

森林防火无人机系统设计与林火识别算法研究*

张庆杰 郑二功 徐亮 徐伟

(空军航空大学 长春 130022)

摘要: 为克服传统森林火灾监测手段监测范围有限、无法适用恶劣环境以及费用高昂等问题,提出了基于六旋翼无人机的林火监测系统。首先,采用开源架构,设计并研制用于控制无人机的自动驾驶仪;其次,搭建用于森林火情监控的小型六旋翼无人机。在传回的火情视频的基础上,利用视觉显著性检测方法,按照林火区候选、特征融合、特征分类、阈值判断等流程判断是否有林火发生。如果有火情出现,算法能够自动提取林火的形状、面积、蔓延速度等信息,并结合光电烟雾传感器实现火情预警。该系统具有垂直起降、对气象的要求低,且使用和维护成本低等特点。

关键词: 林火监控;开源自动驾驶仪;显著性检测;无人机

中图分类号: V279;TP751 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Design of the UAV system for forest fire prevention and the research of the fire recognition algorithm

Zhang Qingjie Zheng Ergong Xu Liang Xu Wei

(College of Control, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: First, the autopilot of the unmanned aerial vehicle(UAV), based on the open source architecture, is designed and developed. Secondly, the small hex-copter UAV is built for the forest fire monitoring. The significant detection method is adopted to deal with the returned fire video, and the process such as the fire candidate region selection, feature fusion, feature classification, threshold judgment is employed to judge the occurrence of forest fires. If a fire occurs, the algorithm can compute the shape, area and spread speed and other information of the fire automatically, and start warning with the help of the photoelectric smoke sensor. The system has the characteristics of vertical takeoff and landing, low demand for weather, low use and maintenance costs.

Keywords: forest fire monitor; open source autopilot; significant detection; unmanned aerial vehicle

1 引言

传统的森林防火工作多采用人工方式,通过设置防火指挥部、办公室,安排大量人员进行巡视,每年将消耗大量的人力物力财力。随着新技术和新设备的不断发展,已逐渐出现了护林塔、瞭望塔和护航飞机检测等火灾监测手段,但受到监测范围、飞行时间和架次有限以及费用高昂等约束,发挥的作用受到一定程度的限制。另外,护航飞机也很难做到全天候飞行,特别是在森林火灾发生时火场上空能见度极低,即使是护航飞机能达到火场上空,观察员也无法详细观察到地面火场情况,而在这种情况下飞行又存在着安全隐患。

由于无人机可在高危地区探测,对气象的要求低,各国都开展了基于无人机平台的林火监测系统^[1]。比如以色列

飞机公司的火鸟遥控无人机、美国航空航天局和美国林业局使用的牵牛星无人机,国内齐齐哈尔大学研制林火监测无人飞艇、内蒙古大兴安岭林区根河航空护林站研发的 Z5 型无人直升机等等。这些应用大都采用可见光 CCD 传感器,仅限于对林火火情的监视,为防火和灭火提供现场影像支持。文献[2]在讨论航空器在森林防火中的应用时提到,红外探测技术将提高火情侦查的发现率和准确率,但红外传感器的成本较高。本文提出一种基于小型六旋翼无人机平台的林火监控系统,利用视觉显著性检测方法,运用离线数据库自动筛选林火区域并进行火情预警。该无人机监控系统具有垂直起降、高清影像实时传输、林火区域自动识别、以及基于图像识别结果和烟雾检测双重预警等功能,系统对气象的要求低,且使用和维护成本低。

收稿日期:2016-01

* 基金项目:吉林省科技厅青年科研基金(20130522108JH)、国家自然科学基金青年基金(61203355)资助项目

2 基于开源架构的自动驾驶仪

自驾仪由处理器、敏感元件和执行机构组成。处理器接收各传感器传来的姿态数据处理并发送相应的控制指令给执行机构。敏感元件即各类传感器,主要有惯性敏感元件、磁力计、气压高度计、空速计和GPS等,用来感受或测量 UAV 的姿态、高度、速度和航向等飞行参数,并输出相应的电信号。对于多旋翼无人机来说,执行机构即无刷电机,根据接收到的控制指令信号,无刷电机转动从而带动相

