全日制学位研究生专业必修课《现代导航技术》

第10章 地球物理场和视觉导航技术

主讲教师：赵龙
办公地点：新主楼E402
网　站：dnc.buaa.edu.cn
Email：flylong@buaa.edu.cn

本章的学习目的

1、地球物理场导航的意义。

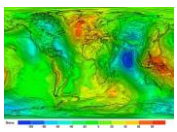
2、掌握地形匹配、景像匹配、地磁匹配、重力匹配和视觉导航定位技术的原理。

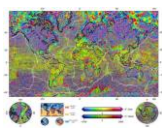
3、掌握惯性/地球物理场组合导航数学模型的建立

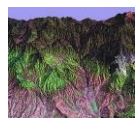
10.1、概述

- 地球物理场

各种地球物理方法在地表或地表附近测量的各种物理现象的信息可以统称为地球物理场的信息。可分为天然存在的地球物理场和人工激发的地球物理场。


重力异常场


地磁异常场


地形场


光场

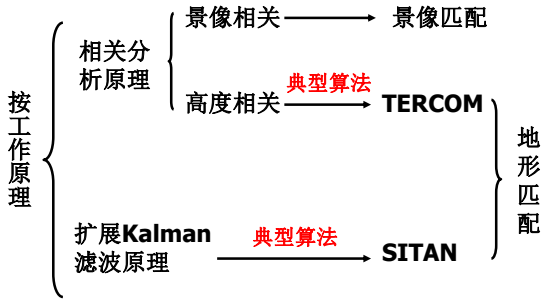
10.1、概述

- 地球物理场导航技术

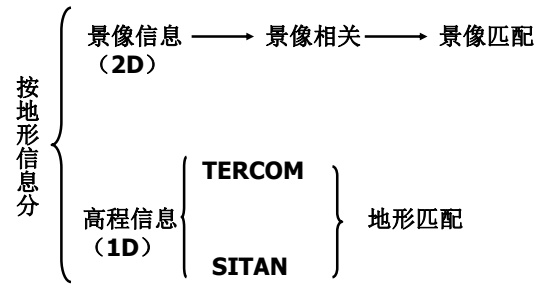
地球物理场导航定位技术是通过载体上地球物理场测量传感器测量的信息与储存在载体导航计算机中的地球物理场基准信息相比较确定载体导航参数的技术。

