

基于深度学习的四旋翼无人机控制系统设计

徐一鸣, 李笑, 杨凯凯, 杨宇

(武警工程大学 信息工程学院, 西安 710086)

摘要: 针对传统四旋翼无人机控制系统受到外界干扰, 无法及时躲避障碍物而导致控制精度低的问题, 提出了基于深度学习的四旋翼无人机控制系统设计; 根据四旋翼无人机控制系统总体结构, 加入超声波测距模块; 依据系统硬件框图, 采用 TMS320F28335 型号主控芯片, 实现关键态势智能分析; 以串级 PID 控制器的控制对象为无人机姿态角度, 控制电机转速; 根据 DSP 发出不同占空比的 PWM 信号, 改变无人机飞行姿态, 依据执行机构驱动原理, 保证无人机飞行时的平衡状态; 使用红外遥控系统, 应用编/解码操控集成电路芯片, 采用 TS0P1738 型号红外线接收器, 适合于红外线遥控数据传输; 构建深度学习目标控制模型, 利用处突阵法与三角形相似原理, 计算像素尺寸, 获取障碍物距无人机当前位置距离, 避免受到外界障碍物干扰; 自适应扩展 Kalman 滤波器技术对无人机自动控制系统有效减小测量误差, 准确地对机动目标进行追踪; 由系统调试结果可知, 当转台角度为 0° , 该系统控制的俯仰角为 31° 、航向角为 186° 、横滚角为 0° 与实际值一致, 对处理突发性群体事件具有重要意义。

关键词: 深度学习; 四旋翼无人机; 处突阵法; PID 控制器; 红外线接收器

Design of Quadrotor UAV Control System Based on Deep Learning

Xu Yiming, Li Xiao, Yang Kaikai, Yang Yu

(School of Information Engineering, Armed Police Force Engineering University, Xi'an 710086, China)

Abstract: Aiming at the problem that the control system of the traditional quadrotor UAV is affected by external interference and cannot avoid obstacles in time, the control accuracy is low. A design of quadrotor drone control system based on deep learning is proposed. According to the overall structure of the quadrotor drone control system, an ultrasonic ranging module is added. According to the system hardware block diagram, the TMS320F28335 main control chip is used to achieve intelligent analysis of key situations. Take the control object of the cascade PID controller as the drone attitude angle to control the motor speed. According to the PWM signals with different duty ratios sent by the DSP, the drone's flight attitude is changed, and the equilibrium state of the drone is ensured according to the driving principle of the actuator. Use infrared remote control system, apply encoding / decoding to control integrated circuit chip, adopt TS0P1738 infrared receiver, suitable for infrared remote control data transmission. Construct a deep learning target control model, use the similarity principle of the burst array method and the triangle to calculate the pixel size, and obtain the distance from the obstacle to the current position of the drone, to avoid interference from external obstacles. Adaptive extended Kalman filter technology effectively reduces the measurement error of the UAV automatic control system and accurately tracks the maneuvering target. According to the system debugging results, when the turntable angle is 0° , the system controls a pitch angle of 31° , a heading angle of 186° , and a roll angle of 0° , which are consistent with the actual values, which is of great significance for handling sudden group events.

Keywords: deep learning; four-rotor UAV; burst method; PID controller; infrared receiver

0 引言

军事平台使用四旋翼无人机进行监测侦查等, 普通拍摄方式受到限制, 拍摄的位置有限, 因此得到的信息较为片面^[1]。四旋翼无人机靠着本身简单的结构和高效率的机动模式, 正被广泛的应用。无人机的特点在于体积小、灵

活且不易被发现, 适应于恶劣的作业环境, 对犯罪嫌疑人员进行长时间的隐秘追踪; 并通过视频链路, 将拍摄画面传输到指挥中心进行处理; 无人机设备还可携带或装置非杀伤性武器, 减缓罪犯的活动能力, 便于警方人员展开抓捕。四旋翼无人机仅仅由四个电机来控制完成它的六个自由度姿态, 因此它属于耦合强但驱动差的一种非线性的不确定性系统, 而且特别容易被外界因素所扰动, 这就要求四旋翼必须具备准确且快速的鲁棒性。所以, 在过去几年间, 有大量学者把不同的控制器放入无人机的控制中, 就是为了避免这些不确定因素有可能带来的不良影响^[2]。目前, 关于无人机的研究内容逐渐受到科研机构以及各个高校的重视, 相继投入研究, 且得到了颇有成效的方案, 使该问题在一定程度上得到了解决。无人机的控制性能与感知方向密切相关, 飞行感知性能越好, 无人机的控制性能越优, RealSense 相机在无人机感知方向中应用较多, 通过

