, 设计了分数阶系统的仿真方法。分数阶控制系统也被广泛应用于各个行业中, 在水下机器人的航向控制^[7]、地铁列车的控制^[8]以及水轮的调节控

制^[9]都取得了很好的效果。同时分数阶控制器也应用到无人机飞行控制中, 在固定翼飞行器的控制^[10-11]和四旋翼的单环分数阶控制^[12]都取得了良好的控制效果。虽然目前分数阶控制器已经被广泛使用并达到了良好的控制效果, 但是分数阶控制器在无人机中的应用多单纯针对角度进行控制, 在农用植保无人机领域中更是较少采用。

本研究结合农用多旋翼无人机作业过程中需要贴近植株飞行这一特殊要求, 为保证飞行器作业过程中能够迅速调整飞行姿态, 在当前串级整数阶 PID 控制算法基础上结合分数阶 PID 控制器提出了一种串级分数阶 PID 控制算法, 旨在进一步提高飞行器的控制性能。

1 材料与方法

1.1 飞行器模型的建立

以四旋翼飞行器为研究对象。多旋翼无人机通常通过直流电机带动螺旋桨旋转产生推力, 通过各电机的转速配合实现飞行姿态的变化^[13]。直流电机动态模型为一阶惯性模型, 如式(1)所示^[14]:

$$G_m(s) = k / (T_m s + 1) \quad (1)$$

式(1)中 T_m 为电机时间常数, k 为常数。四旋

收稿日期: 2019-12-08

基金项目: 现代农业(柑橘)产业技术体系建设专项(CARS-26); 国家重点研发计划项目(2017YFD0202001、2017YFD0701400); 中央高校基本科研业务费专项(2662020GXPY012)

颜家彬, 硕士. 研究方向: 农用无人机应用. E-mail: 18062122477@163.com

通信作者: 龙长江, 博士, 副教授. 研究方向: 无损检测、机电自动控制、农用无人机技术. E-mail: lcjflow@163.com

翼飞行器的动力学模型具有强耦合、非线性等特点,难以进行准确地分析^[15]。为简化动力学模型以便于求各通道的传递函数,忽略小的非线性因素,假设四轴飞行器的各零部件是刚性连接,结构完全对称,重心、机体坐标系的原点、几何中心三点重合,桨叶升力与桨叶的转速的平方成正比,在小角度和低速的情况下,角度简化控制模型如式(2)所示^[16]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{p} &= \frac{(J_Y - J_Z)}{J_X} qr + \frac{J_{rz}}{J_X} (\Omega_1 - \Omega_2 + \Omega_3 - \Omega_4) q + \frac{\tau_\varphi}{J_X} \\ \dot{q} &= \frac{(J_Z - J_X)}{J_Y} pr - \frac{J_{rz}}{J_Y} (\Omega_1 - \Omega_2 + \Omega_3 - \Omega_4) p + \frac{\tau_\theta}{J_Y} \\ \dot{r} &= \frac{(J_X - J_Y)}{J_Z} pq + \frac{\tau_\psi}{J_Z} \\ \dot{\Omega}_1 &= \frac{-1}{T_m} \Omega_1 + \frac{k}{T_m} V_1 \\ \dot{\Omega}_2 &= \frac{-1}{T_m} \Omega_2 + \frac{k}{T_m} V_2 \\ \dot{\Omega}_3 &= \frac{-1}{T_m} \Omega_3 + \frac{k}{T_m} V_3 \\ \dot{\Omega}_4 &= \frac{-1}{T_m} \Omega_4 + \frac{k}{T_m} V_4 \\ (\dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})^T &= (p, q, r)^T \\ \tau_\varphi &= -\frac{\sqrt{2}}{2} lb (\Omega_1^2 - \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ \tau_\theta &= -\frac{\sqrt{2}}{2} lb (-\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ \tau_\psi &= d (\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \end{aligned} \right\} (2)$$

选状态空间变量如式(3)所示:

$$\left. \begin{aligned} X &= (\varphi, \theta, \psi, \Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4)^T \\ Y &= (\varphi, \theta, \psi)^T \\ U &= (U_1, U_2, U_3)^T \end{aligned} \right\} (3)$$

