

四旋翼无人飞行器混合控制系统研究

夏国清¹, 廖粤峰^{1*}, 王璐²

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

(* 通信作者电子邮箱 155336889@qq.com)

摘要:针对四旋翼无人飞行器质量未知情况下的垂直起降控制问题,提出一种基于状态反馈和神经网络自适应的混合控制方法。该方法通过一个状态反馈控制器实现飞行器的水平位置和航向控制,考虑到飞行器负载的未知特性,通过径向基函数(RBF)神经网络对飞行器质量进行估计,从而实现对高度的精确控制。仿真分析及验证表明,所提出的控制方法能够有效实现飞行器高度的精确控制,并能够在线估计出飞行器质量参数。

关键词:四旋翼无人飞行器;混合控制;神经网络;自适应控制;径向基函数

中图分类号: TP273.2 **文献标志码:** A

Research on hybrid control system of quadrotor UAV

XIA Guoqing¹, LIAO Yuefeng^{1*}, WANG Lu²

(1. Automation College, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China;

2. College of Electronic Information and Electric Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A hybrid control method based on state feedback and adaptive neural network was proposed, which considered the taking off and landing control problem under unknown mass of the Unmanned Aerial Vehicle (UAV). A state feedback controller was designed to realize the horizontal position and heading control. The accurate control of height was archived considering the vehicle's unknown load through the Radial Basis Function (RBF) neural network. The simulation analysis and experiments illustrate that the proposed control method can effectively realize the accurate control of height, and can be able to online estimate aircraft quality parameters.

Key words: quadrotor Unmanned Aerial Vehicle (UAV); hybrid control; neural network; adaptive control; Radial Basis Function (RBF)

0 引言

近年来,无人驾驶飞行器的研究与应用受到了广泛关注。四旋翼无人驾驶飞行器由于能够垂直起降和悬停而被广泛应用于无人侦察、森林防火、城市巡逻等领域。针对其多变量、非线性、欠驱动、强耦合和对干扰敏感的特点,在工程应用中一般的解决方法是对系统在平衡点附近进行线性化处理,设计状态反馈控制律使系统的极点具有负实部,从而实现系统的镇定。然而飞行器执行每次飞行任务所携带的载荷不同,其质量也会经常发生改变。每次起飞前都进行飞行器重量的确定和相应控制参数的修改是一项十分繁琐的工作;并且,飞行器质量对于高度控制效果的影响较大,过大的质量参数误差将会造成高度控制较大的稳态误差甚至发散。为此,本文从工程应用的角度出发,研究了飞行器在质量未知情况下的控制问题^[1-2]。

近年来,各国学者针对四旋翼无人飞行器控制问题提出了大量方法:Benallegue等^[3]使用反馈线性化方法对四旋翼无人飞行器进行建模和控制,Waslander等^[4]研究了四旋翼飞行器的积分滑模控制和强化学习算法,Bouabdallah等^[5]将反步控制理论和滑模变结构控制理论应用于四旋翼无人飞行器控制,国内薛文涛等^[6]使用了径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络比例-积分-微分(Proportion-Integration-Differentiation, PID)控制器对四旋翼无人飞行器进

行控制,李光春等^[7-8]将反步法应用在四旋翼无人飞行器的轨迹跟踪控制上。其中滑模控制方法带来系统抖振现象,而反馈线性化方法工程实现起来比较困难。

本文针对飞行器任务载荷重量不确定的特点,提出了一种状态反馈和自适应控制相结合的混合控制策略。首先将飞行器的水平位置控制和高度控制通道进行解耦,设计了状态反馈控制器对飞行器水平位置进行控制;并分别使用了状态反馈控制方法和基于RBF神经网络的控制方法进行高度控制器设计^[9-10]。仿真结果表明,本文设计的自适应高度控制器能够有效减少四旋翼无人飞行器质量不确定对高度控制带来的影响,并且能够在线估计出无人飞行器的质量。

1 系统原理与数学模型

1.1 四旋翼无人飞行器

四旋翼无人飞行器由固联在刚性十字交叉结构上的4个独立电机驱动系统组成。该系统是一个具有4个输入、6个输出的二阶非完整系统。其线运动和角运动之间存在约束关系,即飞行器的俯仰、横滚姿态是受到飞行器位置误差约束的。同时,四旋翼无人飞行器具有高度的耦合特性,一个旋翼转速的改变将导致至少3个自由度方向上的运动。减小右面旋翼的速度将会导致飞行器向右滚动,因为左右升力出现了不平衡;同时也会导致飞行器向右偏航,因为左右为一组的旋翼和前后为一组的旋翼产生的反扭力矩出现了不平衡。此

