

# 基于自适应 CMAC 神经网络控制器的四旋翼飞行器实验研究

孙文革 程 莉 周燕燕 薛喜红

(新疆职业大学, 机械电子工程学院 新疆乌鲁木齐 830013)

**摘 要:** 四旋翼飞行器是一个多变量、强耦合、欠驱动的时变开环不稳定系统, 其控制器的性能是系统设计的关键因素。首先根据牛顿欧拉定理建立了飞行器的动力学模型, 然后在自适应神经元控制器的基础上, 将 CMAC 与神经网络并联构成了自适应 CMAC 神经网络控制器结构。在仿真实验平台上使用该控制器进行了加重物及震动实验, 并与传统 PID 控制器的控制效果进行了比较, 比较结果表明, 自适应 CMAC 神经网络控制器具有良好的自适应能力、更强的抗干扰性及更好的鲁棒性。

**关键词:** 四旋翼飞行器; CMAC 神经网络; 自适应控制; 鲁棒性; PID 控制

中图分类号: TP2

文献标识码: A

## Experimental Study of Quadrotor Based on Adaptive CMAC Controller

SUN Wen-ge

(Department of mechatronic engineering, Xinjiang Vocational University, Urmqi, 830013)

**Abstract:** The performance of controller of the quadrotor is the key factor of system design because it is an multivariable under-actuated open loop unstable time varying system with coupling characteristics. The dynamics model and the state space function of the quadrotor are firstly established according to Newton Euler equation, then, the adaptive CMAC controller is proposed based on adaptive neuron controller, which is parallel to the adaptive neuron controller. The payloads and the shake test is performed on the platform of simulation experiment, and the control effect is compared with the traditional PID controller, the comparison results show that this proposed controller is of perfect self-adaptive control properties and robustness against the external disturbance.

**Key words:** Quadrotor; CMAC neural network; Self-adaptive control; Robustness; PID control

### 0 引言

四旋翼飞行器在数据采集、航空摄影、地质勘探、侦察营救及农牧业农药喷洒及消防等方面具有广阔的应用前景。四旋翼飞行器是一个多变量、强耦合、欠驱动的非线性时变开环不稳定控制系统<sup>[1]</sup>, 飞行器在飞行过程中会受到复杂的空气动力方面的扰动<sup>[2]</sup>, 飞行过程中各种不确定因素都会对飞行器的飞行姿态和效果产生较大影

响, 传统的控制方法难以取得较好的控制效果, 高精度、高性能的飞行器控制策略近年来逐渐成为了控制工程领域的研究热点。现阶段对四旋翼飞行器的控制策略主要包括反馈控制<sup>[3]</sup>、滑模控制<sup>[4]</sup>、干扰观测器<sup>[5]</sup>、神经网络自适应控制<sup>[6]</sup>等, 但上述控制方法都有各自的局限性, 在实际应用中难以取得较好的效果。如文献<sup>[3]</sup>运用线性反馈控制理论去控制非线性控制系统, 难以在非悬停状态下保持平衡。文献<sup>[4]</sup>用滑模控制方法设计控制器, 在控制过程中会频繁切换从而产

生抖动,文献<sup>[6]</sup>用神经网络进行自适应控制,但神经网络的计算速度较慢,无法保证系统的快速响应。

本文采用了 CMAC (小脑模型关联控制器, Cerebellar Model Articulation Controller) 设计了鲁棒自适应控制器,用于提高四旋翼飞行器姿态与位置控制系统的鲁棒性,并进行了系统震动及负重实验研究,研究表明,该控制方案具有良好的参数适应能力,可较好的实现系统跟踪及抗扰动功能。

### 1 飞行器建模

四旋翼飞行器可视作一个 6 自由度的运动模型,其仿真坐标系如图 1 所示。俯仰定位为绕着机体 Y 轴的旋转,角度用编码器来测量;翻转定义为绕 X 轴的旋转;偏航定义为绕 Z 轴的旋转。

