

第 3 章



平台设计与构建

3.1 引言

构建小型无人旋翼飞行器是一项具有挑战性的任务,必须仔细考虑诸如部件的选择、布局设计、重量配平与减振等问题,尽管有人已经建立了一些小型无人旋翼飞行器平台并且在实际任务中使用,但难以在文献中找到一套统一的、行之有效的平台设计方法。

本章阐述构建小型无人旋翼飞行器系统的系统化设计方法,为了理解方便,将以 SheLion 的构建过程为例,包括以下四个关键步骤:

1. 虚拟设计环境的选择;
2. 部件的选择;
3. 航电系统设计与集成;
4. 性能与可靠性评估。

本章纲要如下: 3.2 节介绍一种在小型无人旋翼飞行器部件布局设计中经常使用的虚拟设计环境(virtual design environment,简称 VDE)SolidWorks; 3.3 节关注 SheLion 各部件的选择; 接下来 3.4 节基于所选取的部件给出系统设计与集成过程; 最后,3.5 节对整体设计进行性能与可靠性的评估。

3.2 虚拟设计环境的选择

我们的经验表明,为构建可靠的小型无人旋翼飞行器选取一个合适的虚拟设计环境是重要的,对系统集成与布局设计有很大帮助。在 SheLion 与本研究团队所有其他无人系统的构建过程中,我们选取了一种功能强大的三维虚拟设计环境^[175] SolidWorks,具有以下优点:

1. 易于使用: 参照几个关键的辅助材料与样例,通过短时间的自学训练,用户们就可以熟悉 SolidWorks 的功能。
2. 强大的 3D 与 2D 设计功能: 对任何一种选定的部件,其 3D 虚拟部件都可以用形状、尺寸与颜色精确地描述,当 3D 虚拟部件生成以后,同时生成了与其关联的机械加工或



改造中所需的 2D 视图与蓝图。

3. 精确的物理描述：每种虚拟部件都可以用必要的物理参数，如尺寸、量纲、重量，进行参数化，而且 SolidWorks 还集成了一些专业功能，可以计算出一些不可直接测量的参数，比如重心位置与不规则表面的面积。

4. 动画功能：对于一些可以移动或转动的部件，比如本章后面处理的云台(pan/tilt)伺服机构，SolidWorks 可以通过所集成的动画功能模拟其运动，于是在部件集成过程中为设计者提供一种非常直观的可视化效果。

这种基于 VDE 的设计理念是我们提出的无人系统设计方法中的特色之一。图 3.1 显示了 SheLion 的实体与虚拟部件，正是这个精心设计出的虚拟部件使得其实体的组建快速而顺利。



图 3.1 SheLion 的虚拟部件及其实体

3.3 部件的选择

图 3.2 给出了 SheLion 的硬件配置，图中每一个实线方块代表一种具体的设备，正如先前的第 1 章中提及的，构成一架全功能小型无人旋翼飞行器系统所必需的部件有：