收稿日期:2012-09-14;修回日期:2012-10-29。

作者简介:夏国清(1962-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:船舶动力定位;廖粤峰(1988-),男(满族),广东阳春人,硕士研究生,主要研究方向:飞行器控制;王璐(1987-),男,河南洛阳人,博士研究生,主要研究方向:非线性滤波、非线性控制。

外,滚动又将会导致飞行器向右的平移,4个旋翼的耦合关系加大了四旋翼无人飞行器控制器设计的难度。

图1为四旋翼无人飞行器的工作原理示意图。其中, n 系为世界坐标系, b 系为载体坐标系, f 和 Q 分别为旋翼产生的升力和反扭矩, φ 、 θ 和 ψ 分别为俯仰、横滚和航向3个角度。通过调节4个旋翼的转速,可以改变四旋翼无人飞行器的运动形式。当 $f_1 = f_2 = f_3 = f_4$ 时,飞行器保持悬停或上升/下降;当 $f_2 = f_4$ 且 $f_1 \neq f_3$ 时,飞行器进行俯仰运动;当 $f_1 = f_3$ 且 $f_2 \neq f_4$ 时,飞行器进行横滚运动;当 $f_1 = f_3 \neq f_2 = f_4$ 时,飞行器进行偏航运动。

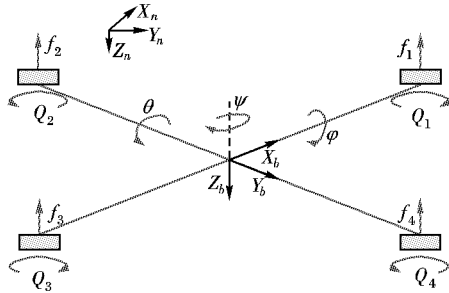


图1 四旋翼无人飞行器飞行原理

1.2 系统数学模型

首先计算得到飞行器升力和力矩与电机转速间的关系。 T 为电机升力, $\tau = (\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3)^T$ 分别为横滚、俯仰和航向三个角运动方向上的控制力矩,并假设电机响应无滞后,则控制量 T 和 τ 与电机转速 $\omega_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 之间的关系为:

$$\begin{cases} T = \sum_{i=1}^4 f_i = C_T \rho A r^2 \sum_{i=1}^4 \omega_i^2 \\ \tau_1 = d C_T \rho A r^2 (\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ \tau_2 = d C_T \rho A r^2 (\omega_1^2 - \omega_3^2) \\ \tau_3 = C_Q \rho A r^3 (\omega_2^2 + \omega_4^2 - \omega_1^2 - \omega_3^2) \end{cases} \quad (1)$$

其中: ρ 为空气密度, r 为桨叶半径, $A = \pi r^2$ 为螺旋桨桨盘面积。 d 表示电机到飞行器几何中心的距离, C_T 和 C_Q 分别为旋翼的拉力系数和扭矩系数。

假设飞行器重心为载体系原点,电机的升力面和重心位于同一个平面上,且电机无安装误差角。选取北、东、地坐标系作为地理坐标系,得到四旋翼无人飞行器位置系统数学模型^[11]:

$$\begin{cases} \dot{\zeta} = v \\ m \dot{v} = m g e_3 - R e_3 T \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\zeta, v \in \mathbf{R}^3$ 为地理坐标系下载体的位置和速度。 $R \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为系统的姿态矩阵。记 $n = R e_3$ 为姿态矩阵的第三列, $e_3 = [0 \ 0 \ 1]^T$ 为 Z 轴的单位向量, m 为系统的质量, g 为重力加速度。

选取欧拉角对系统姿态子系统进行描述,欧拉角定义为 $\eta = [\varphi \ \theta \ \psi]$,得到基于欧拉角的态度子系统模型为:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = F(\eta) \omega \\ J \dot{\omega} = -\omega \times J \omega + \tau \end{cases} \quad (3)$$

$$F(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \varphi \tan \theta & \cos \varphi \tan \theta \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi \sec \theta & \cos \varphi \sec \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $\omega \in \mathbf{R}^3$ 表示载体坐标系下的角速度, $J \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为系统的转动惯量矩阵,系统的转动惯量矩阵 J 为正定对角阵,且 X 轴和 Y 轴对应的转动惯量相等。