收稿日期: 2020-03-03; 修回日期: 2020-04-07。

基金项目: 2018 年度装备军内科研项目 (WJ20182A020020-2); 2019 年大学基础研究基金项目 (WJY201906); 武警部队军事理论研究计划课题立项 (WJY19-134)。

作者简介: 徐一鸣 (1996-), 男, 河南商丘人, 硕士在读, 主要从事人群态势感知以及预测分析、复杂性方向的研究。

通讯作者: 杨宇 (1981-), 男, 内蒙古通辽人, 博士, 副教授, 主要从事人群异常行为检测以及态势预测分析、复杂性研究、信息安全隐私保护方向的研究。

分析相机拍摄图像，分割处理当前帧景深图像，获取无人机控制方向与飞行路程，以得到对无人机的控制^[3]。然而，采用上述方法都无法避开障碍物，导致控制效果较差。

为了让四旋翼无人机可以完成自主飞行，提出了在深度学习如何设计控制四旋翼无人机系统的基础上，对无人机的避障功能进行的设计，进行了速度控制法的飞行试验，测试和验证速度控制方法的可行性和控制性能。

1 四旋翼无人机控制系统总体结构设计

四旋翼无人机的主要组成部分为：无人机机架、飞行控制器、导航与定位系统、自动避障系统等，无人机能够稳定自如的飞行，主要是由控制系统控制的，所以控制系统的设计是至关重要的^[4]。控制系统总体框图如图 1 所示。

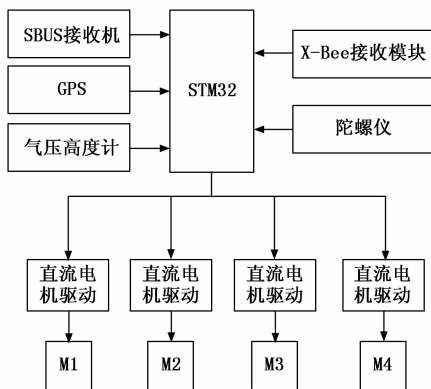


图 1 四旋翼无人机控制系统总体结构

控制系统的是使用 STM32 的主控芯片，主控芯是通过捕获遥控器上的 PPM 信号，对其解码，进而得到所需的目标姿态^[5]。而陀螺仪传感器则使用的是 MPU6050 总控芯片，该芯片获得陀螺仪传感器的姿态信息是靠串口通信协议来实现的，并对其进行解码；主控芯片将 PWM 波为 4 轮周期 20 ms、高电平时间 1~2 ms 输送到 4 个电子调速器，电子调速器需要依靠 PWM 波的占空比来对四个无刷电机的转速进行调节；接着主控芯片需要按照遥控器所给出的指令输出相应的 PWM 波，使控制云台的舵机产生驱动，进而调整云台姿态^[6]。超声波测距模块加入，使飞行安全性得到了保证。

2 系统硬件结构设计

无人机硬件结构主要包括控制器、传感器、电源以及执行结构四个模块，模块之间的关联如图 2 所示。

因为微型无人机有着多变的飞行姿态，为了使无人直升机的带载能力得到一定程度的提升，该无人机设计四旋翼的机械结构^[7]。为了它的各个机翼实现协调运动的目的，而采用机载导航系统控制，进而可以自动的调整四旋翼无人机的飞行姿态，实现关键态势智能分析^[8]。

2.1 串级 PID 控制器控制模块

关于控制器，在设计的时候需要采用美国德州仪器公司自己生产并且研发的具有高强的信号处理能力和嵌入式

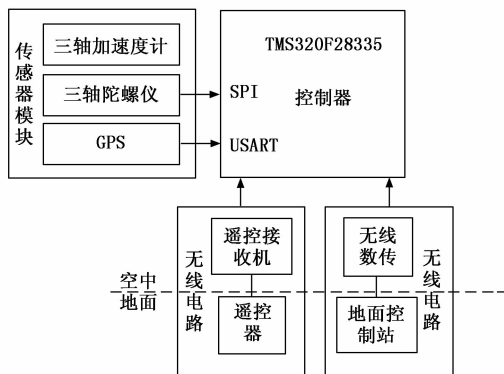


图 2 四旋翼无人机控制系统硬件框图

与事件管理能力的 TMS320F28335 芯片作为主芯片^[9]。该芯片外部接口是由飞控系统决定的，它不管引脚数目还是引脚功能方面都完美的与四旋翼无人机控制系统的一切要求吻合，所以仅仅需要少量的扩展芯片的接口即可实现。

