## AHRS倾角测量项目

### 操作要点：

* 零位时要求保持静止1S。用于采集精确的零位俯仰和横滚。
* 将机翼转动到角度最小处，保持静止1S。用于作为转轴计算参考r系，提高转轴计算精度。
* 加计和陀螺计算转轴的方法均要求转角越大，计算精度越高。因此求转轴阶段数据要求转动幅度范围大些。
* 每30S需要有一次

### 关键点备注

* 提高频率为500HZ进行静止状态判断，将各个阈值更精细调整，对数据进行野值剔除和平滑预处理。
* 在静止状态的判断中加入角速度微分判定。

### 功能要求描述：

机翼只有绕单轴转动一个自由度，以某个状态为参考零位，测量机翼在其他任何状态下相对参考零位的转动角度。

### 坐标系定义：

**机翼固连坐标系（）**：

**机翼转轴：**

**IMU固连坐标系（）**：

**IMU零位坐标系（）**：零位时刻的b系。

**NED地理系（）：**由于测试位置变化不大，可以认为****是不变的。

**游动水平面坐标系（）：**轴与****重合，在的投影与重合（即相对的航向始终为0）。

**世界坐标系（）：**。

* 静止时，通过加计可计算得到相对的俯仰和横滚角，又航向为0，因此即可得到 。



由于磁场干扰严重，只能利用加计和陀螺，不用磁力计。

### 解算方案：

输入：三轴加计数据 ，三轴陀螺数据 。

输出：机翼绕****的转角。

##### # 任意时刻单轴转角与俯仰横滚的关系

与机翼绕****转角的关系：



通过求可同时求得转角和转轴，其中应该是一个常数。

求：







上式中，和已知（由初始和t时刻俯仰横滚得到），已知，只有一个未知数。

NOTE：等式中2个方程解一个未知数存在的问题：当对应的俯仰和横滚与均为理论值时，这2个方程应该是得到一个一致解的，但当或者俯仰横滚有误差均会导致这两个方程得到不同的解。从几何意义上，应该求一个使得中的俯仰和横滚对应转轴与最接近的。对应的数学表达为：使最小。

的精度主要取决于的精度。静态时仅由加计即可求得，要得到0.1°测角精度，加计常漂估计误差大约要求在0.5mg以内。 这样的话，需要考虑温度的影响。

动态过程中，采用积分方法。设积分时间为30S，要求角度积分误差在0.3°以内，则要求陀螺漂移在0.01°/s内。ADIS16362的陀螺常漂为3°/s，常漂稳定性为0.007°/s，温度影响为0.01°/s/°C。在补偿温度影响的影响下勉强可以做到。但感觉和困难。。。

这种方法的**思想**是：只要俯仰和横滚，再利用单自由度约束就可直接得到转角，且同时可将航向解出。由于通过加计求俯仰和横滚的精度较高，不需要航向的算法可得到更高的精度。

#### （A）零位获取

静止时通过加计得到，零位时。

#### （B）转轴获取

##### （B1）静态转轴获取（纯加计）

纯利用加速度计求





将规范的转换为矢量显示形式（注意变为非规范化四元数）：



当，





式中，3个未知数，2个齐次方程。解不出来。每增加一组方程，增加1个未知数和2个方程。2组以上的方程可解得。且求得转轴的同时可得到转角。

###### K个点得到方程组：



采用最小二乘解法：



###### 转轴解算数据选择

选择转动角度的点进行转轴解算。问题是转轴没有解算出来角度是未知的。想到2中粗略的方案：（1）用俯仰横滚作粗略的判断；（2）用陀螺仪计算转角，作为判断依据。方法（2）的问题是纯加计求转轴的数据中，角速度是很慢的，可能平均角速度能到5°/s。另外导致这种方法失去只用加计的便捷性。

先试试方法（1），限定t时刻俯仰和横滚为如下条件时满足解算转轴的要求：

1. 假定t时刻的航向和初始时刻的航向都为0，得到一个转角，要求这个转角大于30°。即假设 ，则 中的转角大于30°。
2. t时刻为0加速度状态。

###### NOTE（方程待优化）：

* 方程解个数问题：当时可得到唯一解。
* 很小时求解误差很大，已经很小，所以从30°以上才能开始计算转轴。。
* 应该先剔除一些离群点，而不是直接最小二乘。
* **纯加计求转轴一个重要优化方法：**利用****