1.3 模型简化与分解

这里对系统高度通道使用自适应控制,自适应控制器能够不断检测系统参数或运行指标,并根据参数的改变或者运行指标的变化,改变控制参数或控制作用,使系统运行于最优工作状态^[12]。该方法能够在负载重量未知的情况下实现飞行器的垂直起降,并能够在线估计出负载重量。

将系统分解为高度通道和水平位置、航向通道,考虑到飞行器多运行于平衡点附近,认为 $F(\eta)$ 为一个单位矩阵,得到高度通道模型为:

$$\ddot{z} = -g + \frac{1}{m} (\cos \varphi \cos \theta) T \quad (5)$$

水平位置和航向通道为:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m} (\cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi) T \\ \ddot{y} = \frac{1}{m} (\cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi) T \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} J_x \ddot{\varphi} = \dot{\theta} \dot{\psi} (J_y - J_z) + \tau_1 \\ J_y \ddot{\theta} = \dot{\varphi} \dot{\psi} (J_z - J_x) + \tau_2 \\ J_z \ddot{\psi} = \dot{\varphi} \dot{\theta} (J_x - J_y) + \tau_3 \end{cases} \quad (7)$$

根据简化后得到的飞行器模型,就能够针对模型特点进行控制器的设计。

2 控制器设计与稳定性分析

2.1 控制系统设计

由四旋翼无人飞行器模型可以看出,四旋翼无人飞行器是一个欠驱动的非线性系统,通过对高度通道设计神经网络自适应控制器,对水平位置和航向通道设计状态反馈控制器,实现对四旋翼无人飞行器的混合控制。如图2所示为混合控制系统结构框图,期望高度和垂向速度为 z_d 和 \dot{z}_d ,期望水平位置和航向为 x_d, y_d 和 ψ_d 。

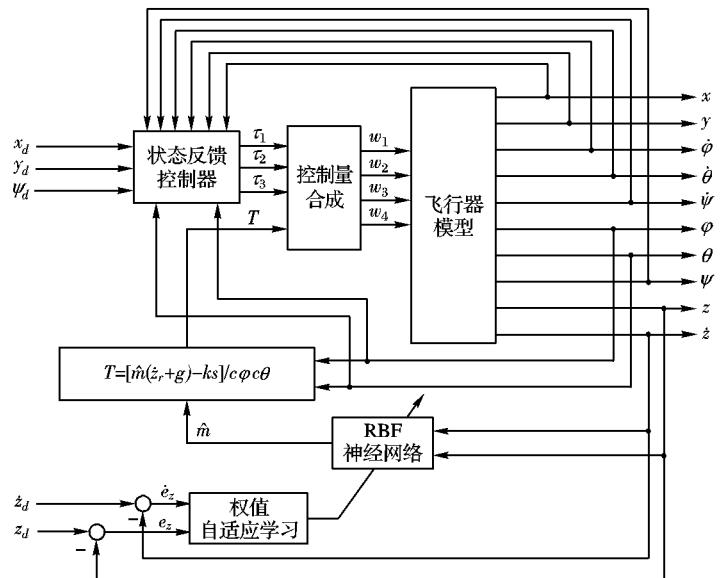


图2 混合控制系统结构框图

2.2 高度通道的自适应控制器设计

高度通道的调节是一个非线性过程,使用传统的线性自适应律进行调节虽能够达到减小误差的目的,但估计的质量会存在误差,这是由于系统激励信号过于简单^[13]。

因为具有良好的函数逼近能力,神经网络被大量应用到系统建模中。为了使控制器能够更加准确地了解被控对象信息,本文使用RBF神经网络的方法对系统进行辨识^[14-16],