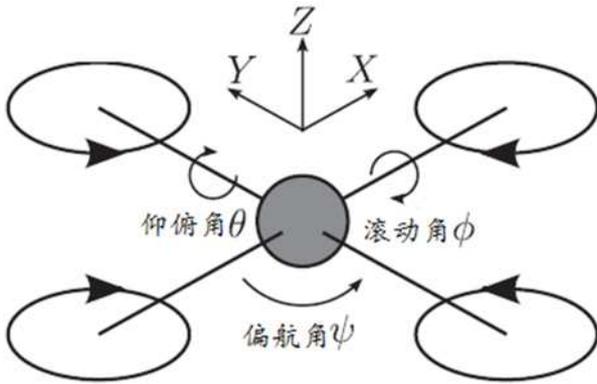


图 1 飞行器仿真坐标系

旋转矩阵 R 与平移矩阵 T 表示为<sup>[6]</sup>:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & \sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \sin\phi \sin\theta \sin\psi + \cos\phi \cos\psi \\ \cos\theta \sin\psi & \sin\phi \sin\theta \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi \cos\theta & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi / \cos\theta & \cos\phi / \cos\theta \end{bmatrix}$$

假设飞行器三个轴受到的扰动为  $D_i$  ( $i = x, y, z$ ), 则可根据牛顿欧拉方程得出系统的动力学模型为:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{(\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi) b \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 + D_x}{m} \\ \ddot{y} = \frac{(\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) b \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 + D_y}{m} \\ \ddot{z} = \frac{(\cos\phi \cos\theta) b \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 - mg + D_z}{m} \\ \ddot{\phi} = \frac{(I_{yy} - I_{zz}) \dot{\theta} \dot{\psi} + J_r \dot{\phi} \Omega_r + bl(\Omega_4^2 - \Omega_2^2)}{I_{xx}} \\ \ddot{\theta} = \frac{(I_{zz} - I_{xx}) \dot{\phi} \dot{\psi} - J_r \dot{\theta} \Omega_r + bl(\Omega_3^2 - \Omega_1^2)}{I_{yy}} \\ \ddot{\psi} = \frac{(I_{xx} - I_{yy}) \dot{\phi} \dot{\theta} + d(\Omega_4^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 - \Omega_1^2)}{I_{zz}} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中,  $\Omega_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ )—四个叶片旋转的角速度;  $b$ —阻

力因素;  $m$ —飞行器质量;  $g$ —重力加速度;  $l$ —螺旋桨中心到旋转轴轴心的距离;  $J_r$ —螺旋桨转动惯量;  $I_i$  ( $i = xx, yy, zz$ )—各方向转动惯量;  $\Omega_r$ —螺旋桨整体速度;  $d$ —风阻系数<sup>[7]</sup>。

实际设计控制器时,将系统模型用状态方程  $\dot{X} = f(X, U)$  形式表示,其状态向量  $X$  与控制量输入  $U$  表示为:

$$X = (x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z}, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}) \quad (3)$$

$$U = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ bl(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ bl(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ d(\Omega_4^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 - \Omega_1^2) \end{pmatrix} \quad (4)$$

从而将式(2)形式变为:

$$X = f(X, U) = \begin{pmatrix} x_2 \\ [(\cos x_7, \sin x_9, \cos x_{11} + \sin x_7, \sin x_{11})U_1 + D_x] / m \\ x_4 \\ [(\cos x_7, \sin x_9, \sin x_{11} - \sin x_7, \cos x_{11})U_1 + D_y] / m \\ x_6 \\ (\cos x_7, \cos x_9)U_1 - mg + D_z / m \\ x_8 \\ [(I_{yy} - I_{zz})x_{10}x_{12} + J_r x_{10} \Omega_r + U_2] / I_{xx} \\ x_{10} \\ [(I_{zz} - I_{xx})x_8 x_{12} - J_r x_8 \Omega_r + U_3] / I_{yy} \\ x_{12} \\ [(I_{xx} - I_{yy})x_8 x_{10} + U_4] / I_{zz} \end{pmatrix} \quad (5)$$

### 2 控制器设计

#### 2.1 系统控制策略设计

本文设计了一个自适应 CMAC 神经网络控制器结构如图 2 所示。

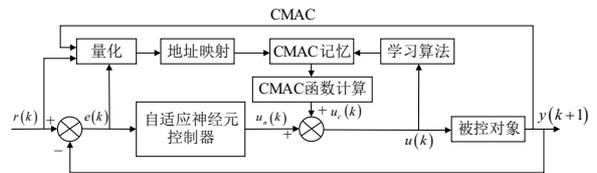


图 2 自适应 CMAC 神经网络系统控制器结构图

CMAC 输入为系统给定信号及误差信号,用 CMAC 的输出  $u_c(k)$  与总输入  $u_n(k)$  进行比较得到误差信号用以调整权重<sup>[8]</sup>。