北航数字导航中心长期从事地球物理场导航与定位技术研究，从理论、算法、仿真和应用方面取得了一系列的成果，部分成果已经在实际中进行应用。

10.1、概述

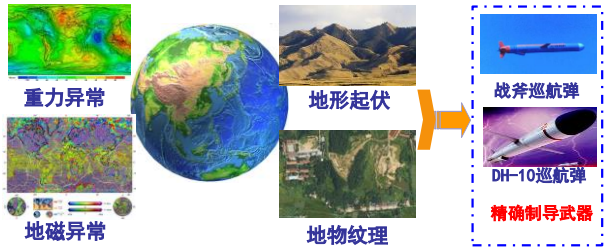


10.1、概述

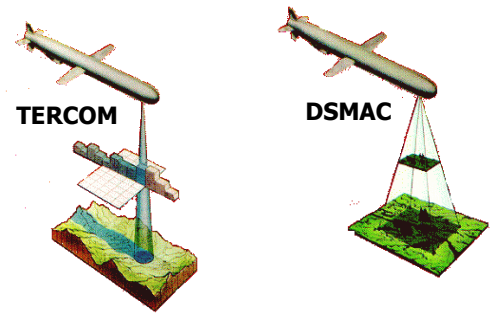


10.1、概述

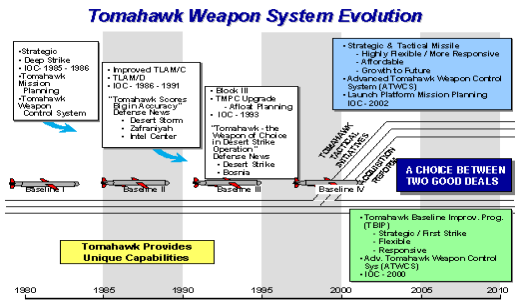
➢ 在GNSS信号不可用时，地球物理场可提供定位信息



10.1、概述

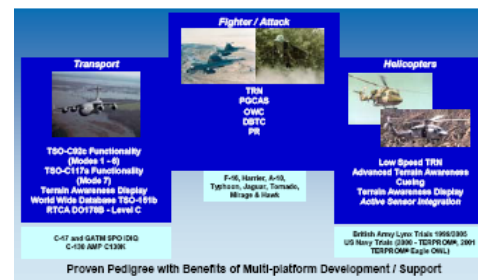


10.1、概述



美国GPS成熟，地形匹配为备份导航系统，景像还在用

10.1、概述



TERPROM

10.1、概述



TERPROM

10.2、地形匹配和地形辅助惯性导航

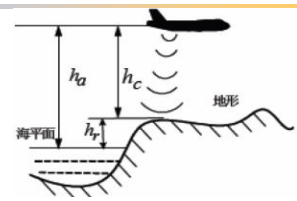
➢ 匹配导航

h_a：海拔高度

h_r：地形的高度

h_c：相对高度

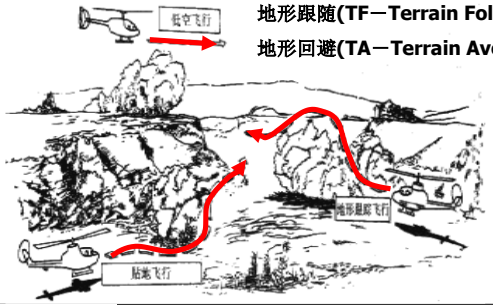
$h_r=h_a-h_c$



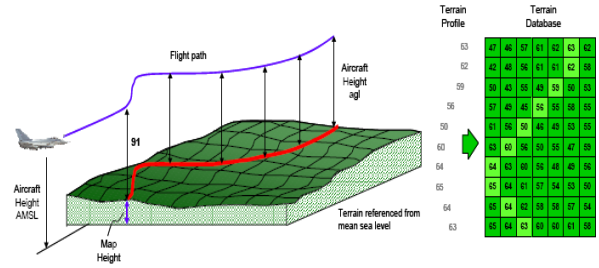
- 惯性导航系统——可提供全部导航信息；
- 无线电高度表——测量飞行器对地面的相对高度；
- 气压式高度表或大气数据中心——单独或与惯导系统综合地提供飞行器的海拔或绝对高度；
- 导航计算机和大容量存储器——完成导航计算和存储数字地图。

10.2、地形匹配和地形辅助惯性导航

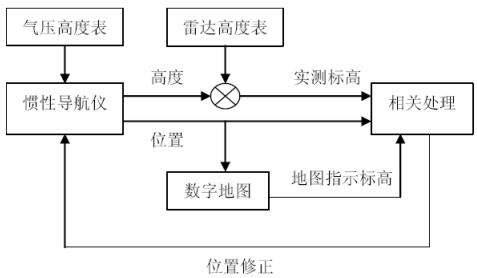
地形辅助导航(TAN)
地形跟随(TF—Terrain Follow)
地形回避(TA—Terrain Avoid)



10.2、地形匹配和地形辅助惯性导航



10.2、地形匹配和地形辅助惯性导航



相关分析原理

10.2、地形匹配和地形辅助惯性导航

➢ **相关分析算法的三种典型算法**

- **交叉相关算法(COR-Cross CoRelation)**

$$J_{COR}=\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}h_m(x+i\delta x,y+j\delta y)h_r(i) \Rightarrow \text{MAX}$$

- **平均绝对值算法(MAD-Mean Absolute Difference)**

$$J_{MAD}=\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}|h_m(x+i\delta x,y+j\delta x)-h_r(i)| \Rightarrow \text{MIN}$$

- **均方差算法(MSD-Mean Square Difference)**

$$J_{MSD}(j\delta x)=\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}[h_m(x+i\delta x,y+j\delta y)-h_r(i)]^2 \Rightarrow \text{MIN}$$