四旋翼无人机的中央处理器是四旋翼无人机控制系统的核心模块，即人们经常提到的 MCU，无人机在俯仰通道时的姿态角度为串级 PID 控制器的控制对象，它的执行器是由 4 个无刷电机构成。串级 PID 的运用，无人机的姿态角度作为外环角度控制系统的输入信息，而姿态角速度则为内环角速度控制系统的输入信息^[10]。它主要用来实现传感器信息的采集、机体姿态角的实时解算，和飞行数据的传输、电机转速的控制等^[11]。

2.2 传感器模块设计

作为检测装置，传感器通过转换电信号的形式，将所感受到的信息加以传输，在传输之前，对信息进行对应的存储、显示、控制以及记录处理，使传输信号满足转换要求^[12]。

传感器大多由以下四个部分组成：敏感元件、转换元件、变换电路和辅助电源。还需要转换元件和变换电路进行辅助^[13]。

2.3 执行机构驱动模块

直流无刷电机因为本身具备时间周期长、效率高等一系列特点，而以执行机构的方式配合无刷电机应用于系统中。电机是飞行器姿态控制的动力来源的一个非常重要的执行机构^[14]。直流无刷电机的工作原理是利用空气动力学使旋翼的转速不同，进而使飞行姿态千变万化。PWM 波发出的信号作为直流无刷电机的控制信号。根据 DSP 发出 PWM 信号有着大不相同占空比，电机也会因为这些信号产生不同的转速，导致飞行器出现不一样的飞行姿态^[15]。其原理图如图 3 所示。

飞行器在飞行状态中要能够迅速的从不稳定的飞行状态调整为平衡状态，这就要求执行机构可以在最短的时间内做出相应的反应，将飞行器的飞行速度在最快的时间内进行增加或者是减少。

2.4 遥控接收模块

通用红外遥控系统的两大组成部分为：发射和接收，

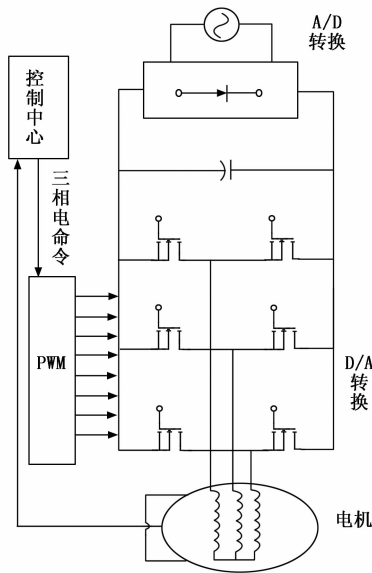


图 3 执行机构驱动模块

通过编/解码专用集成电路芯片实现控制操作, 如图 4 所示。

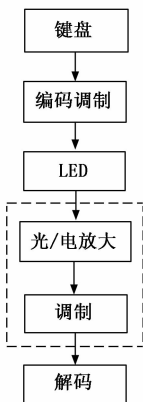


图 4 红外遥控接收模块

接收部分的组成部分为: 包括光、电转换放大器、解调、解码电路。VlsHAY 公司推出了 TS0P173 红外线接收器, 该接收器具有一体化红外线的特点, 将集红外线接收和放大于一体, 它可以实现从红外线接收到输出与 TTL 电平信号兼容的一切工作, 且不用借助任何的外接元件, 但它的体积却只有普通的三极管那么大, 它的功能如图 4 所示的虚线部分, 任何红外线遥控和红外线数据传输它都能适用。

3 系统软件功能设计

无人机具体位置以及速度信息, 在处理大规模群体事件时起到关键作用。因此, 无人机即时状态预估精度需要提高。移动目标检测区域, 卷积神经网络 (CNN) 拥有权重共享功能, 在网络模型复杂性以及权重数量上起到抑制作用。但是, 由于其权重数量相对较多, 检测实时性较差, 将区域概念引入神经网络中, 提出区域卷积神经网络