RBF网络是一种3层前向网络,由输入到输出的映射是非线性的、局部逼近的神经网络,其辨识得到的模型更接近于真实模型。令RBF神经网络的输入为测量的实际高度 z 和高度变化率 \dot{z} ,输出为估计质量 \hat{m} 。通过RBF神经网络不断在线逼近真实质量 m ,将估计质量 \hat{m} 代入式(8),计算出控制量 T 为:

$$T = [\hat{m}(\dot{z}_r + g) - ks]/c\varphi c\theta \quad (8)$$

设计RBF神经网络来估计质量 \hat{m} ,用 ε 代表神经网络的逼近误差,则 \hat{m} 表示为:

$$\hat{m} = \mathbf{W}^T f(\mathbf{V}^T \mathbf{x}) + \varepsilon \quad (9)$$

则RBF网络的辨识结构如图3所示。

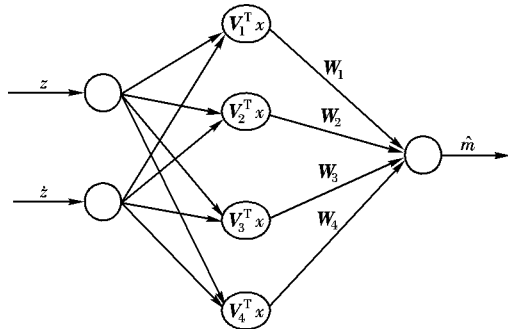


图3 RBF神经网络结构

图3中: $\mathbf{V}^T \mathbf{x}$ 为RBF神经网络隐层的高斯基函数,它与飞行器的实际高度信息 z 和垂向速度 \dot{z} 有关; \mathbf{W}^* 为网络的输出层权值,权值自适应学习率由高度误差 e 和垂向速度误差 \dot{e} 设计。

2.3 水平位置和航向的状态反馈控制器设计

使用状态反馈控制方法,设计控制器如式(10),其中 u_x 和 u_y 为虚拟控制量, $k_{p,x}$ 和 $k_{p,y}$ 为比例项, $k_{d,x}$ 和 $k_{d,y}$ 为微分项, $k_{i,x}$ 和 $k_{i,y}$ 为积分项,这里根据文献[11,17],直接给出结果:

$$\begin{cases} u_x = \frac{m}{u_1} [\ddot{x} + k_{d,x}(\dot{x} - \dot{x}^d) + k_{p,x}(x - x^d) + k_{i,x} \int (x - x^d)] \\ u_y = \frac{m}{u_1} [\ddot{y} + k_{d,y}(\dot{y} - \dot{y}^d) + k_{p,y}(y - y^d) + k_{i,y} \int (y - y^d)] \end{cases} \quad (10)$$

进而根据虚拟控制量 u_x 和 u_y 计算得到期望的俯仰角 φ_d 和横滚角 θ_d 信息:

$$\begin{cases} \varphi_d = \arcsin(u_x \sin \psi - u_y \cos \psi) \\ \theta_d = \arcsin\left(\frac{u_x \cos \psi + u_y \sin \psi}{\cos \varphi_d}\right) \end{cases} \quad (11)$$

从而给出姿态动力学系统的状态反馈控制量如式(12)所示:

$$\begin{cases} \tau_1 = \dot{\omega}_x + k_{d,\varphi}(\omega_x - \omega_{x,d}) + k_{p,\varphi}(\varphi - \varphi_d) - \dot{\theta}\psi(J_y - J_z) \\ \tau_2 = \dot{\omega}_y + k_{d,\theta}(\omega_y - \omega_{y,d}) + k_{p,\theta}(\theta - \theta_d) - \dot{\varphi}\psi(J_z - J_x) \\ \tau_3 = \dot{\omega}_z + k_{d,\psi}(\omega_z - \omega_{z,d}) + k_{p,\psi}(\psi - \psi_d) - \dot{\varphi}\dot{\theta}(J_x - J_y) \end{cases} \quad (12)$$

其中: $k_{p,\varphi}$ 、 $k_{p,\theta}$ 和 $k_{p,\psi}$ 为比例项, $k_{d,\varphi}$ 、 $k_{d,\theta}$ 和 $k_{d,\psi}$ 为微分项, $\omega_{x,d}$ 、 $\omega_{y,d}$ 和 $\omega_{z,d}$ 为期望角速度。

最后,利用计算得到的控制量 T 和 τ ,通过式(1)能够计算出飞行器的四个电机转速,实现对飞行器的控制。

2.4 稳定性分析

状态反馈控制器的稳定性分析比较简单,这里仅给出神

经网络自适应控制器稳定性分析过程。

假设输入信号是有界的。假设 \hat{m} 为神经网络的输出,即通过逼近后得到的系统质量, m 为系统真实质量, \mathbf{W}^* 和 \mathbf{V}^* 为最优权重矩阵, $\hat{\mathbf{W}}$ 和 $\hat{\mathbf{V}}$ 为网络权重的估计值,组合误差为 s 。文献[12]指出上述神经网络满足Stone-Weierstrass定理的条件,能够在一个紧集上以任意精度逼近任意连续函数。则有

$$\begin{cases} \hat{m} = \hat{\mathbf{W}}^T f(\hat{\mathbf{V}}^T \mathbf{x}) \\ m = \mathbf{W}^{*T} f(\mathbf{V}^{*T} \mathbf{x}) \end{cases} \quad (13)$$