由于飞行器近似于悬停状态下飞行,故可采用最小扰动法对模型进行线性化,运用状态空间法表达,可依据式(2)求得四轴飞行器的传递函数(由于过于复杂,本研究没有列出,具体表达式见参考文献[16])。式(2)~(3)中, φ 为横滚角, θ 为俯仰角, ψ 为偏航角, p 、 q 、 r 分别为机体坐标系下的横滚、俯仰及偏航角速度; J_X 、 J_Y 、 J_Z 为飞行器绕各轴的转动惯量, J_{rz} 为电机转动惯量, Ω 为电机转速, V 为电压, τ_φ 、 τ_θ 、 τ_ψ 为三轴方向上所受力矩, l 为轴距, b 为电机拉力系数, d 为电机扭力系数, U_1 、 U_2 、 U_3 分别表示横滚、俯仰、偏航方向的控制量。

试验用四旋翼无人机采用大疆 F450 机架、朗宇 2212-KV980 无刷电机、天行者 15A 电子调速器、

ATG1047 桨叶以及 LIGHT 开源飞控自行搭建,其相关参数如下: X 、 Y 、 Z 轴的转动惯量依次为 0.010 3、0.008 3、0.017 0 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,电机转速为 393.12 rad/s 、 k 值为 980,时间常数为 0.026 s,飞行器轴距为 0.225 m,电机拉力系数为 $1.508 \times 10^{-5} (\text{N} \cdot \text{s}^2)/\text{rad}^2$,电机扭力系数为 $1.878 \times 10^{-7} (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2)/\text{rad}^2$ 。

通过 MATLAB 带入相关参数进行运算,可得试验用四轴飞行器的传递函数如式(4)所示:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{27612}{(s+38.5)s^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{34266}{(s+38.5)s^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{654.8}{(s+38.5)s^2} \end{bmatrix} (4)$$

1.2 飞行器的控制方法

1) 串级分数阶 PID。在四轴飞行器控制系统中,通常采用串级整数阶 PID 控制器,其内环对角速度进行反馈控制,外环针对角度进行反馈控制^[4]。分数阶与整数阶微积分相比,前者的积分和微分过程更加光滑平坦^[5]。分数阶 PID 控制器是在传统的 PID 控制器的基础上引入积分阶次 λ 和微分阶次 μ 2 个可调参数,参数选择的范围比整数大,具有更大的灵活性和滤波功能,因而不仅具有传统整数阶 PID 控制器的优点,而且控制精度更高,动态跟踪效果好^[5]。分数阶 PID 控制器表达形式如式(5)所示(λ 、 μ 均大于零)。

$$u(t) = k_p e(t) + k_i D^{-\lambda} e(t) + k_d D^\mu e(t) (5)$$

鉴于分数阶 PID 的优势,本研究在串级整数阶 PID 控制器基础上提出了串级分数阶 PID 控制器。由于分数阶控制算法引入了额外的参数,若内外环均采用分数阶控制器,参数整定上的困难十分突出,因此选择仅 1 个环采用分数阶控制。由于角速度控制环直接输出对应的电机驱动信号并且应用中更新频率一般是外环的数倍以上,分数阶 PID 在离散时保留前时刻误差的影响,更新频率更快的内环能够更加快速地实施控制,因此,综合权衡、采用外环为整数阶 PID 控制器、内环为分数阶 PID 控制器的方案足以获得良好的控制性能,并且参数整定难度较小。

2) Simulink 仿真测试。由于飞行姿态的各种变化均通过调节 4 个电机的转速实现,3 个姿态角模型结构一致,除比例环节放大系数有差异外,其余结构和参数完全一致,横滚姿态角或俯仰姿态角变化时飞机姿态对地倾斜,对飞行器稳定性影响较大。由于横滚姿态角与俯仰姿态角对称,本研究以横滚姿态角为代表进行控制。由于内环为角速度环,外

环为角度环,忽略前后环节之间的负载效应,将式(4)中首项分解成 $27612/(s+38.5)s$ 和 $1/s$ 2 个部分,使内环的角速度通过积分环节与外环的角度联系起来。使用 Simulink 工具箱对串级整数阶 PID

