

DOI:10.16652/j.issn.1004-373x.2018.22.033

四旋翼无人机自主避障系统的设计与实现

胡海兵¹, 汪国庆¹, 赖重远², 张结文¹

(1.合肥工业大学 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009; 2.江汉大学 交叉学科研究院, 湖北 武汉 430056)

摘要: 针对自主导航过程的预先避障和飞行控制中预判与控制, 该文利用超声波检测距离原理对体小质轻、低空低速的小型无人机导航控制系统的自主避障功能进行了研究。小型无人机将 AHRS 信息采集与避障飞行控制分开设计为两部分相对独立的系统。两片 DSP 芯片分别实现姿态数据采集、处理和避障导航计算, 有效降低了导航系统的计算复杂度, 实时通信和数据处理更加流畅。飞行实验表明, 无人机可以预判, 及时规避障碍物和自主巡航, 设计方案可靠稳定, 可为民用小型无人机的设计与应用提供参考。

关键词: 无人机; 四旋翼; 自主导航; 避障; 定位; 超声波测距

中图分类号: TN752.6-34

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2018)22-0133-05

Design and implementation of autonomous obstacle avoidance system for quadrotor UAV

HU Haibing¹, WANG Guoqing¹, LAI Zhongyuan², ZHANG Jiewen¹

(1. Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Institute for Interdisciplinary Research, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

Abstract: In allusion to the obstacle pre-avoidance in the autonomous navigation process and the prejudgment and control in flight control, the autonomous obstacle avoidance function of the small-scale low-altitude and low-speed unmanned aerial vehicle (UAV) navigation control system with small volume and light weight is studied by using the distance detection principle of the ultrasonic wave. In the small-scale UAV, the AHRS information acquisition and obstacle avoidance flight control are separately designed into two parts of relatively-independent systems. The two DSP chips are adopted to respectively realize attitude data acquisition and processing and navigation calculation of obstacle avoidance, so as to effectively reduce the computational complexity of the navigation system, and make the real-time communication and data processing more smooth. The results of the flight experiment show that the UAV can prejudge and avoid obstacles timely, and perform autonomous cruise; the design scheme is reliable and stable, which can provide a reference for design and application of the small-scale civil UAV.

Keywords: UAV; quadrotor; autonomous navigation; obstacle avoidance; positioning; ultrasonic distance measurement

0 引言

近年来,自主导航无人机以其低廉的成本、无人员伤亡风险、机动性能好、使用方便等优势,在高危作业、灾害航拍、抢险布控、环境监测等领域得到了广泛的应用^[1]。传统上,外形尺寸 10~30 cm 的小型无人机大多采用独立的单片机控制。这种方式数据处理能力不足,只能完成简单的控制任务。近些年,国内新技术的应用提高了无人机的导航性能,例如小型农用无人机导航控

制系统采用数字信号处理器(DSP)实现了无人机的自主飞行导航控制^[2]。张焱等采用内外环结构的 PD 控制算法,构造了无人机的位置与姿态跟踪控制器,实现了四旋翼无人机滚转角、俯仰角和水平纵向、横向位置共四个自由度的自动控制,飞行控制仿真实验效果明显^[3]。吴涛等采用四元数的方法来描述载体运动的姿态,通过陀螺仪测姿态四元数,卡尔曼滤波算法融合加速度计数据,对姿态四元数进行修正,实现了姿态解算精度的提高^[4]。这些飞行器控制器模型提高了无人机的导航及控

收稿日期:2018-03-05

修回日期:2018-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(61501208);江汉大学高层次人才科研启动经费项目(3003-06000040);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T201828)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (61501208), Scientific Research Start-up Fund for High-level Talents of Jiangnan University (3003-06000040), Science and Technology Innovation Team Plan for Excellent Young and Middle-Aged Talents of Colleges and Universities in Hubei Province (T201828)