控制器的工作分为控制和学习两个过程。

初始状态的所有权重为零,将系统给定值  $r(k)$  与误差信号  $e(k)$  进行量化,然后将其作为地址输入 CMAC,在存储器中将与之相应的 C 各单元中的权重值相加,从而得到 CMAC 的输出:

$$u_c(k) = \sum_{i=1}^c \omega_i^{(k)} a_i(k) \quad (6)$$

式中,  $C$ —泛化常数,  $\omega_i^{(k)}$ —权重值,  $a_i(k)$ —CMAC 存储器地址选择向量。

将 CMAC 的输出  $u_c(k)$  与神经元控制器输出  $u_n(k)$  相加即可得到被控对象（螺旋桨电机）的总输入量  $u(k)$ 。在每个控制周期结束时，将系统输出  $y(k+1)$  和实际误差  $e(k+1)$  作为地址输入 CMAC 网络计算相应的输出  $u'_c(k)$ ，将其与  $u(k)$  进行比较对权重进行修正后，进入学习过程，学习的最终目的是要让  $u_c(k)$  最接近  $u(k)$ ，权重调整规则为：

$$\omega_i(k+1) = \omega_i(k) + \beta \frac{u(k) - u'(k)}{C} \quad (7)$$

式中， $\beta$ -CMAC 的学习速率， $0 < \beta \leq 1$ 。

### 2.2 自适应神经元控制器的设计

本文中固定增益控制器采用常规 PD 控制器，自适应神经元控制器用以对固定增益进行自适应调节，其具体结构如图 3 所示。

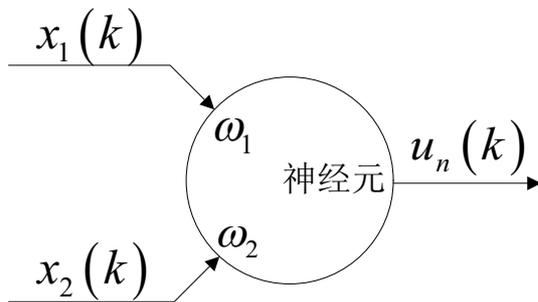


图 3 自适应神经网络结构图

输出  $u_n(k)$  为：

$$\begin{aligned} u_n(k) &= \omega_1(k)x_1(k) + \omega_2(k)x_2(k) \\ &= K_p(k)e(k) + k_d(k)[e(k) - e(k-1)] \quad (8) \end{aligned}$$

式中， $\omega_1(k)$ 、 $\omega_2(k)$ -对应 PD 控制器的 P、D 调节系数的神经元权重， $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ -给定信号的误差及其变化量。

神经网络的整定指标：

$$J = \frac{1}{2}(r(k+1) - y(k+1))^2 = \frac{1}{2}e(k+1)^2 \quad (9)$$

可以使用梯度下降法在线调整神经元权重值，即：

$$\Delta\omega_i(k) = -\eta \frac{\partial J}{\partial \omega_i} = \eta e(k+1) \cdot \frac{\partial y(k+1)}{\partial u_n(k)} x_i(k) \quad (10)$$

式中， $\eta$ -学习速率， $0 < \eta \leq 1$ ； $\omega_i$ -神经元权重值； $\frac{\partial y(k+1)}{\partial u_n(k)}$

-被控对象输出对神经元输入的灵敏度，可用下式近似求取<sup>[9]</sup>：

$$\frac{\partial y(k+1)}{\partial u_n(k)} \approx \operatorname{sgn} \left[ \frac{y(k+1) - y(k)}{u_n(k) - u_n(k-1)} \right] \quad (11)$$

