

编号：

国防科技创新特区快速响应小组项目 课题申请书

课题名称： 无人机快速避障技术研究

所属项目： 国防科技创新快速响应小组
（深圳）2020 年第 6 批需求

申请单位： 清华大学深圳国际研究生院

参研单位： 无

课题负责人： 张盛

申请日期： 2020-04-20

目录

一、基本信息.....	3
二、需求概述.....	4
2.1 功能需求.....	4
2.1.1 无人机避障技术需求分析.....	4
2.1.2 无人机避障系统组成.....	6
2.2 技术指标.....	7
2.2.1 技术指标解析.....	7
2.2.2 方案技术指标论证.....	8
3.3 节点要求.....	10
三、研究内容与课题目标.....	10
3.1 课题研究目标.....	10
3.2 主要研究内容.....	11
3.2.1 研究内容概述.....	11
3.2.2 拟解决难题.....	11
3.2.3 关键技术原理.....	14
3.3 课题研究基础.....	22
3.4 技术途径与可行性分析.....	26
3.5 拟提交成果.....	31
3.6 需求与指标预期实现情况.....	31
四、经费需求概算.....	32
五、课题管理模式.....	32
5.1 组织管理方式.....	32
5.2 项目实施的组织.....	33
5.3 项目实施的政策.....	33
5.4 资源支撑条件.....	33
六、成果转化预期.....	34
七、其他.....	34
7.1 现有工作基础和条件.....	34
7.1.1 申请单位简介.....	34
7.1.2 团队实验室介绍——先进传感器件与集成系统重点实验室.....	34
7.1.3 团队前期研发成果.....	35
7.1.4 仪器设备情况说明.....	36
7.1.5 正在承担和参与的科研项目情况.....	37
7.1.6 完成国家、省、市科技计划项目情况.....	37
7.2 研究团队.....	38
7.2.1 课题负责人.....	38
7.2.2 重要参与者.....	40

一、基本信息

课题名称	无人机快速避障技术研究				需求编号	SZKX-2020-06-01
课题负责人	姓 名	张盛	性 别	男	出生年月	1975 年 8 月
	学 历	博士	职 称	副教授	单位职务	清华大学深圳国际研究生院/先进传感器件与集成系统重点实验室/副主任
	手 机	13632683550	办公电话	0755-26036411	E-mail	zhangsh@sz.tinghua.edu.cn
申 请 单 位	单位名称	清华大学深圳国际研究生院				
	单位联系人	刘为			联系电话	18038153872
	通讯地址	广东省深圳市西丽深圳大学城清华校区 A 栋二楼			邮政编码	518000
经费概算（万元）		97				
研究周期（月）		8 月			申请日期	2020-04-20
课题负责人签字：				（单位盖章）		
年 月 日				年 月 日		

二、需求概述

2.1 功能需求

2.1.1 无人机避障技术需求分析

近年来，随着多旋翼消费级无人机市场的飞速增长，其相关技术也正在发生日新月异的变革，以往多用于特种行业甚至军用产品上的技术（如飞行控制、图像传输、目标识别和跟踪等）也越来越多地用于消费级无人机，使其越来越接近于自动化甚至智能化飞行机器人的概念。

在消费级无人机技术的诸多趋势中，避障能力是实现自动化乃至智能化的关键环节，完善的自主避障系统将能够在很大程度上减少因操作失误造成的无人机损坏和伤及人身和建筑物的事故发生率，而从各消费级无人机厂商的新品和技术发展方向看，避障技术也将在未来几年趋于完善并成为中高端消费级无人机的标配系统。

根据目前无人机避障技术的发展以及其未来的研究态势，无人机避障技术可分为三个阶段，一是感知障碍物阶段；二是绕过障碍物阶段；三是场景建模和路径搜索阶段。这三个阶段其实是无人机避障技术的作用过程。从无人机发现障碍物，到可以自动绕开障碍物，再达到自我规划路径的过程。

（一）无人机感知障碍物——快速运动检测与识别

当无人机遇到障碍物时，能快速识别，并且悬停下来，等待下一步指令。只要多旋翼无人机能够测量出与潜在障碍物之间的距离，就可以在撞向障碍物之前停止前进。而当前运用较多的障碍物检测方法主要有：1）超声波测距，家用汽车的倒车雷达就是利用超声波检测障碍物，该方法优点就是技术成熟、成本低；但缺点在于作用距离近（常用的中低端超声波传感器作用距离不超过 10m），且对反射面有一定要求。因此超声波测距传感器常用来测量无人机与地面的距离。2）红外/激光 TOF：即飞行时间传感器，基本原理就是传感器发射一定频率的红外/激光信号，然后根据反射信号与原信号的相位差计算信号的飞行时间，即可换算出距离障碍物的距离。该方法技术比较成熟，作用距离较超声波更远（数米到数百米），而且高等级的 TOF 传感器可以获得障碍物的深度图像，但缺点在于成本高，抗干扰能力较差。因此该方案在当前市场上产品或样机中有一定规模的应用。3）双目视觉：运用人眼估计距离的原理，即同一个物体在两个镜头画面

中的坐标稍有不同，经过转换即可得到障碍物的距离，双目视觉方法也可以获得障碍物的深度图像。该方法缺点在于技术难度较高，且距离估计的误差随距离变大而指数型增长，只是这一缺点在无人机避障应用中并无大碍。4) 电子地图：借助细粒度的数字高程地图和城市 3D 建筑地图，既能够实现避免重要建筑物受到无人机撞击（即禁飞区功能），也能够实现很多情况下的无人机避障。

因此，本项目拟采用实验室提出的基于时空卷积网络的短时运动检测算法与识别技术来完成对于运动障碍物的快速检测与识别。

（二）绕过障碍物——空间距离测量以及障碍物运动速度估计

无人机能够获取障碍物的深度图像，并由此精确感知障碍物的具体轮廓，然后自主绕开障碍物。这个阶段是摆脱飞手操作，实现无人机自动驾驶的阶段。实际应用中，需要设计让无人机安全高效地绕过障碍物继续完成预定飞行的策略。首先无人机需要获取障碍物轮廓，如果避障传感器是普通超声波，无人机就只能知道前方有障碍，但是却无从知道障碍物的边缘，因此就需要无人机具备“能够获得障碍物深度图像”的能力，对于能获得深度图像的 TOF 测距和双目视觉测距方式，只要障碍物没有充满视场，就总能够找到障碍物的边缘。虽然关于机器人在未知场景中的避障方法研究非常多，但是由于终究是未知场景，其中必然有复杂的搜索过程。

考虑到本项目中是已知的运动障碍物，所以采用单目相机来测量距离。项目中对于运动的障碍物，利用 Kalman 滤波器良好的运动估计性能来估计障碍物的运动状态进而重新规划路径来避障，不仅能够满足低时延要求而且算法的鲁棒性能够得到保证。

（三）场景建模和路径搜索——无人机避障路线规划

无人机能够对飞行区域建立地图模型然后规划合理线路。这个地图不能仅仅是机械平面模型，而应该是一个能够实时更新的三维立体地图。这将是目前无人机避障技术的最高阶段。无论是基于电子地图，还是其他来源，还是 SLAM（即时定位与地图构建）获得了场景模型，就可以在机载计算机里用算法去搜索优化的避障路径。当前关于这种已知场景路径规划的研究很多，算法也是层出不穷，也是无人机避障发展的必然趋势。

考虑到本次项目低时延的需求，拟采用人工势场的方式来解决无人机在遭遇

快速向无人机运动的障碍物时在极短的时间内完成无人机飞行航线的重新规划，并且输出无人机飞行姿态调整的具体指令来完成无人机快速避障。

2.1.2 无人机避障系统组成

1. 系统组成

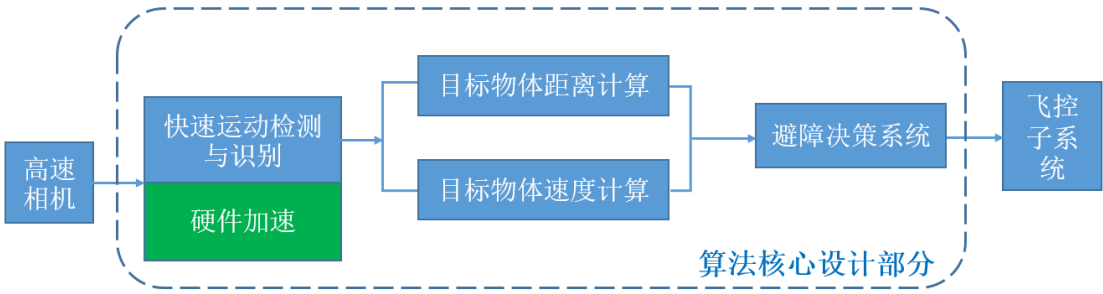


图 2-1 无人机反应系统整体设计示意

本项目的系统主要由前置的高速相机以及视觉系统和无人机平台组成，采用高帧率的图像传感器来实时的采集无人机视野中的场景；算法系统主要包括对障碍物进行快速运动检测与识别算法、空间距离测量以及障碍物运动速度估计算法。在有障碍物高速向机体运动的时候，通过避障决策系统完成对无人机航线的重新规划，输出避障指令到无人机平台的飞控系统中控制无人机进行快速避障。

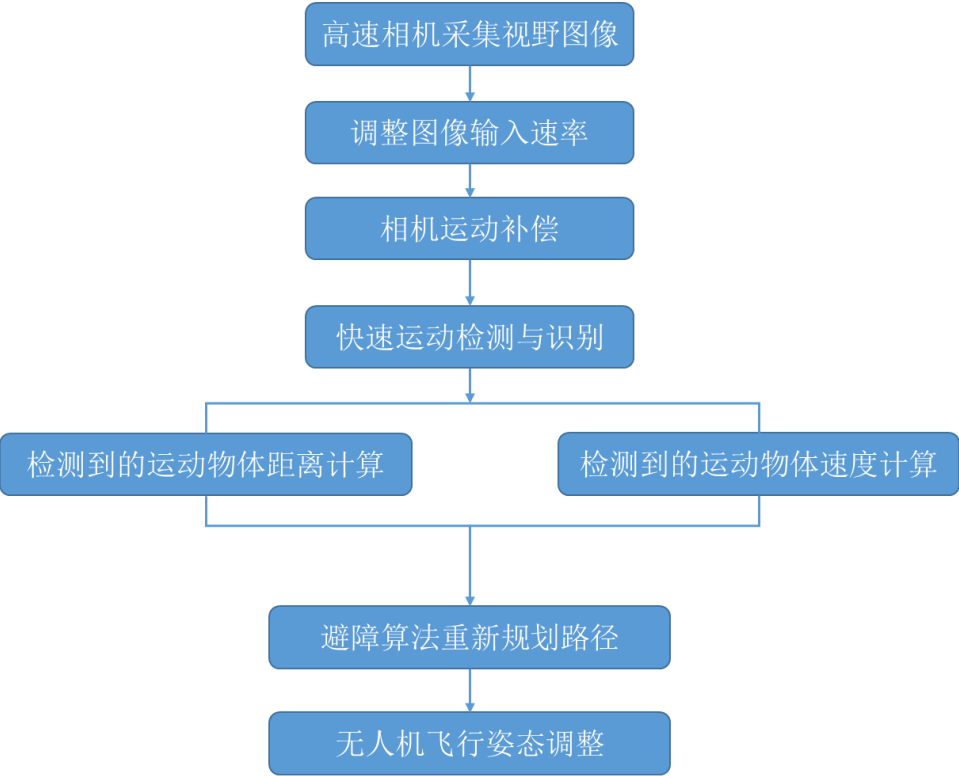


图 2-2 系统工作流程图

由于系统的算法部分计算复杂度较高,需要的计算资源以及计算的时延要求较高,为了使无人机在设计的障碍物的距离和速度指标下及时做出反应并完成避障,需要从软件和硬件方面分别进行优化,其中优化硬件结构及采用高速、并行的计算资源尤为重要;软件的优化即尽可能的简化算法的设计,降低计算复杂度,来实现无人机的快速避障任务。

