



---

# 多旋翼飞行器设计与控制

## 第十五讲 展望

全权 副教授

qq\_buaa@buaa.edu.cn

自动化科学与电气工程学院

北京航空航天大学



# 东方智慧



## 古代直升飞机



# 核心问题

---

多旋翼飞行器的该何去何从?



# 大纲

---

1. 新技术展望
2. 需求和技术创新方向
3. 风险分析
4. 机遇和挑战



# 1.新技术展望





# 1.新技术展望

## □ 动力技术

(1) 新型电池。来自加拿大蒙特利尔的EnergyOr技术有限公司报道采用燃料电池的四旋翼进行了3小时43分钟续航飞行。此外，石墨烯、铝空气电池、纳米点电池这三项电池技术有望成为未来电池世界的希望。人们对这些新的电池技术有着十分迫切的需求。它们将首先会被应用到手机和电动汽车，随后可配备于多旋翼。



采用燃料电池的EnergyOr四旋翼



EnergyOr燃料电池



# 1.新技术展望

## □ 动力技术

(2) 混合动力。2015年，美国初创公司Top Flight Technologies报道自己开发混合动力六旋翼。该六旋翼仅需要1加仑汽油，便可以飞行两个半小时，约160公里的距离，最高负重达约9公斤。另外，一家来自德国的公司Airstier推出了一款多旋翼。该多旋翼采用油电混合动力，有效载荷5公斤，可飞行1个小时。



Top Flight Technologies混合动力六旋翼



Airstier year!



# 1.新技术展望

## □ 动力技术

Skysapience视频



(3) 地面供电。系留多旋翼，采用地面供电，通过电缆将电能源源不断输送给多旋翼，比如：以色列公司Skysapience六旋翼。



Skysapience六旋翼

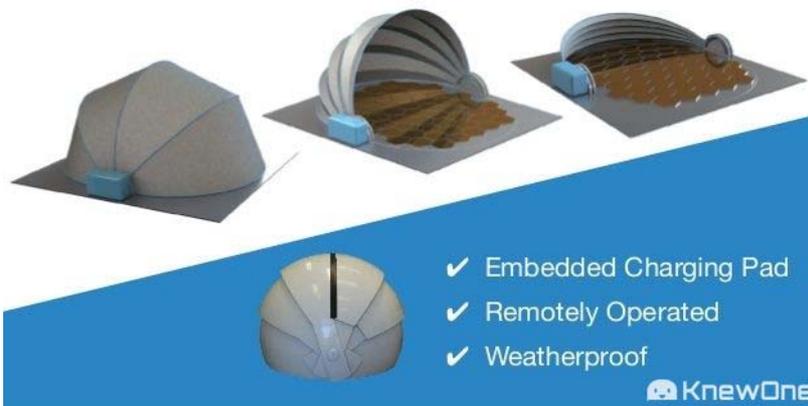


# 1.新技术展望

## □ 动力技术

(4) 无线充电。来自德国柏林的初创公司 SkySense 在无人机户外充电方面提供了一种解决方案。SkySense 研发出一块可以为无人机进行无线充电的平板。SkySense 的最大特点是可以进行远程控制，无人机的降落-充电-起飞全过程可以独立实现，不需要有人在现场进行干预和辅助。如果充电时间更快，那么无线充电技术将会极大地帮助多旋翼进行长途飞行。

Solution: Skysense Droneport



SkySense 无人机场 和 充电平板



# 1.新技术展望

## □ 导航技术

### (1) 定位技术

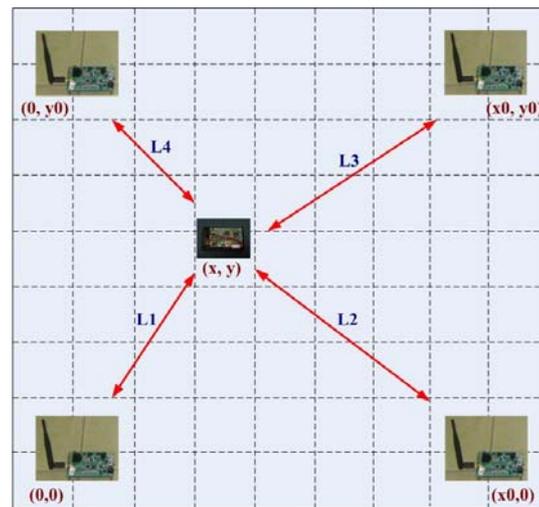
1) GPS载波相位定位。SwiftNavigation公司开发的Piksi; 由日本东京海洋大学开发的RTKLIB开源项目。2015年9月24日,在第四届中国卫星导航与位置服务年会暨中国卫星导航定位展上,具有星基增强的厘米级精度北斗接收机首次亮相。