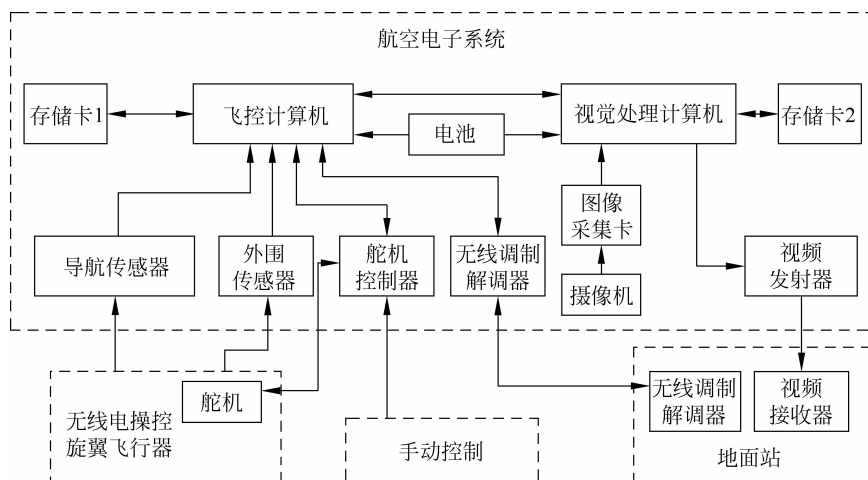


图 3.2 SheLion 无人飞行器系统的硬件配置



1. 一架无线电操控旋翼飞行器；
2. 一套航电系统,用于收集在线飞行数据,运行自动控制律,以及与地面站通信；
3. 一套手动操纵系统,由操作人员与无线电操控器以及相关设备组成；
4. 一套地面站系统,用于监视飞行器的飞行状态,并与机载系统通信。

3.3.1 无线电操控直升机

第一项要选择的是一架高性能的无线电操控旋翼飞行器,也就是旋翼飞行器航模,SheLion 选择了 Raptor 90 SE。图 3.3 给出了它的实体照片与虚拟部件,其关键指标列在表 3.1 中。



图 3.3 Raptor 90 SE 直升机及其虚拟部件

表 3.1 Raptor 90 SE 直升机的关键指标

指 标	Raptor 90 SE 直升机
机身长度	1.39m
主旋翼展长	1.41m
尾桨展长	0.25m
续航能力	15min
无载荷重量	5.95kg
最大起飞重量	11kg
传动比	1 : 8.45 : 4.65(主桨 : 发动机 : 尾桨)
机身材料	碳纤维
动力能源	硝基油

选取该直升机的基本原因如下：

1. 低成本高性能：与大多数第二类无线电操控旋翼飞行器相比,如 Turbulence D3 和 Observer Twin,Raptor 90 SE 大约只有一半的价格,却提供了等同的飞行性能与可靠的结构设计。

2. 良好的机动能力：Raptor 90 SE 最初是为特技飞行而设计的,它的灵活性与机动能力在航模爱好者圈内是众所周知的。

3. 足够的载荷能力：从表 3.1 可以看出,Raptor 90 SE 的最大起飞重量是 11kg,去除其本身重量,有效载荷超过 5kg,超过了我们的 4kg 重量预算,包括航电系统、起落架和振动

隔离器。

参见图 3.4, Raptor 90 SE 采用了航模爱好者团体内广泛采用的标准操作原理, 使用了五个数字式伺服舵机, 由众所周知的 Futaba^[67] 和 JR-Propo^[94] 生产, 接收来自机载系统或者手动操作人员的控制信号, 驱动各个控制桨面。

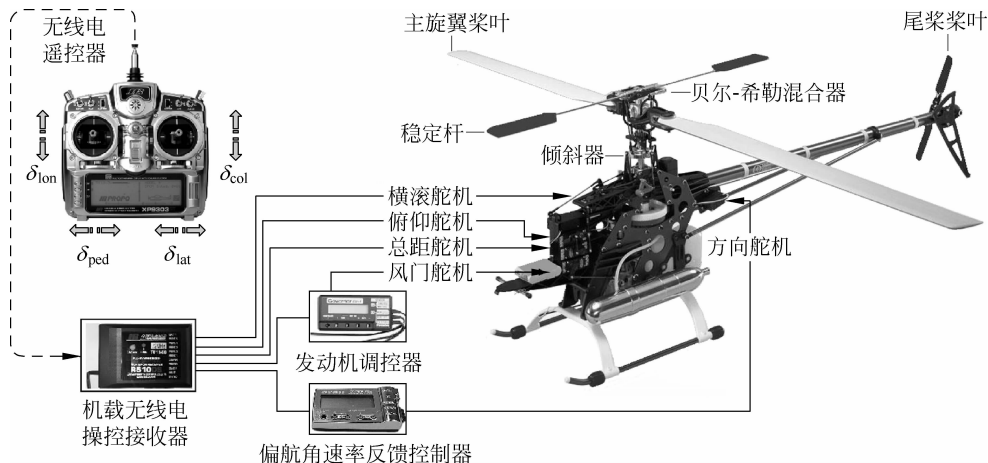


图 3.4 Raptor 90 SE 直升机的操作原理

1. 横滚舵机, 产生主旋翼横向周期变距驱动信号 δ_{lat} , 掌管自动倾斜器 (swashplate) 的左右倾斜动作, 改变主旋翼桨叶的横向周期桨距角, 操纵横滚运动与横向平移。