2.2 技术指标

2.2.1 技术指标解析

本项目将利用采购的商用低成本无人机,进行合理的研改和技术攻关,能够在飞行过程中成功躲避运动障碍物模拟考核。

1. 无人机飞行速度 $\geq 20\text{m/s}$; (指无人机平飞的速度)
2. 无人机有效载荷 $\geq 0.5\text{kg}$;
3. 无人机对运动障碍物检测响应时间 $\leq 10\text{ms}$; (无人机采集视野图像进行障碍物运动检测与识别到障碍物运动状态得到的延时即为无人机对运动障碍物检测响应时间)
4. 模拟运动障碍物体积 3-10 立方分米,以速度 10m/s-20m/s 从无人机 3 米外无人机视野中突然出现;(模拟障碍物为体积约 3-10 立方分米的球体,运动速度为 10m/s-20m/s,障碍物从距离无人机 3m 外以设定的速度飞向无人机,此时需保证障碍物在无人机能够捕捉到的方向进行模拟测试)
5. 完成不少于 200 次躲避实验,无人机成功躲避模拟障碍物概率 $\geq 90\%$ 。

2.2.2 方案技术指标论证

a. 算法延时指标论证（无人机对障碍物的检测响应时间 $\leq 10\text{ms}$ ）

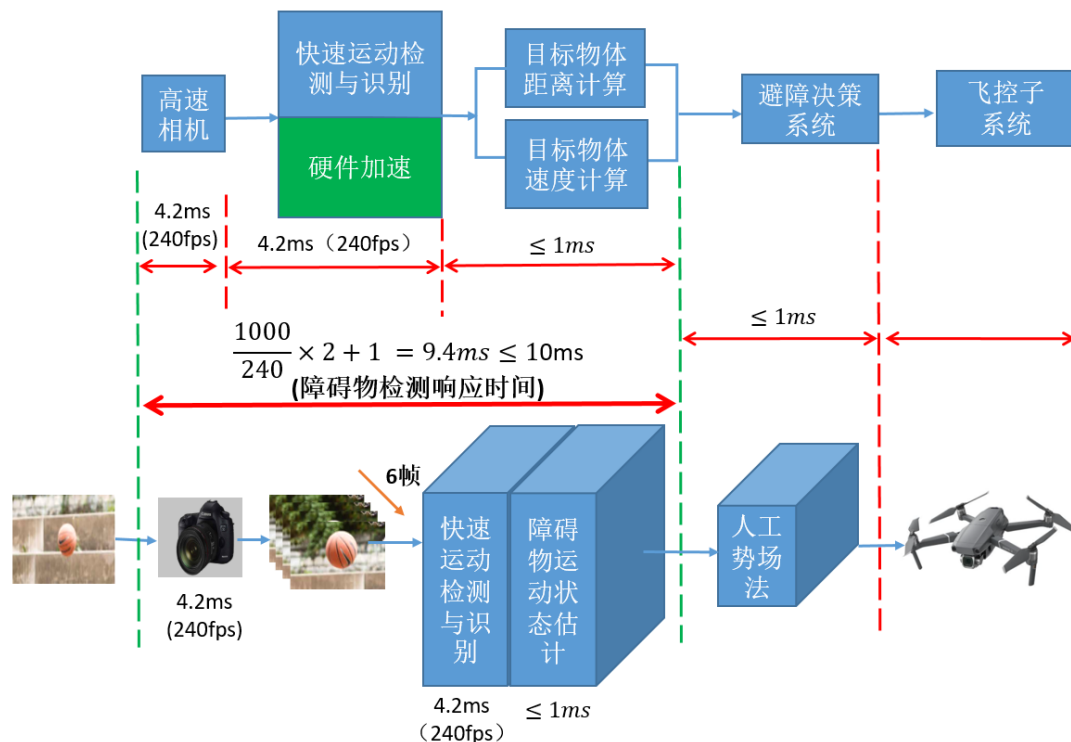


图 2-3 系统整体响应时延详解

前置高速相机（240fps）启动后，相机开始采集图像。在算法启动后，数据缓存区缓存有前 5 帧的图像，加上相机实时采集的 1 帧图像，总共 6 帧图像数据进入后续算法进行计算，流程如图 2-3 所示。

基于已有的短时运动检测研究基础、面向卷积核堆积数据流 SFS 和压缩编码格式 CSF 的 3D-SIMD 深度神经网络硬件加速处理器架构来进一步加速检测识别算法的计算，能够使快速运动检测与识别部分模块的处理速度达到 240fps；障碍物的运动状态估计的计算复杂度相对较低，算法时延能够保证在 1ms 之内，这样无人机对障碍物的检测响应时间不大于 10ms，能够满足项目提出的关键指标。后续通过人工势场产生避障加速度（使用人工势场法进行路径规划的时延不大于 1ms），无人机调整飞行姿态进行快速避障。

b. 方案可行性论证



图 2-4 无人机避障示意图

障碍物从 3 米外朝着无人机开始运动，速度达到 20 米每秒，且障碍物处于无人机视野中，假设障碍物继续运动能够和无人机发生碰撞，这样障碍物运动到无人机位置所用的时间为 $3/20=0.15s$;

无人机在避障加速度的作用下能够达到的速度为 $2\sim 3m/s$ ，假设障碍物为体积为 $10dm^3$ ，则直径为 $2R=2\sqrt[3]{((10\times 4/3)/\pi)}\leq 0.28m$ ，无人机为了避障，需要运动的位移模 $\geq 0.28m$ ，此处设为 $0.30m$ ，无人机避障完成所用时间： $0.3/3\sim 0.3/2=0.1\sim 0.15s$;

无人机对目标检测的时延和路径规划的时延为 $9.4+1=10.4ms$ ，当无人机的躲避速度为 $3m/s$ 时，避障执行时间即为 $100ms$ ，无人机检测并且避障（包括无人机检测响应以及路径规划的时间）时延为 $100+10.4=110.4ms$;

因此，无人机能够反应的避障距离为 $\geq 2.208m$ ，对于在避障距离内的障碍物，无人机能够安全的完成避障。

3.3 节点要求

本项目研究计划在八个月内完成：

阶段	起止时间	研究内容	预期目标	资金使用计划
第一阶段	2020.4.1 至 2020.7.30	1) 无人机平台选型调试；2) 高帧率摄像平台选型调试；3) 算法设计仿真与调试；	1) 实现符合项目指标要求的无人机平台，完成实验飞行；2) 完成高帧率摄像头硬件调试；3) 完成运动目标图像训练算法设计与仿真实现；	本阶段 使用经费 65 万元
第二阶段	2020.8.1 至 2020.11.30	1) 无人机避障飞控程序设计开发和调试；2) 在摄像头硬件平台上集成运动目标识别算法；3) 实现无人机与高帧率摄像头硬件平台的联接与调试；4) 开展不少于 200 次飞行实验。	1) 完成无人机避障飞控系统开发；2) 完成运动目标高速识别算法的硬件化集成；3) 完成无人机与高帧率摄像头硬件平台的联调联试；4) 开展不少于 200 次飞行实验。	本阶段 使用经费 32 万元

三、研究内容与课题目标

3.1 课题研究目标

本项目的研究目标是，利用采购的商用低成本四旋翼无人机平台，基于高帧率图像传感器和边缘侧智能计算硬件平台，结合短时运动目标高速检测关键技术和算法成果基础，通过在飞行过程中成功躲避运动障碍物模拟考核。重点是实现无人机队运动障碍物检测响应时间小于 10 毫秒，以及躲避给定条件下的模拟障碍物的成功率超过 90% 的目标。

本项目的预期成果包括：1) 实现具有产品化前景的“运动检测”事件传感器开发，对运动目标的视觉检测响应时间不大于 10 毫秒；2) 在商用低成本四旋翼无人机开放平台上实现避障飞控子系统的开发集成，实现飞行速度不小于 20 米每秒，有效载荷不小于 0.5 公斤的目标；3) 完成不少于 200 次躲避实验，其中模

拟运动障碍物体积为 3 到 10 立方分米，从 3 米外以速度 10~20 米每秒靠近无人机，且无人机躲避成功率不低于 90%。

3.2 主要内容

3.2.1 研究内容概述

本研究项目重点基于高速图像获取与边缘侧智能计算的无人机快速避障关键技术，内容包括：1) 商用低成本四旋翼开放无人机平台的快速避障飞控子系统开发与调试；2) 基于高帧率（240fps）图像传感器数据的短时运动检测算法研究与实现，提出每 6 帧图像数据完成一次运动检测的核心技术和方法，从而每秒完成 100 次运动检测，实现系统响应时间不大于 10 毫秒；3) 基于智能传感器研究方法，设计与高帧率图像传感器相结合的边缘侧机器视觉硬件，分别采用 FPGA 硬件集成和“Sensor+MPU”架构，探索低成本硬件方案，最终实现具有产品化前景的“运动检测”事件传感器开发；4) 进行运动检测事件传感器与开放无人机平台的联调联试，对给定飞行速度、体积和角度的运动目标，进行 200 次避障实验，不断改进目标检测算法，实现 90%的避障成功率。

3.2.2 拟解决难题

为解决无人机的快速避障问题，重点需要攻克的难题包括：

（1）超高速目标运动检测需求

短时视频运动检测（以下简称短时运动检测），顾名思义，相比一般的视频运动检测而言，对所使用的视频帧序列的长度进行限制，仅用少量几帧图像的短视频段来检测变化区域。

短时运动检测的核心目标是从视频段中提取出帧间的变化信息。鉴于卷积网络在学习和表达复杂特征的优越性，部分研究者先将两帧图像拼接或堆叠起来，应用卷积网络对变化特征进行提取。不过这类方法所体现的运动检测思想仍局限于将当前帧与背景图进行对比，既过于依赖于先验的背景信息，也不适用于视频段中多帧图像分析。

短时运动检测关注的是视频中即时发生的变化区域，因此对于场景中的前景和背景的定义完全基于短时间内的观测内容，不关心物体的长期运动表现，也不会因间歇性运动对前景/背景产生歧义。

本项目提出了一种能够有效提取变化特征的回顾卷积方式。回顾卷积的特点是能够使短时视频段中的当前帧图像与任意历史观测帧图像直接关联,而不受到时间间隔的限制。以回顾卷积为基础,我们构造了一种时空尺度可变的变化特征提取结构,该结构由回顾卷积、空间卷积和全时段时间均值池化组成,能够表达复杂的变化特征。

本项目提出了一种基于时空卷积网络的端到端的短时运动检测框架,由三部分构成,分别是变化特征提取模块、共享空间卷积子网络和多级编码器-解码器结构。该框架为时空域的全卷积网络,具有时空尺度可变性,能够适应不同时空尺度的输入数据,并且通过共享空间卷积子网络与多层编码器-解码器结构实现了多空间尺度下的变化特征融合,提高了对不同尺度变化的适应性和鲁棒性。

通过改进的回顾卷积方式和短时运动检测框架,本项目对时空卷积网络提取变化信息时存在的过拟合问题进行的剖析,并给出了相应的解决方案,提出了相比三维卷积结构更加有效的特征提取方式,通过实验也证实了所提方法在不同场景下的适用性和泛化性。

(2) 超高速的视频数据获取

为了实现超高速的运动检测,除了以上少帧数情况下的短时检测框架和方法,还需要得到超高速的图像数据,并结合片上系统开发流程,基于 FPGA 与 MPU 相结合的边缘侧智能计算平台,实现高实时性的运动检测事件传感器开发。

本项目基于已有图像传感器芯片公司 Smartsens 公司的 240fps 图像传感器芯片、与该公司合作的 FPGA 边缘侧智能计算平台及正在开发中的 MPU 边缘侧智能计算平台,实现高帧率高检测次数的事件传感器开发。

(3) 边缘侧硬件快速计算与响应实时性问题

近年来,随着深度神经网络技术的发展,很多开创性的神经网络架构不断出现,具有代表性的网络结构有 AlexNet、VGGNET、GoogleNet、ResNet、R-FCN、Deformable-ConvNets 等等。然而,这些网络通常包含数以百万计的参数,几十到几百个卷积层,需要数十亿次的算术运算。

目前嵌入式硬件加速设计普遍存在处理速度相对较慢,与高速应用不适配等缺点。因此非常需要针对移动嵌入式硬件设备的特点,有针对性的进行优化设计,使这一优势技术能在移动嵌入式设备中得以广泛应用。