应的螺旋桨以不同的转速转动。

2.1 硬件总体结构

根据自动驾驶仪的基本功能和开源自驾仪的结构设计,其硬件总体结构如图1所示。可以看出,自驾仪硬件可以分为微处理器及其外围最小系统、气压高度计、加速度计、陀螺仪、磁传感器、空速计、数传模块、GPS模块、接收机、存储器等。遥控器除了完成飞行过程中的各种飞行动作,还可以切换不同的飞行模式。

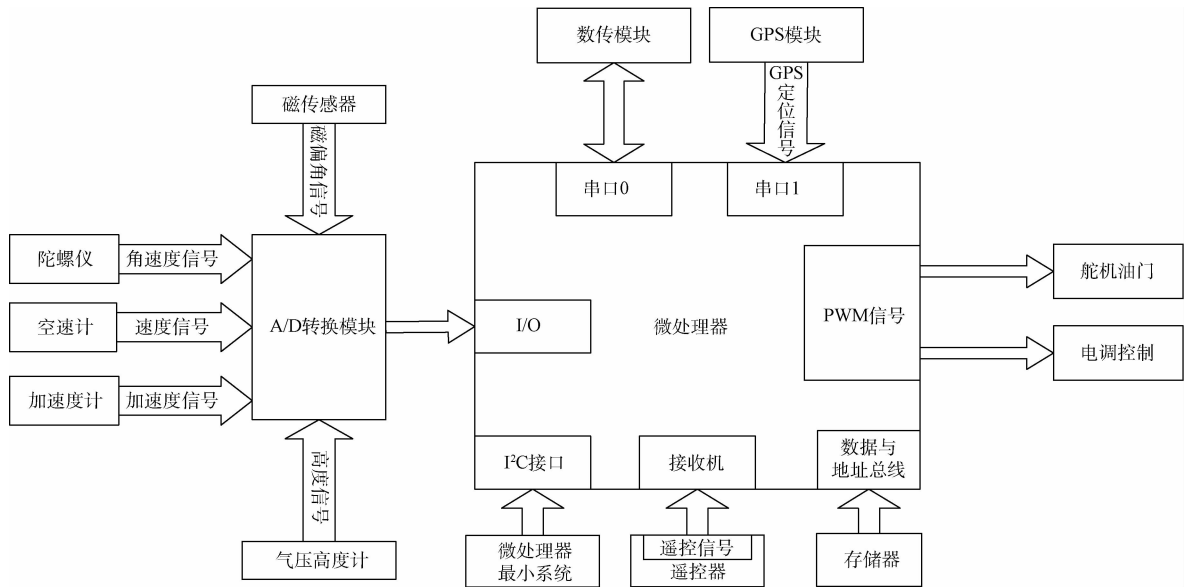


图1 自驾仪硬件总体结构

2.2 自驾仪部分硬件选型

考虑到飞行环境和成本的限制等需要,本着以下4点原则设计:设计简单有效;处理器稳定高效,确保安全稳定飞行;传感器灵敏度高,抗干扰能力强,精度高;集成度高,尽量模块化,减少不必要的飞线,提高系统的稳定性和可靠性。因此,基于开源架构的自动驾驶仪的部分硬件型号如下。

1)微处理器:ATMEGA2560 单片机

ATMEGA2560-16AU 单片机具有2个8位和4个16位通用的定时/计数器、4个UART(硬件串行端口)、16路模拟输入、一个16 MHz晶体振荡器、86个可控的I/O引脚,支持12路PWM信号输出,一个复位电路和SPI接口电路。

2)航姿传感器:MPU-6000

采用Invensense公司生产的感测组件MPU-6000芯片,可对飞机的姿态和加速度等参数进行测量,并发送给中心处理器进行解算。

3)气压高度计:MS5611-01BA03

采用高分辨MS5611-01BA03芯片测量气压,主处理器对接收到的测量气压值通过气压高度公式进行解算,进而测量出飞机当前高度值。

4)磁传感器:HMC5883L

HMC5883L包括高分辨率HMC118X系列磁阻传感器,并附带霍尼韦尔专利的集成电路包括放大器、自动消磁驱动器、偏差校准,能使罗盘精度控制在 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 的12位模数转换器。利用I²C接口与微处理器通信。