纯加计求转轴的一个重要误差来源于计算中较小时带来的误差。利用，可不直接计算，而通过检测出转角最小的点，而通过计算减小带来的误差。

#### （ ） 纯加计实时解算转角

由方程可得：





上式可解得。

##### （B2）动态转轴获取（纯陀螺）



0时刻，。采集陀螺数据，利用捷联惯导积分公式，计算得到。中的矢量部分即为所求转轴在初始本体系中的矢量。

转轴的优化方法：

（1）采用纯陀螺计算时，由于会随时间而累积误差，也将随时间累积误差。越大，在对后三位进行归一化时得到矢量误差越小。因此，采取快速转动，取转动最大角度的方法可得到较高精度。取角度最大的10°部分。

由于与相等，可从快速往复转动的最高点到最低点这段时间数据求取，并且可通过多次往复转动优化。

##### （B3）纯陀螺积分动态转轴获取优化

定义姿态误差角为：



状态量，状态方程：



量测方程根据角速度与转轴平行的关系得到。

准确的角速度与转轴平行的关系为：



做如下假设：

1）没有误差

2）

利用角速度与转轴平行的关系，在不考虑当前时刻的误差时，可直接得到累积姿态误差：







采用Kalman滤波，以为状态量，为状态方程（线性）。利用的矢量部分不变建立量测方程。

量测量：



量测方程（线性）：



##### （B4）利用加计优化陀螺积分的动态转轴获取







量测方程（线性）：



#### （C）纯陀螺转角计算

有两种计算方法，一种是积分法，一种是角速度和转轴平行法。

##### （C.1）角速度和转轴平行法（直接解算转角失败-得到一种陀螺漂移估计的观测信息）

转轴已知，利用角速度和转轴平行，可求出转动角度。转轴平行的几何表达方法有叉乘和点乘两种数学表达方法。需要求得的未知数只有一个，叉乘得到0矢量有2个方程，点乘得到标量有1个未知数，均可求出转角。但叉乘的方程较为复杂，点乘的方程较为简单，因此选择点乘法解转角。









由于与平行：





上式将消除了，因此求不出，等价于：



等价于：



结论的简单证明和几何理解：



即转轴在任何时刻本体系下的表达式一致的。根据这个结论，可以在零位之后遇到更好的数据时再次优化。

的几何意义是绕旋转一个角度，从集合上和好理解：



因此：



这是一个神奇的结论，r系和b系的矢量居然可以直接相乘。并且这个结论已经试验验证了。当角速度大于2°/s时，。当角速度大于8°/s时，。当角速度低于2°/s（0.0349rad/s）后，误差迅速增大，这是由于中由导致的误差被放大。

定义平行因子：



由于不需要将转换为，关系非常有用：

1）可用于粗略判断是否正确，如果在角速度大于5°/s时，，可以肯定的误差太大。

2）估计陀螺漂移：





对上式进行简化：





当远大于时：



定义漂移因子。



数据源：\_raw\_data\_4.20\Xu\ahrs1，取角速度为19°/s以上数据计算结果如上，的均值为-0.0113°/s。

取角速度为15°s以上数据计算的均值为-0.0107°/s。

取角速度为10°/s以上数据计算的均值为-0.0114°/s。

取角速度为5°/s以上数据计算的均值为-0.0129°/s。

可见，简化后的常值特性保持的还是比较好的。

###### 平行->估计陀螺漂移：

量测量：



量测方程：



这是非常简单的线性量测方程，注意这个量测信息只在远大于时有效。

##### （C.2）积分法



从中即可得转动角度。

#### （C）动态俯仰横滚计算方法

当物体不在静止状态时，可通过陀螺仪计算俯仰和横滚及。有两种计算方法，一种是积分法，一种是角速度和转轴平行法。

获得零位和转轴后，通过陀螺仪积分的办法计算，并采用Kalman滤波，利用转轴与角速度和速度垂直约束建立量测模型。当检测到静止时，进行校准。

捷联解算：  
 

状态量：





状态方程：



量测量：



量测方程：



#### （D）加计求俯仰和横滚（0运动加速度时）

0运动加速度时，通过加计可得到精度较高的俯仰和横滚，可用于校准俯仰和横滚。当检测到加计的模与重力加速度的模较为接近时，认为处于准静止状态。

以北东地地理坐标系为导航系。











0.01mg误差时的误差：



0.5mg误差时的误差：



1mg误差时的误差：



3mg误差时的误差：



和1mg误差时，且，的误差：



和1mg误差时，且，的误差：



和1mg误差时，且，的误差：



结论：

* + 越接近水平，测角精度越高。
  + 相同条件下，俯仰误差比横滚误差大。
* 近似有结论：对于本体系xy平面与水平面的夹角，60°时误差是0°的3倍，80°时误差是0°的9倍。
* （1）以俯仰和横滚30°为限，1mg加计常漂时，对应的测角误差约为0.1°。

