# 云台概述

## 整体结构

云台系统是通过特定机械结构将载具和末端器件的运动进行隔离的系统。三轴云台是通过串联三个完全正交或非完全正交的旋转约束实现的，并通过机械或者电动的方式达到对载具和末端器件的旋转运动进行隔离的效果。

本文所描述的是三轴正交电子云台。在三个旋转约束中各配置一个电机，通过惯性传感器检测末端的姿态，经过计算相应的电机之后调整电机的输出。从而达到运动的隔离和末端姿态控制的效果。如图1.1所示。

云台的机械部分主要由6大部分组成，基体、减震器、去振基座、航向臂、横滚臂、俯仰臂和末端器件。其中末端器件和俯仰臂可看成同一个运动构件(因运行过程中不存在相对运动)。

电气部分由imu传感器，主控电路，电机模组等组成。

本文主要研究三轴稳定系统的传感器、嵌入式系统和控制技术，从原理到实现细节以及仿真和实验过程。会出现大量的数学推导和公式。其中涵盖的技术有：

1. 惯性导航；
2. 路径规划；
3. 机器人正逆运动学；
4. 控制系统；
5. FOC电机控制；
6. 振动隔离；
7. 系统辨识；

以下将描述各个技术在整个系统中的整合方式。惯性导航用于获取末端姿态；通过路径规划，制定出从当前姿态到达目标姿态的运动方式，得到一系列过程点的姿态；机器人正逆运动学用于将末端姿态空间映射到对应的构型空间，即各个电机的角度空间；接着通过合适的控制算法，控制电机的输出；振动分析用于优化导航的精度；通过系统辨识，可以以此为依据制定不同负载下最优的控制测量；最终对电机的控制通过FOC实现。

## 惯性导航

该云台系统使用到的是惯性导航技术的一个分支内容——姿态解算。姿态解算在整个系统中扮演着至关重要的角色。所有后续的规划和控制都基于姿态解算的结果来完成。解算结果的精度影响着整个系统最终的稳定精度。所以不管使用多么先进的控制算法和驱动方式，如果姿态解算的精度达不到要求，也是对整个系统没有作用的。

本文使用的是市面上流行惯性测量单元，采集数据之后通过滤波算法得到末端的姿态。

## 路径规划

云台系统所达到的功能，一是将载具和末端器件进行隔离，二是能够对末端器件的运动进行控制。路径规划是为了实现后者而引进的。对运动进行控制，最终呈现的效果是对末端姿态角度的控制。根据牛顿运动定律，姿态角度是由角加速度的二次积分得到的，而对电机输出的控制，是和角加速度呈线性关系的力矩，因此可以理解为对加速度的控制。为了能够得到稳定平滑的运动效果，在控制过程中，就需要对角度进行合适的插值，使得运动速度和加速度足够的平滑。这个插值过程即路径规划。得到的结果将传入流程的下一个环节——坐标空间转换。

## 正逆运动学

在机器人系统中，正逆运动学研究各关节角度(或/和平移量)和工件坐标之间的关系。运用正运动学，可以在已知关节角度(或/和平移量)的情况下计算出工件的空间坐标；相反，运用逆运动学，可以计算出满足所需要的工件坐标的各关节的角度(或/和平移量)。在本文的云台系统中，电机的目标角度需要通过逆运动学得到。即将末端的三维角度空间转换成关节的构型空间。得到的结果传入下一个环节——控制。

## 控制系统

在云台中，控制系统所做的，是以足够高的运行速率，控制当前的姿态，使得当前姿态和目标姿态的偏差足够小。由于航拍系统中，载具本身的振动在较大的频率范围内都呈现出大的幅值，加之摄影系统较高的帧率(至少满足30Hz时画面不存在抖动)。这对云台系统的响应带宽提出很高的要求。因此本系统以1000Hz的频率运行导航和控制算法。同时使用双闭环的方式对末端姿态进行控制，并且适用内外环模糊控制的方式。不同于普通的串级PID, 本系统中使用串级模糊控制具有更高稳态和动态精度，并且更强的鲁棒性。外环控制的是姿态角度；内环则控制角速度；而FOC端实现电流的控制。