虽然深度压缩技术可以将大型网络参数(如 VGG16)由 550MB 压缩到 11MB,使得高性能深度神经网络在嵌入式设备中的片上部署成为可能,然而目前的技术只适合全连接层。卷积层由于卷积操作的需要,虽然通过压缩降低了乘累加单元(MAC)总数,但是由于压缩造成的内存不规则阻碍了有效的并行加速,使得整体处理效果反而不佳。因此,需要对现有压缩编码技术进行深入研究,通过技术优化网络的整体处理效果。

此外,深度神经网络在计算过程中,还会产生大量的中间数据,需要在处理单元和内存之间进行频繁的数据传输。由此内存带宽能耗过高成为深度神经网络技术应用的另一个瓶颈,需要对稀疏网络以及非稀疏网络计算流程进行进一步的研究,并通过优化计算流程以及数据流程,使得中间数据得以尽快处理,降低执行期间存储带宽压力。

目前优化加速深度神经网络的研究主要可以分为四类:

- 1) 降低精度: 降低网络参数的精度, 由浮点数转为定点数; 降低比特数, 由高比特 32bit 降低为 16bit, 8bit, 4bit, 甚至 1bit 等;
- 2) 简化计算: 将卷积层和全连接层中乘法运算转化为移位和加法运算, 或将乘法运算转换为基于查找表的结构等等;
- 3) 优化流程: 通过优化计算流程和数据流程来降低移动数据所需的次数和功耗;
- 4) 深度压缩: 通过深度数据压缩减少参数所需存储空间和运算次数, 尽可能的将所有数据都缓存到片上, 减少内存存取次数。

第 1 类和第 2 类方法主要用于降低计算量, 可以将其降低几个数量级。第 3 类主要是通过改进流程来优化数据移动过程。第 4 类主要是去除冗余计算, 减少网络所需存储空间以及计算量。当前性能较好的设计基本都是结合了以上方法的一种或者几种。

对于深度压缩稀疏网络, 最近提出的 DVAS, ENVISION, DNPU 等硬件加速设计, 仍存在问题亟待解决, 如 2D-SIMD 处理器架构对稀疏数据的 PE 利用效率不高, 压缩数据先要转换为密集数据才能处理, 需要稀疏控制电路等。

由于深度压缩是新发展出来的技术, 对于压缩稀疏数据过程出现的新问题, 大部分设计的优化不够, 处理压缩稀疏数据仍需相当多的额外逻辑和额外的时钟

周期。例如，Eyeriss 使用片上网络（NoC），仅通过操作非零数据、读取执行数据和乘累加运算（MAC）来处理稀疏数据；DVAS 和 ENVISION 使用输入保护存储器和保护控制单元来处理稀疏数据。

对于稀疏数据压缩编码方面的研究，目前存在的几种稀疏矩阵编码格式，如 CSC，CSR 和 CISR 等，由于其固有的不规则存储器访问等特点，普遍存在数据查找计算复杂、额外逻辑处理电路占用较多等问题，使得运行过程计算复杂，难以有效的实施并行计算，同时需要更大的芯片面积。例如，EIE 使用 ptr 读取单元（约占芯片面积的 19.1%）和稀疏矩阵读取单元（约占芯片面积的 73.57%）来处理压缩的稀疏数据。因此，设计一种压缩编码格式和计算流程，使得稀疏数据可以在执行过程中轻松处理而不需要进行复杂的转换、查找和计算，是非常有必要的。

（4）无人机快速避障与响应问题

对于高速靠近无人机的运动目标，除了需要快速响应的运动检测事件传感器，还需要其产生信号快速进入无人机飞控系统决策逻辑中，并迅速转变为对无人机的姿态与飞行控制，完成避障轨迹设置，从旋翼获得运动推动力，实现整体的避障动作。受限于无人机本身重量和推动力的约束，需要用尽可能少的时间完成从事件信号到控制信号的转变，开发无人机快速避障的飞控子系统，并在开放平台上完成调试。可以通过设计固定化的避障动作等方法，最大程度地减少逻辑与决策过程所需的时间。对于体积为 3~10 立方分米的运动目标，我们假设需垂直移动两倍边长距离以实现成功避障，大约最多需提升 30 厘米；运动目标自 3 米外以 20 米每秒靠近，则飞行所需时间为 150 毫秒，除去 10 毫秒事件传感器响应时间，预留 40 毫秒系统响应时间，无人机飞行时间为 100 毫秒，因此需要爬升速度为 3 米每秒。

3.2.3 关键技术原理

3.2.3.1 快速运动检测与识别技术

为了使无人机能够避开具有一定速度的主动障碍物，并极大的降低无人机避障算法的延时，首先要考虑的就是障碍物运动检测算法的时延问题。考虑到实验室关于运动检测方面的研究做的比较成熟，因此结合本实验室提出的基于时空卷

积网络的短时视频运动检测算法，来完成对运动障碍物的快速检测与识别。

短时视频运动检测，即短时运动检测，对所使用的视频帧序列的长度进行限制，仅用包含几帧图像的短视频段来检测变化区域。为了提高算法的效果，减少特征的冗余，专门提出了回顾卷积结构，这种卷积方式以当前帧的图像信息为基础，与各历史帧逐一进行比较，回顾了所有的历史观测内容，由此来获得充分的变化信息提取与表达，因而将这种卷积方式称为回顾卷积。回顾卷积的计算公式如下：

$$x_{n,l,i,j}^{(out)} = f_{acti} \left(\sum_{c=0}^{C-1} \sum_{h=0}^{K-1} \sum_{w=0}^{K-1} \omega_{c,0,h,w}^{(n)} x_{c,l,i+h,j+w}^{(in)} + \sum_{c=0}^{C-1} \sum_{h=0}^{K-1} \sum_{w=0}^{K-1} \omega_{c,1,h,w}^{(n)} x_{c,L-1,i+h,j+w}^{(in)} \right)$$

为了在不增加计算复杂度的前提下保证算法的准确率，我们将空洞卷积与回顾卷积结合，使用空洞回顾卷积来进行短时变化特征的提取；结合多层编码器-解码器结构，使用 ResNet-18 卷积结构，搭建了用于运动检测与识别的整体框架。

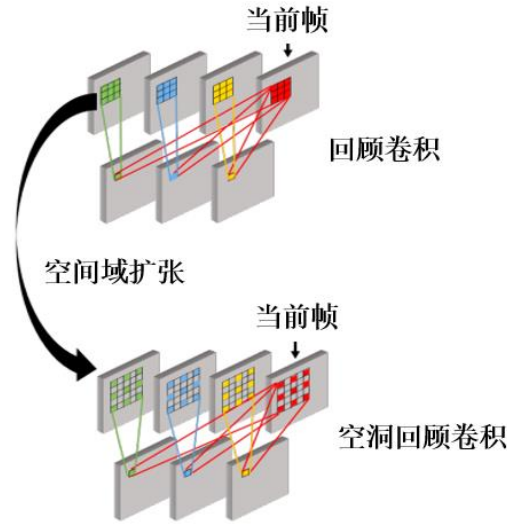


图 3-1 空洞回顾卷积过程

3.2.3.2 深度神经网络边缘计算与硬件加速技术

项目组通过对现有计算数据流程研究分析，针对深度神经网络自身的特点设计了一种全新的卷积核堆积数据流（SFS）；对现有压缩编码格式进行改进，设计了卷积核相对索引稀疏压缩编码格式（CSF），以充分利用数据的稀疏性，简化执行时的数据处理，降低计算产生的中间数据累积。与 ICLR2016 年度最佳论文“深度压缩”中的结果相比，运用本文的方法可在减少经典网络 AlexNet 和 SqueezeNet 所需的存储空间方面分别有 1.11 倍和 1.09 倍的改进，同时数据查找方面的计算

量可以降低 95%。而且，使用这些方法还可以简化处理不规则稀疏数据内存访问的逻辑电路和减少芯片面积。

项目组改进了当前的二维单指令多数据（2D-SIMD）处理器架构，设计了一个面向卷积核堆积数据流 SFS 和压缩编码格式 CSF 的 3D-SIMD 深度神经网络硬件加速处理器架构，与 DVAS、ENVISION 中的 2D-SIMD 处理器结构相比，当使用 AlexNet 上深度压缩后的数据时，处理单元（PE）阵列的利用率从 26.5% 提高到 96.5%。在这些方法的硬件实现上，本项目用 FPGA 设计几个极简高速数据流全连接（FC）和卷积（CONV）层神经网络处理器来验证它们的效率。与 EIE 和 Eyeriss 相比，本方法在大多数层上，每个 PE 的计算效率至少提高了 2 倍。不仅如此，在 AlexNet 带有 384 个卷积核的 CONV4 层上将单个 PE 的计算效率提升了 8 倍，在经典网络 VGG16 带有 512 个卷积核的 CONV5-3 层上提升了 11 倍。

（本节内容引自本课题组已有研究成果：Yuechao Gao, Nianhong Liu, Sheng Zhang. Stacked Filters Stationary Flow For Hardware-Oriented Acceleration Of Deep Convolutional Neural Networks. ICLR 2018 workshop.）

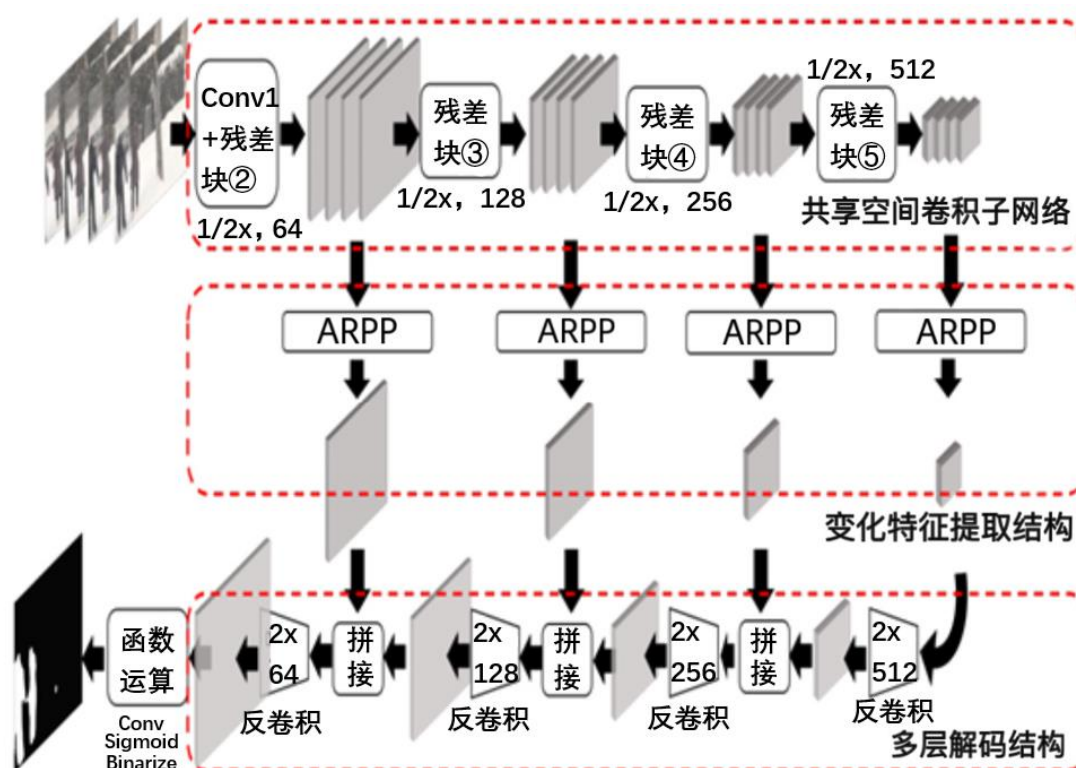


图 3-2 网络结构整体设计示意

3.2.3.3 无人机避障、路线规划技术

考虑到本次项目低时延的需求，拟采用人工势场的方式，使无人机在遭遇快速向无人机运动的障碍物时能在极短的时间内完成无人机飞行航线的重新规划，并且输出无人机飞行姿态调整的具体指令来完成无人机快速避障。

人工势场的基本原理是在空间中建立一个势力场，其中包括引力场以及斥力场，一般将障碍物作为中心来产生斥力场，为了完成无人机向着目标空间位置飞行，所以需要在期望到达的空间位置产生引力场；这就是构造人工势力场，有了势力场之后，一般的做法是对势力场求解梯度作为斥力或者引力矢量，此时无人机所在的空间位置的路径规划就由两种力的矢量和来作为重新规划无人机飞行路径的参数。

