

基于改进单神经元的四旋翼 PID 控制器设计

姚乐^{1,2,3}, 管业鹏¹, 金星^{2,3}

(1. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200444; 2. 中国科学院 上海微系统所与信息技术研究所, 上海 200050;

3. 浙江中科领航汽车电子有限公司, 杭州 311228)

摘要: 针对传统 PID 控制算法对四旋翼飞行器的姿态角进行控制时, 其控制参数很难随着环境的变化进行自整定, 进而影响四旋翼飞行器的稳定性的问题, 提出了一种改进的 PID 控制算法; 该算法通过改进单神经元中的 K 值公式提高了 K_p 、 K_i 、 K_d 的学习速率, 从而提高了系统的响应速度; 通过增加超调惩罚措施, 通过适当的放大或缩小超调, 可以使系统超调达到最小; 通过与增量型 PID、标准二次型单神经元 PID 算法进行比较, 并且进行仿真实验; 结果表明: 所提方法具有参数自整定能力强且快速响应、鲁棒性强及稳定性好。

关键词: 四旋翼飞行器; 单神经元 PID 控制

Design of Quadrotor PID Controller Based on Improved Single Neuron

Yao Le^{1,2,3}, Guan Yepeng¹, Jin Xing^{2,3}

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Shanghai 200050, China;

3. Zhejiang Autorock Electronics Co., Ltd, Hangzhou 311228, China)

Abstract: When PID controller is adopted to control quadrotor attitude angle, one of difficult problems is how to self-tune parameters of controller with the variance of circumstance, which affects the stability of quadrotor. An improved single neuron PID controller is proposed. The algorithm improved K value formula of single neuron PID control to improve the K_p , K_i , K_d learning rate, which increase the response speed of the system; by increasing the overshoot punitive measures, through appropriate zoom in or out overshoot, overshoot can be minimized. By comparing with standard PID controller and standard quadratic single neuron PID algorithm and simulating, the result shows that the algorithm has a strong self-tuning, quick response, strong robustness and a good stability.

Keywords: quadrotor; single neuron PID control

0 引言

近年来, 四旋翼飞行器以其简单的机械结构与悬浮、垂直起落等优点, 被广泛应用于航拍、道路监控等领域^[1]。四旋翼飞行器要完成悬浮、垂直起落, 需要控制系统对姿态具有良好的控制特性。四旋翼飞行器姿态控制系统分别对 Pitch (俯仰)、Roll (横滚) 和 Yaw (航向) 3 个通道进行协调控制, 即可实现飞行。

针对四旋翼飞行器姿态控制, 常规 PID 控制器虽然简单易行, 但一组固定不变的 PID 参数无法适应参数变化, 干扰众多的控制系统。针对这一缺点, 文献 [2] 提出了模糊 PID 控制, 但是模糊 PID 控制的参数需要研究者根据先验经验确定, 具有很强的主观性并且不一定能找到最优解; 文献 [3] 提出了基于遗传算法的 PID 控制以及文献 [4] 提出了基于量子粒子群优化的 PID 控制, 这两种算法可以找到最优解, 但需要建立被控对象的精确数学模型, 然而实际工程中, 随着环境的变化以及原器件的老化, 很难建立精确的数学模型, 因此不能实现精确控制; 文献 [5] 提出了基于神经网络 PID 控制算法, 不需要精确的数学模型, 也不需要先验知识确定最优解, 有效解决了上述两个问题, 由于神经网络具有很大的复杂

度, 计算量大, 而在四旋翼控制模型中一般采用为 32 位的 Arm (Stm32 等), 或者 16 位 (AVR 等), 甚至是 8 位 (Arduino), 且主频不超过 100 MHz, 因此很难满足其计算量。由于单神经元是神经元的组成单元, 不仅可以实现在线调整 PID 参数, 且不需被控对象的精确数学模型, 整个系统的构架简单, 提出了一种改进的单神经元的 PID 控制方法, 并应用于四旋翼上。