系统模型和串级分数阶 PID 系统模型分别进行仿真。模型如图 1 所示,上部为串级整数阶 PID 控制模型,下部为串级分数阶 PID 控制模型,分数阶 PID 控制器采用 CRONE 工具箱实现。

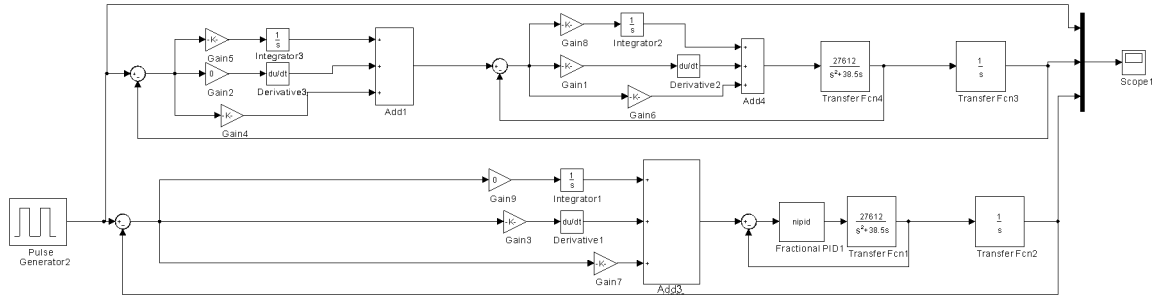


图 1 系统模型 Simulink 仿真

Fig.1 System model Simulink simulation

3)参数确定方法。由于引入了参数 λ 和 μ ,分数阶 PID 控制器参数的整定比传统整数阶 PID 控制器更加复杂。串级整数阶 PID 需要对内环和外环 PID 的 6 个参数进行整定,串级分数阶 PID 需要对内环分数阶 PID 和外环 PID 的 8 个参数进行整定。人工的整定方法难以快速获得良好的控制器参数,本研究采用遗传算法分别对串级整数阶 PID 和串级分数阶 PID 参数进行整定。

控制效果,选择最优得到控制器参数集为 $[4.721, 0.034, 0.314, 14.972, 0.023, 0]$; $[0.089, 0.325, 0.211, 0.521, 0.846, 14.995, 0, 0.015]$ 。

本研究使用 MATLAB 遗传算法工具箱对参数进行选择,需要确定其适应度函数以及参数寻优范围,根据参数范围采用双精度实数编码,初始种群为能满足约束的种群,种群规模为 200,交叉概率为 0.8,变异概率采用工具箱默认变异函数,其余设置均采用默认值。适应度函数 J 设定如式(6)所示:

2 结果与分析

2.1 仿真结果

将使用遗传算法寻优最终获得的参数分别带入 Simulink 系统仿真模型中。仿真结果如图 2 所示,其中图 2A 为系统测试时无人机在悬停状态下输入信号为横滚角由 0° 阶跃至 10° 再由 10° 负阶跃返回 0° 时飞行器响应曲线仿真结果。由图 2A 可见,串级分数阶 PID 较之于串级整数阶 PID 的控制效果更优,两者的超调都接近于零,串级分数阶 PID 调节时间为 0.263 s,串级整数阶 PID 调节时间为 0.386 s,前者比后者减少了 31.9%。图 2B 输入信号为横滚角限定在 -5° 到 10° 之间随机阶跃时系统的响应仿真曲线。由图 2B 可见,串级分数阶 PID 响应曲线始终位于输入信号曲线和串级整数阶 PID 响应曲线之间,表明串级分数阶 PID 能够更快速、更平稳地跟踪期望姿态的变化。