式中， $\operatorname{sgn}$  为符号函数。

### 3 实验结果及分析

在深圳固高科技生产的四旋翼飞行仿真平台上进行了实验，从而对控制算法进行验证。实验台如图 4 所示。

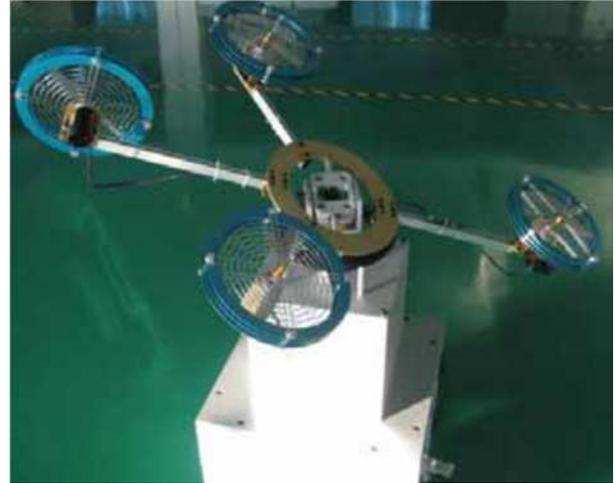


图 4 四旋翼飞行仿真平台

两个直流电机被安装在飞行器本体的末端来驱动两个螺旋桨，通过安装在支点和两个螺旋桨中心的编码器把直升机的俯仰角、螺旋桨的翻转角和旋转速度反馈到控制卡，再由用户编写的控制算法计算出控制量发给两个电机进行飞行姿态和速度的控制。

实验台参数如表 1 所示。

表 1 四旋翼飞行仿真平台参数表

变量	变量含义	变量值	单位
$L$	臂长	0.52	$m$
$I_{xx}$	X 轴惯量分量	0.1637	$kg \cdot m^2$
$I_{yy}$	Y 轴惯量分量	0.7583	$kg \cdot m^2$
$I_{zz}$	Z 轴惯量分量	0.406	$kg \cdot m^2$
$k_{fc}$	力系数	0.138	$N/V$

为了验证本文算法的优越性，实验分别采用了实验台自带的常规 PID 控制算法和自适应 CMAC 控制算法进行。

当飞行器空载达到平衡状态后，在一个悬臂上悬挂一个 90 克的重物，相当于在 Z 轴方向施加了一个  $0.021 N \cdot m$  的阶跃干扰，从而观测系统的运行状态。

在另一个实验中，在空载平衡情况下，在一个悬臂上施加力的作用进行上下震颤，震动频率  $1 Hz$ ，振幅  $\theta$  在  $3-7^\circ$  之间，用以模拟室外的自然风况条件。

#### 3.1 使用 PID 控制算法实验结果

使用 PID 算法得出的加重物实验结果如图 5 所示。系统进入平衡状态后，在 15s 悬挂重物，最大俯仰角很快达到了  $8^\circ$ ，接近 15s 的调节后， $\theta$  和  $\phi$  都重新进入了平衡状态（归零），而偏航角  $\psi$  调节时间较长，图 5 的时间轴较短，其平衡状态没有显示出来，在后面的实验中，曲线  $\psi$  均不再显示。

震颤实验也是在 16s 的时间开始，实验结果如图 6 所示。 $\theta$  和  $\phi$  均在震颤开始后呈明显的高频震荡，且  $\theta$  的震荡呈发散趋势，证明系统工作于不稳定状态。