2)多信息源定位。英国军方BAE最近公布了他们研发的名叫NAVSOP。该技术将利用包括TV、收音机、Wi-Fi等等信息定位,弥补GPS的不足,期望最小误差只有几米。

3) UWB (Ultra Wideband, 超宽带)无线定位[1]。此项技术是基于超宽带脉冲信号到达时间差的原理进行定位,可以提供10厘米精度的二维或三维定位信息。通过与惯性导航传感器融合,可以给出更高的精度且具有更强的鲁棒性[1]。



SwiftNavigation公司开发的Piksi



UWB 无线定位

[1]J D Hol, et al. Tightly coupled UWB/IMU pose estimation. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Ultra-Wideband. New York, USA: IEEE, 2009.



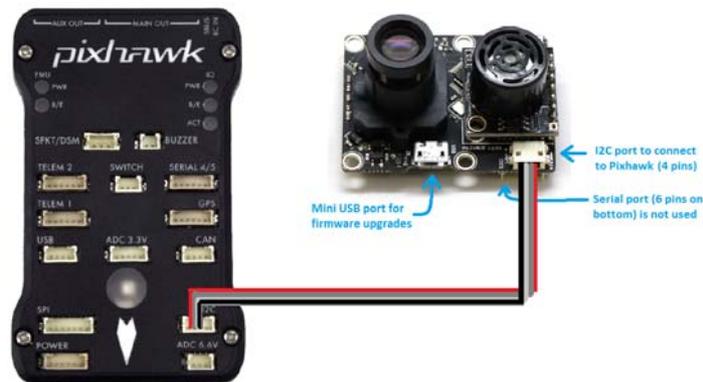
# 1.新技术展望

## □ 导航技术

(2) 测速技术。从安全的角度来说，多旋翼在飞行过程中，快速且准确的获取自身速度十分重要。这是因为速度反馈能有效提高多旋翼控制的稳定性（提高阻尼），从而达到更好的悬停和操控效果，提升了飞行器的可操控性。常用的测速方法大多基于光比较精确的测速方案是通过“视觉（光流）+超声波+惯导”的融合。AR. Drone 是最早采用该项技术的多旋翼飞行器，极大提升了飞行器的可操控性，获得了巨大的成功。PX4 自驾仪开源项目提供了开源的光流传感器PX4Flow。该传感器可以帮助多旋翼在无GPS情况下精确悬停。大疆公司推出的“悟”和“Phantom 3”同样采用了该项技术。



AR. Drone传感器



PX4Flow传感器



# 1.新技术展望

## □ 导航技术

### (3) 避障技术。

- 1) 深度相机避障技术。
- 2) 声呐系统避障技术。
- 3) “视觉+忆阻器”避障技术。
- 4) 双目视觉避障技术。
- 5) 小型电子扫描雷达。
- 6) 激光扫描测距雷达。
- 7) 四维雷达。



RealSense视频



RealSense传感器



Panoptes的eBumper4（声呐避障）



# 1.新技术展望

## □ 导航技术

### (3) 避障技术。

第一，深度相机避障技术。深度相机由常规相机、红外线激光投影仪和红外线相机组成。红外线投影仪对场景投影结构光，进而通过分析红外传感器接收的反光得到深度信息。微软在2010年11月推出了深度相机Kinect。然而它体积还是较大，并且两米之外才能更好的识别用户手势。在2015年国际消费类电子产品展览会上，英特尔把RealSense 技术也应用到了多旋翼身上，用于感知周围环境，进而供多旋翼进行自主避障。与Kinect相比，英特尔的RealSense相机更小更轻，只有4毫米厚，8克重。除此之外，还有声呐系统避障技术、“视觉+忆阻器”避障技术、双目视觉避障技术、小型电子扫描雷达、激光扫描测距雷达和四维雷达等相关技术。



# 1.新技术展望

## □ 导航技术

### (4) 跟踪技术

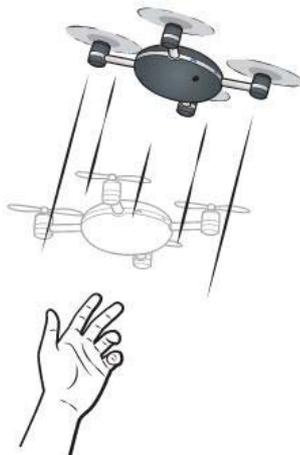
#### 1) GPS跟踪

#### 2) 视觉跟踪

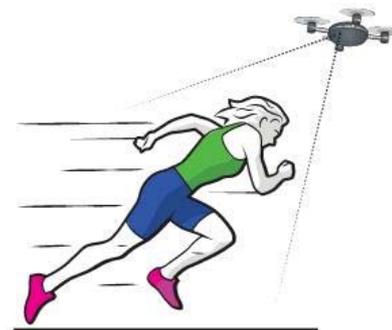
视觉跟踪 视频



Ready.