1. 斥力场：

为了让无人机能够在高速运动的障碍物或是距离无人机较近的障碍物靠近时迅速响应完成避障，斥力场梯度需沿着物体到无人机方向与距离关联变化，且变化曲线变化梯度十分陡峭，基于以上因素项目组对经典的势力场设计函数进行了修正，方程如下：

斥力场函数：

$$U_{r,i}(\eta_i) = \begin{cases} k_{r,i} \left(\frac{\eta_0 - \eta_i}{\eta_0} \right)^\gamma, & \text{if } 0 \leq \eta_i \leq \eta_0 \\ 0, & \text{if } \eta_i \geq \eta_0 \end{cases}$$

斥力矢量：

$$F_{r,i} = -\Delta U_{r,i} = \begin{cases} \frac{k_{r,i}\gamma}{\eta_0} \left(\frac{\eta_0 - \eta_i}{\eta_0} \right)^{\gamma-1}, & \text{if } 0 \leq \eta_i \leq \eta_0 \\ 0, & \text{if } \eta_i \geq \eta_0 \end{cases}$$

其中 η_0 是设定的阈值距离， η_i 是障碍物到无人机的距离， k_r 和 γ 是设计参数，为了增大斥力变化幅度，通过增大参数 k_r 的值来实现。修正的结果为：

$$\|F_{r,i}\| = \begin{cases} k_{r,i} \left(1 - \frac{1 - e^{\eta_i}}{1 - e^{\eta_0}} \right), & \text{if } 0 \leq \eta_i \leq \eta_0 \\ 0, & \text{if } \eta_i \geq \eta_0 \end{cases}$$

经过修正，斥力自无人机到障碍物之间的变化幅度就会更加剧烈，为无人机对于高速运动物体的即时响应提供可靠的保证。斥力的方向为 $\nabla \eta_i$ ，即障碍

物到无人机距离的梯度方向，这里取无人机到障碍物表面最近一点的方向。因为障碍物具有一定的运动速度，而以上的斥力场只考虑了距离因素。为了让无人机对于运动速度更大的障碍物具有更大的斥力作用，设计了以下的斥力矢量：

$\nabla \eta_i$ 和障碍物运动速度的方向的叉乘归一化矢量：

$$\vec{\theta}_i = \frac{\nabla \eta_i \times \vec{v}}{\|\nabla \eta_i \times \vec{v}\|}$$

其中 \vec{v} 为障碍物运动的速度；将 $\vec{\theta}_i$ 投影到无人机飞行平面：

$$\vec{\theta}_{i,n} = \vec{\theta}_i - \langle \vec{\theta}_i, \vec{n} \rangle \bullet \vec{n}$$

其中 \vec{n} 为无人机飞行平面的法向量，令 $\vec{\theta}_{i,n}$ 为障碍物对于无人机的斥力方向，再将速度的大小考虑到斥力中，可得斥力的最终表达式：

$$F_{r,i} = -\Delta U_{r,i} = \begin{cases} \|\dot{X}_i\| k_{r,i} \left(1 - \frac{1 - e^{\gamma \eta_i}}{1 - e^{\gamma \eta_0}}\right) \theta_{i,n}, & \text{if } 0 \leq \eta_i \leq \eta_0 \\ 0, & \text{if } \eta_i \geq \eta_0 \end{cases}$$

当空间中检测到多个障碍物时，无人机所受到的斥力的合力为：

$$F_{r,total} = \sum_i F_{r,i}$$

2. 引力场：

为了让无人机能够飞行到设定的目标空间位置，设计了如下的引力场：

$$U_a = \begin{cases} \frac{k_a}{(\gamma_a + 1) e_0^{\gamma_a}} \|e\|^{\gamma_a + 1}, & \text{if } \|e\| < e_0 \\ k_a \|e\|, & \text{if } \|e\| \geq e_0 \end{cases}$$

求解引力场梯度得到引力：

$$F_a = -\Delta U_a = \begin{cases} k_a \frac{e}{\|e\|} \left(\frac{\|e\|}{e_0}\right)^{\gamma_a}, & \text{if } \|e\| < e_0 \\ k_a \frac{e}{\|e\|}, & \text{if } \|e\| \geq e_0 \end{cases}$$

其中 e_0 为距离阈值， e 为目标位置与无人机之间的距离， k_a 为引力场增益， γ_a 为设计参数。

综上，无人机在势力场中所受的合力为 $F_{total} = F_{r,total} + F_a$ ，输出无人机的加

速度可以为： $\vec{a} = \frac{F_{total}}{m}$ ，其中 m 为无人机的质量。

3.2.3.4 障碍物空间位置测量技术

为了保证无人机检测到空间中的障碍物之后能够成功避障，需要实时的测量障碍物到无人机之间的空间距离，因此无人机平台在检测到障碍物的同时,需持续得到障碍物的空间位置信息，作为避障算法的一个重要的参数输入。

若项目中的运动障碍物是已知的，可采用单目相机来测量距离。因为单目相机仅根据一帧图像无法得到图像中物体的深度信息，所以在没有别的辅助算法以及低时延的要求下，仅对已知物体作为障碍物时是有效的。

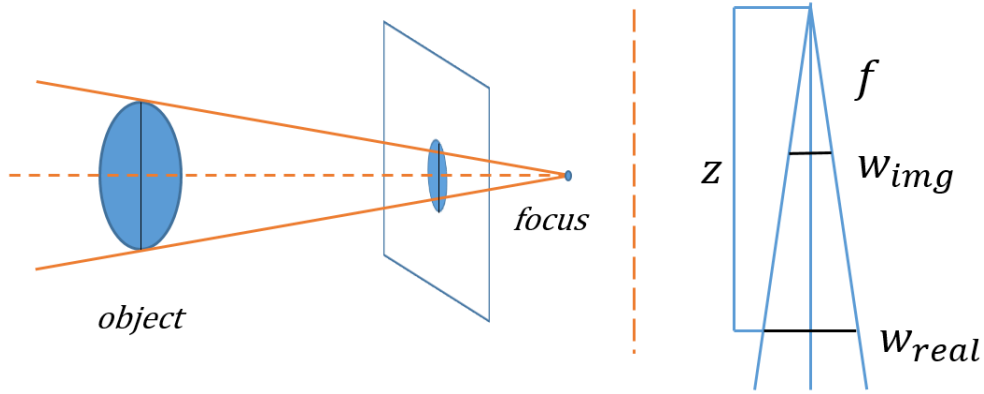


图 3-3 单目相机测距

具体的计算方式如下：

$$\frac{\hat{z} + f}{f} = \frac{w_{real}}{w_{img}}$$

z 为物体到相机的距离， f 为相机的焦距， w_{real} 为物体的实际宽度， w_{img} 为物体在图像中的宽度；由于相机的焦距远小于物体到相机的距离，所以：

$$\hat{z} = f \frac{w_{real}}{w_{img}}$$

利用障碍物到相机的距离、障碍物的实际尺寸以及相机的内参矩阵作为无人机避障算法的输入参数，进行物体位姿计算，将二维图像投影到三维空间，其一般过程如下：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{matrix} \text{Film plane to pixels} \\ \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \times \begin{matrix} \text{Perspective matrix} \\ \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \times \begin{matrix} \text{Pose matrix} \\ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \times \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \\ 1 \end{bmatrix}$$

上式为相机成像过程中三维空间的实际物体和二维图像的矩阵变换关系。这里已知图像中的像素点和空间三维点的对应关系，通过解 PnP 问题就可以得到位姿矩阵，最终将图像中目标物体的像素点反投影到三维空间中。

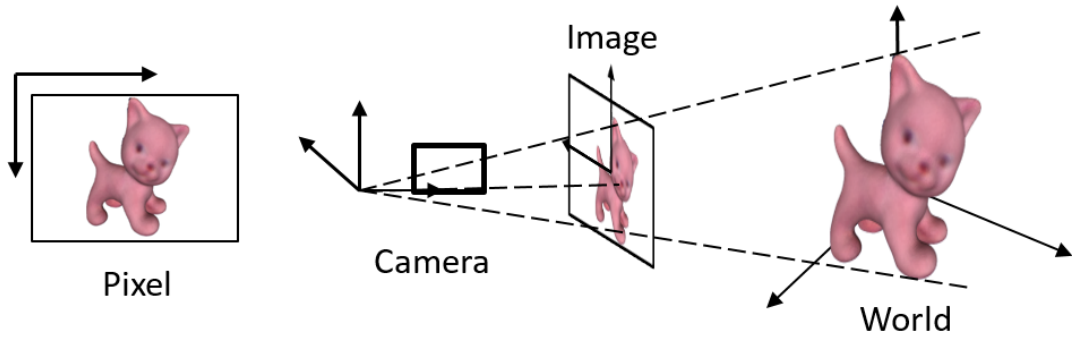


图 3-4 相机成像以及各坐标系之间的关系示意

为了减少计算量，可选取 6 个物体表面的点来代表整个物体：

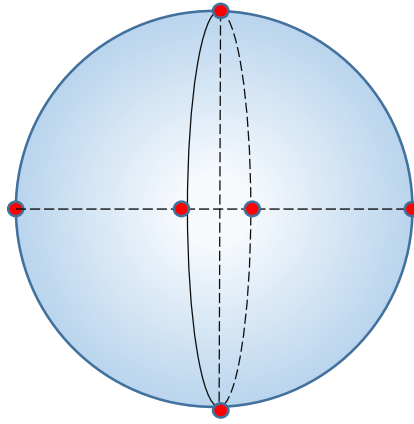


图 3-5 关键点选取示意（物体外接矩形的四个交点的反投影点、距离相机物体表面最近和最远的点，一共 6 个点来表示障碍物）

3.2.3.5 测速技术

在障碍物空间位置已知的情况下，还需要障碍物的速度信息才能有效的对无人机路径重新规划，来成功避障。考虑到 Kalman 滤波器在机器人定位以及导航方向应用有着很突出的性能优势，具有良好的运动估计性能，在机器人缺少比较

精确的定位算法时，Kalman 滤波器为机器人的导航提供了比较精确的自身运动状态估计，因此在本项目中，对于运动的障碍物也可以利用 Kalman 滤波器来估计障碍物的运动状态，进而重新规划路径完成避障，不仅能够满足低时延要求，算法的鲁棒性也能够得到保证。

设障碍物的运动状态为：

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix}$$

\mathbf{p} 表示空间位置， \mathbf{v} 表示运动速度，都是三维矢量；

由匀速运动的运动学公式得：

$$\mathbf{p}_k = \mathbf{p}_{k-1} + \Delta t \mathbf{v}_{k-1}$$

$$\mathbf{v}_k = \mathbf{v}_{k-1}$$

$$\Delta t = t_k - t_{k-1}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{V}_k$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{W}_k$$

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \Delta t \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_k = [\mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{O}_{3 \times 3}]$$

其中 $\mathbf{V}_k \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{Q})$ 表示噪声分布， $\mathbf{W}_k \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{R})$ 表示测量误差分布；由以上各式可以计算 Kalman 滤波器协方差：

$$\hat{\mathbf{x}}_{p,k} = \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{m,k-1}$$

$$\mathbf{P}_{p,k} = \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{m,k-1} \mathbf{A}_k^{-1} + \mathbf{Q}$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{p,k} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{p,k} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R})^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{m,k} = \hat{\mathbf{x}}_{p,k} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{p,k})$$

$$\mathbf{P}_{m,k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{p,k} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k)^T + \mathbf{K}_k \mathbf{R} \mathbf{K}_k^T$$

3.3 课题研究基础

自飞机问世以来已逾百年,而随着近年来微机电系统以及控制理论不断发展,无人机开始出现在我们的视野。无人机按照使用的平台可分为固定翼无人机、旋翼无人机、无人飞艇、扑翼无人机等。其中旋翼无人机更是因其结构简单、飞行稳定、操作简单、成本相对较低,近年来发展迅速,在民用市场更是炙手可热,聚集了一批相关的业余爱好者。