2. 俯仰舵机, 产生主旋翼纵向周期变距驱动信号 δ_{lon} , 掌管自动倾斜器的前后倾斜动作, 改变主旋翼桨叶的纵向周期桨距角, 操纵俯仰运动与纵向平移。

3. 总距舵机, 产生主旋翼总距角驱动信号 δ_{col} , 改变自动倾斜器垂直方向的位置, 引起主旋翼桨叶的总距角变化, 操纵垂向运动。值得注意的是, 某些低端定桨距遥控直升机并不具备这个功能。

4. 方向舵机, 产生尾桨总距角驱动信号 δ_{ped} , 由厂家安装的偏航角速率反馈控制器操纵, 通过操纵尾桨总距角实现偏航角速率与航向角的控制, 因此允许手动操作人员间接控制裸机过于敏感的偏航运动。

5. 最后, 风门舵机, 由遥控式发动机调控器 (engine governor) 操纵, 控制主旋翼恒速转动。本书中全部研究工作都是把发动机预先设置成恒速转动, 在自动飞行控制闭环中并没有使用该舵机。

注意, 遥控直升机最有区别的特点是常常使用贝尔-希勒稳定器 (Bell-Hiller stabilizer)^[186] 配合自动倾斜器获得期望的桨叶挥舞运动响应性能。

3.3.2 飞行控制计算机

飞行控制计算机是机载系统的大脑, 其基本功能包括:

1. 分析由机载传感器与视觉信息处理计算机送来的各种飞行数据。
2. 运行飞行控制律。



3. 与地面站通信。

4. 记录飞行数据,存储于 CF(compact flash)卡中(图 3.2 中的存储卡 1),用于后期分析。

由于无人机系统的独有特点,选择飞控计算机时要特别注意其尺寸、重量、输入/输出端口配置、可扩展能力、防振特性,以及功耗。

SheLion 最后选择了嵌入式计算机 PC104 ATHENA,图 3.5 显示了其实体与虚拟部件。此机型按照 PC104 协会^[143]制定的 PC104 标准生产,通常用于嵌入式系统。因为具有以下特点,ATHENA 非常适合我们的应用。

