

INS的初始对准

- 惯导初始化
- 静态粗对准
- 初始对准影响因素
- 姿态测量的通用原理

INS的初始化

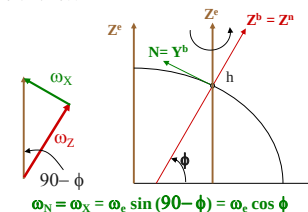
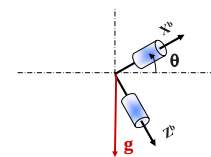
- 初始位置: 给定(例如从 GPS)
- 初始速度: 零 (静止状态)或给定
- 初始姿态: 初始对准
 - 粗对准 vs. 精对准
 - 静止状态 vs. 运动状态
 - 重要性: 失之毫厘, 谬以千里

$$\delta r^N = \delta r_0^N + \delta v_0^N \cdot t + \frac{1}{2} \left(g \cdot \delta \theta_0 + b_{aN} \right) \cdot t^2 + \frac{1}{6} \left(b_{gE} \right) \cdot g \cdot t^3$$

- * 定义姿态角 roll, pitch, yaw/azimuth/heading
- * 强调载体坐标系(b-frame) 采用前右下(F-R-D)

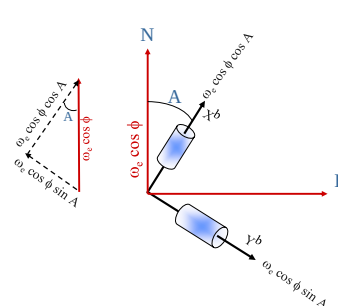
静态粗对准

- Accl. Leveling (加速度计调平)
 - 通过感应重力加速度找到水平
- Gyro Compassing (陀螺罗盘)
 - 通过感应地球自转角速度找到航向



静态粗对准 (续)

在加速度计调平的基础上:



$$\begin{aligned} \omega_x^b &= \omega_e \cos \phi \cos A \\ \omega_y^b &= -\omega_e \cos \phi \sin A \\ \tan A &= -\omega_y^b / \omega_x^b \Rightarrow \text{Azimuth} \end{aligned}$$

- * 不需要知道当地纬度
- * 可以计算经度

思考题

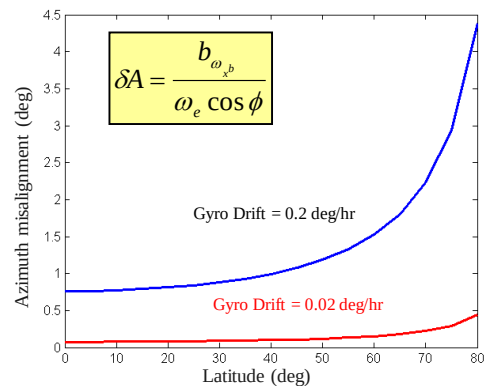
1. 加速度计调平的精度取决于什么？
2. 陀螺罗盘的精度取决于什么？
3. 在静基座对准中，纬度=30°，东向陀螺零偏=0.01 deg/hr，那么造成的航向误差是多少？
4. 如果纬度=80° 呢？
5. 如果陀螺的 ARW=0.002 deg/sqrt(hr)，为了在纬度=45° 的地方得到小于0.7 mrad的航向标准差，初始对准时间至少应为多长？

* bias, noise, SF

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

109

航向角精度依赖于？



© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

111

思考题(续)

答3: 纬度=30°，东向陀螺零偏=0.01 deg/hr，所以

$$\begin{aligned} \delta A &= \frac{b_{\omega_x^b}}{\omega_e \cos \phi} = \frac{0.01(\text{deg/h})}{15(\text{deg/h}) \cos 30^\circ} \\ &= 7.698 \times 10^{-4} \text{ rad} = 7.698 \times 10^{-4} \frac{180}{\pi} \text{ deg} = 0.0441 \text{ deg} \\ &= 2.65' \end{aligned}$$

答4: 纬度=80°，东向陀螺零偏=0.01 deg/hr，所以

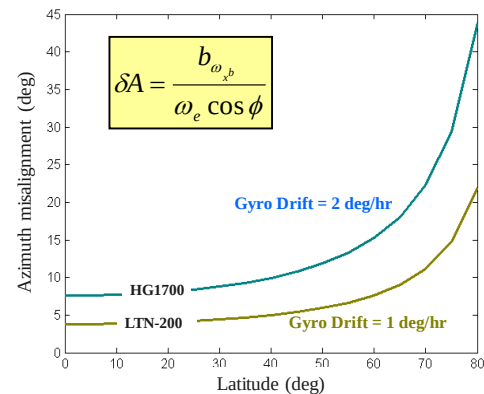
$$\delta A = 0.22 \text{ deg} = 13 \text{ arc min}$$

* Depend on latitude!