## FOC电机控制

为了提高电机响应速度以满足整个系统的响应带宽需求，本系统使用永磁无刷直流电机(PMSM)作为3个轴的驱动电机。相比普通的有刷直流电机，永磁无刷直流电机具有响应快、摩擦小、寿命高、扭矩大等优势，所以更加适用于当前情况。为了能达到控制精度要求，本系统采用磁场定向控制(FOC)方案对电机进行控制。主控系统运行位置环和速度环，在主控系统计算得到的电机力矩指令，发送到各个电机驱动。电机驱动部分运行电流的FOC控制，快速精准的让输出电流达到目标电流。

## 振动隔离

作为所有机械系统不可规避的问题，振动在三轴稳定器中同样存在，在应用于航拍系统的稳定器中它更是影响精度的主要原因。对航拍系统而言，振动隔离效果不佳，轻则影响画面；重则导致云台姿态严重偏离目标甚至系统崩溃。可想而知振动隔离对整个系统的重要程度。

本文通过实验对不同减震器的不同布置方式下，进行幅频特性的分析，总结规律。最终确定选型以及排列方式，使传递到云台末端的振动频率以及幅值尽可能满足云台控制系统的响应带宽要求。

## 系统辨识

随着嵌入式系统运算能力的不断提高，运行速率的不断加快，越来越多的先进控制技术得以在很多地方实现应用。其中包括模糊控制、自适应控制、鲁棒控制和最优化控制等现代控制技术。而这些先进控制算法中，大部分需要基于已知的系统而设计，即系统传递函数(理想情况下)或者包括其各个参数已知。本系统使用的是模糊控制的变体，为了在不同负载下控制精度都能达到要求，就需要根据不太负载调整控制参数。通过系统辨识，可以获得传递函数以及其参数，从而可以根据这些参数设计最终的控制参数。

# IMU姿态解算

## 介绍

在航天航空、机器人、导航、人体运动分析、人机交互等领域里面，姿态的高精度测量扮演着至关重要的角色。一些技术的应用使得惯性传感器可以通过自身数据就能够对姿态进行测量，而不需要依赖于运动方式，环境以及位置。IMU(惯性测量元件)由三轴加速度计和三轴陀螺仪组成，可以测量物体的旋转运动和平移运动。MARG(磁场，角速度和重力)传感器是一个整合3轴磁罗盘的IMU。对于多数应用，只需要IMU来计算相对重力方向的姿态已经足够了。MARC系统，也称为AHRS(姿态和方向参考系统)可以提供相对于重力和地球磁场方向的完整姿态测量。

陀螺仪用于测量旋转角速度，并且可以通过对积分得到传感器的姿态。由于高精度陀螺仪价格昂贵，并且体积庞大，所以像低精度的陀螺仪MEMS(Micro Electrical Mechanical System)得以在大多数情况下应用。陀螺仪的积分误差使得姿态的估计产生累积偏差。因此，单独使用陀螺仪并不能得到绝对的姿态数据。通过引进加速度计和磁力传感器对重力和地磁场的测量，系统可以计算出觉对的姿态数据。然而，加速计和磁传感器也更容易受到噪声的干扰。姿态滤波器是用于通过对陀螺仪、加速计和磁力计的融合得到姿态的。

卡尔曼滤波器是大多数主要应用里面公认的方向滤波器。高效和高精度使得卡尔曼滤波器在这些应用里面使用得非常广泛，但是卡尔曼滤波器也存在一些缺陷。比如线性卡尔曼适用的带宽受限，尔扩展卡尔曼因基于向量设计，需要的计算量相当大。

本次使用的方法是梯度下降算法。可以适用于IMU也适用于MARG传感器阵列。使用具有耦合性质的四元素表示方向而不是3个相互独立的欧拉角表示。

## 方向表示

四元数是用于表示刚体或坐标系在三位空间里面的姿态的四维复数。任意两个坐标系B和A，B在A中的表示，可以通过对A绕某个轴旋转一个角度实现。如图1所示。此方向的四元数表示为 ，如式(1.1)所示。，，，表示在三个方向上的分量。为了方便计算和表示方向，四元数一般要求模长为1。