由于在空间上具有高自由度,搭配上相应的传感器,无人机可以在多领域辅助人类进行工作,目前已广泛应用于搜寻救援^[1]、远程感知^[2]、基建检查^[3]、精准农业^[4]、货物运输分发^[5]、路面交通的实时管理^[6]、监督管理^[7]、提供无线网络覆盖^[8]等多个领域,已成为辅助人类社会生产和管理的重要工具,未来随着软硬件水平的不断发展,机上可以负载更多的传感器或计算单元,无人机将以更高效、低限制条件的姿态出现在更多领域中,这其中有非常大的进步空间。

而无人机的出现为人类社会带来巨大改变的同时,也引入了很多的挑战,比如因为空间和能耗引入的机上能源问题^[9,10]、无人机飞行中的避障问题^[11]、无人机工作中数据交互引入的网络问题^[12]、以及安全策略问题^[13]。

无人机避障是无人机应用中无法绕过的一个话题。在飞行过程中障碍物无处不在,且不分室内室外和运动状态,与无人机的碰撞会给其机体造成打击,进而可能影响其正常工作。因此无人机在飞行中提前做出决策来规避障碍物,以防事故发生,是非常重要的。

一个无人机避障系统必须能够做到障碍物检测和避障行为。障碍物检测包含如何感知环境并从中获取障碍物信息(位置、速度、大小、朝向等),并通过这些信息作出潜在的碰撞预测;避障行为则关注系统如何操控,以及如何决定开始和停止避障的时间节点。接下来从以上两个层面分析无人机的国内外研究现状。

(1) 障碍物检测技术研究现状

无人机的自主障碍物检测技术可以分为协作式检测和非协作式检测,典型协作式检测设备,如应答机、TCAS 以及 ADS-B 等能够获取装载有同类型的飞行器的直接、精确、全面的信息,但该方法检测的对象局限在搭载同类型设备的飞行器上,对在此之外的障碍物则功能明显退化;非协作式检测方法主要是通过雷达、激光、红外、图像、超声等机上搭载的传感器来对环境中的障碍物进行检测。

激光雷达^[14]是众多交通系统中非常典型的一类传感器。它速度快、扫描范围广、对天气、灰尘或照明的变化有较好的鲁棒性，可以准确地反馈周围环境的深度信息。然而激光雷达的缺点也较为明显，其设备可能相当大，对无人机搭载来说是个不小的负担。此外，结构光、声呐等设备也在重量和功率上要求非常高，对于小型无人机来说难以承受。

利用图像进行检测一般使用单目^[15,16]或双目相机，这种传感器类型通常依赖于图像处理来提取关于环境和障碍物的有用信息。视觉传感器具有体积小、重量轻、放置灵活、易于安装等优点，能够准确地反馈障碍物对无人机的相对角度信息。但同时，光线、清晰度、视野限制、背景颜色、天气等因素对返回的图像质量有很大的影响。但无论如何，这类方法由于近来图像处理和计算机视觉领域的蓬勃发展变得越来越流行，已成为当前相对主流的方法。

利用图像传感器进行障碍物检测，需要对获取的图像进行目标检测和识别。传统的目标检测算法基于预先设计的特征，如尺度不变特征转换 SIFT 特征、梯度方向直方图 HOG 特征等^[17]，但是这些方法相对复杂，检测速度也较慢，在对实时性要求高的工程中应用效果较差。

随着卷积神经网络 CNN 的问世，基于 CNN 的目标检测与识别算法得到了快速的迭代更新，逐步取代传统目标检测方法成为主流。其特点可以归纳成两点，其一，使用卷积神经网络来获取图像更深层次的特征；其二，将深度学习应用于检测和定位图像的位置过程。

目前，基于深度学习的目标检测与识别算法可以大致分成三类：一种是基于区域建议的目标检测与识别算法，基于这些区域和算法给出的一系列区域建议，设计后面的卷积神经网络，给出目标的候选框和分类标签，此类算法中较著名的有 R-CNN 系列目标检测方法（R-CNN、Fast R-CNN、Faster R-CNN）^[18-20]；第二种则是基于回归的目标检测与识别算法，这种算法一般速度较快，比较经典的算法有 YOLO、SSD^[21-22]。第三种则是基于搜索的目标检测与识别算法，如基于视觉注意的 AttentionNet。

（2）避障技术研究现状

避障是具有非碰撞约束的导航机器人的任务，使用不同的运动规划方法来完成任务。包括多无人机系统下基于信息共享的几何法和最优路径法，基于 SLAM

的避障方法^[23]通过提前定位与构建地图能达到较好的效果，但是对机上搭载的计算机计算能力要求较高。

最经典的运动规划方法是人工势场(APF)方法。APF 方法的基本概念是在指定区域生成人工势场，基于这个人工势场，无人机被吸引到目标位置的同时，可以避开探测到的障碍物^[24,25]。Khatib^[26]首先提出了 APF 方法，由于其在路径规划方面的简易性和高效性，已经有无数学者对其进行了研究。虽然 APF 在过去几年中得到了广泛应用，但这一传统方法仍存在着局限性，如局部极小值问题和障碍附近目标不可达问题。

为了改进其不足之处，现有的基于 APF 的避障技术结合了其他的一些有效的技术，如快速搜索随机树^[27,28]、bug 算法^[29]、粒子群优化^[30]等。此外，改进 APF 本身也是一个研究方向，Sun 等人^[31]和 Triharminto 等人^[32]在斥力场公式中增加了附加项，Weerakoon 等人^[33]和 Sudhakara 等人^[34]提出了势函数的其他形式。另外，Rezaee 等人^[35]用无 curl 向量场来表示斥力场。针对 APF 在动态环境下应用的不足之处，[36]进一步提出了增强无卷向量场的方法，用于改进传统人工势场法的斥力场表达。

参考文献:

- [1] M. Silvagni, A. Tonoli, E. Zenerino, and M. Chiaberge, “ Multipurpose UAV for search and rescue operations in mountain avalanche events,” *Geomatics, Natural Hazards Risk*, vol. 8, no. 1, pp. 18–33, 2017
- [2] E. Tuyishimire, A. Bagula, S. Rekhis, and N. Boudriga, “Cooperative data muling from ground sensors to base stations using UAVs,” in *Proc. IEEE Symp. Comput. Commun. (ISCC)*, Jul. 2017, pp. 35–41.
- [3] P. Liu et al., “A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering,” *Smart Struct. Syst*, vol. 13, no. 6, pp. 1065–1094, 2014
- [4] Y. Huang, S. J. Thomson, W. C. Hoffmann, Y. Lan, and B. K. Fritz, “Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management,” *Int. J. Agricult. Biol. Eng.*, vol. 6, no. 3, pp. 1–10, 2013
- [5] G. N. Fandetti, “Method of drone delivery using aircraft,” U.S. Patent 14 817 356, Feb. 9, 2017.
- [6] H. Menouar, I. Guvenc, K. Akkaya, A. S. Uluagac, A. Kadri, and A. Tuncer, “UAV-enabled intelligent transportation systems for the smart city: Applications and challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 3, pp. 22–28, Mar. 2017
- [7] C. C. Haddad and J. Gertler, “Homeland security: Unmanned aerial vehicles and border surveillance,” Library Congr., Washington, DC, USA, Tech. Rep., 2010.
- [8] P. Bupe, R. Haddad, and F. Rios-Gutierrez, “Relief and emergency communication network based on an autonomous decentralized UAV clustering network,” in *Proc. SoutheastCon*,

Apr. 2015, pp. 1–8.

[9] B. Saha et al., “Battery health management system for electric UAVs,” IEEE Aerosp. Conf., pp. 1–9, 2011.

[10] S. Park, L. Zhang, and S. Chakraborty, “Battery assignment and scheduling for drone delivery businesses,” in Proc. IEEE/ACM Int. Symp. Low Power Electron. Design (ISLPED), Jul. 2017, pp. 1–6.

[11] H. Pham, S. A. Smolka, S. D. Stoller, D. Phan, and J. Yang. (2015). “A survey on unmanned aerial vehicle collision avoidance systems.” [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1508.07723>

[12] M. H. Tareque, M. S. Hossain, and M. Atiquzzaman, “On the routing in flying ad hoc networks,” in Proc. Federated Conf. Comput. Sci. Inf. Syst. (FedCSIS), 2015, pp. 1–9.

[13] A. Y. Javaid, W. Sun, V. K. Devabhaktuni, and M. Alam, “Cyber security threat analysis and modeling of an unmanned aerial vehicle system,” in Proc. IEEE Conf. Technol. Homeland Secur. (HST), Nov. 2012, pp. 585–590

[14] Gageik, N., Benz, P., Sergio, M.: Obstacle detection and collision avoidance for a UAV with complementary low-cost sensors. IEEE Access 3, 599–609 (2015)

[15] Obstacle Detection and Avoidance System Based on Monocular Camera and Size Expansion Algorithm for UAVs

[16] Aguilar, Wilbert & Álvarez, Leandro & Grijalva, Santiago & Rojas, Israel. (2019). Monocular Vision-Based Dynamic Moving Obstacles Detection and Avoidance. 10.1007/978-3-030-27541-9_32.

[17] Dalal N, Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR 2005). IEEE, 2005:886~893.

[18] Girshick R, Donahue J, Darrell T, et al. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Computer Society, 2014: 580~587.

[19] Girshick R. Fast R-CNN[C]//IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE Computer Society, 2015: 1440~1448.

[20] Ren S, He K, Girshick R, et al. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks[C]//International Conference on Neural Information Processing Systems. MIT Press, 2015: 91~99.

[21] Redmon J, Divvala S, Girshick R, et al. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Computer Society, 2016: 779~788.

[22] Liu W, Anguelov D, Erhan D, et al. SSD: Single Shot MultiBox Detector[C]//European Conference on Computer Vision. Springer International Publishing, 2016: 6517~6525.

[23] Fu, C.; Olivares-Mendez, M.A.; Suarez-Fernandez, R.; Campoy, P. Monocular visual-inertial SLAM-based collision avoidance strategy for fail-safe UAV using fuzzy logic controllers. J. Intell. Robot. Syst. 2014, 73, 513–533, doi:10.1007/s10846-013-9918-3

[24] LaValle, S. M., Planning algorithms, Cambridge university press, 2006.

[25] Ge, S. S., and Cui, Y. J., “Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method,” Autonomous robots, Vol. 13, No. 3, 2002, pp. 207–222.

[26] Khatib, O., “Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots,” Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, IEEE, 1985, pp. 500–505

- [27] Gao, X., Wu, H., Zhai, L., Sun, H., Jia, Q., Wang, Y., and Wu, L., “A Rapidly Exploring Random Tree Optimization Algorithm for Space Robotic Manipulators Guided By Obstacle Avoidance Independent Potential Field,” *International Journal of Advanced Robotics Systems*, Vol. 15, No. 3, 2018, pp. 1–17
- [28] Xinyu, W., “Bidirectional Potential Guided RRT * for Motion Planning,” *IEEE Access*, Vol. 7, 2019, pp. 95046–95057.
- [29] Wang, M., Su, Z., Tu, D., and Lu, X., “A Hybrid Algorithm Based on Artificial Potential Field and BUG for Path Planning of Mobile Robot,” *2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control*, 2013, pp. 1393–1398
- [30] Ahmed, A. A., and Abed, A. A., “Path Planning of Mobile Robot by using Modified Optimized Potential Field Method,” *International Journal of Computer Applications*, Vol. 113, No. 4, 2015, pp. 6–10.
- [31] Sun, J., Tang, J., and Lao, S., “Collision avoidance for cooperative UAVs with optimized artificial potential field algorithm,” *IEEE Access*, Vol. 5, 2017, pp. 18382–18390
- [32] Triharminto, H., Wahyunggoro, O., Adji, T., Cahyadi, A., and Ardiyanto, I., “A novel of repulsive function on artificial potential field for robot path planning,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 6, No. 6, 2016, p. 3262
- [33] Weerakoon, T., Ishii, K., and Nassiraei, A. A. F., “An artificial potential field based mobile robot navigation method to prevent from deadlock,” *Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*, Vol. 5, No. 3, 2015, pp. 189–203
- [34] Sudhakara, P., Ganapathy, V., Priyadharshini, B., and Sundaran, K., “Obstacle Avoidance and Navigation Planning of a Wheeled Mobile Robot using Amended Artificial Potential Field Method,” *International Conference on Robotics and Smart Manufacturing*, Vol. 133, Elsevier B.V., 2018, pp. 998–1004. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.076>.
- [35] Rezaee, H., and Abdollahi, F., “Adaptive artificial potential field approach for obstacle avoidance of unmanned aircrafts,” *2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, IEEE, 2012, pp. 1–6
- [36] Choi, Daegyun & Lee, Kyuman & Kim, Donghoon. (2020). Enhanced Potential Field-Based Collision Avoidance for Unmanned Aerial Vehicles in a Dynamic Environment. 10.2514/6.2020-0487.