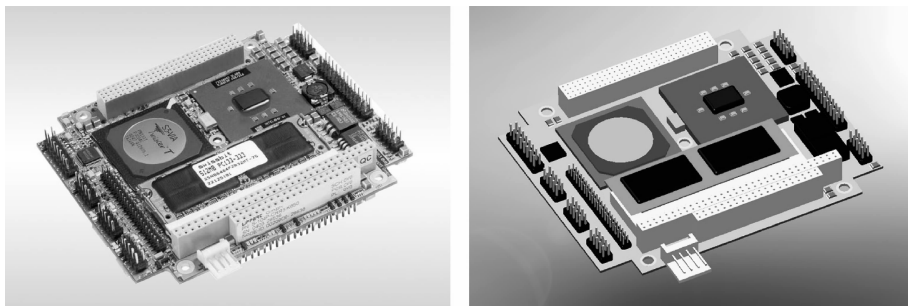


图 3.5 ATHENA 计算机板及其虚拟部件

1. 尺寸小: PC104 为掌上型计算机板卡,其标准尺寸为 $96\text{mm} \times 90\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。
2. 重量轻: 包括连接线与接头,ATHENA 总重只有 140g。
3. 足够的处理速度: ATHENA 的处理速度为 500MHz,远超机载软件系统的需求。
4. 丰富的 I/O 端口: ATHENA 提供丰富的 I/O 端口与外部设备通信,包括四个 RS-232 串行口,四个 USB 端口,两个定时/计数器,一个 24 位数字 I/O 端口,一个 16 通道模拟 I/O 端口,以及一个 100Mbps 的以太网端口,这些特点为选择传感器与简化在线程序调试提供了足够的灵活性。
5. 防振能力: PC104 标准采用独特的多针孔连接器,具有良好的连接可靠性与防振能力。
6. 可扩展能力: 基于 PC104 标准的计算机板卡具有统一的连接器形式与尺寸,因此,所有其他功用的 PC104 板卡(如视觉数据转换与 I/O 扩展板)都可以与 ATHENA 直接连接,构成一个新的计算机栈。
7. 低功耗: ATHENA 的功耗在满负荷工作条件下大约每小时只有 12.5W。

3.3.3 导航传感器

导航传感器为飞行器飞行状态提供可靠的测量,市面上有许多成品可供选用,在制造技术、材料、估算方法、测量范围、尺寸和重量方面各有不同。按照工作原理,一套完整的导航解决方案通常归属于以下三类中的一类: ①惯性导航系统 INS; ②GPS/INS 组合导航系统; ③GPS 辅助的航姿参考系统(attitude and heading reference system,简称 AHRS)。对于 SheLion,我们力图采用成本低、尺寸小、具有足够精度的 GPS 辅助航姿参考系统。

GPS 辅助的航姿参考系统由四个关键部件组成: ①惯性测量单元 IMU; ②GPS 接收



机；③磁力计；④数据融合与估计算法。与传统上只能提供姿态测量的航姿参考系统不同，GPS 辅助的航姿参考系统能够提供导航与控制所需要的测量数据，包括位置、速度、姿态、角速率，以及加速度。SheLion 采用了一款尺寸小、名为 MNAV 的导航传感器套装，作为构成 GPS 辅助航姿参考系统的基础，图 3.6 显示了其实体与虚拟部件，主要特点有：

1. 完整的集成：MNAV 是基于 MEMS 技术的 IMU、基于 MEMS 技术的三轴磁力计和手指大小的 GPS 接收机的集成，所有原始在线飞行数据都可以由 MNAV 捕获。

2. 紧凑的布局：如图 3.6 所示，MNAV 中的加速度计、陀螺和磁力计全部精确垂直安装。

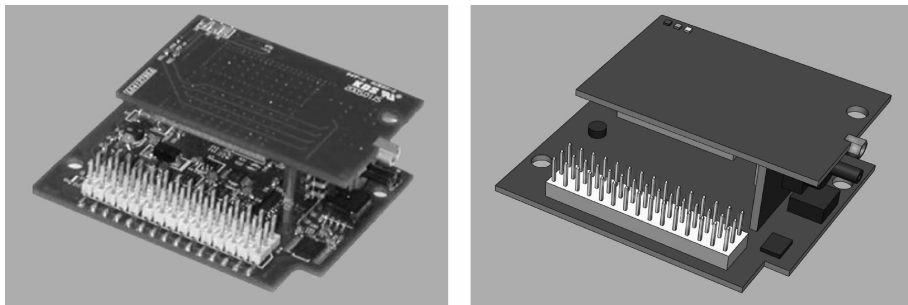


图 3.6 MNAV 实体及其虚拟部件

3. 足够的测量范围与分辨率：MNAV 的关键指标在表 3.2 中给出，表中数据表明，MNAV 完全能够处理任何常规的直升机机动情况，甚至是高速飞行情况。

表 3.2 MNAV 的关键指标

指 标	MNAV
加速度测量范围	$\pm 2g$ (重力加速度)
角速度测量范围	$\pm 200^\circ/s$
磁力计测量范围	$\pm 0.75G$
GPS 的 CEP 精度	3m
更新速率	1~100Hz(可编程)
尺寸	57mm×45mm×11mm
重量	33g(克)
功耗	$\leq 0.8W$

4. 尺寸小、重量轻：MNAV 的重量为 33g，尺寸为 57mm×45mm×11mm，目前是性能最好、尺寸最小的导航传感器可用商品。

5. 串行输出：MNAV 集成了一个 16MHz 的单片机，主要负责 A/D 转换与数字信号输出，采用标准的 RS-232 串行协议，此功能简化了机载软件的数据 I/O 编程。