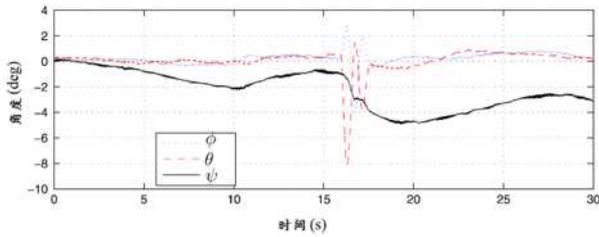


图 5 使用 PID 算法加重物实验结果

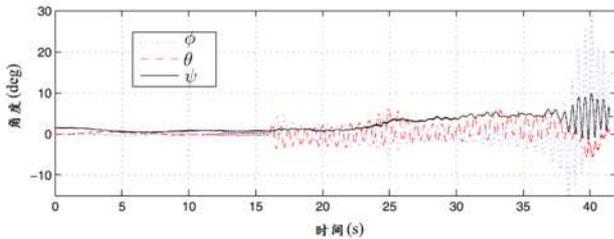


图 6 使用 PID 算法震颤实验结果

### 3.2 使用自适应 CMAC 算法实验结果

使用自适应 CMAC 算法进行实验的加载荷实验结果如图 7 所示。

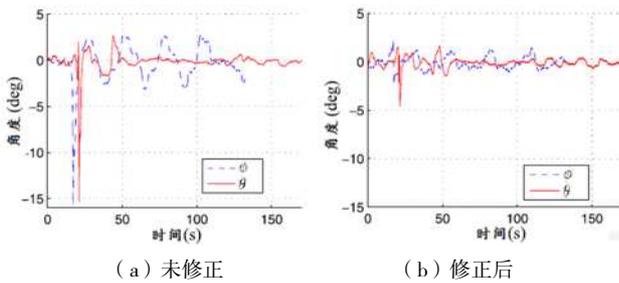


图 7 使用 CMAC 算法加载荷实验结果

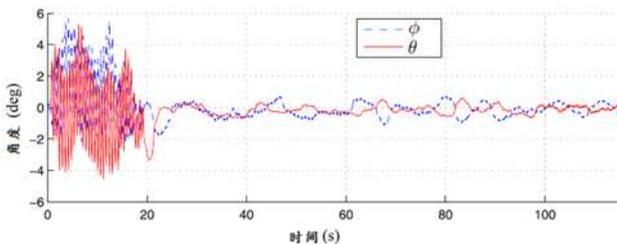


图 8 使用 CMAC 算法震颤实验结果

从图 7 (a) 中可以看出, 在 16s 时间加载荷后,  $\theta$  和  $\phi$  的最大偏转角度均达到了  $15^\circ$ , 在对 CMAC 的学习速率进行了修正后, 振幅明显减小, 最大倾角不到  $5^\circ$ , 小于常规 PID 算法实验, 经过 50s 左右的调节后趋于稳定。

从图 8 可以看出, 使用 CMAC 算法进行震颤实验的结果明显优于使用 PID 算法, 把空载的平衡状态定义为 0 时刻并开始震颤, 在经过 20s 左右的调整后, 系统逐渐进入了稳态,  $\theta$  及  $\phi$  的震荡均在  $1^\circ$  以内, 说明在自然风条件下, 使用自适应 CMAC 算法的四旋翼飞行器在稳定性方面的控制效果明显优于传统的 PID 算法, 在搬运物体时, 当机身质量发生突变时, 采用自适应 CMAC 算法的机身摆动较

小, 但调节时间略长于常规 PID 算法。

## 4 结论

针对四旋翼飞行器的强耦合、多变量、欠驱动等特性, 本文设计了一种自适应 CMAC 控制器, 以系统给定信号和动态误差作为 CMAC 的激励信号, 与自适应神经网络结合共同构成复合控制。通过分析实验结果证明, 相对于传统的 PID 控制, 该控制器具有更好的抗扰动能力, 更强的参数自适应能力以及鲁棒性。

自适应 CMAC 控制器可以在不改变系统结构情况下直接通过计算机实现功能, 对应于现在广泛使用的 PID 控制系统来说, 是一种可以实现在线自学习、自适应控制的较好方法。

## 参考文献

- [1]李砚浓, 李汀兰, 姜艺, 等. 基于 RBF 神经网络自适应 PID 四旋翼飞行器控制[J]. 控制工程, 2016, 23 (3): 378-382.
  - [2]韩笑, 廖粤峰. 基于扰动抑制的四旋翼飞行器跟踪控制[J]. 计算机仿真, 2016, 33 (2): 111-115.
  - [3]FREW E W, ROCK S M, JONES H, et al. Combined cdgps and Vision-based control of a small autonomous helicopter[C]//American Control Conference, 1998: 694-698.
  - [4]XIA Y, ETAL. Attitude tracking of rigid spacecraft with bounded disturbance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 647-659.
  - [5]WANG L, SU J. Disturbance rejection control of a morphing UAV[C]//Proceedings of American Control Conference. Washington, 2013: 4307-4312.
  - [6]FU J, CHAI T-y, SU C-y, et al. Motion/force Tracking Control of Nonholonomic Mechanical Systems via Combining Cascaded Design and Backstepping[J]. Automatica, 2013, 49(12): 3682-3686.
  - [7]朴海国, 王志新, 张华强. 基于合作粒子群算法的 PID 神经网络非线性控制系统[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(12): 1318-1324.
  - [8]BROOKS A, BANKES S, BENNETT B. Weapons mix and exploratory analysis: a case study, DB-216/2-AF[R]: RAND, 1997.
  - [9]李辉. 一种自适应 CMAC 神经网络控制器的设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (9): 2233-2243.
- 作者简介: 孙文革 (1967.6-), 汉族, 籍贯: 甘肃, 本科学历, 实验师, 研究方向为电子技术及自动控制技术。