2.3 PCB设计与制作

采用Altium Designer13软件进行原理图和PCB的设计与布局布线,按照各元器件手册,自行设计了元件封装,并根据需求,将UBEC电源模块和数传模块设计在底板上,这样大大减少了飞机上的走线,既美观又增加了连线可靠性,同时在自驾仪上增加了减震孔,省去了减震座,将内外置罗盘的选择改成了跳帽插接形式,这样用户选择内置或者外置罗盘时更加方便,电路板的布局布线和外接接口也进行了设计和优化。根据电路原理图绘制PCB图,将绘制完毕的PCB图送到工厂加工生产。自驾仪电路板与底板实物图如图2所示。

3 无人机平台

3.1 平台组成

为达到减轻平台重量,增加飞行续航时间的目的,选

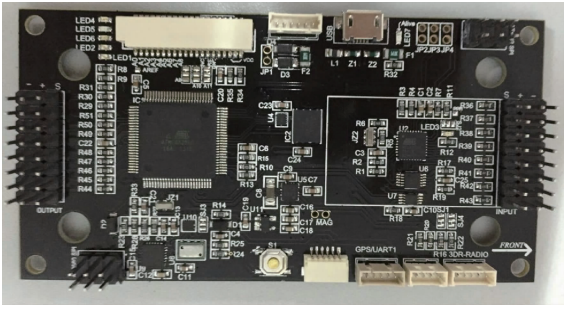


图2 基于开源架构的自驾仪电路板



图3 无人机平台的硬件结构

择轴距为 680 mm 的飞越六轴碳纤维机架作为无人机飞行平台。基于开源自驾仪架构研发的自动驾驶仪为无人机控制核心,按照系统功能和接口电气定义,连接系统各部分模块。

1)动力模块:汉飞 3508 无刷电机、好盈 40 A 电调、1255 碳纤维桨、6 200 mAh 锂电池。

2)通信模块:2.4 GHz 遥控器接收机、900 MHz XBEE pro 数传模块、5.8 GHz 图传模块。

3)定位模块:M8N GPS 模块。

4)可见光传感器模块:GoPro HERO4 运动相机、飞越 2D 无刷云台。

5)烟雾报警模块:HEIMAN 光电探测传感器。

自动驾驶仪是无人机平台的核心,遥控器接收机和数传模块是控制输入,经过导航和控制算法将控制信号输出给电调,并控制电机和螺旋桨的转速。外置 GPS 和罗盘模块是为了提高平台的准确定位和姿态保持能力。可见光传感器和图传模块分别实现林火视频的采集和无线传输,无刷云台用于确保视频图像的稳定。烟雾报警器模块独立运行。上述硬件平台均采用锂离子电池进行供电,自动驾驶仪通过电压电流传感器监测平台剩余电量。

3.2 主要性能指标

按照 3.1 节各模块配置情况,无人机系统主要性能指标如下:轴距:680 mm;速度:20 m/s;高度:1 000 m;起飞重量:2 800 g;飞行时间:15 min;飞行模式:增稳、悬停、自动、返航;失控保护:GPS 信号丢失保护、遥控器信号丢失保护、数传信号丢失保护、电池电压低保护、地理围栏。

3.3 地面控制终端

在地面操控终端方面,采用增稳、线传、自动等模式操控无人机,无人机平台的硬件结构如图 3 所示。借助图像采集设备接收可见光图像,进行实时监测;在林火识别算法方面,按照林火区候选、特征融合、特征分类、阈值判断等流程判断是否有林火发生。如果有火情出现,该算法自动提取林火的形状、面积、蔓延速度等信息。

4 林火图像识别算法

林火图像识别算法流程如图 4 所示。首先基于林火

与森林在亮度、色度上的显著差异,利用视觉显著性检测初步筛选出林火疑似区域,然后基于协方差矩阵提取疑似区域时空分块图像的颜色、纹理和帧间差分特征,最后利用 SVM 进行训练和分类,并依据一定的判据进行林火预警。