3.3.4 外围传感器

SheLion 还使用了两个外围传感器：声呐和转速传感器。尽管 MNAV 的 GPS 单元对一般的位置控制是可接受的，但要实现精确的自动着陆，其精度并不够好，因此我们增加了



一个尺寸小(40mm×60mm×15mm)、重量轻(45g)的声呐,型号为 UPK-2500^[187],用于近地测高,其有效测量范围为 2m,分辨率为毫米级,输出为 0~10V 的电平信号,馈入 ATHENA 计算机板的模拟输入通道。

转速传感器用于给飞控计算机提供主旋翼转速的实时测量,是保障飞行安全与实现自动着陆的基本部件。SheLion 上安装的转速传感器由我们研究小组定制,主要由以下部分组成:①感应发动机旋转的磁感探头;②斯密特触发器,触发 ATHENA 计算机板上的模/数转换器与定时/计数器。

3.3.5 失效保护舵机控制器

失效保护舵机控制器(fail-safe servo controller)是保障小型无人旋翼飞行器飞行安全的另一个重要设备,主要负责对操作人员与计算机生成的伺服控制命令解码,并选择哪一路解码信号去驱动多个舵机。自主飞行过程中可能发生故障,在控制器的帮助下,手动操作人员有机会救回无人平台。SheLion 选用了型号为 HBC-101 的控制器,如图 3.7 所示,具有下面一些吸引人的特点。

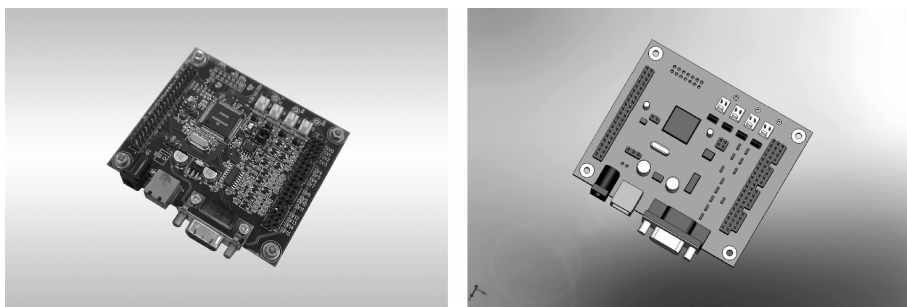


图 3.7 HBC-101 实体及其虚拟部件

1. 可靠的切换功能:任何时候,HBC-101 都能由预先设定的通道接收手动操控杆产生的切换信号,实现自动与手动控制间的平滑切换,这种设计保证了手动操作人员始终具有选择手动或自动控制的最高权限。

2. 足够的输入/输出通道:如前面提及的,Raptor 90SE 直升机使用了 5 个舵机,而 HBC-101 提供了 8 个输入/输出通道,完全满足需求。

3. 信号采样能力:HBC-101 具有对输入/输出信号采样的能力,采样速率高达 100Hz,采样数据可以通过串行通信协议传送到 ATHENA 计算机板,该功能对飞行动力学建模与自动控制性能分析尤其重要。

4. 高分辨率:输入采样与舵机驱动可以看做是特殊的模/数与数/模转换,HBC-101 提供的高达 0.009°的分辨率可以大大提高数据质量与实际控制性能。

3.3.6 无线调制解调器

无线调制解调器用来建立无人直升机与地面控制站间的通信,完成在线飞行状态下载



与命令及航迹上传。选择无线调制解调器最重要的因素是通信范围与可靠性,SheLion 最终选择的是工作在 2.4GHz 频带的 IM-500(如图 3.8 所示),只有手掌大小,重量为 75g,一些独特之处如下:

1. 超长的传输距离:在视线无遮挡条件下,最大通信距离为 32km。
2. 串行通信协议:采用 RS-232 串行通信协议。
3. 足够的数据吞吐率:115.2Kbps 的数据吞吐率足以满足我们的应用。