通过实验结果仿真与对比表明: 所提方法不仅具有较强的收敛速度, 而且具有较强的自适应能力和自学能力, 对控制器参数可实现在线调整, 有较强的鲁棒性。

1 单神经元结构及控制算法

1.1 单神经元自适应 PID 控制

神经网络是模拟人类大脑神经网络结构和行为的一种网络, 单神经元作为神经网络的基本单元, 同样具有其基本的学习性能, 并且单神经元结构简单、易于计算, 更适合在运算速度较低的 MCU; PID 控制参数的变化与被控对象的输出紧密联系, 故将两者结合形成的单神经元自适应 PID 控制器, 这样既可以实现四旋翼根据不同环境下自适应调节, 也可以使整个系统结构简单。在四旋翼中存在不同的角度控制, 为了分析方便, 只进行俯仰角的分析, 俯仰角的单神经元自适应 PID 控制器的结构^[6]如图 1 所示。

因为在 PID 中有 3 个调节参数, 因此令 $n=3$, 则图 1 中的状态变换器的输入即 t 、 $t-1$ 和 $t-2$ 时刻的四旋翼上俯仰角

收稿日期: 2015-09-11; 修回日期: 2015-11-02。

作者简介: 姚乐 (1991-), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式软件方向的研究。

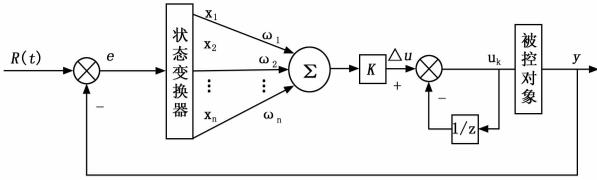


图 1 单神经元自适应 PID 控制结构

的偏移误差分别为:

$$x_1(t) = e(t) - e(t-1) \quad (1)$$

$$x_2(t) = e(t) \quad (2)$$

$$x_3(t) = e(t) - 2e(t-1) + e(t-2) \quad (3)$$

单神经元 PID 控制的核心特点是通过一定的学习规则对系数进行调整, 从而实现自适应功能^[7]。常用的学习规则有 3 种包括无监督 Hebb 学习、有监督的 Delta 学习和有监督的 Hebb 学习。文献 [7] 推导出单神经元自适应 PID 控制算法如下:

$$u(t) = u(t-1) + K \sum_{i=1}^3 \bar{\omega}_i(t) x_i(t) \quad (4)$$

$$\bar{\omega}_i(t) = \frac{\omega_i(t)}{\sum_{i=1}^3 |\omega_i(t) x_i(t)|} \quad (5)$$

$$\omega_1(t) = \omega_1(t-1) + \eta_p h(t) u(t) x_1(t) \quad (6)$$

$$\omega_2(t) = \omega_2(t-1) + \eta_i h(t) u(t) x_2(t) \quad (7)$$

$$\omega_3(t) = \omega_3(t-1) + \eta_d h(t) u(t) x_3(t) \quad (8)$$

式中, $R(t)$ 为 t 时刻给定的输入, 即给定的俯仰角的角度值; $e(t)$ 为 t 时刻输出和给定的偏差; $x_i(t)$ 表示 t 时刻单神经元的状态输入信号, 即 t 时刻四旋翼与给定信号的偏差; $\omega_i(t)$ 为 t 时刻 $x_i(t)$ 的权值系数; $u(t)$ 表示 t 时刻单神经元状态输出值; K 为神经元的比例系数, K 值的大小决定系统调节的速度, 适当的增大 K 值可以提高系统的响应时间, 但过大会使系统出现过调甚至系统发散, 过小会使系统的响应时间变长, 系统的随动性能变差; η_p, η_i, η_d 分别为 PID 中比例、积分、微分的学习速率; $h(t)$ 为性能指标或神经元的递推信号, $h(t) = e(t)$ 。