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

110

航向角精度依赖于？



© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

112

陀螺噪声对初始对准的影响——对准时间



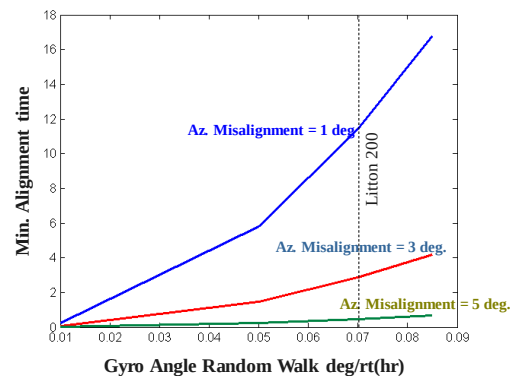
- 陀螺噪声也影响初始对准精度
- 陀螺均值的RMS误差正比于对准时间(T_a) 的均方根

$$\delta A = \frac{ARW}{\omega_e \cos \phi \sqrt{T_a}} \rightarrow T_a = \left(\frac{ARW}{\omega_e \cos \phi \delta A} \right)^2$$

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

113

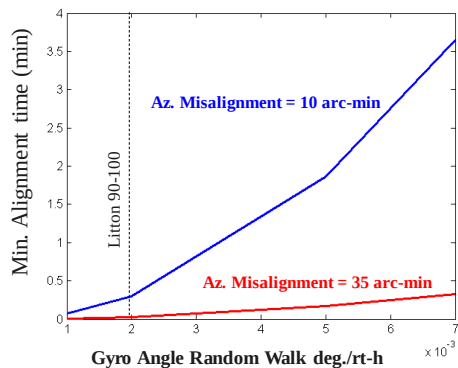
陀螺噪声对初始对准的影响(续)



© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

115

陀螺噪声对初始对准的影响(续)



© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

114

静基座对准的航向角误差取决于?



- 陀螺 (东向轴) 零偏
- 纬度 (ϕ)
- 陀螺角度随机游走 (ARW)
- 对准时间 (T_a)
- 加速度计调平精度
- 载体的晃动

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

116

姿态测量的通用原理

- 已知两个坐标系下的两个非平行向量

$$\gamma^n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad \omega_{ie}^n = \begin{bmatrix} \omega_{ie} \cdot \cos \phi \\ 0 \\ -\omega_{ie} \cdot \sin \phi \end{bmatrix}$$

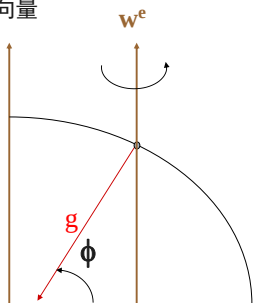
$$\mathbf{v} = \gamma \times \omega_{ie}$$

$$\begin{bmatrix} \gamma^n & \omega_{ie}^n & \mathbf{v}^n \end{bmatrix} = \mathbf{C}_b^n \cdot \begin{bmatrix} \gamma^b & \omega_{ie}^b & \mathbf{v}^b \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \mathbf{C}_b^n = \begin{bmatrix} \gamma^n & \omega_{ie}^n & \mathbf{v}^n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \gamma^b & \omega_{ie}^b & \mathbf{v}^b \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\mathbf{C}_n^b \cdot \begin{bmatrix} \gamma^n & \omega_{ie}^n & \mathbf{v}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma^b & \omega_{ie}^b & \mathbf{v}^b \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \mathbf{C}_n^b = \begin{bmatrix} \gamma^b & \omega_{ie}^b & \mathbf{v}^b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \gamma^n & \omega_{ie}^n & \mathbf{v}^n \end{bmatrix}^{-1}$$



$$\mathbf{C}_b^n = (\mathbf{C}_n^b)^{-1} = (\mathbf{C}_n^b)^T$$

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

117

姿态表达式

- 欧拉角

- 从n系到b系：航向→俯仰→横滚(Yaw-Pitch-Roll)
- 不可交换
- 在俯仰±90° 时奇异

- 方向余弦矩阵

$s = \sin; c = \cos$

$$\mathbf{C}_b^n = (\mathbf{C}_n^b)^T = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -c\phi s\psi + s\phi s\theta c\psi & s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi \\ c\theta s\psi & c\phi c\psi + s\phi s\theta s\psi & -s\phi c\psi + c\phi s\theta s\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix}$$

■ 航向角 $\alpha = \tan^{-1} \frac{C_{21}}{C_{11}} \quad (-\pi < \alpha \leq \pi)$

■ 俯仰角 $\theta = \tan^{-1} \frac{-C_{31}}{\sqrt{C_{32}^2 + C_{33}^2}} \quad (-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2)$