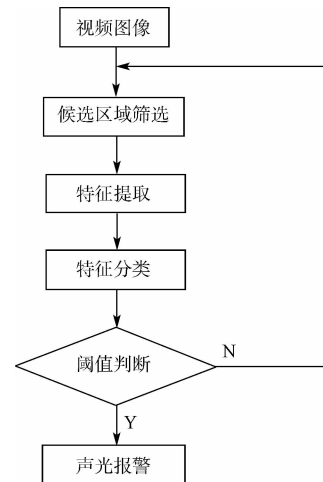


图4 林火图像自动识别流程

4.1 林火疑似区域检测

与森林相比,林火在亮度和颜色特征上更具有显著性,利用视觉显著性检测算法可以有效的检测出林火疑似区域。文献[3]提出了一种基于离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)的图像显著性检测算法,一幅图像 I 的视觉显著图 M 可以表示为:

$$M = G * \text{IDCT}(\text{sign}(\text{DCT}(\text{scale}(I)))) \quad (1)$$

式中:G 为高斯滤波器,* 表示卷积,sign 为符号函数,DCT 和 IDCT 分别为 DCT 变换和 DCT 逆变换,scale 表示图像缩放操作。

文献[4]利用四元数 DCT 变换(quaternion DCT, QDCT)将上述算法从单通道扩展至彩色图像,并获得了更好的检测性能。本文首先在 CIELab 颜色空间,采用文献[5]的显著性检测算法,得到视觉显著性图(图 5(b)),经

二值化处理,得到图像的显著性区域(图 5(c));然后基于 RGB 空间的两个简单的颜色判决规则,即 $R > R_T$ 且 $R \geq G > B$,进一步去除非火焰像素,得到林火疑似区域(图 5(d)).可以看出,疑似区域中包含了大部分的林火区域,且排除了大量的非林火区域。

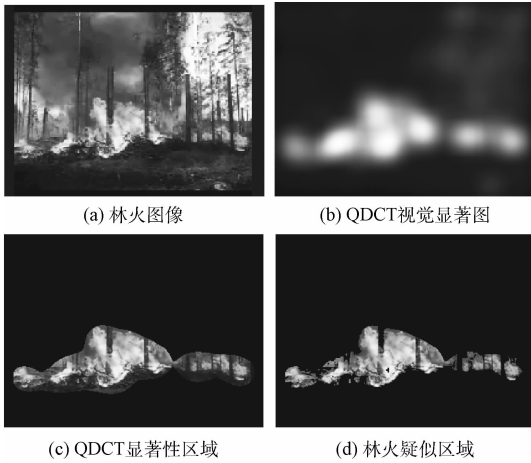


图 5 林火疑似区域检测

4.2 时空分块和协方差矩阵特征提取

由于提取的林火疑似区域中可能包含其它与火焰颜色相似的干扰物,不适合提取疑似区域的整体特征进行识别;同时,小分块图像的信息量又较少,不利于特征提取与识别;而视频图像相邻帧间具有很强的相关性,可将相邻帧间的分块图像作为一个整体进行特征提取与识别。因此,本文将视频图像分为 $16 \times 16 \times F$ (F 为帧数,本文取 10)的时空不重叠的立体块,进行特征提取。

对于一幅图像 I ,一个给定的图像区域 R ,可以用协方差矩阵表示为:

$$\hat{\Sigma} = \frac{1}{N-1} \sum_x \sum_y ((\Phi(x,y) - \bar{\Phi})(\Phi(x,y) - \bar{\Phi})^T) \quad (2)$$

式中: $\bar{\Phi} = \frac{1}{N} \sum_x \sum_y \Phi(x,y)$, N 为像素总个数, $\Phi(x,y)$ 为 I 经某种映射后的特征图像,可以是图像的灰度、颜色、纹理、梯度等。