（2）以俯仰和横滚60°为限，1mg加计常漂时，对应的测角误差约为0.2°。

#### （E） 加速度为0状态判断

当加速度为0时，可用加计测量俯仰横滚。



法向加速度： ，切向加速度：。

要求则为零加速度状态，充要条件是：

（1），即把IMU模块按照在转轴线上

（2），。

以上2种方法是通过陀螺判断是否零加速度。忽略加计零漂时，可通过加计模判定：

（3）

##### 0加速度状态判断解决方案：

1. 首先，使IMU模块安装尽量靠近转轴
2. 对陀螺模和加计模数据做平滑滤波，设置平滑步长=？（比如10ms，500HZ时的5个点）
3. 判断加计模与g之间的差是否在某个阈值内，比如1~3mg。
4. 满足3）后，判断当前时刻是否满足，设置阈值
5. 满足3）和4）后，计算，判断是否满足。

由于求微分噪声比较大，采取近似措施。针对满足的点，检查该点附近一段时间（比如0.05 S）内是否连续满足。

1. 同时满足以上条件则判断为0加速度状态。

##### 0加速度判断难点：

1）0加速度过程中偶尔会出现很短时间的数据跳动或野值，这些剧烈跳动的数据使得“角速度=0”的状态不连续，导致计算“角速度=长时间=0”区间时丢失一些长达1S的时间。

解决办法：

1. 对加计和陀螺做预处理，去除野值和异常的剧烈跳动数据。

直接对原始IMU数据进行平滑很麻烦，现直接对于采集的IMU数据进行步长为0.1~0.2s的卷积平滑，平滑对静止状态的判断非常有效。

为了增加精度，以后可改为仅对已经判断为静止的时间段IMU数据进行平滑。

2> 增大“角速度=0”的平滑处理程度

3> 增大“加速度模=g”的平滑处理程度

**正弦运动的加速度大小：**





* 
* 
* 
* 

为了使，要求：。

* 
* 

**安装1米远时加速度大小**

* 
* 
* 

#### （E） 静止状态判断

静止状态加速度、速度、角速度、角速度变化率都为0 。

1. 首先判读角速度是否为0；
2. 满足（1）后，判断加速度模是否为g；
3. 判断角速度变化率是否为0。

#### （G） 运动加速度剔除

当发现持续某个时长（如10S）没有检测到0加速度状态时，只能选择某个加速度较低的状态，对其进行运动加速度剔除后进行俯仰和横滚求解。



#### （）数据预处理

###### （1）去除野值

突变较大的数为野值。判断第k个点是否为野值：

对第 k-N1到k+N2个点进行线性平滑，求

##### 加计陀螺参数

陀螺零漂：3°/s，陀螺零漂稳定性：0.007°/s，角度随机游走2°/h，陀螺零漂温度系数：0.01°/s/°C。

加计零漂：6mg，加计零漂稳定性：41g，速率随机游走0.09m/s/h，加计零漂温度系数：0.05mg/s/°C。

##### 50HZ静止状态参数-4.20北航转台采集-ahrs2

meam\_gyro = ( -0.02, -0.07, -0.13 ) °/s

std\_gyro = ( 0.33, 0.30, 0.33 ) °/s

meam\_acc = ( -1.45, 584.14, 812.82 ) mg

std\_acc = ( 1.82, 1.78, 1.83 ) mg

max\_gyro = ( 1.10, 0.70, 0.60 ) °/s

min\_gyro = ( -1.10, -1.10, -0.90 ) °/s

maxPlusMin\_gyro = ( 2.20, 1.80, 1.50 ) °/s

max\_acc = ( 3.33, 588.74, 816.85 ) mg

min\_acc = ( -6.33, 580.09, 807.86 ) mg

maxAccErr = ( 4.88, 4.61, 4.96 ) mg







##### 50HZ静止状态参数-4.20办公室地面测-static1

meam\_gyro = ( 0.06, -0.15, -0.03 ) °/s

std\_gyro = ( 0.31, 0.34, 0.38 ) °/s

meam\_acc = ( -24.63, -20.34, 999.66 ) mg

std\_acc = ( 1.68, 1.93, 1.81 ) mg

max\_gyro = ( 1.00, 0.90, 0.90 ) °/s

min\_gyro = ( -0.80, -1.30, -0.80 ) °/s

maxPlusMin\_gyro = ( 1.80, 2.20, 1.70 ) °/s

max\_acc = ( -20.98, -14.99, 1003.66 ) mg

min\_acc = ( -28.64, -24.64, 994.34 ) mg

maxAccErr = ( 4.01, 5.35, 5.32 ) mg