图 3.8 IM-500 实体及其虚拟部件

3.3.7 电池

民用中通常有三种选择:锂聚合物电池(Lithium-polymer,简称 Li-Po)、镍氢电池(Nickel-metal hydride,简称 Ni-Mh)和镍镉电池(Nickel-cadmium,简称 Ni-Cd)。与另两种相比,锂聚合物电池的性能在以下方面远远胜出:①能量密度;②充放电效率;③自放电率;④使用寿命;⑤循环寿命。因此,SheLion 选择了锂聚合物电池。更具体地,选择了由 Thunder Power RC 公司生产的四块锂聚合物电池,为机载电子设备提供能量,其中两块为 7.4V/1300mAh(7.4V 情况下连续工作 1 小时的放电电流为 1300mA),单体重量为 70g,另两块为 11.1V/2100mAh,单体重量为 190g。需要强调的是,对电池容量的需求是在精心设计电源供给之后才确定的,3.4.3 节会详细介绍。

3.3.8 视觉信息处理计算机

视觉信息处理计算机与机载系统视觉控制部分协调运行,其主要功能包括:①接收来自图像采集卡的原始数据;②基于所选取的算法分析图像数据;③与飞控计算机通信实现基于视觉的控制;④传输视频数据到地面控制站。飞控系统与视觉处理系统采用两台独立计算机的主要原因是:

1. 视觉处理的计算量远远高于飞控计算,把两项计算集于一台计算机将会由于数据堵塞大大增加软件系统停止运行的机率,飞行实验时可能导致严重事故。
2. 飞控程序运行频率远远高于视觉处理速度,另外,许多任务实现可能并不使用视觉信号,独立配置计算机大大简化机载软件系统的开发,表现在:①运行时间分配;②任务线程规划;③数据交换。

考虑到视觉数据处理的要求,SheLion 选用了一款名为 Cool-Road-Runner III 的 PC104



计算机板卡处理视觉信息,其工作速度更高(933MHz),但 I/O 端口较少(对视觉处理来说并不需要),额外的散热片使其总重量增加到 190g,除此之外,与前面介绍的 ATHENA 具有相似的特性。

3.3.9 视觉传感器

视觉传感器,也就是摄像机,负责获取周围环境的在线飞行视觉信息,在我们的研究中,所采集图像的静、动态特征(例如地标的颜色和形状与地面目标的运动)都需要具有足够的分辨率。我们最终选择了小型的 Edmund Optics 彩色 DSP 板卡式 CCD 摄像机,其分辨率为 380TV 线,40°的视场角,极轻的重量,只有 30g。对于低端产品(低于¥5000),与同规格的 CMOS 摄像机相比,CCD 摄像机通常提供更高质量、更锐利的图像,这对视觉处理算法中的特征提取有利(特别是对彩色特征提取)。值得注意的是,所选的摄像机输出的是 PAL 制式的模拟图像信号,因此需要一块图像采集卡进行模/数转换。

3.3.10 图像采集卡

图像采集卡的基本功能是完成模拟视频信号的模/数转换,然后输出数字化数据到视觉处理计算机进一步处理。我们选择的是 PC104 标准的图像采集卡,型号为 Colory 104,具备以下特点:

1. 高分辨率:可达 720×576 像素;
2. 多个视频输入端口,允许同时从多部摄像机采集数据;
3. 足够的处理速度:模/数转换的最高速率为 30 帧/秒,高于我们 10 帧/秒的机载视觉信息处理速率;
4. 有特色的处理方法:可以并行处理两个图像处理任务,把模拟图像信号数字化并转换到两种不同的格式。在我们的研究中,一个任务被配置成转换所捕获的视频信号到 RGB 格式,并通过 PCI 总线传输到视觉处理计算机的 RAM 以实现实时图像处理;另一个任务被配置成压缩视频信号到 JPEG 格式(具有相对较小的文件尺寸)并存储到 CF 卡(图 3.2 中的存储卡 2)中,用于后期处理分析。