协方差矩阵能够融合多种特征,在纹理分类^[6]、图像融合^[5,7]、目标检测与跟踪^[8-9]等领域均匀有广泛的应用。文献[10]将协方差矩阵应用于视频火焰检测中,主要利用了 RGB 三通道的颜色值及灰度图像的时空梯度等属性特征。本文将林火图像看作一种纹理,用局部 DCT 变换刻画林火的局部纹理特征。局部 DCT 模板具有带滤波器的作用,本质上相当于 Gabor 滤波器,其在纹理分类中有较多的应用。三个一维的 DCT 向量基 $u_1 = [1,1,1]^T$, $u_2 = [1,0,-1]^T$, $u_3 = [1,-2,1]^T$ 可通过式(3)产生 9 个 3×3 的二维 DCT 卷积核:

$$v_{i,j} = u_i \cdot u_j^T \quad i, j \in \{1,2,3\} \quad (3)$$

本文使用 8 个二维 DCT 卷积核(不含 $v_{1,1}$)与图像进行卷积,得到 8 个刻画局部纹理特征的特征图像。另外,采用帧间一、二阶差分,得到 2 个帧间差分图像。这样,每个像素点具有 10 个特征属性,可得到一个 10×10 的协方差矩阵。由于协方差矩阵具有对称性,因此,得到 $0.5 \times (10 \times 11) = 55$ 维的特征。对 RGB 三通道计算协方差矩阵,又可得到 $0.5 \times (3 \times 4) = 6$ 维特征,共计 61 维协方差矩阵特征。

为了减少计算量,仅对时空分块中检测到的疑似像素总数占时空分块像素总数的比例大于 0.4 的时空分块提取协方差矩阵特征。同时,为减少非疑似像素的干扰,计算协方差矩阵时只考虑疑似像素,而不是整个时空分块的所有像素。

4.3 基于 SVM 的训练与分类

实验视频数据库由 10 段林火视频和 4 段航拍彩色森林视频图像构成,其中 9 段林火视频来自文献[11],其他为从互联网下载的航拍视频。通过交互的方式共得到 61 205 个时空分块的协方差矩阵特征集,其中,正样本 10 907 个,负样本 50 298 个。训练时,采用 RBF 核函数的 libsvm^[12],随机选取 50%的正负样本,通过交叉验证和网格搜索确定最优参数。用训练好的模型对其余 50%的正负样本进行测试,测试准确率为 98.59%,其中检测率为 97.83%,虚警率为 1.26%。

4.4 林火预警判据

如果将每个时空分块看作一个像素点 p ,其被 SVM 分类为正样本,标记为 1,被分类为负样本标记为 0,则判断存在林火的预警判据 P 可表示为:

$$P = \begin{cases} 1, & p = 1 \text{ 且 } \text{sum}(N_s(p)) \geq 2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $N_s(p)$ 为 p 的 8 邻域时空分块的分类标记。

5 识别结果与分析

用训练好的模型对林火视频数据库中的视频帧进行测试,若一帧图像中有任意区域满足式(4)的判据,则该帧判为含有林火的帧。实验视频库的检测结果如表 1 所示。

表 1 视频帧的检测结果

林火视频	检测率	森林视频	虚警率
posVedio1	320/320(100.0%)	negVedio1	10/990(1.0%)
posVedio2	330/360(91.7%)	negVedio 2	0/990(0.0%)
posVedio 3	2290/2290(100.0%)	negVedio 3	0/990(0.0%)
posVedio 4	1740/1740(100.0%)	negVedio4	0/1190(0.0%)
posVedio 5	2605/2970(87.7%)		
posVedio 6	418/540(77.4%)		
posVedio7	480/490(98.0%)		
posVedio8	620/620(100.0%)		
posVedio9	330/420(78.6%)		
posVedio10	410/420(97.6%)		

可以看出,本文算法具有低的虚警率和较高的检测率,对大部分林火视频的检测率均在90%以上,而对有些视频(如 posVedio6 和 posVedio9)的检测率较低的主要原因是,式(4)的判据决定了视频帧中可检测的火焰区域大小应不小于 32×32 像素,而 posVedio6 和 posVedio9 中火焰区域的面积较小,检测难度较大。