从式 (6) ~ (8) 可以看出, 其控制规律的形式与增量式 PID 具有一致形式。

采用 Hebb 学习规则, 通过调节权系数, 可以对被控对象进行自动的调节各个系数的权重, 以适应被控对象在不同环境下的状态变化。单神经元自适应 PID 控制规律, 相当于可变系数的 PID 控制器, 可以实现高性能、强鲁棒性的要求^[7]。

1.2 标准二次型性能指标学习算法的 PID

在单神经元自适应过程中, 为了能够得到参数的最优, 从而使四旋翼更快的达到稳定状态, 在连续权值的调整中加入二次性能指标, 使系统的输出偏差和控制规律的增量加权平方和为最小, 间接实现对偏差和控制律增量的约束控制, 根据文献 [8] 可得到标准二次型性能指标学习算法的 PID 控制公式:

$$\omega_1(t) = \omega_1(t-1) + \eta_p K [Pb_0 e(t) x_1(t) - QK \sum_{i=1}^3 (\omega'_i(t) x_i(t)) x_1(t)] \quad (11)$$

$$\omega_2(t) = \omega_2(t-1) + \eta_i K [Pb_0 e(t) x_2(t) - QK \sum_{i=1}^3 (\omega'_i(t) x_i(t)) x_2(t)] \quad (12)$$

$$\omega_3(t) = \omega_3(t-1) + \eta_d K [Pb_0 e(t) x_3(t) -$$

$$QK \sum_{i=1}^3 (\omega'_i(t) x_i(t)) x_3(t)] \quad (13)$$

式中的符号参考 1.1 节。

1.3 改进的标准二次型单神经元的 PID 算法

由于单神经元 PID 控制算法的稳定性, 完全取决于 K 值的大小, 因此 K 值的变化会影响到整个系统的稳定性^[9], 而在标准二次型单神经元 PID 算法中, K 值恒定不变的, 而四旋翼对于系统的实时性要求较高, 从而易导致当误差比较大时, K_p, K_i, K_d 的学习速度较慢, 导致整个系统的调节速度较慢, 而当四旋翼从一个稳定状态改变到另一个稳定状态时, 如果在中间过程维持过多时间, 可能导致整个四旋翼偏离或者坠机, 因此需要根据误差实时的在线调整 K 值。根据文献 [10-11], 提出一种可以实时调整的 K 值方法:

$$K = \alpha + \beta e(t) \quad (14)$$

式中, α 为标准二次型神经元的 K 基准, 在实际调整系数时, 可以先根据标准二次型的 K 值调节至最好的状态作为 α 的值, 这样不仅可以保证 K 值为正, 而且可以减少调节参数。 β 可以根据实际的系统进行分段处理, 当误差较大时, 可以适当增加 β 值, 相当于间接的增加 K 值从而增加系统的响应速度; 当误差较小时可以将 β 值变为 0, 当误差为负数时, 可以将 β 值也变为负数, 这样可以增加系统的学习速度。

在实际的四旋翼控制过程中, 由于对于平衡的要求较高, 不仅需要较短的响应时间, 而且不需要较大的超调, 从而能够保证平衡状态, 因此提出一种超调惩罚措施, 即当有超调时, 将该处误差放大:

$$e(t) = k_0 e(t) \quad (15)$$

式中, k_0 为放大倍数, 可以进行分段调整, $k_0 \geq 0$, 当误差较小并且是允许的范围之内, 可以将 k_0 置为 0, 停止调节。

上述为改进的单神经元 PID 控制算法, 其算法流程如下:

- Step1: 根据经验, 先调试一组比较好增量式 PID 参数;
- Step2: 初始化各个参数, 将 K_p, K_i, K_d 的初值赋值为上述初始值, 对 K_p, K_i, K_d 的学习速率进行初始化, 初始化 P, Q 值;
- Step3: 根据公式 (1) ~ (3) 计算系统偏差;
- Step4: 根据公式 (11) ~ (13) 更新网络的权值系数;
- Step5: 根据公式 (14) 更新 K 值, 公式 (15) 更新误差公式;
- Step6: 如果达到控制要求, 则算法结束, 否则返回 Step3。