制性能,但上述小型无人机导航与控制较少提及导航行程中的避障功能。

小型自主导航无人机避障系统依然是小型无人机发展和突破的关键技术。设计简单而又有效地自动避障系统,保障无人机空中作业的安全是亟待解决的问题。国内外针对小型多旋翼无人机的避障系统还很少,所提出的各种避障方法和思想,大多处于仿真阶段,其有效性也有待验证,少有真正使用的避障系统^[5]。该文针对用于航拍和监测任务的小型无人机的特点,要求无人机低成本、体积小质轻,同时实现按照设定航线自主导航,实时回传采集数据,并预知障碍物并自动绕开。为实现上述要求,本文构造了一种基于超声波测距的无人机自主导航与科学避障系统。飞行实验表明,基于该避障系统的无人机可以实现预判,及时规避障碍物和自主巡航功能,设计方案可靠稳定,可为民用小型无人机的设计与应用提供参考。

1 系统总体结构

基于超声波距离检测的无人机避障系统,包括无人机端和地面监控端。无人机导航控制系统结构图如图1所示。

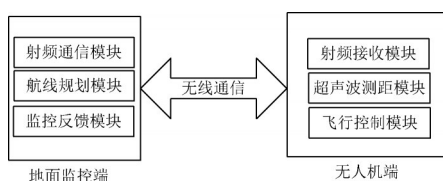


图1 导航控制系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of navigation control system

无人机包含飞行控制模块、机载射频通信模块、超声波测距模块。飞行控制模块以TMS320C28335 DSP处理器为控制核心,同时及时通过机载射频接收模块实时反馈飞行状况给地面站。超声波测距模块依据声速和超声波发射、接收的时间间隔判断和预算出无人机飞行过程中前方、左方、上方、右方、后方障碍物以及与障碍物之间的距离。无人机由超声波测距模块和飞行控制模块科学预判无人机的飞行路线,自主航行,规避障碍物。

地面端集成射频通信模块、航迹规划模块和监控反馈模块,目的主要是人为干预和控制无人机的飞行状态。航迹规划模块包含最新地图,用于设置无人机在自主飞行模式下的起止点、飞行高度和飞行速度。实时监控模块用于实时检测与监控无人机状态,并进行数据存储、故障检测与报警操作。机载射频通信模块实时与地面射频通信模块保持无线通信。

1.1 无人机总体结构

无人机整体结构包括外形支架结构、控制主板以及起降辅助系统等。无人机外形支架结构的坠落预防机制和处理机制需要从材料上选择时考虑结构耐摔压、耐磨损等因素。除了自身的导航与控制 and 信息采集硬件设备,还需要携带足量供给能源。同时,无人机的外形设计需要符合流体力学和空气动力学,具有应对突发的恶劣环境因素的能力,不同条件下飞行校正具有较好的鲁棒性和适应性。无人机起降系统应具有良好的场地适应性,可参考正常布局采用小型复合材料无人机进行设计。考虑用于航拍和监测任务的无人机的功能特点,无人机控制主板硬件结构图如图2所示。

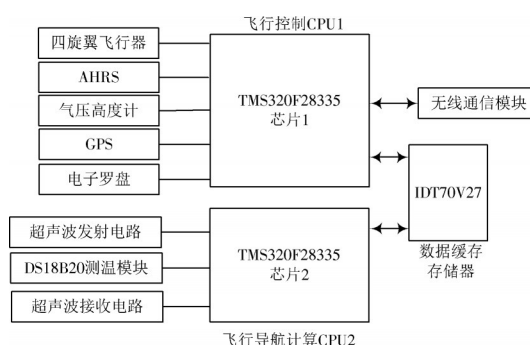


图2 控制主板硬件结构图

Fig. 2 Structure diagram for hardware of control mainboard

无人机主控芯片采用两片TI的高性能、低功耗的TMS320C28335 DSP处理器,主要负责采集姿态航向参考系统(Attitude and Heading Reference System, AHRS)信息,电子罗盘航向角、5个方向的声波检测数据及GPS位置数据,并分别分析、计算采集的实时数据。F28335芯片1完成的主要功能包括与AHRS、GPS、电子罗盘、气压高度计、无线模块等进行通信,获取飞机的各种姿态和位置信息。F28335芯片2主要承担导航飞行和测距避障计算,它与F28335芯片1之间需进行高速数据交换。芯片1和芯片2的数据缓冲存储器选择至关重要,选用双口RAM的IDT70V27芯片可实现存储数据共享,一个存储器配备2套独立的地址、数据和控制线,允许2个独立的CPU或控制器同时异步访问存储单元,符合2片F28335芯片通信需求。