3.4 技术途径与可行性分析

3.4.1 无人机平台概述

课题组拟采用基于机器视觉的无人机自主导航实验平台，集无人机、单目或双目视觉和视觉处理板于一体，形成完整的无人机飞控、通讯链路、视觉图像采集和姿态解算过程的解决方案。

该平台支持飞控体系数学仿真实验、台架试验、实物飞行实验，也包含模型编译下载、数据监控及记录处理的工具软件，能够提供满足自主导航避障算法研究所需的全系统全功能开发测试环境，帮助课题组成员快速熟悉整套控制系统设计流程，协助团队更好的紧跟行业发展方向，发掘专业潜能，专注于研究工作。

3.4.2 整体方案

基于机器视觉的无人机自主导航避障实验平台硬件主要由基本的开发主机、无人机系统、机载视觉系统、机载图像处理板、及其他配件等组成。其系统组成架构如下所示。

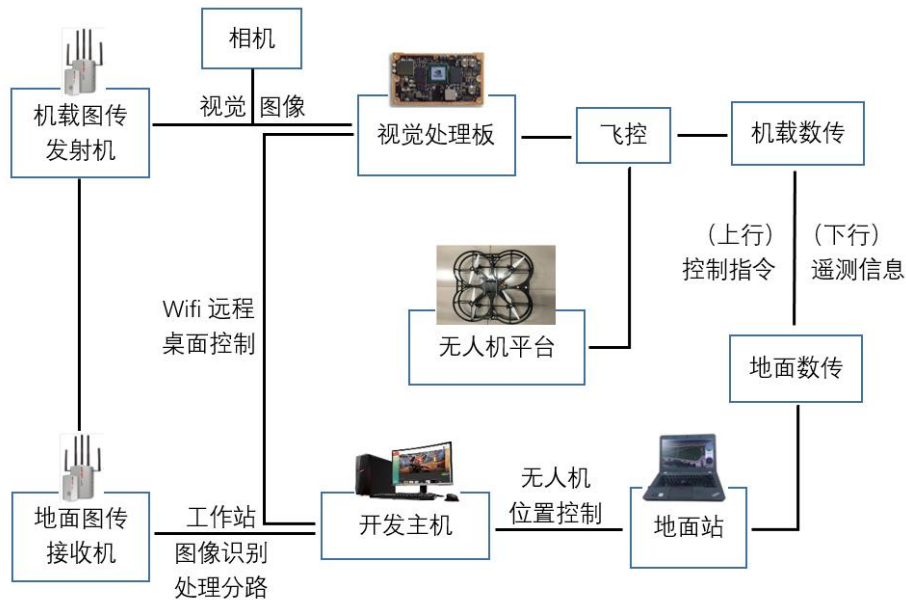


图 3-10 无人机平台系统组成架构

接下来是各部分的介绍。

1) 开发主机

开发主机是前期的视觉系统控制平台，主要用于单双目视觉目标识别训练系统开发使用，可以结合图传数传信息，配合相关仿真软件实现无人机启停控制，在线监控、数据后处理、各类仪表检测、三维视景显示等功能。当主机中 MATLAB 环境下成功进行飞控算法设计后，将生成的 C 语言代码部署到机载图像处理板上运行，最终实现自主控制。

2) 无人机系统

无人机系统由四旋翼无人机和支撑用实验台架组成。无人机自重 1kg 左右,且满足有效载荷不小于 0.5kg。飞行稳定,最高飞行速度不小于 20m/s。该无人机既可以通过万向节与台架连接,使用直流电源持续供电,完成模拟实验,也可以脱离台架进行一定续航时间的实际飞行实验。无人机支持串口、USB 接口、网络通讯等多种通讯控制接口控制,可搭载激光或光流传感器等多种传感器模块,以满足研究系统需要,适应各种实际应用环境。

3) 机载视觉系统

机载视觉系统包含单目或双目摄像头和图传系统。将多个摄像头固定于无人机底部，实时采集无人机工作过程中拍摄的图像信息，发送至机载图像处理板进行相关的 SLAM 和避障等计算，或下传至地面图传接收机，由开发主机处理。如采用单目摄像头，则对摄像机标定要求较高且需尽量减小镜头畸变，先结合障碍物的体积大小计算位置信息，再完成剩余的图像信息处理。如采用双目摄像头，则可直接实时获取深度信息，计算得到点云图像。且镜头内置 IMU 六轴传感器，与图像同步精度高达 0.05ms，依据姿态测量原理，将集成传感器的原始测值经模块内置姿态计算方法计算后得到新的飞行器姿态（滚转、俯仰、偏航角）测值，为 SLAM 算法及空间移动算法的研发提供数据校正。

视觉系统配备的 Global shutter CMOS 图像传感器，型号为 SC130GS。最高支持 1280H*1024V，240fps 的传输速率。可输出黑白 RAW/RGB 图像，有效像素窗口为 1288H*1032V，支持复杂的片上操作——例如 HDR 模式、支持外触发全局曝光模式、窗口化、水平镜像、垂直倒置等。内置温度传感器，具有低功耗（Max: 340mW）、高动态输出、高光敏度、消除帧间闪烁等特性。SC130GS 可以通过标准的 SPI 及 I2C 接口进行配置。SC130GS 可以通过 Trigger0 引脚实现外部控制曝光及多 sensor 同步。

4) 机载图像处理板

后期控制平台，于机载端进行进一步图像处理。是集深度学习、计算机视觉、图像处理和 GPU 计算于一体的目标检测算法运行板，集成一个超高运算速度 GPU 和一个处理器集群。

5) 其他可选配件

平台采用模块化的硬件设计，以及完整的底层软件驱动代码，可根据实验需要方便配备，供学生进行二次开发。如超声波模块和单点激光模块进行距离测试，检测无人机高度和附近障碍；光流模块进行光流速度测量，增强无人机定点飞行稳定能力；GPS 模块（较低精度，1m 左右）和 RTK 模块（较高精度，厘米级）进行室外位置控制；UMB 定位系统（较低精度，厘米级）和室内光学定位系统（较高精度，毫米级）进行室内定位。

可选配件还包括 VR 眼镜，可将图传系统提供的图像进行 3 维显示（存在一定显示延迟）。

3.4.3 软件开发与技术支持

1) 基于机器视觉的无人机自主导航避障实验平台软件开发体系

基于机器视觉的无人机自主导航避障实验平台软件开发体系由视觉开发平台、信息交互与任务控制平台、无人机系统等组成。视觉开发平台由视觉开发训练环境、视觉处理开发系统、视觉定位平台、环境重建系统等组成。信息交互与任务控制平台由信息交互程序、避障与路径规划算法、无人机位置导航控制程序等组成。开发体系示意图如下所示。

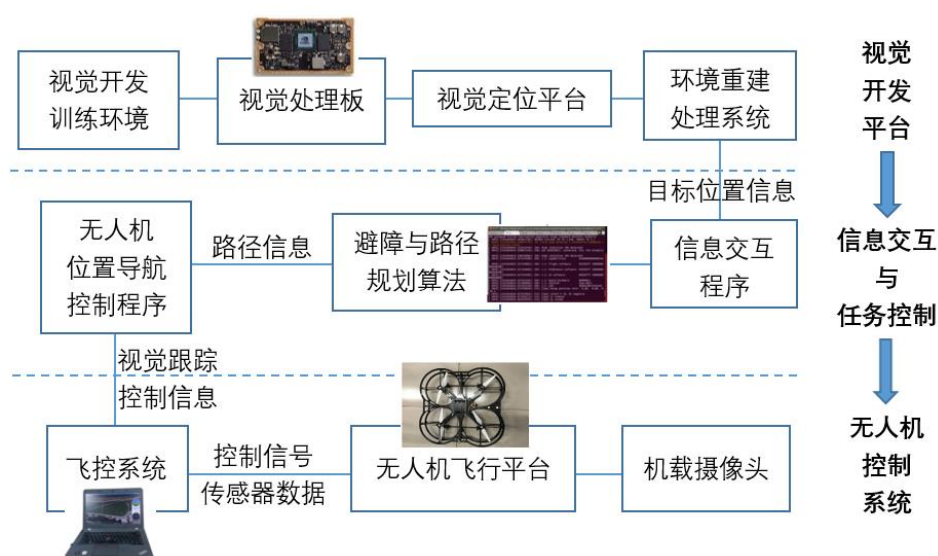


图 3-11 无人机平台开发体系

视觉开发平台通过信息交互与任务控制来改变无人机的飞行状态，即利用摄像头采集的图像信息，通过立体匹配技术计算出二维图像的深度信息，同时利用视觉惯性融合技术估计相机自身的运动姿态，结合深度信息，重建空间环境的体素地图。由地图获取障碍物距离信息，生成可执行路径。

2) 技术服务

该开发体系可提供全套基于机器视觉的无人机自主导航避障实验平台软件，开发环境包含视觉端、消息收发、飞控开发环境。

相关软件源代码包含视觉端程序、无人机位置控制和位置估计程序、消息收发层程序、任务层程序等。

视觉端程序中主要步骤包含构造深度图、运动估计、环境重建、航迹规划等，具体过程如下：

构造深度图，以一种双目立体视觉系统为例，获取图像的深度图，运用基于

立体匹配的生成概率模型 ELAS 立体视觉算法，可快速匹配高分辨率图像。在双目立体图像间建立点对点应然后根据对应点的视差计算出深度。用左右图像的互相推测，来执行左右一致性检查，消除遮挡区域中的虚假不匹配和视差。

运动估计，主要用于计算每帧图像无人机的位姿。通过滑动窗口优化进行实时光流点跟踪与匹配，视觉和 IMU 的紧耦合。通过稀疏特征点提取与跟踪、IMU 预积分与初始化处理、KLT 光流法进行后端融合优化、利用共视的特征点进行闭环检测等步骤，完成利用视觉惯导融合的定位算法，实现无人机的精确定位。

环境重建，主要实现单帧深度图融合，重建出无人机的环境。例如，可采用在线实时动态增量式生成 ESDF 算法。ESDF 是基于体素网格的方法，每个点包含了该点到最近障碍物的欧几里得距离。在计算机图形和视觉应用中，TSDF 近来已经成为一种常用的隐函数表面表示方法。因为 TSDF 的快速重建和过滤传感器噪声，并且可以使用子体素分辨率创建人类可读的地图网格。

航迹规划，根据传感器的信息来不断地更新其内部的环境信息，从而确定出机器人在该环境地图中的当前位置，以及周围局部范围内的障碍物分布情况，并在此基础上，规划出一条从当前点到某一子目标点的躲避障碍物碰撞的最优路径。

无人机位置估计程序与位置控制程序，代替了飞控系统中位置控制程序的一部分功能，然后在这个基础上借助命令发布这个话题给上层应用提供了接口，便于上层开发。位置估计作为飞控系统的位置姿态状态估计，将位姿信息转成飞控能够使用的类型发送给飞控系统进行解算。

消息收发层程序属于底层程序，可利用类似 Mavros 程序来完成，负责将飞控系统发来的 mavlink 消息转换为 ros 中的话题，为上层的程序提供消息订阅，将任务层发出的 ros 话题转换为 mavlink 消息发送给飞控系统。

任务层程序，无人机基本动作控制程序：一键起飞、降落、悬停、紧急上锁、惯性系及机体系下的控制指令等无人机自主控制程序。另外还可使用一些组合功能控制程序，主要包括自主着陆、自主跟踪、路径自主规划等无人机自主复杂功能控制程序。

3.4.4 平台设备组成

表 3-1 视觉障碍导航无人机开发平台系统组成

系统组成	说明
------	----

无人机系统	1	数传模块	WiFi 数传
	2	多旋翼无人机	含遥控器动力系统及实验台架
	3	飞控计算机	集成信号接收模块及姿态、空速传感器
机载视觉系统	1	机载视觉摄像头	单目/双目相机
	2	图传系统	包括机载端和地面端
	3	视觉处理板	型号未定
地面控制系统	1	多旋翼控制地面站	笔记本
	2	基于机器视觉的自主导航开发工作站	工控机
	3	高速无线路由器	无线路由器
系统软件	1	地面控制软件	未定
	2	自主导航避障开发系统	定制
	3	多旋翼控制系统	定制