Throw.



Go!

Lily 四旋翼的GPS跟踪



大疆 四旋翼的视觉跟踪



# 1.新技术展望

## □ 导航技术

### (4) 跟踪技术

常见的跟踪方式为在被跟踪者身上放置GPS接收机，从而进行定位和跟踪。然而，对于非合作目标，比如罪犯，该方式是行不通的。

新的技术可以依赖视觉和雷达。在视觉跟踪方面，3D Robotics公司推出了具有“Follow Me”模式的“Tower Drone Control App”，该模式能够使飞行器跟随用户，并将用户保持在摄像头中心且跟踪用户运动。不仅如此，相机的角度也可以在无人机跟随过程中调整。OpenCV 开源软件也同样有很多跟踪算法供飞行器开发。

尽管视觉跟踪廉价，但是它容易受到复杂天气和光线的影响。对比来讲，雷达跟踪更为鲁棒。在2015年，雷达传感器开发商Oculii发布了RFS-M，并宣称其为第一个实时四维跟踪移动传感器平台。



# 1.新技术展望

## 交互技术

(1) 手势控制技术 (2) 脑机接口的技术。



手势控制臂带控制AR.Drone 视频



手势控制臂带控制AR.Drone



脑电波控制飞行视频



浙江大学CCNT实验室脑电波控制飞行器



# 1.新技术展望

## □ 交互技术

(1) 手势控制技术 (2) 脑机接口的技术。

在2014年国际消费类电子产品展览会上，有人演示了利用MYO手势控制臂带控制AR.Drone四旋翼。类似地，智能手机、手环、手表和戒指等内置惯性传感器，可以识别操作者的手势，同样也可以用于控制多旋翼。

另外，脑-机接口的技术是指在人脑与计算机等外部设备之间建立直接的连接通路。通过对于传感器获取的脑电信息的分析解读，用计算机芯片和程序将其转化为相应的动作，这就是用“意念”操控物体的基本原理。国内外学者都尝试该技术控制无人机。然而，从安全的角度来讲，这些多旋翼离商业应用仍然差得很远。



# 1.新技术展望

## □ 通讯技术

- (1) 5G通讯技术
- (2) Wifi通讯技术





# 1.新技术展望

## □ 通讯技术

通讯技术十分重要。该项技术有助于信息共享，可以进一步用于交通管理或多旋翼健康评估，在高速通讯技术的支持下，数据可以上传到云端。

### (1) 4G/5G通讯技术

在2015年11月，有报道称美国希望达成一个全球协议来重新分配无线电频段，以迎接移动设备“5G”时代的到来。这将引发世界范围内的飞行跟踪系统和民用无人机发展的新高潮。在未来的十年中，仅仅在美国就会因此出现800亿美元的商机。

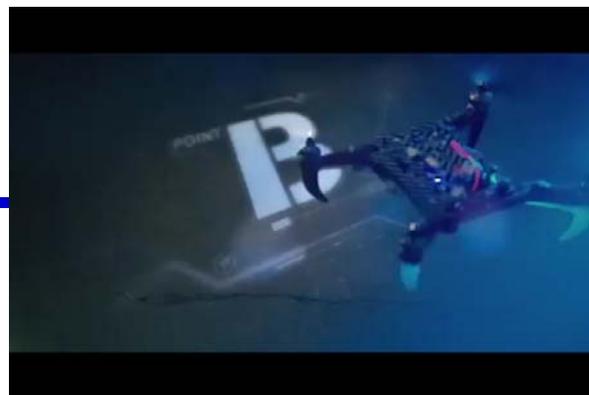
### (2) Wifi通讯技术

2013年，德国的卡尔斯鲁厄理工学院开发出了一项新的Wifi技术，利用更好的硬件配备240GHz无线电频率，实现了在0.6英里内用户的链接速度达到40Gbits/s (5GB/s)。这种技术可以通过无人机的视频发射器提供与地面设备的高速连接。