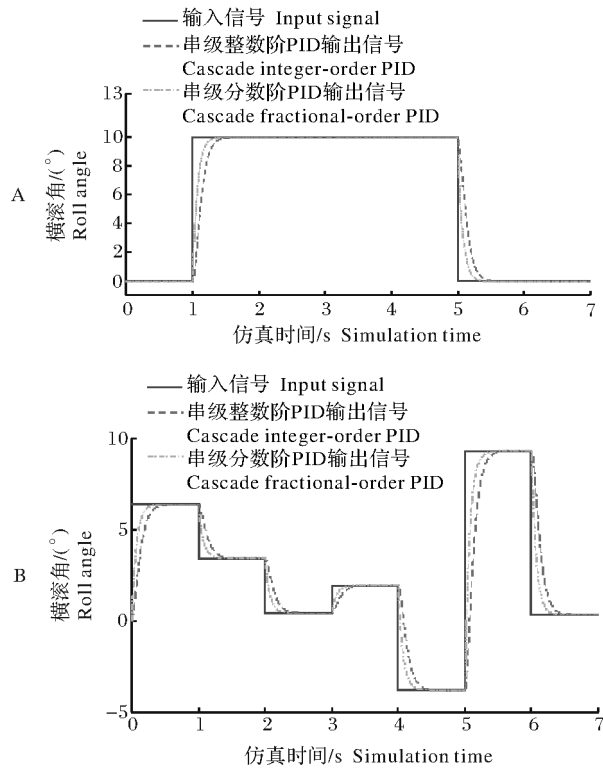
$$J = 10 \times \int_0^{\infty} |e(t)| dt + 2t_r + 0.2t_s \quad (6)$$

其中, $e(t)$ 为系统误差即飞行器重新达到稳定状态过程中每时刻对应最终稳定状态下的误差; t_r 和 t_s 分别为上升时间和调节时间。

2.2 试验测试

通过初步调试确定参数的大致范围,串级整数阶 PID 的范围调设为 $[0, 0, 0, 0, 0, 0]$ 到 $[5, 1, 1, 15, 1, 1]$,其中前 3 项为内环 PID 的参数,后 3 项为外环 PID 的参数。串级分数阶 PID 的范围设定为 $[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$ 到 $[5, 1, 1, 1, 1, 15, 1, 1]$,其中前 5 项为内环分数阶 k_p, k_i, k_d, λ 和 μ 的值,后 3 项为外环 PID 参数。将遗传算法多次运行,对比参数获得的

试验用飞行器结构参数如前文所述,通过天地飞 09SII 遥控器输入信号来控制无人机的姿态,系统使用 LIGHT 开源飞控板,利用 Keil5 编写的基于串级整数阶 PID 和串级分数阶 PID 工程代码使用 J-ink 通过上位机导入飞控板上的 STM32F407VGT6 微控制器。试验平台如图 3 所示,图 3 中试验平台为自行



A: 阶跃信号下 2 种算法仿真图 Simulation of two algorithms for step signal; B: 随机幅值 2 种算法仿真图 Simulation of two algorithms of random amplitude.

图 2 算法仿真对比图

Fig.2 Algorithm simulation comparison chart



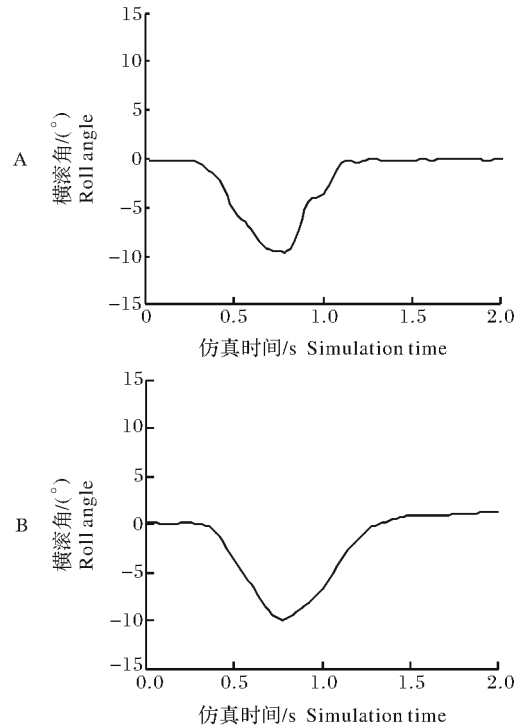
图 3 测试实景图

Fig.3 The test view

设计制作的小型无人机多自由度测试台架,能够进行多轴飞行器姿态变化的试验测试^[17],测试数据利用 STM32 开发板与 NRF24L01 无线模块组成的无线通信系统发送给上位机。

试验前将遥控器横滚角输入范围限定在 $\pm 10^\circ$ 范围内。试验时启动四旋翼无人机,待其在悬停状态下姿态平稳后,突然将遥控器横滚角操作杆置底,输入 -10° 控制信号,然后瞬间释放操作杆,使操作杆自动复位到 0° 。横滚角实时数据通过 LIGHT

飞控板内置传感器采集并解算,由无线模块通过串口通讯发送给上位机生成过渡过程曲线。2 种算法的控制过程曲线如图 4 所示。



A: 串级分数阶 PID Cascade fractional PID; B: 串级整数阶 PID Cascade integer order PID.