3.5 拟提交成果

本项目在短时运动目标高速检测、深度神经网络边缘计算与硬件加速的关键技术和算法成果的基础进行创新性研究，实现学术产出。由相关领域研究人员将成果计划发表在国际高水平学术期刊和国际会议上，计划发表学术论文 ≥ 6 篇；申请国家发明专利 ≥ 5 项。

在无人机避障技术的最终产出上，本项目的拟提交成果包括：

- 1) 具有产品化前景的“运动检测”事件传感器开发；
- 2) 在商用低成本四旋翼无人机开放平台上实现避障飞控子系统的开发集成；
- 3) 搭载“运动检测”事件传感器和避障飞控子系统的无人机能够通过避障实验。三项成果均需符合预期指标的要求。

3.6 需求与指标预期实现情况

1、经济指标

1) 技术成果应用于无人机避障技术的研发和生产流程，团队有良好的产业合作基础，技术成果可以向企业转化；2) 与超过 5 家的国内的无人机相关企业建立战略合作关系，推动无人机相关避障技术的建设和行业标准制定。

2、学术指标

本项目基于短时运动目标高速检测关键技术和算法成果基础，能通过在空中飞行过程中成功躲避运动障碍物模拟考核，团队成员分别在相关领域具有较高研究水平。成果计划发表在国际顶级学术期刊和国际会议上，计划发表学术论文 ≥ 6 篇；申请国家发明专利 ≥ 5 项。

3、技术指标

1) 实现具有产品化前景的“运动检测”事件传感器开发，对运动目标的视觉检测响应时间不大于 10 毫秒；

2) 在商用低成本四旋翼无人机开放平台上实现避障飞控子系统的开发集成，实现飞行速度不小于 20 米每秒，有效载荷不小于 0.5 公斤；

3) 模拟运动障碍物体积 3 到 10 立方分米，从 3 米外任意方向以速度 20 米每秒速度靠近，完成不少于 200 次躲避实验，无人机躲避成功率不低于 90%。

四、经费需求概算

序号	科目名称	分系统	预算金额 (单位:万,人民币)	备注
(一) 直接费用			81	
1	设备费		0	
2	材料费		26	
3	外部协作费		11	
4	燃料动力费		4	
5	会议、差旅、国际合作与交流费		2	
6	出版、文献、信息传播、知识产权事务费		0	
7	劳务费		35	
8	专家咨询费		3	
9	其他支出		0	
(二) 间接费用			16	
合计(直接费用+间接费用)			97	

五、课题管理模式

5.1 组织管理方式

(1) 课题及任务的内部组织管理方式

本课题组织管理实行课题负责人负责制。课题负责人对课题的实施过程进行指导、协调和管理，负责整个课题的研究进程并根据项目分工的实际情况安排课题经费。每个参与成员有具体明确的分工，课题推进过程实现各个环节优势互补。

(2) 课题及分任务的协调机制

课题负责人和各分任务负责人组成项目协调小组，每月定期召开协调小组例会，讨论项目及课题具体事宜，确保项目及课题顺利实施。课题组内部每月召开两次例会，讨论协调课题内部事宜，确保课题顺利实施；同时项目组组织召开总结讨论会，回顾已完成研究并安排下一阶段工作细节，讨论协调项目内部各项事宜，确保项目节点计划顺利实施。

5.2 项目实施的组织

本课题申请单位为清华大学深圳国际研究生院，课题负责人在项目实施过程中全程监督和调控：

(1)加强项目管理，科学组织规划

课题负责人在项目申请单位的配合下，按照统筹规划、整体安排、联动实施的原则，组织课题任务分工，协作研究等工作，并定期检查研究工作的进展，确保整个项目的顺利实施。

(2)明确任务，定期检查

参与课题研究的人员需明确项目任务、进度和责任，按照课题的节点计划，定期进行自我检查，并制定科学的评价指标体系，实时动态汇报项目完成情况，及时解决出现的问题，确保按计划高质量地完成各子目标任务，及保证总体目标的实现。项目实施的资金预算严格遵守国家相关部门资金使用规定。

5.3 项目实施的政策

本项目申请单位为清华大学深圳国际研究生院，对项目研究人员的考核与激励、仪器设备购置和维护、科研环境改善、后勤保障等方面给予强有力的支持，以保证课题负责人及其研究队伍的稳定，保障研究课题实施所需的条件，确保本课题的顺利进行。

5.4 资源支撑条件

根据本课题的特点，课题实施中将充分发挥清华大学深圳国际研究生院牵头单位的作用，做好项目的总体规划。合理确定项目发展的方向、重点和目标，科学制定项目研发的具体任务、步骤和策略。整合优质资源，根据项目实施的需要，

统一调配单位和项目团队的人力和设备条件，集中优势力量和配套条件进行扶持，以确保科研任务的顺利完成。

六、成果转化预期

本项目实施重点是以课题组在高速机器视觉方面科研基础，及与国内专业公司团队的已有合作基础为依托，由项目牵头单位清华大学深圳国际研究生院组织项目实施和管理。计划在图像传感器芯片方面，继续与思特威（上海）电子科技有限公司、重庆信络威科技有限公司的开展合作，确保项目的实施和研发工作顺利完成。

七、其他

7.1 现有工作基础和条件

7.1.1 申请单位简介

本项目由清华大学深圳国际研究生院主导申请，由张盛博士负责组织项目申报、项目研发等工作。清华大学深圳国际研究生院是清华大学与深圳市合作共建的公立研究生教育机构，主要在医药健康、信息科技、集成电路、能源材料等领域布局清华大学一流的工科学科并辅以创新管理。

院里已建成一批国家级、省部级重点实验室分室或分中心，深圳市重点科研机构，与海外高校建立的联合实验室，省部产学研联盟和一些校企合作科研基地。

7.1.2 团队实验室介绍——先进传感器件与集成系统重点实验室

清华大学深圳国际研究生院先进传感器件与集成系统重点实验室团队共有 44 人，其中教授 2 人、副教授 3 人、讲师及博士后 5 人，在培研究生 34 人（3 名博士生，31 名硕士生）。实验室组建至今，团队已培养 30 余名优秀毕业生，包括 3 名博士和 30 余名硕士。已发表高水平论文超过 43 篇，其中包括 21 篇 SCI 收录论文和 22 篇 EI 收录的论文。此外，团队申请专利 20 余项，内容涉及传感器件、通信系统、CMOS 工艺及片上信息处理系统等领域。实验室以服务先进传感领域的国家重大战略需求、探索微电子科学与技术领域前沿重要学术问题为自主创新研究的重点，以培养拔尖创新人才为核心，面向环境、工业、汽车、交通、军事、安全、健康、医疗、消费电子等领域，研究和开发新型高性能先进传感器件和应用系统，在新型微纳米材料、创新性器件和集成系统技术等方面开展具有

国际影响力的工作。

实验室团队与意法半导体深圳研发中心、亚太区总部有长达 12 年的合作，双方在 MEMS 传感器及其应用、通信系统、室内外定位辅助系统等方面开展科研和产业合作；团队与桑达电子集团签署了战略合作协议，共同在电子产品生产、研发方面开展项目合作；团队与深圳国民技术、华北工控、迈瑞等知名企业开展了多种形式的科研合作，并签署了横向合作项目。此外，项目组与 SmartSens 美国研发中心资深专家也保持着良好的沟通和合作，和美国爱荷华州立大学传感器件研究中心有良好的沟通，能够进一步为本项目的国际化合作和成果推广提供良好的基础条件，促进成果在国际同行中的影响力和产业合作高度。

7.1.3 团队前期研发成果

团队前期在传感器与材料相关领域研发成果如下：

1) 在图像传感领域与江苏思特威公司合作，共同研制 SC1145, SC2045, SC2135, SC3035 等 CMOS 图像传感芯片，同时设计了一种低照度图像增强算法，可以从噪声源头建模进行噪声滤除，提高图像质量，可以为低光照强度的荧光检测提供指导，项目负责人带领完成的像素读取电路、高速 ADC 电路等关键技术，已经在相关图像传感器芯片中得到了广泛应用，形成了年超过 5000 万颗图像传感器芯片的市场影响力。

2) 研究石墨烯薄膜材料，用于红外探测传感器，获得柔性聚合物、导电碳材料复合物的制备工艺方法。完成情况：已完成石墨烯薄膜材料的研究工作，获得大面积、均匀、高质量的石墨烯材料，并用于红外探测等传感器的研制，相关技术应用了硅材料相关的加工技术，对于在图像传感器芯片硅结构刻蚀微阱结构等关键问题具有借鉴意义。

3) 研究获得基于石墨烯的新型红外传感器，针对健康监护应用，基于柔性复合材料的电阻式测试，研制出新型可穿戴式脉搏检测传感器，检测精度优于 ± 4 次/分钟。完成情况：已完成柔性聚合物、导电碳材料复合物等新型材料的敏感机理与工艺方法的研究工作，并应用于可穿戴式压力传感器等的研制。

4) 深圳市先进传感器件与集成系统重点实验室在 DNA 测序专用图像传感器芯片方面具备独有的技术基础，由多名交叉学科的优秀中青年学术骨干构成，在生物检测、芯片设计与系统集成、微流控结构等方面开展交叉科研和攻关。研究团队正在开展的“面向 DNA 测序的图像传感器芯片技术攻关”项目取得了初步

进展，项目组设计了有针对性的图像传感器芯片，研究了光导显微结构、单分子荧光检测图像传感器像素结构，正在申报专利，并已经初步完成用于荧光检测的 CMOS 专用图像传感器芯片的结构设计，计划在 2020 年进行第一次流片。

7.1.4 仪器设备情况说明

本项目主要涉及 MEMS 工艺器件材料、图像传感器芯片电路设计等多个领域的前沿研究，需要更多的仪器设备支持。课题组主要成员来自图像传感器设计、MEMS 工艺器件等多个领域，能够为本项目的开展提供充分的实验条件和设备支撑。器件材料、图像传感器芯片研究相应仪器设备：

应用中的仪器设备有高速示波器、频谱仪、网络分析仪、噪声指数分析仪、SUN880 服务器以及 ARM 开发系统、40G 采样速率示波器/频谱仪等高性能调试设备，能够为后续项目开发提供充足的实验室环境。在此基础上，采购了面向器件测试的半导体测试仪和设备，能够用于本项目的测试和演示系统开发工作。

主要设备及开发环境介绍如下：

1) 半导体测试仪：型号 4200-SCS，用于实验室级的器件直流参数测试、实时绘图与分析，具有高精度和亚 fA 级的分辨率。它用户可以更快地开始分析测试结果。其它一些特征使得应力测量功能能够满足各种可靠性测试的需求。

2) 低温真空探针：型号 CG-196，用于测试半导体器件的电学特性，主要应用于半导体行业、光电行业、集成电路以及封装的测试。广泛应用于复杂、高速器件的精密电气测量的研发，旨在确保质量及可靠性，并缩减研发时间和器件制造工艺的成本。

3) 视频演示开发系统，型号 POE HA-786，高清网络摄像机产品基于嵌入式 Linux 操作系统，采用低照度 CMOS 图像传感器，支持 720P/960P/1080P 高清视频。

4) 光学隔振平台：型号 OTP12-08，为卓立汉光自行生产的标准阻尼隔振光学平台，整体高度 800mm，分为台面和支架两部分。符合国家标准（GB/T 20029-2005）要求的标准阻尼隔振垫，具有更好的隔振性能。

5) Omni- λ 光栅光谱仪：型号 Omni- λ 3007，150mm、300mm 等多种焦距可选，适应不同光谱带宽需求；光学结构采用经典的 C-T 结构；多光栅塔台设计，更好的发挥了仪器覆盖 UV-VIS-IR 全波段光谱范围的优势，并可根据需要灵活选择光谱范围和分辨率；可与卓立光源、探测器（单点探测器和阵列 CCD 等）自由组合搭建，提出任意光谱系统解决方案，如荧光、拉曼、透射/反射、吸收光