# 1.新技术展望

## □ 芯片技术



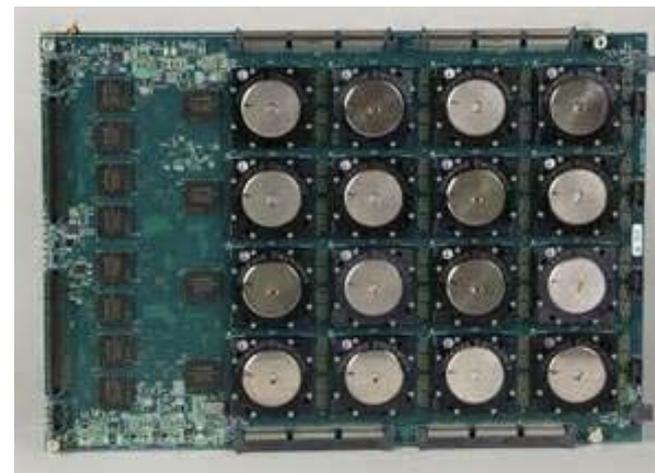
基于高通骁龙处理器的无人机自主导航飞行视频



高通骁龙芯片



英特尔爱迪生芯片



IBM类脑芯片



# 1.新技术展望

## □ 芯片技术

(1) 2014年CES上，高通和英特尔展示了功能更为丰富的多轴飞行器。例如，高通CES上展示的Snapdragon Cargo无人机是基于高通**Snapdragon芯片**开发出来的飞行控制器，它有无线通信、传感器集成和空间定位等功能。2015年9月，据美国科技新闻网站Engadget报道，高通已经为无人机市场推出了一个芯片解决方案，名为“骁龙飞行平台”。英特尔CEO Brian Krzanich也亲自在CES上演示了他们的无人机，采用了**四核的英特尔凌动（Atom）**处理器的PCI-express定制卡。此外，活跃在在机器人市场的欧洲处理器厂商XMOS也表示已经进入到无人机领域。

(2) 3DR发表声明与Intel英特尔共同合作开发**Edison芯片**，这是一种新型微型处理芯片。它只有一个硬币的大小，却具有个人电脑一样的处理能力。

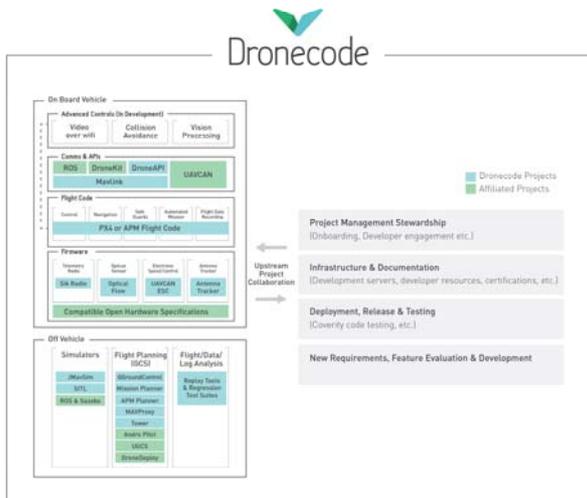
(3) 目前，包括IBM在内的多家科技公司都在模拟大脑，开发**神经元芯片**。而一旦类似芯片被应用于无人机，自主反应、自动识别有望会变得轻而易举。



# 1.新技术展望

## □ 平台技术

- (1) “Dronecode”的无人机开源系统。
- (2) Ubuntu 15.04 操作系统。
- (3) Airware发布企业级无人机系统。





# 1.新技术展望

---

## □ 平台技术

2014年10月，著名开源基金会Linux推出了名为“Dronecode”的无人机开源系统合作项目，将3D Robotics、英特尔、高通、百度等科技巨头纳入项目组，旨在为无人机开发者提供所需要的资源、工具和技术支持，加快无人机和机器人领域的发展。

Ubuntu 15.04的物联网版本是Ubuntu目前最小且最安全的版本，非常地精简，适合发行家、科技专业人士与开发者使用，能够在无人机等领域中使用。

Airware公司发布了商业无人机操作系统，宣称该系统可以安全可靠地操纵无人机，符合政府和保险需求，建立面向工业的无人机软件系统。同时，Airware希望让消费者自主选择飞行器，并匹配相应的硬件和软件使无人机可以执行不同任务。