图 4 2 种算法试验测试对比图

Fig.4 Comparison chart of algorithm test

由图 4 可知,串级分数阶 PID 和串级整数阶 PID 的调节时间分别为 0.48、0.72 s。对比可见,使用串级分数阶 PID 控制器的系统动态性能更佳。

3 讨论

本研究针对农用多旋翼无人机作业过程中需要迅速调整飞行姿态这一问题展开研究,通过分析分数阶 PID 引入积分阶次和微分阶次使得控制性能更优,对比常用的串级整数阶 PID 算法提出了串级分数阶 PID 控制器。以四轴多旋翼无人机为研究对象,结合其动力学模型,利用遗传算法整定的控制器参数仿真并搭建实际四轴多旋翼无人机飞行平台对比串级分数阶 PID 和串级整数阶 PID 的控制效果。仿真和实测结果均表明串级分数阶 PID 相对于串级整数阶 PID 控制品质更优,不仅调节时间短而且调节过程更加平稳,综合以上分析可知,将原有的串级整数阶 PID 的内环改为控制精度更高的分

数阶PID运用于实际可进一步提高操作灵敏性,优化飞行控制性能,应用于农业生产可提高多旋翼无人机的作业效率并有助于减少飞行事故。由于试验条件限制,本研究对农用无人机作业时质量变化问题没有考虑,为进一步改善控制性能,后续考虑将最优控制以调节时间为目标,做到固定载荷条件下调节时间最短,自适应控制以载荷变化情况自动调节控制参数,改善控制性能,将二者与分数阶控制相结合,进一步研究以获得更优异的性能。

参考文献 References

- [1] 胡红岩,任相亮,姜伟丽,等.植保无人机棉田喷洒农药沉积分布研究[J].华中农业大学学报,2018,37(5):59-64.HU H Y, REN X L, JIANG W L, et al. Distribution of pesticide plant protection UAV[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(5): 59-64 (in Chinese with English abstract).
- [2] 王大帅,张俊雄,李伟,等.植保无人机动态变量施药系统设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(5):86-93.WANG D S, ZHANG J X, LI W, et al. Design and test of dynamic variable spraying system of plant protection UAV[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2017, 48(5): 86-93 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张东彦,兰玉彬,陈立平,等.中国农业航空施药技术研究进展与展望[J].农业机械学报,2014,45(10):53-59.ZHANG D Y, LAN Y B, CHEN L P, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2014, 45(10): 53-59 (in Chinese with English abstract).
- [4] 曾宪阳,杨红莉,郁汉琪.基于STM32单片机四旋翼飞行器建模分析与设计[J].电子技术应用,2016,42(12):65-68.ZENG X Y, YANG H L, YU H Q. Modeling analysis and design of quadrotor aircraft based on STM32 single chip microcomputer [J]. Journal of application of electronic technique, 2016, 42(12): 65-68 (in Chinese with English abstract).
- [5] 王春阳.分数阶 $PI-\lambda D-\mu$ 控制器参数整定方法与设计研究[D].长春:吉林大学,2013.WANG C Y. Research on parameter tuning method and design study for fractional order $PI-\lambda D-\mu$ controller [D]. Changchun: Jilin University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [6] 薛定宇.控制系统计算机辅助设计[M].2版.北京:清华大学出版社,2006.XUE D Y. Computer aided design of control system [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2006 (in Chinese).
- [7] 赵蕊,许建,王森,等.基于遗传算法和分数阶技术的水下机器人航向控制[J].中国舰船研究,2018,13(6):89-95.ZHAO R, XU J, WANG M, et al. Direction control of underwater vehicle based on genetic algorithms and fractional order technology [J]. Chinese journal of ship research, 2018, 13(6): 89-95 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张驰,谭南林,周挺,等.基于分数阶PID控制器的地铁列车优化控制研究[J].铁道学报,2018,40(10):8-14.ZHANG C, TAN N L, ZHOU T, et al. Research on optimal control of metro train based on fractional order PID controller [J]. Journal of the China railway society, 2018, 40(10): 8-14 (in Chinese with English abstract).
- [9] CHEN Z, YUAN X, JI B, et al. Design of a fractional order PID controller for hydraulic turbine regulating system using chaotic non-dominated sorting genetic algorithm II [J]. Energy conversion and management, 2014, 84: 390-404.
- [10] CHAO H, LUO Y, DI L, et al. Roll-channel fractional order controller design for a small fixed-wing unmanned aerial vehicle [J]. Control engineering practice, 2010, 18(7): 761-772.
- [11] REDDY K S A. Fractional order controllers for flight control of drones [R/OL]. Institutional repository of IIT patna, 2015 [2019-12-26]. <http://idr.iitp.ac.in:8080/jspui/handle/123456789/269>.
- [12] HAN J, DI L, COOPMANS C, et al. Pitch loop control of a VTOL UAV using fractional order controller [J]. Journal of intelligent & robotic systems, 2014, 73(1/2/3/4): 187-195.
- [13] 李尧.四旋翼飞行器控制系统设计[D].大连:大连理工大学,2013.LI Y. Design of control system of four-rotor aircraft [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [14] 杨丽.无人机无刷直流电动舵回路研究[D].南京:南京航空航天大学,2009.YANG L. Research on the loop of brushless direct-current electric rudder of unmanned aerial vehicle [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [15] 孟佳东,赵志刚.小型四旋翼无人机建模与控制仿真[J].兰州交通大学学报,2013,32(1):63-67.MENG J D, ZHAO Z G. Modeling and control simulation of small quadrotor unmanned aerial vehicle [D]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2013, 32(1): 63-67 (in Chinese with English abstract).
- [16] 刘莉欣.微小型四旋翼飞行器辨识建模研究[D].南京:南京航空航天大学,2014.LIU L X. Research on identification and modeling of micro and small quadrotor aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [17] 张春友.农用多轴无人机姿态解算与控制[D].武汉:华中农业大学,2017.ZHANG C Y. Attitude solution and control of agricultural multi-axis unmanned aerial vehicle [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).