1.2 无人机地面监测控制端

在无人机的自主导航和避障功能的实现中,无人机的地面遥控设计不是本文讨论的重点,它的实时监控和操纵只不过通过无线通信对无人机的实时飞行数据进行校正和更新。地面监控运用正确的硬件设计和软件程序是实现无人机安全飞行的前提,但对于航拍和监测任务的小型无人机,地面监控更重要的作用是飞行任务的汇报和反馈,表现为采集数据、影像的接收以及飞行

状态同步回传。

2 无人机自主导航系统的实现

无人机的导航系统与地面监测站之间需进行大量通信,数据量大,对实时性要求高。无人机导航控制系统以TMS320F28335芯片为核心,并扩展了DSP芯片异步串行通信接口,保证了数据通信的稳定可靠,实现了无人机的自主导航控制。无人机数据采集和避障计算分开设计,导航控制系统主要由F28335芯片1和F28335芯片2及其相关外设组成。为了保证无线通信的实效性和稳定性,降低导航系统及蔽障控制系统的复杂度,系统将姿态数据采集与导航蔽障控制分开,采用双DSP芯片完成,从而提高计算速度和飞行安全性。

系统硬件设计的关键是F28335芯片1和GPS、F28335芯片1和F28335芯片2之间的接口设计。F28335包括2个UART异步串口和一个SPI同步串口。一个SCI串口(UART)用于接收地面遥测数据,另一个用于与飞行控制系统通信。提高UART异步串口的中断级别并简化系统设计,数据缓存存储器采用容量为64 B的TL16C752外扩串口收发芯片接收GPS信息。F28335之间采用IDT70V27进行接口,完成数据通信。自主导航系统的信号处理主要包括GPS、电子罗盘、高度气压计、空间坐标转换等。无人机执行飞行任务默认设置飞行高度、四旋翼转速范围等飞行数据存入F28335的FLASH存储器,防止无人机不利条件下的失控。

2.1 飞行控制模块

导航系统结构主要由F28335芯片1、F28335芯片2及外设扩展组成。硬件电路设计和传感器选择考虑因素较多,例如高度气压计考虑无人机载重及低空定高的需求,采用仅仅1.5g的飞思卡尔半导体(Freescale Semiconductor)的MPX4115传感器,其气压量程、高度量程^[6]分别为15~115 kPa和1 100~13 000 m。机载(主要由三轴陀螺仪、加速度计和磁阻传感器组成)的AHRS模块,多种传感器的配合目的是消除速度、加速度漂移来实现稳定飞行。电子罗盘使用数字式罗盘HMR3300,有补偿硬磁、铁磁干扰和离散磁场功能。

2.2 机载射频通信模块

无人机F28335芯片1接收高度气压计、GPS、数字式罗盘HMR3300等数据,进行数据计算和分析,将任务指令传递给任务系统,将数据处理结果、定位信息和姿态航向参考系统(AHRS)信息传送给数据缓存存储器。F28335芯片2根据导航需要随时读取其中的数据,F28335芯片2根据GPS数据导航信息及超声波测距信

息计算分析,发出导航控制指令,并将姿态信息传送给地面站。无线通信模块是以ZigBee技术的低功耗Xbee-Pro Series 2通信模块,250 kbit/s数据传输速度、1.5 km的通信距离和50 mW输出功率满足无人机的续航和监控,地面可以及时获取无人机的飞行状况及实时位置的反馈^[7]。

3 无人机自主避障的实现

3.1 超声波测距模块

基于超声波距离检测的无人机避障系统主要有超声波发射、接收模块两部分。无人机避障系统的控制方法使得无人机能够对障碍物进行自动规避,规避的方式更为多样化,并且能够自动调整航线,完成规定的飞行任务。无人机避障系统简单,使用方便,具有较大的实用价值。