图6~9给出了部分视频帧的检测结果,其中, posVedio7 和 posVedio9 为摄像机静止时拍摄的视频,



图6 视频 posVedio4 部分帧的检测结果

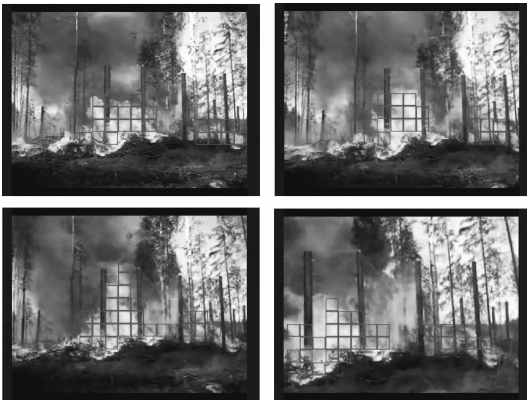


图7 视频 posVedio7 部分帧的检测结果

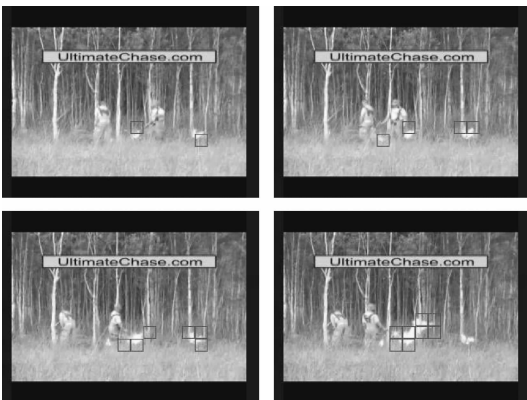


图8 视频 posVedio9 部分帧的检测结果

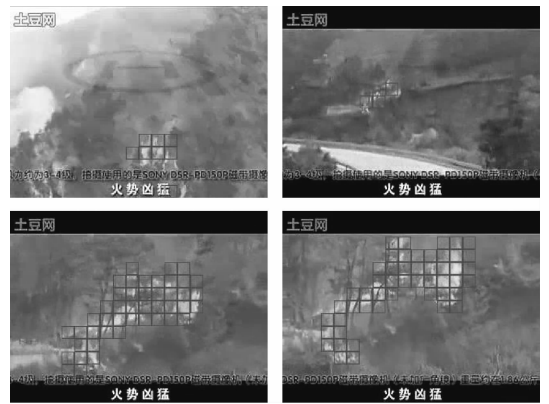


图9 视频 posVedio10 部分帧的检测结果

posVedio4 和 posVedio10 为摄像机运动时拍摄的视频,可以看出,无论摄像机静止还是运动,本文算法均可准确检测出林火区域。视频 posVedio9 在初始阶段由于火焰区域面积较小,无法有效检测,但随着火焰区域面积逐步增大,算法便可有效检测到林火区域。

6 结 论

利用无人机实施林火监测实时性好、机动灵活、使用和维护成本低,能够在较低虚警率的情况下,实现林火监测和火焰自动识别预警。

参 考 文 献

- [1] 李滨,王宏宇,杨笑天. 无人机系统在森林防火方面的应用及其发展[J]. 电子技术,2015,5(4):15-18.
- [2] 单保君,江西军,王秋华,等. 森林航空灭火研究综述[J]. 防护林科技,2015(9):76-78.
- [3] HOU X, HAREL J, KOCH C. Image signature: Highlighting sparse salient regions [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(1):194-201.
- [4] SCHAUERTE B, STIEFELHAGEN R. Quaternion-based spectral saliency detection for eye fixation prediction [C]. Computer Vision-ECCV, Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012:116-129.
- [5] 周美丽,白宗文,延小进. 基于相位相关法的图像拼接系统设计[J]. 国外电子测量技术,2015,34(5):31-33.
- [6] 朱立军,苑玮琦. 基于双线性模板和分块策略的虹膜色素斑检测[J]. 仪器仪表学报,2015,36(12):2714-2721.
- [7] 殷明,庞纪勇,褚标,等. 基于插值与 NSQCT 域融合的图像超分辨率重建[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(10):1440-1448.
- [8] 宁忠磊,王宏琦,张正. 一种基于协方差矩阵的自动