(R-CNN)。

R-CNN 算法: 首先, 对图片加以划分, 一张图片中包含 2 000 到 3 000 个候选区域, 接着将每个区域的特征用 CNN 提取出来, 然后就需要通过 SVM 训练分类器把这些特征分类整理, 最后的目标边界框的重新定位需要靠边界框回归算法实现。R-CNN 运算效率在克服了传统方法缺点后仍然不是很高, 原因是每个候选区域的整个网络都要进行重新计算。基于 CNN 模型特征候选区域映射克服冗余, 将相应区域内的深层特征进行直接提取, 深度学习目标控制模型如图 5 所示。

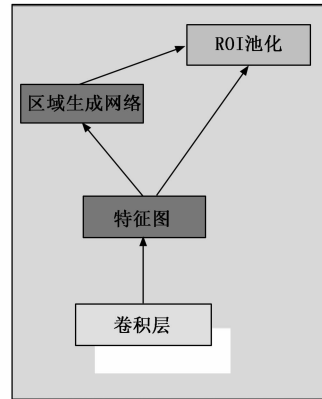


图 5 基于深度学习目标控制模型

依照前面所讲述的模型, 进行设计的四旋翼无人机飞行器软件流程, 如图 6 所示。

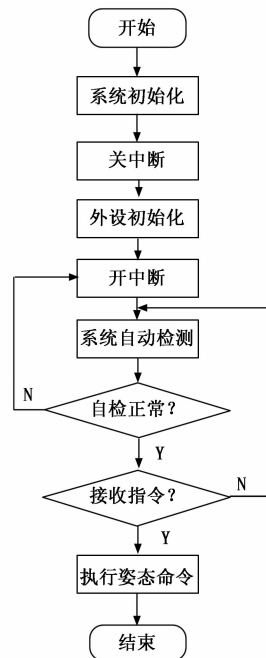


图 6 软件流程图

串口初始化是除了 I/O 口初始化、系统时钟初始化以及系统参数初始化之外同样需要在系统初始化中进行的。通过自动检测方式, 判断无人机的通讯状态, 获取空中飞

行姿势。执行飞行命令过程中，姿势命令主要包括偏航、俯仰以及翻转三种姿态，不同姿态命令可以通过一次任务加以实现，如果它可以经受住上述的检测，那么整个系统便会进入另一种状态，即等待指令的状态。反之，如果无人机没有接到任何与上述指令相关的命令，无人机的软件就会对相应的命令进行分析与计算，从而准备接下来全新的指令。它可以完整并且有效的框选出被测试的目标，进而对框上下边距之间的像素尺寸做出计算。

通过处理阵法、三角形相似原理，对目标的选择框进行尺寸计算，确定上下框之间的距离，预估无人机与障碍物之间的位置关系。物体到摄像头的距离需要符合下面的关系：

$$h = (\alpha \cdot h) / x \tag{1}$$

其中： α 为实际距离； h 为摄像头的焦距； h 为目标实际尺寸； x 为成像后的尺寸。

通过自适应扩展 Kalman 滤波器技术，将非线性问题转换为线性问题加以求解。假设，移动目标加速度为不为零的常数，可通过下式描述移动目标的加速度以及加速度噪声：

$$\begin{cases} \bar{x}(t) = \bar{a} + a(t) \\ \bar{a}(t) = -\alpha a(t) + \omega(t) \end{cases} \tag{2}$$

式中， $\bar{x}(t)$ 表示加速度，均值不为零； \bar{a} 表示机动加速度均值， $a(t)$ 表示加速度噪声， α 表示机动加速度时间常数的倒数，在有转弯情况时， $\alpha = 1/60$ ，有大气干扰时， $\alpha = 1$ 。由最优估计理论可知：

$$\hat{x}(k | k) = E[\bar{x}(k) / Z_k] \tag{3}$$

式中， $Z_k = \{Z(1), Z(2), \dots, Z(k)\}$ ，可以用 $\hat{x}(k | k)$ 代替 \bar{a} ，实时更新扰动协方差，这样做的目的就是实现滤波的自适应。自适应扩展卡尔曼滤波器估计运动目标的过程为：