---



# 1.新技术展望

## □ 空管技术

(1) 2015年美国航天局无人机系统交通管理大会UTM于7月28-30日在加州NASA Ames研究中心举行。此次会议给大家一个讨论低空无人机系统交通管理的机会，憧憬低空无人飞行器交通管理的未来。亚马逊和谷歌在会上发表了白皮书，通过ADS-B和V2V通信，探索了管理空域和协调飞行器的策略



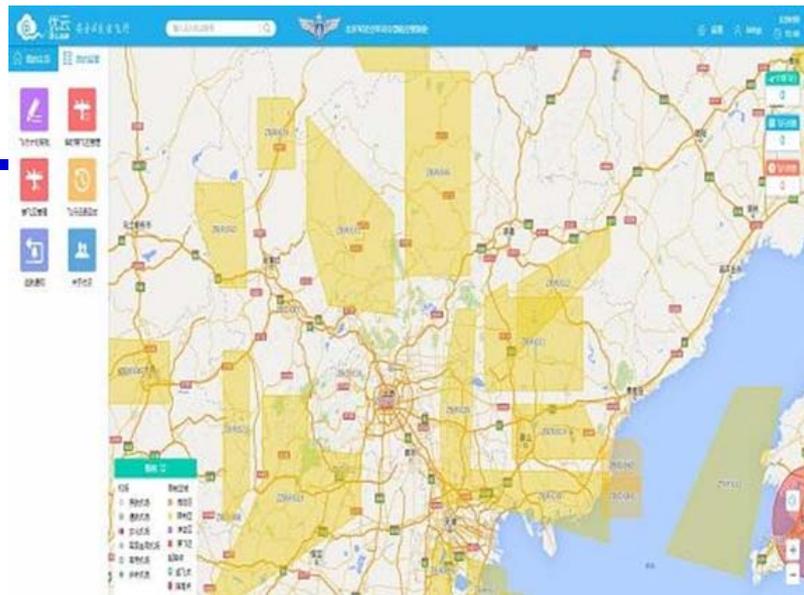
NASA空中交通概念图



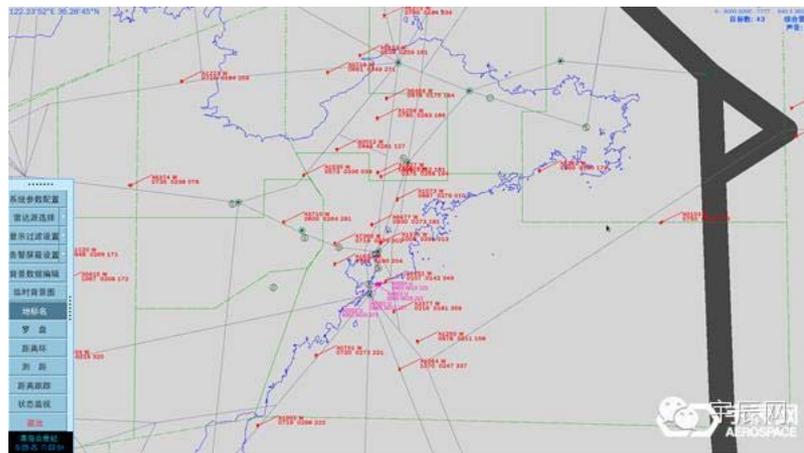
# 1.新技术展望

## □ 空管技术

2015年9月，在第三届AOPA国际飞行训练展会上，AOPA（中国）联合多家企业开发的针对小型无人机的“U Cloud”监管系统上线。除了U Cloud，国内还有“U Care”无人机管理系统等。它们的出现，可以帮助飞控手了解附近的无人机，有助于中国无人机飞行器的管理。