- 目标检测方法[J]. 中国科学院研究生院学报, 2010, 27(3):370-375.
- [9] 文松柏. 基于协方差特征矩阵的目标跟踪系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2011.
- [10] HABIBOGLU Y H, GUNAY O, CETIN A E. Covariance matrix-based fire and flame detection method in video [J]. Machine Vision and Applications, 2011, 23(6):1-11.
- [11] JIANG B, LU Y, LI X, et al. Towards a solid solution of real-time fire and flame detection [J]. Multimed Tools Appl, 2015, 74(3):689-705.
- [12] 付虎艳, 徐云栋, 李圣娇, 等. 基于 SVM 方法的高山松林蓄积量遥感估测研究[J]. 西部林业科学, 2014, 43(4):83-88.

(上接第 144 页)

通过对常用算法的开发,已经体现出 Catapult 的优势。在复杂算法的开发过程中,这种优势将会更加凸显。在项目开发中可选性将更加广泛且可以满足灵活修改的目的。

5 结 论

本文以数字滤波算法为载体,采用 Catapult C 综合工具,利用基于 C 的高层次综合技术,实现了快速便捷的硬件设计流程。通过与 MATLAB 进行比对,验证了移植的正确性。根据 Catapult C 的特点,可以将更多复杂的算法应用于工程实践中来,为光学遥感成像图像处理提供更多的可选性。随着 Catapult C 的引入,使得设计人员不必花费许多时间和精力去执行整个 RTL 综合,可以在更少时间内得到更高品质的设计,也为后续工作开展提供借鉴。

参考文献

- [1] 翟国芳, 万旻, 程芸, 等. 基于 FPGA 的遥感相机图像传输系统设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(9): 56-59.
- [2] 徐磊, 崔雪楠. 基于 FPGA 的遥感相机多模式数传转接电路设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(9):13-18.
- [3] 邹春勇, 尚海林. 基于 CameraLink 接口高清图像跟踪器设计[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(19):4672-4675.

作者简介

张庆杰, 1981 年出生, 现为空军航空大学讲师, 主要研究方向为无人机智能控制、多机协同控制技术。

E-mail: nudtzhang@hotmail.com

郑二功, 1980 年出生, 现为空军航空大学讲师, 主要研究方向为无人机图像处理。

E-mail: zeg_1980@tom.com

徐亮, 1984 年出生, 现为空军航空大学助教, 主要研究方向为无人机智能控制。

E-mail: 61723426@qq.com

徐伟, 1991 年出生, 现为空军航空大学硕士研究生, 主要研究方向为无人机智能控制。

E-mail: 406930715@qq.com

- [4] 崔葛瑾, 沈李芳, 李伟民. 基于 FPGA 的数字电路系统设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2008.
- [5] 辛光泽, 侯宏录, 李飞, 等. 基于 Camera Link 接口的高速视频图像采集系统[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(3):85-88.
- [6] LI A L, ZHANG B H, BIAN CH P. Design of high-speed CCD image data acquisition hardware system[J]. Chinese Journal of Electron Device, 2007, 30(6):2145-2147.
- [7] 樊宗智, 周煦林, 刘彬. 基于高层次综合的 JPEG 编码器设计[J]. 微电子学与计算机, 2015(6):32-35.
- [8] 罗锋, 刘新宁. 基于 Catapult C 的 DSPPOOL 设计[J]. 现代电子技术, 2009(16):19-21.
- [9] 姜伟, 陈世平, 黄巧林, 等. 光学采样成像系统传递函数补偿的仿真研究[J]. 航天返回与遥感, 2007(28): 28-33.
- [10] 满益云, 陈世平等. MTF 在光学遥感成像系统优化设计中的应用研究[J]. 航天返回与遥感, 2007(28): 39-47.

作者简介

张晔, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为视频数字处理、图像复原等。

E-mail: yueyuan7763@sina.com.cn