1) 初始化扩展卡尔曼滤波器。在给定的采样周期内，计算状态转移矩阵 1 ，计算估计误差协方差阵 Q ，给定目标的初始位置、速度值，对噪声协方差 W 、 V 进行计算，现在启动滤波器进行运算。

2) 模拟更新目标运动轨迹，更新预测协方差阵，将目标前一时刻的状态带入方程进行计算，并对目标下一时刻的运动状态进行估计。

3) 进行仿真。分别以 X 、 Y 两个方向的状态，对噪音扰动情况进行模拟，每次循环时，从状态向量和推定误差误差差距的角度加以赋值，将预测的目标位置推定为下一个视觉的先验条件，更新 Kalman 的余波状态，并反复循环。

综上所述，可完成基于深度学习的四旋翼无人机控制系统设计。

4 系统调试与分析

针对基于深度学习的四旋翼无人机控制系统设计合理性，进行了系统调试与分析。

4.1 实验参数

系统调试与分析主要参数如表 1 所示。

表 1 系统调试与分析主要参数

项目	参数
接收机灵敏度	150dBm
更新率	10Hz
热启动时间	约 1s
冷启动时间	约 30s
辅助启动时间	1s 以内
工作电压	+3.5V—+5.5V
GPS 精度位置	3.0m
速度上限	1500km/h
工作温度	-35℃—+80℃

4.2 实验设备

实验平台上为一架四旋翼无人机，如图 7 所示。



图 7 四旋翼无人机示意图

采用该无人机的系统同时对采用一种基于 RealSense 相机控制系统、基于分布感知与决策控制系统与基于深度学习控制系统在空中的应用进行了对比实验。

使用飞行器姿态测量与显示系统采集四旋翼无人机姿态数据，飞行器姿态测量与显示系统能够实时显示四旋翼无人机下仰 12.5°，俯仰 -8.0° 飞行状态。

4.3 系统调试

图 8 是四旋翼无人机在调试过程中的安装方式。

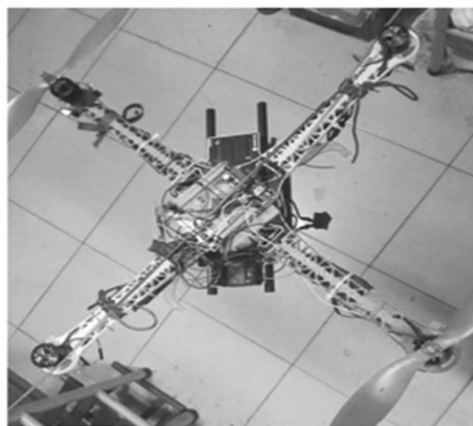


图 8 四旋翼无人机在调试过程中的安装方式

将三种控制系统调试到参数最优状态，并采集四旋翼无人机运行参数，由此完成四旋翼无人机在调试。

4.4 实验结果与分析

根据上述四旋翼无人机调试结果, 可获取四旋翼无人机实际俯仰角、航向角、横滚角, 如表 2 所示。

表 2 实际俯仰角、航向角、横滚角

转台角度	俯仰角	航向角	横滚角
0°	31°	186°	0°
50°	26°	196°	48°
100°	-14°	198°	90°
150°	-24°	176°	120°
200°	5°	162°	-130°
250°	28°	168°	-60°
300°	31°	185°	-20°

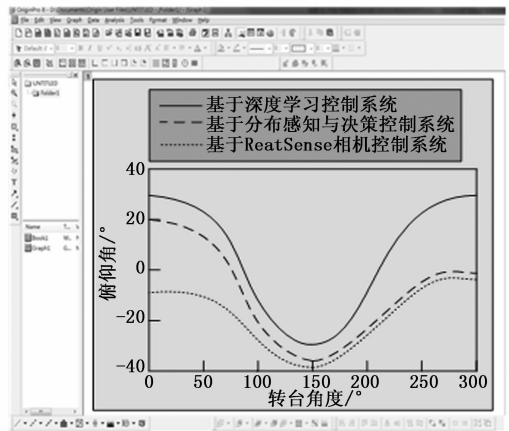
依据上述实际调试结果, 分别将传统的基于 RealSense 相机控制系统、基于分布感知与决策控制系统与基于深度学习控制系统对四旋翼无人机所控制的俯仰角、航向角、横滚角精准度进行对比分析, 结果如图 9 所示。