谱及光源发射光谱系统等。有可选部件如自动滤光片轮、电子快门、自动狭缝。

6) GPU 服务器设备：平台 1 的配置为包括 3 台服务器主机（每台主机配置 2 颗主频为 2.1GHz 的 Inter(R) Xeon(R) Processor E5-2620V4 CPU, 4×32GB 内存，8 块 GTX1080Ti NVIDIA 芯片/GPU 处理器，11GB 内存），主机间用千兆以太网连接，总内存 384G, 总显存 264G。两台服务器为 64 位 Linux 操作系统(Ubuntu)，搭载 Matlab, Visual studio, Python, Open CV 等开发环境，配备了 Tensor Flow, Caffe, Keras 等深度学习库。平台 2 配置为：30 个计算节点（曙光 TC2600 刀片服务器，每节点具有 2 颗主频为 2.0 GHz 的 4 核 AMD Opteron 2350 处理器，8GB 内存），1 个管理 I/O 复用节点（曙光 A650r-FX 服务器，2 颗主频为 2.0GHz 的 4 核 AMD Opteraon 2350 处理器，16G 内存，2X146G+6X300G SAS 热插拔硬盘），计算节点之间采用千兆高速网络连接。平台的总内存为 240GB，理论运算峰值为 2.0T Flops。软件配置：该计算平台提供基于 Linux 系统的计算服务，现已安装了以下软件：编译器（GNU C/C++编译器、GNU Fortran77/99 编译器、Intel 编译器等）并行编译环境（Open MPI、MPICH2、）以及 Gauss 03、FLUENT、ANSYS 等开源或试商用软件。

7.1.5 正在承担和参与的科研项目情况

序号	项目来源	类别	项目名称	起止时间	状态	承担方式
1	深圳市科技创新委员会	深圳市科技创新委员会	面向 DNA 测序的全局曝光 CMOS 图像传感器关键技术研究	2019.3~2022.3	在研	主持
2	重庆市科技局	重庆市集成电路重点攻关项目	用于智能仪器的高精度低功耗仪表放大器的研究	2018.11~2021.11	在研	参与

7.1.6 完成国家、省、市科技计划项目情况

序号	项目来源	类别	项目名称	起止时间	状态	承担方式
1	广东省科技厅	广东省协同创新与平台环境建设专项	嵌入式云存储核心关键技术研发及产业化	2016.7~2016.12	结题	主持

2	科技部	国家 863 项目	载波体制超宽带高速无线通信芯片研发与应用	2011.1~2013.12	结题	参与
3	深圳市科技创新委员会	深圳市基础学科布局项目	体内植入微型图像传感器关键理论与技术研究	2015.12~2018.12	结题	参与
4	广东省科技厅	广东省教育部产学研合作项目	基于物联网技术配电线路智能在线监测入预警	2012.3~2014.3	结题	参与
5	科技部	国家 863 项目	超宽带 SoC 芯片设计及组网试验	2008.10~2009.10	结题	参与

7.2 研究团队

7.2.1 课题负责人

张盛，清华大学深圳国际研究生院重点实验室常务副主任，硕士研究生导师/副教授

(1) 教育经历：

1999/09-2004/07，清华大学，微电子研究所，博士；

1994/09-1999/07，清华大学，电子工程系，本科；

(2) 工作经历：

2007/08-至今，清华大学深圳国际研究生院，副教授；

2004/08-2007/07，清华大学，航天航空学院，助理研究员；

(3) 研究领域：

主要从事图像传感器件及应用、传感器件材料与先进加工工艺、传感信息处理、嵌入式微处理器、分布式网络、宽带无线通信等领域，并形成了丰富的学术成果。目前，科研工作与系统创新和器件创新相结合，专注于先进传感器件工艺材料、传感信息处理、芯片集成和分布式网络领域，最新科研工作包括 CMOS 图像传感器及机器视觉芯片、MicroLED 显示工艺与驱动芯片、分布式嵌入式云存储（DECS）与区块链技术、运动行为感知算法与模块集成四个方向。获得国内发明专利十余项、美国发明专利两项，在国际会议及期刊发表论文四十余篇。

(4) 主持或参加科研项目（课题）及人才计划项目情况：

① 主持重庆高新区-清华大学合作项目即“清研微电子研究中心”，2017/07-2023/06，经费 1100 万元，在研；

② 主持企业横向委托项目—CMOS 图像传感器芯片及应用技术研究，2016/02-2019/01，经费 200 万元，在研；

③ 主持广东省协同创新与平台环境建设专项，嵌入式云存储核心关键技术研发及产业化，2016/07~2016/12，经费 60 万元，已结题；

④ 参与深圳市创新环境建设项目，先进传感器件与集成系统重点实验室，任常务副主任，2014/07-2016/02，经费 300 万元，已结题。

(5) 代表性论文：

① Pengyu Liu, He Xu, Mengyun Yi and **Sheng Zhang***. Novel method to optimize the column random telegraph signal performance in CMOS image sensor.IEICE Electronics Express (ELEX), 2019, DOI: 10.1587/elex.16.20190118.

② Pengyu Liu, **Sheng Zhang*** and Wenli Shen.A novel method to test and optimize the periphery crosstalk in CMOS image sensor.IEICE Electronics Express (ELEX),Vol.17, No.3, 1–6, 2020.

③ Wu M, **Zhang S***, Dong Y. A Novel Model-Based Driving Behavior Recognition System Using Motion Sensors[J]. Sensors, 2016, 16(10):1746.

④ P. Z. Shao, H. M. Zhao, H. W. Cao, X. F. Wang, Y. Pang, Y. X. Li, N. Q. Deng, J. Zhang, G. Y. Zhang, Y. Yang, **S. Zhang***, and T. L. Ren*. Enhancement of carrier mobility in MoS₂ field effect transistors by a SiO₂ protective layer[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(20):10451-10453.

⑤ **Zhang S***, Zhang S, Cheng H, Jiang C. Synthesis of High Dynamic Range Image Based on Logarithm Intensity Mapping Function[J]. 2015, 9219:430-443.

⑥ **Zhang S***, Bai W. Single Image Dehazing based on Dark Channel Prior with Different Atmospheric Light[C]// International Conference on Computer Vision Theory and Applications. 2017:224-229. Porto, Portugal.

⑦ **Zhang S***, Wu Y. An Embedded Cloud scheme for nonhomologous applications in Internet of Things[C]// IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science. IEEE, 2017:94-97. Beijing, China.

⑧ **Zhang S***, Chen N, Lin M. A sub-GHz high data-rate transceiver for wireless sensor network in IoT[C]// International Symposium on Next-Generation Electronics. 2016:1-2. Taiwan.

⑨ **Zhang S***, Wu Y, Wang Y. An embedded Node Operating System for real-time information interaction in Vehicle-to-Vehicle communication[C]// IEEE, International Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2016:887-892. Rio de Janeiro, Brazil.

⑩ **Zhang S***, Pang J, Chen H, et al. A layered tone-mapping operator based on contrast enhanced adaptive histogram equalization[C]// Ieee/acis International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, NETWORKING and Parallel/distributed Computing. IEEE, 2016:237-242. Shanghai, China.

⑪ **Sheng Z***, Chen H, Jiang C, S Zhang. An adaptive time window method for

human activity recognition[C]// Electrical and Computer Engineering. IEEE, 2015:1188-1192. Halifax, Canada.

(6) 主要专利:

- ① 一种图像检测与跟踪并行协同工作的方法和装置, 授权公告日 2018.02.09
- ② 卷积核堆积数据流、压缩编码以及深度学习算法, 授权公告日 2018.08.17;
- ③ 一种高动态范围图像分层压缩方法, 授权公告是 2017.05.31;
- ④ 一种人体活动的特征提取方法, 授权公告日 2017.01.04,;
- ⑤ 一种基于 MEMS 传感器的运动跟踪系统及方法, 授权公告日 2015.08.05;
- ⑥ 一种简化的集成运动传感器的驾驶行为分析装置, 授权公告日 2017.03.29;
- ⑦ 一种基于给定物理模型的汽车运动状态识别方法及系统, 授权公告日 2019.07.05;
- ⑧ 基于无线 HART 和电力线通信的用电终端设备及系统, 授权公告日 2014.10.22;
- ⑨ 电力线通信方法及其帧响应和装置, 授权公告日 2014.09.10。
- ⑩ 基于操作控制单元的跨协议分布式云存储系统和数据管理方法, 授权公告日 2017.08.08;

7.2.2 重要参与者

1、孙万虎, 清华大学深圳国际研究生院, 在读硕士

(1) 教育经历

2013-2017: 北京交通大学通信工程, 学士

2018-至今: 清华深圳研究生院电子与通信工程, 硕士

(2) 研究方向:

计算机视觉方向, 主要是目标检测、物体位置估计和图像处理。

(3) 参与课题:

- 1) 汽车自动加油项目, 油口的视觉检测任务
- 2) 车辆结构化信息检测课题
- 3) 基于 RGB 图像关键点检测的物体位姿估计算法研究与实现课题

2、周茂林, 清华大学深圳国际研究生院, 在读硕士

(1) 教育经历

2015.9—2016.6 清华大学 电子科学与技术学 学士

2019.9—至今 清华深圳国际研究生院 电子与通信工程，硕士

(2) 研究方向：

计算机视觉方向，主要是三维语义重建

(3) 参与课题：

1) 室内场景的实时 3D 场景重建和还原

2) 自由空间的可见光通信

(4) 获奖情况

2016 获综合优秀奖学金

2016 获国家励志奖学金

2017 清华之友—渠玉芝奖学金

3、刘芃宇，清华大学深圳国际研究生院，在读博士

(1) 教育经历

2012.9—2016.6 清华大学 电子科学与技术学 学士

2016.9—至今 清华大学深圳国际研究生院 电子科学与技术 在读博士

(2) 主要论文

① Pengyu Liu, He Xu, Mengyun Yi and Sheng Zhang, “Novel method to optimize the column random telegraph signal performance in CMOS image sensor”, IEICE Electronics Express (ELEX), 2019, DOI: 10.1587/elex.16.20190118

② Pengyu Liu, Sheng Zhang and Wenli Shen, “A novel method to test and optimize the periphery crosstalk in CMOS image sensor”, IEICE Electronics Express (ELEX), 2020

(3) 主要项目经历

① 参与“面向 DNA 测序的全局曝光 CMOS 图像传感器关键技术研究”

② 参与图像传感器 column-RTS 及边缘 crosstalk 内容研究，并发表 2 篇 SCI 论文

(4) 获奖情况

2014 获综合优秀奖学金

2016 被评为“清华大学优良毕业生”

2019 获院系二等奖学金

4、吴正中，清华大学深圳国际研究生院，实验员

(1) 教育经历

2003/9-2007/7，西安电子科技大学，微电子学，本科

2015/9-2018/6，清华大学，电子系，电子与通信工程专业，硕士

(2) 工作经历

从事集成电路研发工作 10 余年，先后在华润半导体，深圳远望谷，深圳环宇晶点，清华大学深圳国际研究生院工作。

(3) 主要项目经历

研究方向为模拟、数模混合集成电路设计。参与的项目有带 LCD 驱动的 MCU 研发，RFID 芯片基带电路设计研发；STN-LCD/LED/EPAPER 驱动芯片的研发。熟悉精通研发流程、工具和原理；独立完成 LCD 驱动芯片的数字电路的前端、后端设计，并且负责芯片模拟电路的模块设计仿真和整体顶层仿真。参与设计芯片均量产，为企业带来巨大的市场收益。

项目简介：

2014-2015 年，工程用计算机 LCD 驱动芯片开发项目，项目来源：德州仪器；

2015-2016 年，超省电系列 LCD 驱动芯片开发项目，项目来源：精电科技(Varitronix)、光联科技(URT) 等；

2016-2017 年，电子书显示驱动芯片项目，项目来源：奥翼电子；

2017-2018 年，具有温度补偿低功耗 LCD 驱动芯片关键技术研究实现，项目来源：环宇晶点、清华大学；

2018 年，三通道 LED 驱动芯片研发，项目来源：智观电子；

2018 年，降压式 DCDC 电源管理芯片研发，项目来源：泓微电子。

(4) 主要论文

① 吴正中,幸新鹏,张盛.“基于正交矩阵的 8 行寻址 LCD 驱动电路”,微电子学, 2018(2).