$\tilde{\mathbf{W}}$ 和 $\tilde{\mathbf{V}}$ 为网络权值的误差为:

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{W}} = \hat{\mathbf{W}} - \mathbf{W}^* \\ \tilde{\mathbf{V}} = \hat{\mathbf{V}} - \mathbf{V}^* \end{cases} \quad (14)$$

定义系统的Lyapunov函数 V_F :

$$V_F = \frac{m}{2} s^2 + \frac{1}{2\eta} (\tilde{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{W}} + \tilde{\mathbf{V}}^T \tilde{\mathbf{V}}) \quad (15)$$

假设输入信号是有界的并假设神经网络的最优权重矩阵是Frobenius范数意义下有界的,即

$$\|\mathbf{W}^*\| \leq w_m$$

$$\|\mathbf{V}^*\| \leq v_m$$

$$|\dot{z}_r| \leq c_3$$

则有 $|\dot{z}_r + g| \leq c_3 + g_0$ 于是得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_F &= m s \dot{s} + \frac{1}{\eta} (\tilde{\mathbf{W}}^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}} + \tilde{\mathbf{V}}^T \dot{\tilde{\mathbf{V}}}) = \\ &= -ks^2 + s(\dot{z}_r + g) (\tilde{\mathbf{W}}^T f(\hat{\mathbf{V}}^T \mathbf{x}) - \mathbf{W}^{*T} \cdot f(\mathbf{V}^{*T} \mathbf{x}) - \\ &\quad \tilde{\mathbf{W}}^T f(\mathbf{V}^T \mathbf{x}) - \tilde{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{W}} - \tilde{\mathbf{V}}^T \tilde{\mathbf{W}} f'(\mathbf{x})) \end{aligned} \quad (16)$$

对 $f(\mathbf{V}^{*T} \mathbf{x})$ 进行泰勒展开,有

$$f(\mathbf{V}^{*T} \mathbf{x}) = f(\hat{\mathbf{V}}^T \mathbf{x}) - f'(\tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{x}) + O(\tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{x})^2 \quad (17)$$

文献[13]证明了高阶无穷小量是有界的,这里认为 $\|O(\tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{x})^2\| \leq c_1$,于是有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_F &= -ks^2 + s(\dot{z}_r + g) (-\tilde{\mathbf{W}} f(\tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{x}) - \\ &\quad \mathbf{W}^{*T} O(\tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{x})^2 - \tilde{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{W}}) \end{aligned} \quad (18)$$

由于 $-\tilde{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{W}} \leq \frac{1}{2} (\|\tilde{\mathbf{W}}\|^2 - \|\mathbf{W}^*\|^2)$ 且根据Sigmoid函数的定义, $0 \leq f(\cdot) \leq 1$,于是有

$$\begin{aligned} \dot{V}_F &\leq -ks^2 + |s| |\dot{z}_r + g| \cdot \\ &\quad \left(\|\tilde{\mathbf{W}}\| + w_m c_1 - \frac{\delta}{2} \|\tilde{\mathbf{W}}\| + \frac{\delta}{2} w_m^2 \right) \leq \\ &\quad -ks^2 + |s| |\dot{z}_r + g| \cdot \\ &\quad \left[-\left(\|\tilde{\mathbf{W}}\| - \frac{\delta}{4} \right)^2 + \frac{\delta^2}{16} + w_m c_1 + \frac{\delta}{2} w_m^2 \right] \end{aligned} \quad (19)$$

令 $c_2 = \frac{\delta^2}{16} + w_m c_1 + \frac{\delta}{2} w_m^2$,则有

$$\dot{V}_F \leq -ks^2 + c_2 c_3 |s| \leq -k \left(|s| - \frac{c_2 c_3}{2k} \right)^2 + \frac{c_2^2 c_3^2}{4k} \quad (20)$$