10.2、地形匹配和地形辅助惯性导航

➢ **惯导/地形匹配组合系统状态方程的建立**

$$X(t)=[\phi_E\ \phi_N\ \phi_U\ \delta v_E\ \delta v_N\ \delta L\ \delta\lambda\ \delta h]^T$$

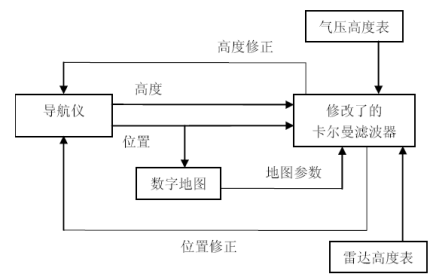
$$\dot{X}(t)=F(t)X(t)+W(t)$$

➢ **惯导/地形匹配组合系统量测方程的建立**

$$Z(t)=\begin{bmatrix}L_I-L_T\\ \lambda_I-\lambda_T\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\delta L+N_N\\ \delta\lambda+N_E\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\delta L\\ \delta\lambda\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}N_N\\ N_E\end{bmatrix}=H(t)X(t)+V(t)$$

$$H=\begin{bmatrix}0\,0\,0\,0\,0\,1\,0\,0\\ 0\,0\,0\,0\,0\,0\,1\,0\end{bmatrix}$$

10.2、地形匹配和地形辅助惯性导航



基于扩展Kalman滤波的方法

10.2、地形匹配和地形辅助惯性导航

- SITAN算法的数学模型
  - 系统状态方程的建立

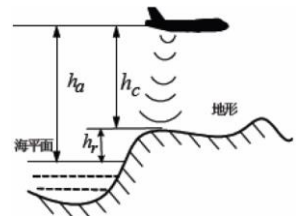
$$X=\begin{bmatrix}\delta x & \delta y & \delta z & \delta v_x & \delta v_y\end{bmatrix}^T$$

$$X_{k+1}=\Phi_{k+1,k}X_k+\Gamma_k\omega_k$$

$$\Phi_{k,k-1}=\begin{bmatrix}1&0&0&T&0\\0&1&0&0&T\\0&0&1&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&0&0&1\end{bmatrix}\qquad \Gamma_k=\begin{bmatrix}T&0&0&T^2/2&0\\0&T&0&0&T^2/2\\0&0&T&0&0\\0&0&0&T&0\\0&0&0&0&T\end{bmatrix}$$

10.2、地形匹配和地形辅助惯性导航

- SITAN算法的数学模型
  - 量测方程的建立



$$\hat{h}_c=\hat{h}_a-\hat{h}_d(\hat{x},\hat{y})$$

$$\hat{h}_d(\hat{x},\hat{y})=\hat{h}_r(\hat{x},\hat{y})+\gamma_m$$

$$\tilde{h}_c(x,y)=h_c(x,y)+\gamma_r$$

10.2、地形匹配和地形辅助惯性导航

- SITAN算法的数学模型
  - 量测方程的建立

$$\hat{h}_c=\hat{h}_a-\hat{h}_d(\hat{x},\hat{y})\qquad \tilde{h}_c(x,y)=h_c(x,y)+\gamma_r$$

$$Z=\hat{h}_c-\tilde{h}_c=\hat{h}_a-\hat{h}_d(\hat{x},\hat{y})-\tilde{h}_c(\hat{x},\hat{y})$$

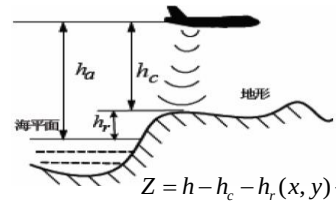
$$=\hat{h}+\delta h-\hat{h}_r(x+\delta x,y+\delta y)-\gamma_m-h_c(\hat{x},\hat{y})-\gamma_r$$

$$=h-h_c-h_r(x,y)-\frac{\partial h_r(x,y)}{\partial x}\delta x-\frac{\partial h_r(x,y)}{\partial y}\delta y$$