“U Cloud”无人机监管系统

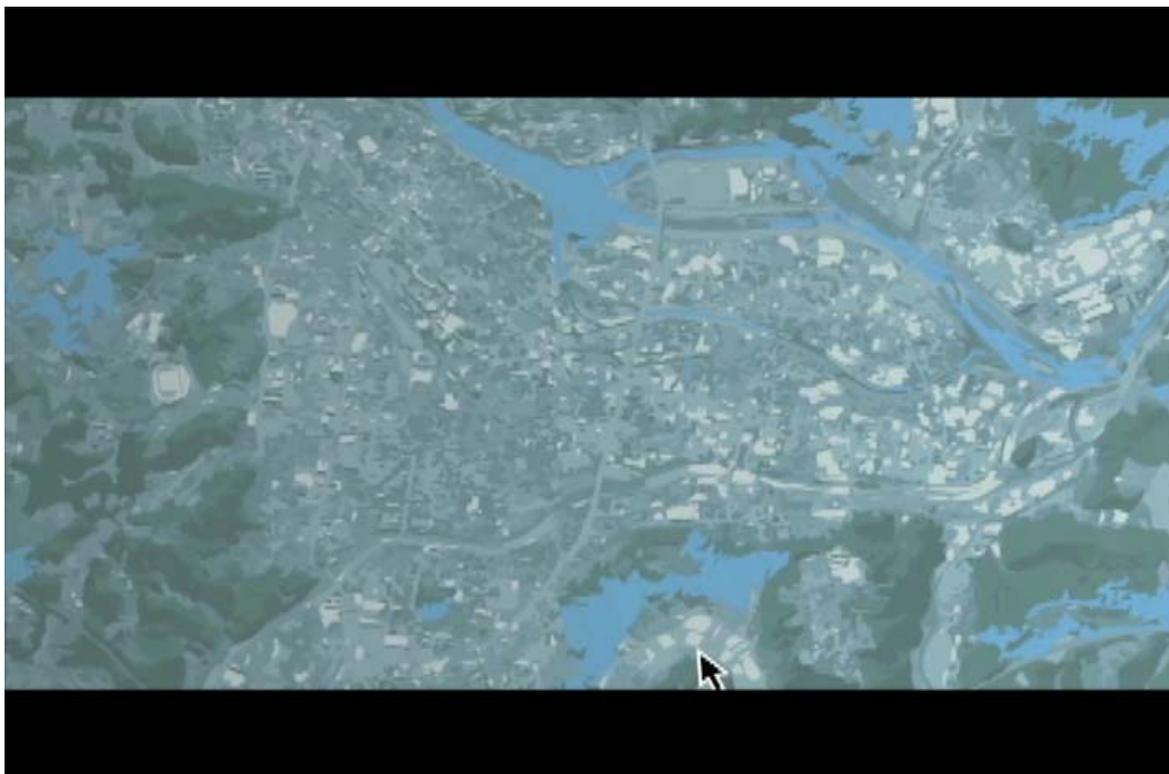


“U Care” 无人机监管系统



# 1.新技术展望

## □ 空管技术



无人机空管系统视频



# 1.新技术展望

---

## □ 总结

在多旋翼的潜在新技术发展进程中，各个技术是相互耦合依存的，比如：芯片、传感器和算法等等。这些技术将构成无人机或者多旋翼的生态环境。在这种情形下，无人机或者多旋翼的发展可能被其中某一项或两项技术的发展引领，这会存在各种可能性，很多是我们目前无法想象的。

同样，无人机或多旋翼的发展也会带动相关行业技术的发展，解决各种实际问题。因此，从多旋翼周边技术的发展来看，多旋翼还有较大的发展空间。



## 2.需求和技术创新方向

### □ 创新层面

从事多旋翼开发，无外乎从需求、方案、技术三个角度入手。从入手的角度，找到一个靠谱的新需求是**上策**；同样的需求，寻求好的方案是**中策**；同样的需求和同样的方案，只是通过技术改进，则是**下策**。需求到技术，遵从

**需求-〉问题（特色）-〉方案-〉技术**

路线。



## 2.需求和技术创新方向

### □ 创新层面

(1) 需求创新不仅需要对用户需求的把握，还要综合把握方案和技术实现的可行性。需求创新将会带来新的问题和特色，这样会立刻形成与其他产品的差异性。新的问题引发新的设计，从而形成新的产品。

(2) 从解决问题的角度，方案是十分重要的。方案创新需要广阔的知识面，包括软件、硬件和算法。在某些情况下，合适的方案会减小技术难度。比如：内置惯性测量单元的智能设备和摄像头都能实现手势识别。操控多旋翼方面，用智能终端还是视觉识别手势就是两种方案。前者开发难度不会太大且鲁棒较好，而工程上用于手势识别的视觉算法往往受限于其应用场景。当然最后应当指出的是，在选择方案时特定的应用环境也需要考虑其中。

(3) 技术创新需要本领域很强的专业知识，难度最大。难度在于需要对多旋翼某种性能有很大提升，让用户真正能感受到。比如：基于光流的测速是一项重要技术，然而，精度上没提高一个百分点都会带来成本的提高。



## 2.需求和技术创新方向

### □ 需求创新

- 多旋翼本身
- 多旋翼+照相机
- 多旋翼+农药
- 多旋翼+货物
- 多旋翼+测绘仪器
- 多旋翼+通信平台
- 多旋翼+武器
- 多旋翼+光源
- 多旋翼+声音
- 多旋翼+读卡器
- 多旋翼+医药
- 多旋翼+绳锁
- 多旋翼+喷火器