2 仿真与结果分析

2.1 四旋翼飞行器高度的 PID 控制

对于单神经元 PID 控制算法, 不需要建立受控对象的精确模型, 可由系统偏差来调整控制量, 从而使系统达到期望输出, 因此可以选取四旋翼的俯仰通道角度与输出的传递函数^[12]做为参考, 其他几个通道也可以进行相关分析, 其传递函数如下:

$$G = \frac{\theta}{\mu_1} = \frac{56.95 s + 4 391}{s^3 + 105 s^2 + 870 s + 4 430}$$

由于姿态解算的更新时间为 4 ms, 因此每一次姿态的都进行控制一次, 因此将采样时间定为 4 ms, 经过抽样以及 z 反变换, 这样被控对象在时域的输入输出关系如 (16) 所示:

$$y(t) = 2.645 6 * y(t-1) - 2.302 8 * y(t-2) + 0.657 * y(t-3) + 0.000 4 * u(t-1) + 0.000 1 * u(t-2) - 0.000 3 * u(t-3) \quad (16)$$

其中: $y(t)$ 表示系统输出量, $u(t)$ 表示系统的输入量。

分别使用增量型 PID 算法, 标准二次型单神经元 PID 算法, 以及改进二次型单神经元 PID 算法, 对系统进行阶跃响应及抗干扰性进行仿真。

对于标准增量式的 PID, 分别选取 $K_p = 10$, $K_i = 0.1$, $K_d = 190$; 标准二次型单神经元 PID 算法选取 $K = 3.075$, $P = 0.1$, $Q = 0.1$; 改进二次型 PID 选取 $K = 3.075 - 0.16e(t)$, 当 $e(t) > 0.1$ 时, $e(t) = 2e(t)$ 时, 其阶跃响应如图 2 所示。

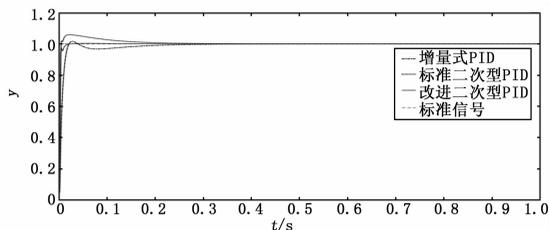


图 2 不同算法下的阶跃响应

为了更好地观察其超调, 局部放大图如图 3 所示。

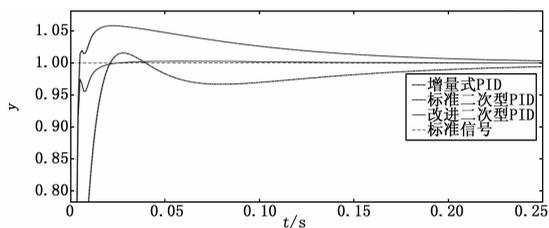


图 3 阶跃响应局部放大图

其中横轴代表时间, 纵轴代表输入为阶跃响应时的输出响应。由图 2 和 3 可以看出, 增量式 PID 和标准二次型单神经元 PID 的调节时间基本一致, 都在 0.25 s 左右, 但是改进的二次型单神经元的调节时间为 0.03 s 左右, 远远小于其他两种算法。其中对于超调, 标准二次型单神经元的超调最大, 其次是增量式 PID, 而改进的二次型单神经元 PID 控制算法的超调最小。

由于四旋翼在实际环境中会遇到各种各样的干扰信号, 对于算法的鲁棒性要求高, 因此需要进行抗干扰测试。分别在第 200 步时对系统添加 10% 的干扰信号, 通过 Matlab 对其输出响应仿真, 结果如图 4 所示。