Cascade fractional order PID control of farm unmanned aerial vehicle

YAN Jiabin, LONG Changjiang, LI Shanjun

*College of Engineering /Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key
Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River,
Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

Abstract The advantages of fractional order PID algorithm compared with traditional integer order PID control algorithm were analyzed to improve the dynamic performance of farm unmanned aerial vehicle (UAV). The fractional order PID algorithm has higher control accuracy. A cascade fractional order PID control algorithm with higher update frequency is proposed based on traditional cascade integer order PID control algorithm and comprehensive implementation difficulty. It uses fractional order PID control algorithm in inner loop and integer order PID control algorithm in outer loop. The four-rotor UAV was modeled, and the parameters of the two algorithms were tuned by genetic algorithm. After obtaining the optimal control, MATLAB/SimuLink was used to simulate and analyze. The results of simulation showed that the overshoot of the two algorithms was close to zero. The regulation time of cascade fractional order PID control algorithm and cascade integer order PID control algorithm was 0.263 s and 0.386 s, respectively. The former is 31.9% less than the latter. It is indicated that effect of the cascade fractional order PID control algorithm is better than that of the cascade integer order PID control algorithm. In order to further compare the two control algorithms, a four rotor UAV is built and tested on a multi degree of freedom test bench which can test the attitude changes of multi axis aircraft. The results showed that the settling time of the cascade fractional-order PID controller was 0.24 s shorter than that of traditional algorithm. The results of simulation and experimental showed that quality of the cascade fractional order PID control algorithm was better than that of the cascade integer order PID control algorithm. The regulation time is short and the regulation process is more stable. The results of comprehensive analyses showed that the cascade fractional order PID control algorithm can further improve the operational sensitivity, optimize the flight control performance, and improve the operation efficiency of multi rotor UAV in agricultural production when applied to agriculture. It can help reduce flight accidents as well.

Keywords farm unmanned aerial vehicle; flight control; cascade fractional order PID; parameters tuning; plant protection machinery; cascade PID

(责任编辑:陆文昌)