(a) 俯仰角: 当转台角度为 0° 时, 采用基于 RealSense 相机控制系统和基于分布感知与决策控制系统控制精准度分别为 -9°、20°, 而采用深度学习控制系统控制精准度为 31°; 当转台角度为 150° 时, 采用基于 RealSense 相机控制系统和基于分布感知与决策控制系统控制精准度分别为 -39°、-35°, 而采用深度学习控制系统控制精准度为 -24°; 当转台角度为 250° 时, 采用基于 RealSense 相机控制系统和基于分布感知与决策控制系统控制精准度分别为 -3°、-2°, 而采用深度学习控制系统控制精准度为 28°。

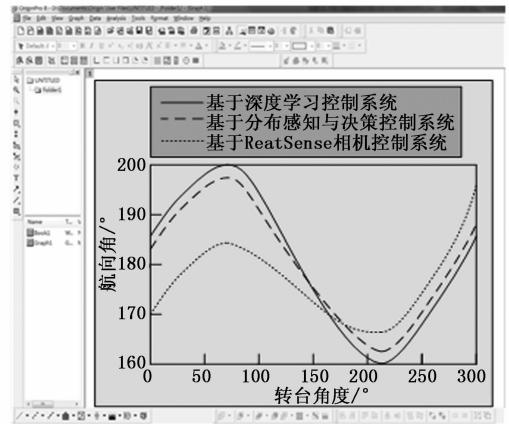
(b) 航向角: 当转台角度为 0° 时, 采用基于 RealSense 相机控制系统和基于分布感知与决策控制系统控制精准度分别为 -170°、184°, 而采用深度学习控制系统控制精准度为 186°; 当转台角度为 150° 时, 采用基于 RealSense 相机控制系统和基于分布感知与决策控制系统控制精准度分别为 174°、176°, 而采用深度学习控制系统控制精准度为 176°; 当转台角度为 300° 时, 采用基于 RealSense 相机控制系统和基于分布感知与决策控制系统控制精准度分别为 196°、189°, 而采用深度学习控制系统控制精准度为 185°。

(c) 横滚角: 当转台角度为 0° 时, 采用基于 RealSense 相机控制系统和基于分布感知与决策控制系统控制精准度分别为 0°、-100°, 而采用深度学习控制系统控制精准度为 0°; 当转台角度为 200° 时, 采用基于 RealSense 相机控制系统和基于分布感知与决策控制系统控制精准度分别为 -120°、-130°, 而采用深度学习控制系统控制精准度为 -130°; 当转台角度为 300° 时, 采用基于 RealSense 相机控制系统和基于分布感知与决策控制系统控制精准度分别为 150°、45°, 而采用深度学习控制系统控制精准度为 -20°。

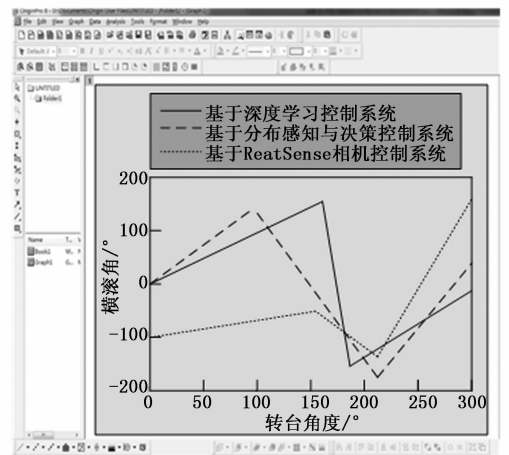
综上所述: 采用传统基于 RealSense 相机控制系统、基于分布感知与决策控制系统控制精准度较低, 而采用基于深度学习控制系统控制精准度较高, 由此可知, 基于深度学习的四旋翼无人机控制系统设计是具有合理性的。



(a) 俯仰角



(b) 航向角



(c) 横滚角

图 9 三种系统控制精准度对比分析

5 结束语

对四旋翼无人机控制系统设计问题进行了深入的研究与分析, 针对四旋翼无人机非线性、强耦合、欠驱动的几大特点, 设计出了一种基于深度学习的四旋翼无人机控制系统设计方案, 通过对比传统控制方法和为了验证该理论所做的实验, 验证了所提方法的抗扰性和鲁棒性。

(下转第 155 页)