超声波测距系统工作原理^[8]:测距时系统F28335芯片2设置引脚输出脉冲信号40 kHz方波,由74HC04功率放大电路连接到超声波发射头。温度 T 由DS18B20采集,反馈声波由CX20106A组成的放大电路进入F28335芯片2输入引脚。发射后F28335芯片2关闭发射信号,调用内部计数器开始计时;当接收信号的最后一个脉冲到来后,计数器停止计时,得到时间 t ,则无人机发射点与障碍物间的距离 $S = vt/2$ 。温度 T 与超声波速度对应的关系 $v = 331.5 + 0.607T$,则 $S = (331.5 + 0.607T)t/2$ 。

3.2 自主避障调整模块

基于常见机器人行走避障系统的超声波距离检测的原理进一步优化,所述超声波测距模块包含5个超声波距离传感器,分别设置在无人机前、左、右、后、上五个方向,用于检测无人机5个方向是否存在障碍物以及与障碍物之间的距离。5个超声波距离传感器的测距范围^[9]为20~600 cm。5个超声波传感器通过电路和软件实现串口的半双工串口通信,并且可设定地址,5个不同地址的传感器挂载在同一个串口上,依次将距离数据发送至F28335芯片2预判。

自主避障模块为嵌入式应用程序,该程序从不同地址以软件串口形式依次读取相应的超声波测距传感器所发送的距离数据,当距离超过设定值时,F28335芯片及时校正AHRS信息来规避障碍物,继续完成设定的任务^[10]。基于多个超声波距离检测的无人机自主避障程序流程图如图3所示。基于5个方向超声波距离检测的无人机自主避障系统结构简单,失控飞行的风险大大降低,同时依次测距的简单算法设计减轻了嵌入式处理器F28335芯片的负荷,使得无人机的机动性和执行力增

强。同时,无人机能够较好地对障碍物进行预先规避,自主调整飞行方向。

4 飞行试验

小型无人机导航系统和避障飞行试验通常采用 Matlab 建模仿真或实际飞行^[11]。采用改进的无人机烧录程序以仿真和实际飞行验证了导航和避障的可靠性。飞行测试地点在合肥工业大学综合体育馆操场,图4为无人机导航系统仿真和避障飞行测试路线,A为无人机的飞行起点,飞行路线按照1-2-3-4-1顺序循环飞行。虚线为预设的无人机矩形飞行航线,其中避障测试内容主要是飞行路线1-4区域建筑群障碍物,飞行路线预设四点(1,2,3,4),经纬度坐标为1($117^{\circ}17'20.59''\text{E}$, $31^{\circ}50'52.10''\text{N}$), 2($117^{\circ}17'23.89''\text{E}$, $31^{\circ}50'52.54''\text{N}$), 3($117^{\circ}17'24.15''\text{E}$, $31^{\circ}50'48.90''\text{N}$), 4($117^{\circ}17'20.33''\text{E}$, $31^{\circ}50'47.57''\text{N}$)。