$$+\delta h-\gamma_m-\gamma_r-\gamma_l$$

10.2、地形匹配和地形辅助惯性导航

- SITAN算法的数学模型
  - 量测方程的建立



$$h-h_c-h_r(x,y)=0$$

$$Z=h-h_c-h_r(x,y)-\frac{\partial h_r(x,y)}{\partial x}\delta x-\frac{\partial h_r(x,y)}{\partial y}\delta y$$

$$+\delta h-\gamma_m-\gamma_r-\gamma_l$$

10.2、地形匹配和地形辅助惯性导航

- SITAN算法的数学模型
  - 量测方程的建立

$$Z=-\frac{\partial h_r(x,y)}{\partial x}\delta x-\frac{\partial h_r(x,y)}{\partial y}\delta y+\delta h-\gamma_m-\gamma_r-\gamma_l$$

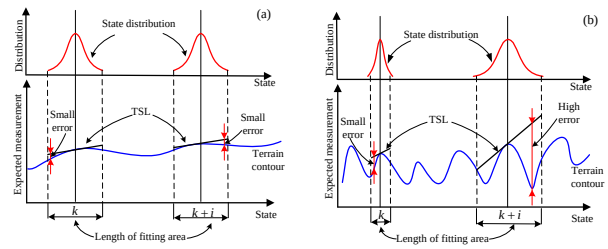
$$h_x=\frac{\partial h_r(x,y)}{\partial x}\qquad h_y=\frac{\partial h_r(x,y)}{\partial y}\qquad \gamma=\delta h-\gamma_m-\gamma_r-\gamma_l$$

$$Z=HX+\gamma$$

$$H=\begin{bmatrix}-h_x & -h_y & 1 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

10.2、地形匹配和地形辅助惯性导航

- BITAN（BUAA Inertial Terrain Aided Navigation）算法



Long Zhao, et al. A Novel Terrain Aided Navigation Algorithm Combined with the TERCOM Algorithm and Particle Filter. IEEE Sensors Journal, 2015,15(2): 1124-1131

10.2、地形匹配和地形辅助惯性导航

- 试飞实验获得了39.4米（CEP）的定位精度；
- 填补了我国在战术轰炸机上使用地形匹配技术的空白；
- 荣获航空总公司科技进步二等奖 。



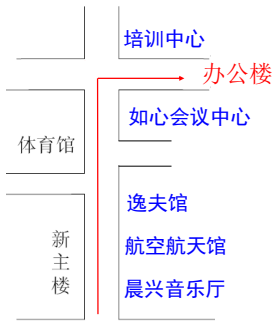



10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航

➢ 在三维空间环境中，人可以利用视觉进行导航定位



10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航



完成这一过程的要素：

（1）基准信息

（2）实时获取信息

（3）对实时获取信息处理

10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航

景像匹配导航技术

利用飞行器实时采集的景像实时图与预先制备的景像基准图进行匹配，获得飞行器精确定位的一项技术。

10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航

➢ 景像匹配——粗匹配算法



10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航

➢ 景像匹配——粗匹配算法

基准图　实时图

- 平均绝对差（Mean Absolute Difference）

$$MAD(x,y)=\frac{1}{Nx\cdot Ny}\sum_{i=1}^{Nx}\sum_{j=1}^{Ny}\left|g(x,y)_{i,j}-f_{i,j}\right| \rightarrow \text{MIN}$$

- 修正相关系数（Correction Correlation Function）

$$COR(x,y)=\left.\frac{Cov(g(x,y)_{i,j},f_{i,j})}{\sqrt{D(g(x,y)_{i,j})}\sqrt{D(f_{i,j})}}\right|_{i,j\in W} \rightarrow \text{MAX}$$

基准图和实时图互协方差

基准图自协方差

10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航

➢ 景像匹配——粗匹配算法

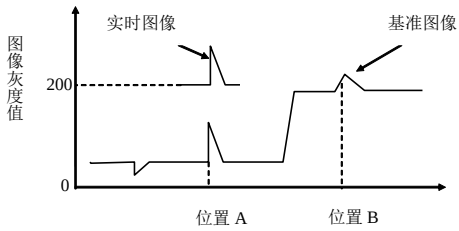


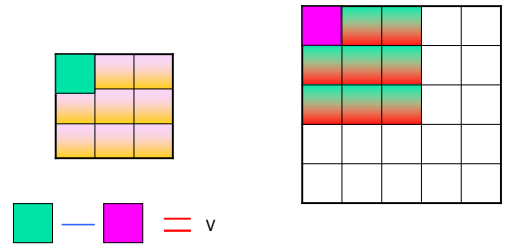
图 11.3 实时图像在 A 位置的相似性更好，而在 B 位置的差异性更小。CCF 会准确确定 A 为匹配点，而 MAD 会错误地确定为 B 位置。