3.3.11 云台伺服机构

在基于视觉的地面目标跟踪过程中,通常需要把目标保持在视觉传感器的视场中,将视觉传感器安装在可以摇摆/倾转的伺服机构上(pan/tilt servo mechanism,后文称为云台),更容易实现这种能力。尽管市场上有一些商品化的空拍万向架可用,但由于载荷有限,对我们的微小无人机来说太重了(平均 1kg),因此我们决定自行设计。如图 3.9 所示,主要由两个数字式航模舵机与一个结构紧凑的安装架组成。两个舵机由另一个 Pololu 舵机控制器操纵,只能对计算机生成的驱动信号解码,并且没有输入记录功能。尽管与 HBC-101 相比 Pololu 舵机控制器的功能较少,但适用于云台伺服机构的驱动,并且重量更轻(10g),自行研制的云台伺服机构总重小于 40g。

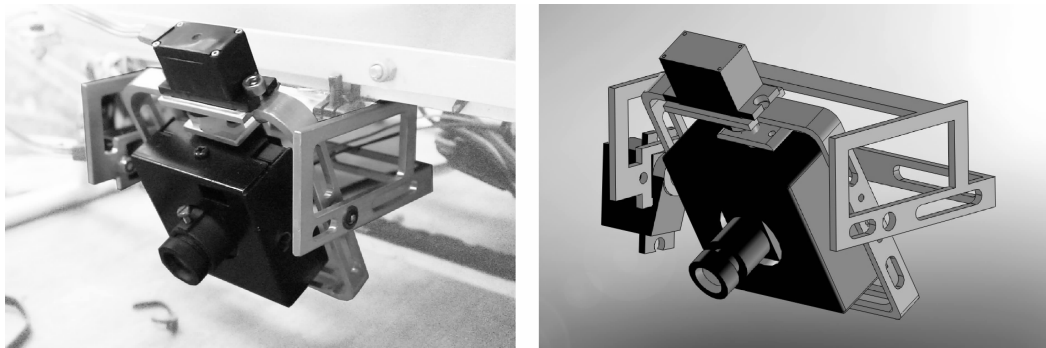


图 3.9 云台伺服机构实体及其虚拟部件

3.3.12 视频发射与接收

为了向地面用户提供实时可视信息,监视机载视觉信息处理系统的工作情况,机载摄像机捕获的视频信号通过视频发射器(无人机一方)与视频接收器(地面站一方)以及中继发射回地面控制站。为了最大限度地减少视频数据发射与在线飞行数据发射间的干扰,我们选择了一套工作在 5.8GHz 频带的视频发射/接收器,与传输飞行数据的无线调制解调器的工作频率 2.4GHz 相差很远。视频数据传输速率在 200m 有效范围内可达 11Mbps,这样的工作范围对我们的实验来说已经足够了。

3.3.13 手动控制

SheLion 的手动控制通过一部高质量无线电操控器实现,型号为 JR PCM-10X,其鲁棒性在遥控航模团体中获得公认,有 10 个具有足够分辨率的可编程信号通道,其中四个用于实现 3.3.1 节介绍的伺服驱动(注意,在手动控制中总距与风门舵机传统上共享同一个通道)。为了满足自动与手动控制模式实时切换的要求,PCM-10X 的其中一个通道专门分配给必要的时候发送切换信号。PCM-10X 的工作频率为 72MHz。

3.3.14 地面控制站

如前文提及,地面控制站的主要任务是实现机载系统与地面用户以及操作人员间的有效通信,应该包括以下功能:①实时显示并监视在线飞行状态;②显示来自视频接收器的图像;③在线生成飞行航迹;④实时发送命令到机载系统;⑤在自动控制模式中简化地面用户与操作人员的工作,特别是在不预期的情况下,如紧急着陆;⑥记录在线飞行数据,作为机载数据记录的备份。在我们的工作中,采用一台配置了专门硬件的笔记本电脑作为地面控制站,其软件系统的具体结构将在第 4 章中给出。