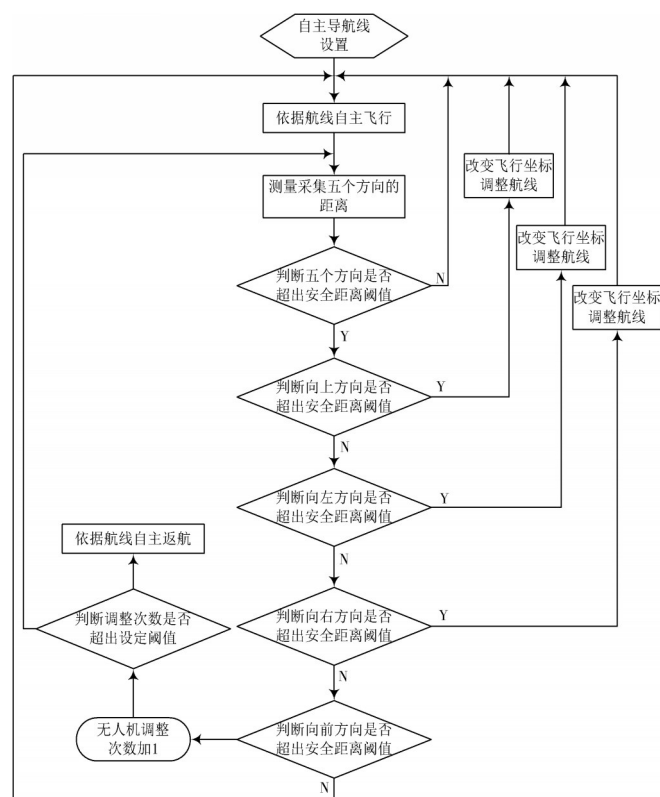


图3 无人机避障程序流程图

Fig. 3 Flow chart for obstacle avoidance program of UAV

无人机的导航和避障程序针对不同风速天气累计有38次飞行测试不断优化算法,其中无风状态下11次,风速小于1.5 m/s 微风状态飞行了6次,风速为1.5~4 m/s 飞行了21次,无人机飞行高度30~80 m。飞行测试的内容包括起飞、降落、数据通信、规避障碍物及导航精度测试等。每次飞行前设定航点坐标,起降良好,能按预设飞行路线飞行,导航系统及避障飞行稳定,悬停精确度

平均位置偏差为-4~6 m。飞行试验中数据传输错误,航拍效果良好,没有同周边建筑群发生碰撞,较好地完成了飞行任务。



图4 无人机飞行测试路线

Fig. 4 Testing route of UAV flight

5 结论

小型无人机将 AHRS 信息采集与避障飞行控制分开设计为两部分相对独立的系统。两片 DSP 芯片分别实现姿态数据采集、处理和避障导航计算,有效降低了导航系统的计算复杂度,实时通信和数据处理更加流畅,实现了小型无人机的自主导航及避障飞行的预期功能,可广泛应用于航拍检测领域。

参考文献

- [1] 陈香,徐卫民,张学民,等.六旋翼无人机在天津应急测绘中的应用[J].测绘技术装备,2016,18(1):69-71.
CHEN Xiang, XU Weimin, ZHANG Xuemin, et al. The application of the six-rotor UAV in emergency surveying and mapping in Tianjin [J]. Geomatics technology and equipment, 2016, 18(1): 69-71.
- [2] 陈天华,卢思翰.基于DSP的小型农用无人机导航控制系统设计[J].农业工程学报,2012,28(21):164-169.
CHEN Tianhua, LU Sihan. Autonomous navigation control system of agricultural mini-unmanned aerial vehicles based on DSP [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(21): 164-169.
- [3] 张垚,鲜斌,殷强,等.基于ARM处理器的四旋翼无人机自主控制系统研究[J].中国科学技术大学学报,2012,42(9):753-760.
ZHANG Yao, XIAN Bin, YIN Qiang, et al. Autonomous control system for the quadrotor unmanned aerial vehicle based on ARM processors [J]. Journal of University of Science & Technology of China, 2012, 42(9): 753-760.
- [4] 吴涛,白茹,朱礼尧,等.基于卡尔曼滤波的航姿参考系统设计[J].传感技术学报,2016,29(4):531-535.