|  |
| --- |
|  |

四元数的共轭，可以用来表示两个坐标系的互换。例如  是  的共轭，表示A相对于B的转换。共轭四元数如式(1.2)所示。







图1. 坐标系B在A中的表示

四元数的乘法，使用 表示，可以用来定义组合方向。例如两个方向和，组合方向的定义如式(1.3)所示。



对于两个四元数和，四元数的乘法由哈密顿法则决定，如式(1.4)所示。四元数乘法不满足交换律，即。



可以通过四元数对一个三维向量进行旋转，如式(1.5)所示， 和 是4维向量，是同一个向量在不同的坐标系和下的表示，三维向量各加入作为第一个元素。



以四元数表示的方向也可以表示成旋转矩阵的形式，转换关系如式(1.6)所示。



欧拉角也可以用来表示从坐标系到坐标系的旋转。，，分别表示绕当前坐标系()下三个坐标轴的旋转。当用欧拉角表示时，不同的旋转顺序会得到不同的方向，本文使用的旋转顺序是。其中绕各个轴的旋转如式(1.71.9)所示。

绕轴的旋转：



绕轴的旋转：



绕轴的旋转：



旋转矩阵可以由式(1.10)表示。



因此，联立式(1.6),(1.10), 得到从四元数到欧拉角的转换关系，如式(1.111.13)所示。







## 梯度下降算法

### 由角速度得到方向

三轴陀螺仪测量传感器相对于自身坐标系三个轴 的旋转角速度，分别对应 。通过式(1.14)的方式将这些参数整合到向量 中。四元数的导数，用以描述地球坐标系相对于传感器坐标系的旋转角速率，可以通过式(1.15)计算得到。





当初始条件已知时，时刻下，地球坐标系相对于传感器坐标系的方向 ，可以通过对四元数倒数 进行数值积分得到。如式(1.16)和(1.17)所示。





### 由向量观察得到方向

三轴加速度计可以测量重力加速度与传感器运动加速度的和加速度的大小以及方向。类似于三轴加速度计，三轴磁力传感器可以测量地球磁场和当前传感器所在环境的磁场的叠加的大小和方向。在方向滤波器中，我们一般假设加速度计和磁力传感器测量的只有重力加速度和地磁场。

如果一个方向场(地磁场或重力)在地球坐标系下已知，那么通过相应的传感器测量得到这个方向场在传感器坐标系下的表示之后，可以计算出传感器相对于地球的方向。然而，对于任意单个测量值(如重力)，都会存在多个方向解的情况。所有的解都可以通过其中一个解绕平行于这个方向场的向量旋转得到。这在一些应用里面是允许的，当使用欧拉角表示时，能够得到一个不完整的方向，即两个已知角度和未知角度，未知角度是绕平行于方向场方向的某个角度。而使用四元数表示时，需要得到一个完整的解。这里用的策略是从众多可能的解当中选取其中一个。因此可以运用最优化技术得到这个解，具体方式如下。

传感器方向, 是满足对地球坐标系的方向场进行旋转之后，旋转得到的向量和传感器测量得到的向量重合的方向。旋转过程如式(1.5)所示。因此，是以式(1.19)为目标函数的方程式(1.18)的解，各向量的定义如式(1.201.22)所示。











很多最优化算法可以用于解决当前问题，由于梯度下降算法在应用和计算上很简单，在本系统中采用该算法解决最优化问题。基于对初始姿态的估计以及迭代步长，使用梯度下降算法进行次迭代后的结果如式(1.23)所示。用于计算梯度的目标函数及其雅克比矩阵如式(1.2423)所示。









式(1.2326)描述公式的是应用于任意方向场下的一般形式。当一个方向场在地球坐标系中只存在1到2个主轴分量时，可以对公式进行简化以减小计算量。如地球重力方向可以假设成只存在z方向上的分量，而其他两个轴上的分量为0。如式(1.27)所示，将以及归一化后的加速度测量值代入上述方程中的和。方程转换为式(1.29),(1.30)所示。









对于地磁场，可以考虑成存在一个水平分量和一个垂直分量的向量。如式(1.31)所示。将和磁力计的测量值代入方程(1.25),(1.26)。得到式(1.33)，(1.34)。









正如前面所讨论的，单独使用测量的重力或者地磁场无法得到传感器方向的唯一解。为了得到唯一解，可以通过联立方程实现，如式(1.35)，(1.36)所示。