10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航

➢ 景像匹配——精匹配算法

▪ “灰度差的平方和最小”

$$\sum vv = \min$$



10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航

➢ 景像匹配——精匹配算法

✓ 几何变形

$$\begin{aligned} x_2 &= a_0 + a_1 x + a_2 y \\ y_2 &= b_0 + b_1 x + b_2 y \end{aligned}$$

✓灰度畸变+几何变形

$$f_r(x,y)+n_1(x,y)=h_0+h_1 f_c(a_0+a_1x+a_2y,b_0+b_1x+b_2y)+n_2(x,y)$$

基准图灰度分布　实时图灰度分布　x_2　y_2

10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航

➢ 景像匹配——精匹配算法

$$f_r(x,y)=h_0+h_1 f_c(a_0+a_1x+a_2y,b_0+b_1x+b_2y)+e(x,y)$$

基准图灰度分布的估计值为

$$\hat{f}_r(x,y)=h_0+h_1 f_c(a_0+a_1x+a_2y,b_0+b_1x+b_2y)$$

令 $G(h_0,h_1,a_0,a_1,a_2,b_0,b_1,b_2)=\hat{f}_r(x,y)$，

在 X_0 =（0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1）对 G 进行线性化

$h_0 = 0$； $h_1 = 1$； $a_0 = 0$； $a_1 = 1$； $a_2 = 0$；

$b_0 = 0$； $b_1 = 0$； $b_2 = 1$

10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航

➢ 景像匹配——精匹配算法

$$G=\hat{f}_r(x,y)=h_0+h_1 f_c(a_0+a_1x+a_2y,b_0+b_1x+b_2y)\,|_{X_0=(0,1,0,1,0,0,0,1)}$$

$$\begin{aligned} &= f_c(x,y)+dh_0+f_c(x,y)\,dh_1+f_{cx}'(x,y)\,da_0+f_{cx}'(x,y)\,x\,da_1 \\ &\quad +f_{cx}'(x,y)\,y\,da_2+f_{cy}'(x,y)\,db_0+f_{cy}'(x,y)\,x\,db_1+f_{cy}'(x,y)\,y\,db_2 \end{aligned}$$

式中，$dh_0=h_0-0$，$dh_1=h_1-1$，$da_0=a_0-0$，$da_1=a_1-1$，

$da_2=a_2-0$，$db_0=b_0-0$，$db_1=b_1-0$，$db_2=b_2-1$，

$$f_{cx}'(x,y)=\frac{\partial f_c(x,y)}{\partial x}，\quad f_{cy}'(x,y)=\frac{\partial f_c(x,y)}{\partial y}。$$

10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航

➢ 景像匹配——精匹配算法

$$Y(x,y)=X^T(x,y)W+v(x,y)$$

式中，$X(x,y)=[1,\ f_c(x,y),\ f_{cx}'(x,y),\ f_{cx}'(x,y)\,x,\ y,$

$f_{cy}'(x,y),\ f_{cy}'(x,y)\,x,\ f_{cy}'(x,y)\,y\,]^T$；

$Y(x,y)=f_r(x,y)-f_c(x,y)$；

$W=[\,dh_0,\ da_0,\ da_1,da_2,\ db_0,\ db_1,\ db_2\,]^T$；

$v(x,y)$ 为量测噪声。

10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航

- 景像匹配——精匹配算法

$$Y(k) = X^T(k)W + v(k) \qquad k = 1,2,\cdots,p*q$$

$$W = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

$$\hat{h}_0 = dh_0 \qquad \hat{a}_0 = da_0 \qquad \hat{b}_0 = db_0$$

$$\hat{a}_1 = da_1 + 1 \qquad \hat{b}_1 = db_1$$

$$\hat{h}_1 = dh_1 + 1 \qquad \hat{a}_2 = da_2 \qquad \hat{b}_2 = db_2 + 1$$

$$\hat{f}_r(x,y) = \hat{h}_0 + \hat{h}_1 f_c(\hat{a}_0 + \hat{a}_1 x + \hat{a}_2 y, \hat{b}_0 + \hat{b}_1 x + \hat{b}_2 y)$$