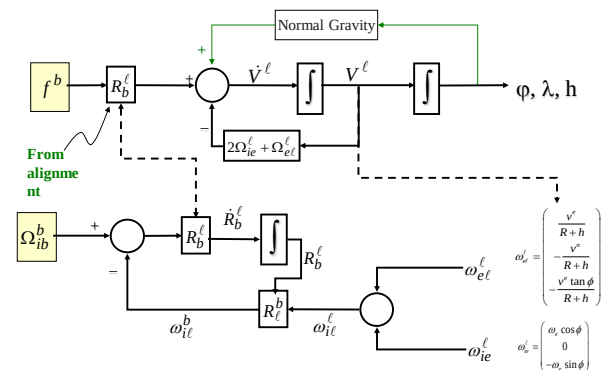
■ 横滚角 $\phi = \tan^{-1} \frac{C_{32}}{C_{33}} \quad (-\pi < \phi \leq \pi)$

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

118

惯导设备的使用

INS算法

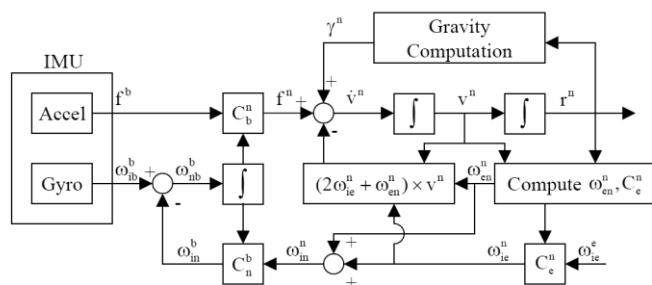


© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

120

INS 算法 (续)

□ 一种典型的INS机械编排框图



© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

121

INS测量 (续)

□ 典型的正式测试任务

1. 静态模式下5-15分钟初始对准
2. INS初始化 (初始化速度和位置)
3. 定期进行零速修正 (ZUPT) 或坐标修正 (CUPT)
4. 用Kalman 滤波进行数据处理 (实时或事后)
5. 反向平滑处理 (事后)
6. 结果显示、检查和输出

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

123

INS测量

□ 在使用惯导系统做测量应用之前

1. 认真阅读设备使用手册
2. 测试标定惯导系统, 估计出加速度计和陀螺仪的零偏和比例因子误差的确定性部分, 并加以补偿
3. 采集长时间的设备数据, 用来估计加速度计和陀螺的随机误差特性(例如, 白噪声、零偏的一阶Gauss-Markov过程参数)
4. 根据陀螺的噪声参数 (ARW) 估算所需初始对准的时长 (考虑现实可行性), 以保证初始对准的航向角精度

□ 做动态测试来演练并考核系统性能

1. 验证导航算法实现的正确性, 精调算法参数, 预估辅助信息更新所需要的频率来保障一定的测量精度.
2. 需要一个好的参考轨迹 (参考真值, 通常是 GPS).
3. 测试轨迹通常是富含典型动态信息的 “L” 或 “S” 形轨迹.

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

122

IMU 输出数据格式

- 速度增量 (Δv) 和角度增量 ($\Delta \theta$)
- 采样定理: 带宽 vs. 数据率
- 连续时间 vs. 离散时间
- 圆锥效应Coning, 划桨效应Sculling, 涡卷效应Scrolling

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

124

附录 – 坐标系

□ 常用坐标系

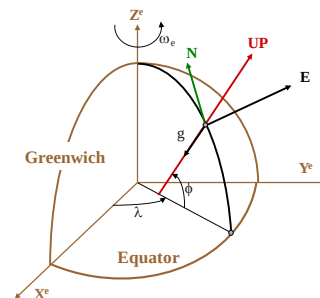
- 实用惯性系 (i-frame)
- 地固系 (ECEF, e-frame)
- 当地水平系 (LLF, n-frame)
- 载体系 (b-frame)

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

125

附录 – 坐标系

□ Local-Level-Frame (LLF, n-frame)



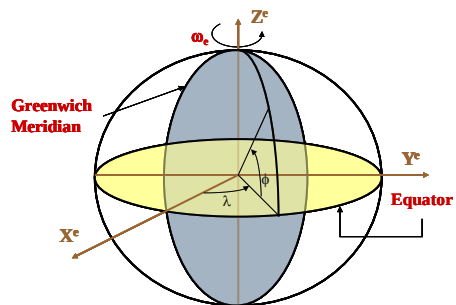
- * LLF is special
- * E-N-U vs. N-E-D
- * 类似站心坐标系?

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

127

附录 – 坐标系

- Practical inertial frame (i-frame)
- Earth fixed frame (ECEF, e-frame)



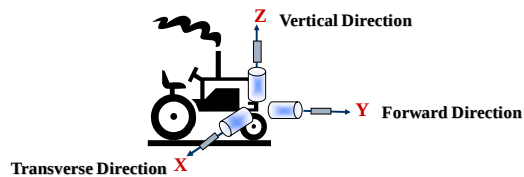
* WGS84 ?

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

126

附录 – 坐标系

□ Body frame (b-frame)



- * Sensor-frame vs. Vehicle-frame
- * R-F-U vs. F-R-D
- * 3D Nav

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

128