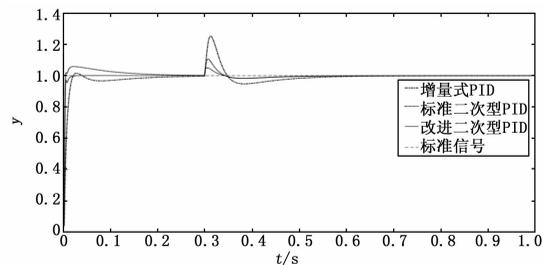


图 4 干扰信号下的各个算法的仿真曲线

其坐标与图 3 的坐标的意思一致。由图 4 可知, 改进的二次型单神经元 PID 算法, 具有比其他两种更好的鲁棒性能, 可以在最短的时间内恢复到期望输出。

K_p 、 K_i 、 K_d 三个参数在有干扰信号下的学习过程如图 5 所示。

其中横轴表示时间, 纵轴表示 K_p 、 K_i 、 K_d 的随着时间

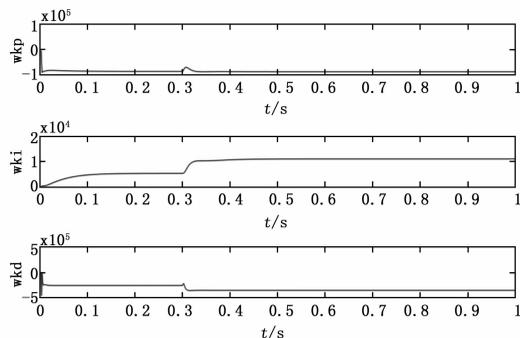


图 5 干扰信号下 K_p 、 K_i 和 K_d 三个参数的学习过程

的变化而变化的值。由仿真结果可知: K_p 、 K_i 和 K_d 具有很快的学习速率, 且在干扰信号下能够实时的调整自身的值。

3 结论

改进的二次型单神经元 PID 控制器具有较强的收敛速度、控制输出平稳、自适应强和强鲁棒性等优点, 解决了四旋翼随着环境变化而不能调整控制参数的问题。根据实验结果仿真与实验, 所提算法不仅具有调节时间短, 且鲁棒性强, 可有效应用于四旋翼飞行器中。

参考文献:

[1] 张 镭, 李 浩. 四旋翼飞行器模糊 PID 姿态控制 [J]. 计算机仿真, 2014, 31 (8): 73-77.

[2] Gautam D, Ha C. Control of a quadrotor using a smart self-tuning fuzzy PID controller [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10.

[3] 牛志玲, 潘晓萌. 基于双种群遗传算法的四旋翼飞行器 PID 参数整定方法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (4): 1230-1232.

[4] Mohammed M J, Rashid M T, Ali A A. Design optimal PID controller for quad rotor system [J]. International Journal of Computer Applications, 2014, 106 (3).

[5] 赵帮俊. 基于 PID 神经网络的四旋翼飞行器控制系统研究 [J]. 科学与财富, 2014 (12): 189-190.

[6] Fang H, Yu X. Design and simulation of neuron PID Controller [A]. 2011 International Conference on Information Technology, Computer Engineering and Management Sciences (ICM) [C]. IEEE, 2011, 1: 80-82.

[7] 马 菲, 马清华, 杨 凯, 等. 毫米波导引头预定回路改进单神经元控制 [J]. 弹箭与制导学报, 2015 (1): 41-44.

[8] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

[9] 侯一民, 朱志超. 单神经元 PID 控制算法在智能车控制系统的应用 [J]. 化工自动化及仪表, 2015 (2): 003.

[10] Wang B, Sun Y, Cao J, et al. Control and simulation of an underwater robot using single neuron PID control based on immune feedback mechanism [A]. 2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA) [C]. IEEE, 2010: 2507-2511.

[11] Wang W, Gao X Z. A single neuron PID controller based on immune tuning and its application [A]. 2010 Sixth International Conference on Natural Computation (ICNC) [C]. IEEE, 2010, 6: 2831-2836.

[12] 李 俊, 李运堂. 四旋翼飞行器的动力学建模及 PID 控制 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2012 (1): 114-117.