亮度 = 新颖程度

深度 = 被追赶时间

广度 = 单价\*数目

加速度 = 发展速度

看好领域

1) 玩具、教育、2) 可穿戴四旋翼、3) 农业无人机、4) 专业领域





## 2.需求和技术创新方向

### □ 技术方案创新

技术性能	机体和外形设计	动力系统设计	信号估计技术	控制器设计	安全决策技术
噪音最小	+++	++	+	+	-
震动最小	+++	++	+	+	-
悬停时间最长	+	+++	+	++	-
飞行距离最远	++	+++	+	+	-
抗风性最强	++	+++	+	++	-
飞行最为精确	-	-	+++	+++	-
自主性最高	-	-	+++	+	++
安全系数最高	-	++	+++	+	+++



## 2.需求和技术创新方向

### □ 技术方案创新-安全系数

■ 基于模型的系统工程；从“以文档为主、模型为辅”向“以模型主、文档为辅”的转变。

■ 健康评估

■ 失效保护

多旋翼属于小型的复杂系统，应该从系统工程的角度设计来保障飞行的安全。2007年，国际系统工程学会（INCOSE）在《系统工程2020年愿景》中，给出了“基于模型的系统工程”的定义：基于模型的系统工程是对系统工程活动中建模方法应用的正式认同，以使建模方法支持系统要求、设计、分析、验证和确认等活动，这些活动从概念性设计阶段开始，持续贯穿到设计开发以及后来的所有的寿命周期阶段。这个概念是与基于文档的系统工程相对应，拟在利用先进的系统建模语言代替自然语言，从而消除不确定性、歧义性和不可计算性等。进而，从“以文档为主、模型为辅”向“以模型主、文档为辅”的转变。这也是国际大型飞机公司，如波音、空客、洛克希德马丁，设计飞机的流程。至今，这是民用大飞机高安全系数的有效途径，只有这样才能够满足国际的适航标准。对于目前有一定实力的多旋翼公司和研究机构，建议采用基于模型的系统工程方法正向设计多旋翼。随着未来多旋翼或无人机的增多，安全系数标准或适航标准必然被公众关注。



## 2.需求和技术创新方向

### □ 技术方案创新-自主级别

表: 多旋翼自主等级示例表

等级	描述	决策	感知	控制	典型场景
2	与外部系统独立的导航(无GPS)	同等级1	在无外界系统帮助下,如GPS,自身传感和状态估计,提前感知故障作好安全保护。感知和态势认知由飞控手判断。	同等级1	无GPS,靠摄像机完成悬停,着陆和跟踪。提前报告故障如遥控器故障,传感器故障和动力系统故障等
1	自动飞行控制	预编程或上传飞行计划如航点、参考轨迹等。由地面站或飞控手进行分析、计划和决策。简单的故障保护	大部分传感和状态估计由多旋翼完成,感知和态势认知由飞控手判断。	由飞控系统计算控制指令	利用GPS,它可以悬停、跟踪目标。可以检测遥控器故障、GPS、电子罗盘故障或电池功率高低。可以切换模式如着陆模式
0	遥控	所有决策功能都是由飞控手完成的	基本的传感可能由多旋翼完成;所有数据由飞控手处理分析	由飞控手给出控制指令	可以由飞控手控制完成悬停、着陆和跟踪目标任务



## 2.需求和技术创新方向

### □ 技术方案创新-自主级别

表: 多旋翼自主等级示例表 (续)

等级	描述	决策	感知	控制	典型场景
4	实时避障/事件检测, 路径规划	危险规避, 实时路径规划与再规划, 事件驱动决策, 任务变化能鲁棒响应	感知障碍、危险、目标, 环境变化检测, 实时建图	精确、鲁棒三维轨迹跟踪	在无GPS情况下, 它可以利用摄像机自主远距离飞行且能返回原处。如果有一个电机故障, 四旋翼可以安全着陆。
3	故障事件自适应	健康诊断, 有限适应, 机载保守低水平决策, 执行预编程的任务	大多数健康和状态感知, 软硬件故障检测	鲁棒飞行控制器, 针对故障、任务和环境变化重新配置和自适应控制	可以评估自身健康状况, 分析故障产生原因。另外, 一个电机故障六旋翼可以返回原处