- WU Tao, BAI Ru, ZHU Liyao, et al. Design of AHRS based on Kalman filter [J]. Chinese journal of sensors & actuators, 2016, 29(4): 531-535.
- [5] 毕凯,李英成,丁晓波,等.轻小型无人机航摄技术现状及发展趋势[J].测绘通报,2015(3):27-31.
- BI Kai, LI Yingcheng, DING Xiaobo, et al. Aerial photogrammetric technology of light small UAV: status and trend of development [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2015(3): 27-31.
- [6] 段镇.无人机飞行控制系统若干关键技术研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2014.
- DUAN Zhen. Research on some key technologies of flight control system of UAV [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [7] ETC2. XBEE-PROZB datasheet [EB/OL]. [2016-02-12]. <http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=XBEE-PROZB>.
- [8] 曹建海,路长厚,韩旭东.基于单片机的超声波液位测量系统[J].仪表技术与传感器,2004(1):39-40.
- CAO Jianhai, LU Changhou, HAN Xudong. Intelligent system to measure liquid height by ultrasonic based on single-chip microcomputer [J]. Instrument technique & sensor, 2004(1): 39-40.
- [9] 张逊逊,许宏科,朱旭.低空低速植保无人直升机避障控制系统设计[J].农业工程学报,2016,32(2):43-50.
- ZHANG Xunxun, XU Hongke, ZHU Xu. Design of obstacle avoidance control system for low altitude and low speed unmanned helicopter [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 43-50.
- [10] 范卫刚,袁冬莉,王化会.基于双DSP的无人机导航系统设计[J].计算机测量与控制,2011,19(1):152-154.
- FAN Weigang, YUAN Dongli, WANG Huahui. Design of navigation system of UAV based on dual DSP [J]. Computer measurement & control, 2011, 19(1): 152-154.
- [11] 曹文君,赵祚喜,刘雄,等.一种单双目结合的全景避障测距方法[J].现代电子技术,2017,40(5):38-41.
- CAO Wenjun, ZHAO Zuoxi, LIU Xiong, et al. An omnidirectional obstacle avoidance range finding method combining binocular vision with monocular vision [J]. Modern electronics technique, 2017, 40(5): 38-41.

作者简介:胡海兵(1984—),男,湖南嘉禾人,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、机器视觉与运动控制、智能机器人。

汪国庆(1991—),男,安徽安庆人,硕士,主要研究方向为嵌入式系统设计、无线传感器网络和媒体信号处理等。

赖重远(1985—),男,湖南湘潭人,助理研究员,主要研究方向为视觉信息的获取与处理。

(上接第132页)

- XUE Wu, ZHANG Yongsheng, YU Ying, et al. Tie points extraction of UAV images in desert area [J]. Journal of geomatics science and technology, 2017, 34(4): 405-410.
- [6] 史洁青,冯仲科,刘金成.基于无人机遥感影像的高精度森林资源调查系统设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(11):82-90.
- SHI Jieqing, FENG Zhongke, LIU Jincheng. Design and experiment of high precision forest resource investigation system based on UAV remote sensing images [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(11): 82-90.
- [7] 宋明明,郑文龙,卞国栋,等.基于多时相Landsat8数据的南方丘陵区典型地物信息提取:以秦淮河流域为例[J].科学技术与工程,2016,16(18):209-216.
- SONG Mingming, ZHENG Wenlong, BIAN Guodong, et al. Land use classification of typical ground objects in Qinhuai river basin based on multi-temporal Landsat8 OLI data [J]. Science technology and engineering, 2016, 16(18): 209-216.
- [8] 韩文霆,李广,苑梦婵,等.基于无人机遥感技术的玉米种植信息提取方法研究[J].农业机械学报,2017,48(1):139-147.
- HAN Wenting, LI Guang, YUAN Mengchan, et al. Extraction method of maize planting information based on UAV remote sensing technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 139-147.
- [9] 胡健波,张健.无人机遥感在生态学中的应用进展[J].生态学报,2018,38(1):20-30.
- HU Jianbo, ZHANG Jian. Unmanned aerial vehicle remote sensing in ecology: advances and prospects [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 20-30.
- [10] 蔚广鑫,洪建胜,王伟斌.无人机激光测量技术在滩涂地形测量中的应用初探[J].应用海洋学学报,2017,36(1):143-149.
- YU Guangxin, HONG Jiansheng, WANG Weibin. Application of laser measurement technology with unmanned aerial vehicle on the tidal flat topographic survey [J]. Journal of applied oceanography, 2017, 36(1): 143-149.
- [11] 杨忠炯,王卉,董栋.无人机输电线路巡线系统及应用研究[J].电子设计工程,2017,25(4):162-166.
- YANG Zhongjiong, WANG Hui, DONG Dong. The application and research of line communication system based on microwave transmission [J]. Electronic design engineering, 2017, 25(4): 162-166.

作者简介:王怀宝(1975—),男,吉林长岭人,硕士,讲师,研究方向为测绘工程、空间地理信息工程等。