则系统误差是一致最终有界的。

3 仿真分析与实验验证

仿真实验对象是以一套自制四旋翼无人飞行器为例进行仿真,其中仿真参数见表1。

设定四旋翼无人飞行器的期望运行轨迹为螺旋线上升, X 方向是幅值为15的正弦曲线, Y 方向是幅值为15的余弦曲线, Z 方向是斜率为1的斜坡曲线,初始值为5,飞行时间为50s,假设飞行器的初始位置为 $(x \ y \ z) = (10 \ 0 \ 0)$,四

旋翼无人飞行器的初始姿态角均为 0° 。假设四旋翼无人飞行器质量的标称值 $m_0 = 2 \text{ kg}$,实际质量为 $m = 4 \text{ kg}$,在 Matlab/Simulink 中,检验本文提出方法对于四旋翼无人飞行器的控制效果,仿真步长取 0.02 s ,设计 RBF 神经网络的隐层节点数为 100,初始权值为 0。根据多次仿真实验对比,状态反馈控制器控制参数选取为:

$$\begin{aligned} k_{p,x} &= 2.2 & k_{d,x} &= 0.3 & k_{i,x} &= 0.05 \\ k_{p,y} &= 2.5 & k_{d,y} &= 0.4 & k_{i,y} &= 0.03 \\ k_{p,\varphi} &= 1.6 & k_{d,\varphi} &= 0.2 & & \\ k_{p,\theta} &= 1.6 & k_{d,\theta} &= 0.2 & & \\ k_{p,\psi} &= 1.8 & k_{d,\psi} &= 0.3 & & \end{aligned}$$

表1 飞行器载体固有参数和空气动力学参数

参数	值
m	4 kg
J_x	$0.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
J_y	$0.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
J_z	$0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
C_T	0.0047
C_Q	0.000228
ρ	$1.184 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
A	0.071 m^2
r	0.15 m
d	0.35 m

针对四旋翼无人飞行器的自主起飞控制过程,分别使用传统状态反馈控制方法和本文提出的混合控制方法进行仿真,图4~7为仿真结果。图4为四旋翼无人飞行器自主起飞的仿真控制效果,其中 RBF 神经网络曲线表示质量经过 RBF 神经网络在线估计后再使用状态反馈控制器的混合控制效果,状态反馈曲线表示仅使用状态反馈控制方法下的控制结果。图5~6为经过 RBF 神经网络对四旋翼无人飞行器质量在线估计下的控制方法和仅使用状态反馈控制下得到的高度跟踪效果和跟踪误差。图7为 RBF 神经网络对于四旋翼无人飞行器质量的辨识结果。