# 3. 风险分析

## □ 风险

(1) 人身安全

(2) 财产

(3) 公共舆论和道德风险



2015年4月24日坠落日本首相官邸



2015年1月29日多旋翼闯入白宫



2015年6月，3名韩国游客擅自遥控航拍飞行器在教堂顶部拍摄，并在慌乱之中操作失误，让飞行器撞到了教堂外侧，令教堂轻微受损。

2015年9月，在美国网球公开赛，一架黑色多旋翼盘旋看台上空并且坠毁，迫使比赛暂时中断



## 3.风险分析

---

### □ 建议

#### (1) 生产和设计厂商

- 1) 提高飞行器本身的可靠性。
- 2) 减少飞行器下降带来的冲击。
- 3) 为飞机编写ID号（飞机编号）。
- 4) 设置禁飞区。
- 5) 防欺骗和防入侵。

#### (2) 对于多旋翼运营厂商

- 1) 培养合格的多旋翼飞控手。
- 2) 保险
- 3) 限制飞行器飞行范围。



## 4.机遇和挑战

### □ 机遇

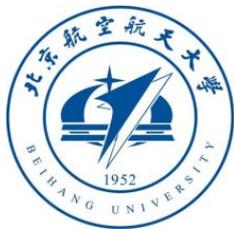


(1) 硬件产业链成熟、成本下降为民用或消费无人机爆发创造条件。地利。中国大陆，特别是珠三角地带，具有较完整的产业链。

(2) 老龄化社会。人力成本会越来越高。

(3) 无人机交通网的新建。

在这个大环境下，可以预见接下来几年中，法律法规将不断完善，多旋翼相关需求会不断被挖掘，平台技术越来越完善，越来越多的人开始接受和使用多旋翼。在这个过程中，将出现越来越多的机遇。



## 4.机遇和挑战

---

### □ 挑战

#### (1) 政策的挑战。

如何制定合理的政策既能保证民用多旋翼或无人机的发展，又能很好地防止多旋翼或无人机危害人们的安全正有待我们去解决。

#### (2) 技术的挑战。

至今，大多数多旋翼的可靠性无法得到保证。如何设计一个高可靠性的**小型多旋翼**也是技术方面的最大挑战。除了多旋翼自身的问题，与防碰撞相关的安全问题也是技术层面上的挑战。



# 资源

---

(1) 可靠飞行控制研究组主页课程中心(全部课件下载)

<http://rfly.buaa.edu.cn/course>

(2) 关注可靠飞行控制研究组公众号 buaarfly(文章、资讯等)

(3) 多旋翼设计与控制交流QQ群:183613048

(4) 视频课程(MOOC)同步发布, 网易云课堂搜索 “多旋翼”

<http://study.163.com/course/introduction/1003715005.htm>

(5) 同名中文书本教材《多旋翼飞行器设计与控制》即将在电子工业出版社出版, 敬请期待

(6) 有疑问可联系课程总助教戴训华, 邮箱: [dai@buaa.edu.cn](mailto:dai@buaa.edu.cn)

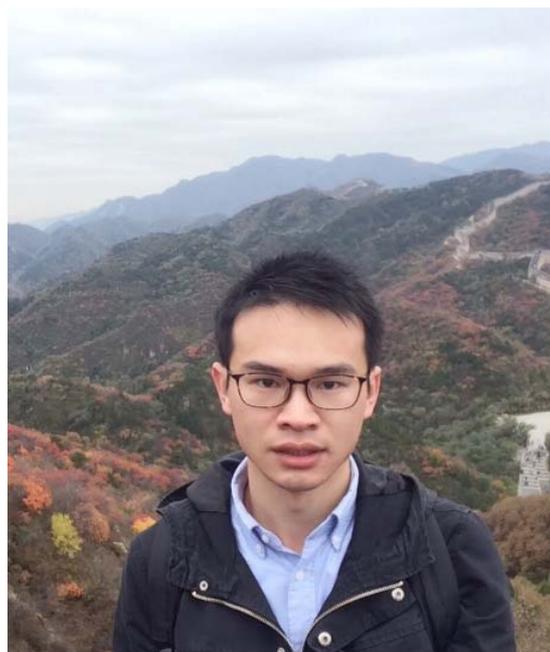


# 致谢

## 感谢控制组同学



杜百会



戴训华

为本节课程准备作出的贡献。



---

# 谢谢

更详细的内容可以参考我们的教材：《多旋翼飞行器设计与控制》，电子工业出版社。

中文版目前在亚马逊、当当、京东、天猫（电子工业出版社旗舰店）等网站有售。

英文版本 *Introduction to Multicopter Design and Control*，在Springer出版，在亚马逊有售。