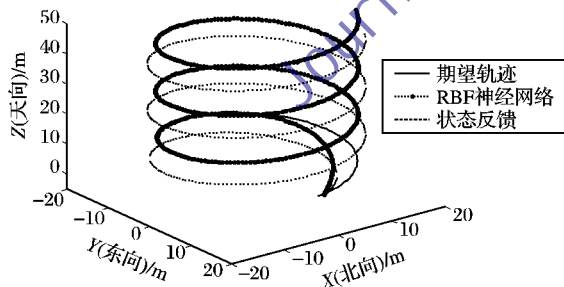


图4 四旋翼无人飞行器的自主起飞控制效果

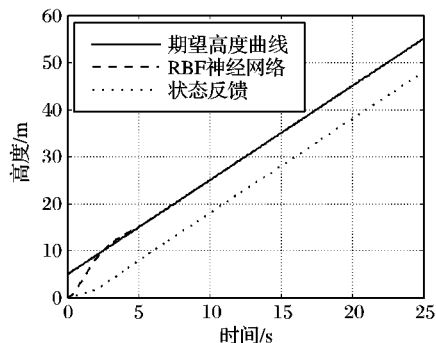


图5 高度控制效果对比

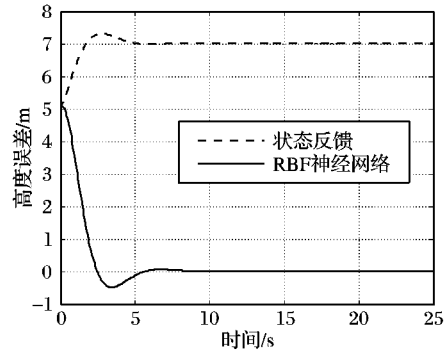


图6 高度控制误差曲线

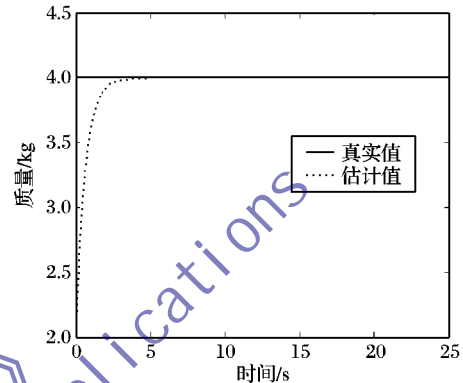


图7 RBF神经网络质量辨识曲线

由图4可看出,与仅使用状态反馈控制方法相比,本文提出的混合控制方法具有较好的控制效果,在飞行器质量不确定的情况下,仍能够实现四旋翼无人飞行器的飞行任务。

由图5~6可看出,本文设计的高度自适应控制器能够提高四旋翼无人飞行器的高度控制精度。

由图7可看出,RBF神经网络能够在5s内逼近飞行器质量真实值4 kg,说明 RBF 神经网络能够完成对于四旋翼无人飞行器质量的在线辨识,且具有较高的精度和较快的收敛速度。

4 结语

本文针对质量参数未知情况下四旋翼无人飞行器的垂直起降控制问题,提出了一种混合控制系统设计方法。该方法使用状态反馈和 RBF 神经网络自适应相结合的方式,通过 RBF 神经网络对四旋翼无人飞行器质量的在线辨识,实现了四旋翼无人飞行器的高度控制。通过仿真实验分析表明,本文提出的混合控制方法能够有效实现四旋翼无人飞行器的高度控制,具有较高的高度控制精度。

参考文献:

- [1] ABDESSAMEUD A, TAYEBI A. Global trajectory tracking control of VTOL-UAVs without linear velocity measurements[J]. Automatica, 2010, 46(6): 1053–1059.
- [2] ZUO Z. Trajectory tracking control design with command-filtered compensation for a quadrotor[J]. IET Control Theory & Applications, 2010, 4(11): 2343–2355.
- [3] BENALLEGUE A, MOKHTARI A, FRIDMAN L. Feedback linearization and high order sliding mode observer for a quadrotor UAV [C]// Proceedings of the International Workshop on Variable Structure Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 365–372.

时,双优先级算法任务错失率介于 EDF 和 PFair 算法之间,但负载一旦超过 4,双优先级算法任务错失率明显要低于另外两种算法。

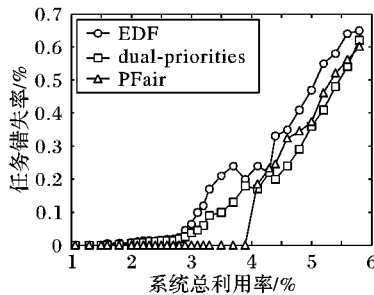


图4 三种调度算法任务错失率对比

双优先级算法中用 EDCL 算法调度强实时周期任务,用延长截止期的方法调度软实时周期任务,使得任务截止期错失率明显下降。三种调度算法性能比较如图 5 所示。

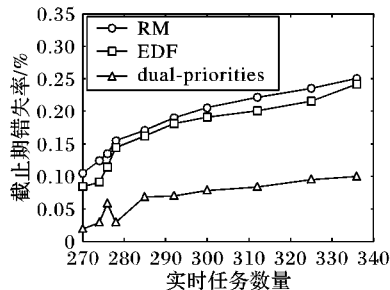


图5 截止期错失率测试结果

实验结果表明,本文提出的调度算法可以很好地调度强实时任务,保证重要任务的优先执行,并降低了强实时任务抢占软实时任务造成的软实时任务错失率。

3 结语

本文针对高速网络中的海量数据处理效率低下问题,提出了一种多片 FPGA 并行处理的模型,并基于此模型,对强实时周期任务提出了一种基于最早截止期临界零松弛度的优先级判定方法,从而保证了强实时周期任务的优先执行。虽然 FPGA 使用的数目越多,但成本会越高,因此需要进一步实现模型中 FPGA 的数量最优问题。

参考文献:

[1] 刘航,戴冠中,李晖晖,等.基于FPGA的高速网络入侵检测系统

[J]. 计算机应用, 2004, 24(5): 33-35.

- [2] 唐杰敏. 基于FPGA的以太网流量发生器的设计与实现[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [3] 林洪周. 万兆网络数据包捕获系统的研究与开发[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [4] 何毅华, 易清明, 石敏. 低成本数据传输存储系统的FPGA实现[J]. 计算机应用, 2009, 29(12): 3238-3240, 3243.
- [5] 朱晴, 吴宁, 顾薛平. 基于FPGA的千兆网络数据采集系统设计与实现[J]. 微型机与应用, 2011, 30(21): 53-55, 59.
- [6] SUGANYA K, NAGARAJAN V. Efficient run-time task allocation in reconfigurable multiprocessor system-on-chip with network-on-chip [C]// 2011 International Conference on Computer, Communication and Electrical Technology. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 12-17.
- [7] QI X, ZHU D K, AYDIN H. Global scheduling based reliability-aware power management for multiprocessor real-time systems [J]. Journal of Real-Time Systems, 2011, 47(2): 109-142.
- [8] DAVIS R I, BURNS A. Improved priority assignment for global fixed priority preemptive scheduling in multiprocessor real-time systems [J]. Real-Time Systems Journal, 2010, 47(1): 1-40.
- [9] LI K. Energy efficient scheduling of parallel tasks on multiprocessor computers [J]. The Journal of Supercomputing, 2012, 60(2): 223-247.
- [10] ELLIOTT G A, ANDERSON J H. Globally scheduled real-time multiprocessor systems with GPUs [J]. Real-Time Systems, 2012, 48(1): 34-74.
- [11] SALAMY H, RAMANUJAM J. An effective solution to task scheduling and memory partitioning for multiprocessor system-on-chip [J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2012, 31(5): 717-725.
- [12] BANUS J M, ARENAS A. Dual priority algorithm to schedule real-time tasks in a shared memory multiprocessor [C]// IPDPS '03: Proceedings of the 17th International Parallel and Distributed Processing Symposium. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2003: 112.
- [13] 刘怀, 费树岷. 基于双优先级的实时多任务动态调度[J]. 计算机工程, 2005, 31(18): 16-18.
- [14] 朱俊超. 基于多处理器的双优先级调度算法改进与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [15] GOOSSENS J, FUNK S, BARUAH S. Priority-driven scheduling of periodic task systems on multiprocessors [J]. Real-Time Systems, 2003, 25(2/3): 187-205.
- [16] 李琦, 巴巍. 两种改进的EDF软实时动态调度算法[J]. 计算机学报, 2011, 34(5): 943-949.

(上接第861页)

- [4] WASLANDER S L, HOFFMANN G M, JANG J S, et al. Multi-Agent quadrotor testbed control design: integral sliding mode vs. reinforcement learning [C]// International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005: 468-473.
- [5] BOUABDALLAH S, SIEGWART R. Backstepping and sliding mode techniques applied to an indoor micro quadrotor [C]// International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005: 2247-2252.
- [6] 薛文涛, 吴晓蓓, 翟玉强, 等. 三自由度飞行器模型的神经网络PID控制[J]. 控制工程, 2009, 16(2): 214-219.
- [7] 李光春, 王璐, 王兆龙, 等. 基于四元数的四旋翼无人飞行器轨迹跟踪控制[J]. 应用科学学报, 2012, 30(4): 415-422.
- [8] 王璐, 李光春, 王兆龙, 等. 欠驱动四旋翼无人飞行器的滑模控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(10): 1248-1253.
- [9] 卓开育, 陆秋君. 基于改进RBF神经网络的车辆类型识别[J]. 计算机应用, 2011, 31(S2): 85-89.
- [10] 贺可鑫, 何小海, 陶青川, 等. 基于RBF神经网络的COSM图像复原算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(S1): 79-85.

- [11] 刁琛. 四旋翼无人飞行器的非线性自适应控制器设计[D]. 天津: 天津大学, 2010: 13-18.
- [12] 周东华. 非线性系统的自适应控制导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 88-103.
- [13] SLOTINE J J, LI W P. 应用非线性控制[M]. 程代展, 译. 北京: 机械工业出版社, 2004: 211-264.
- [14] 张利军, 贾鹤鸣, 边信黔, 等. 基于I2干扰抑制的水下机器人三维航迹跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(5): 645-651.
- [15] FUNAHASHI K-I. On the approximate realization of continuous mappings by neural networks [J]. Neural Networks, 1989, 2(3): 183-192.
- [16] 贾鹤鸣, 宋文龙, 郭婧. 基于神经网络滑模的采摘机械臂控制设计[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2012, 42(3): 709-713.
- [17] POUNDS P, MAHONY R, CORKE P. Modelling and control of a large quadrotor robot [J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(7): 691-699.