10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航

- 景像匹配——精匹配算法



- 最小二乘景像匹配将景像匹配与几何改正作为参数同时解算

10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航

- 惯导/景像匹配组合系统状态方程的建立

$$X(t) = [\phi_E \ \phi_N \ \phi_U \ \delta v_E \ \delta v_N \ \delta L \ \delta\lambda \ \delta h]^T$$

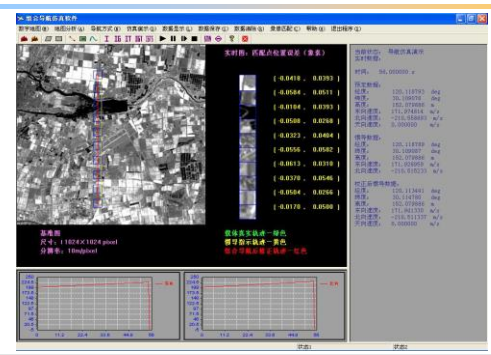
$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + W(t)$$

- 惯导/景像匹配组合系统量测方程的建立

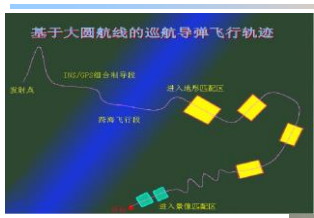
$$Z(t) = \begin{bmatrix} L_I - L_S \\ \lambda_I - \lambda_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta L + N_N \\ \delta\lambda + N_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta L \\ \delta\lambda \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_N \\ N_E \end{bmatrix} = H(t)X(t) + V(t)$$

$$H = \begin{bmatrix} 00000100 \\ 00000010 \end{bmatrix}$$

10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航



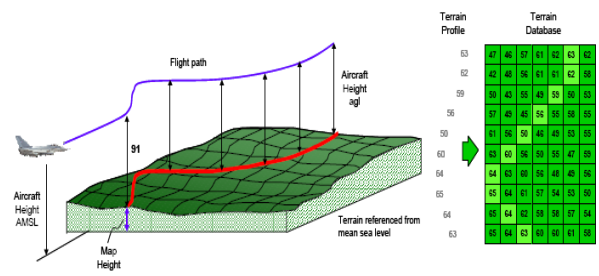
10.3 景像匹配和惯导/景像匹配组合导航





地理信息科技进步一等奖

10.4 地磁匹配和惯性/地磁组合导航



10.4 地磁匹配和惯性/地磁组合导航

➢ **相关分析算法的三种典型算法**

- **交叉相关算法(COR-Cross CoRelation)**

$$J_{COR}=\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}h_m(x+i\delta x,y+j\delta y)h_r(i) \Rightarrow \text{MAX}$$

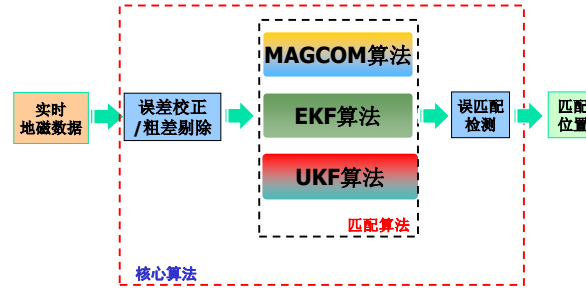
- **平均绝对值算法(MAD-Mean Absolute Difference)**

$$J_{MAD}=\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}|h_m(x+i\delta x,y+j\delta x)-h_r(i)| \Rightarrow \text{MIN}$$

- **均方差算法(MSD-Mean Square Difference)**

$$J_{MSD}(j\delta x)=\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}[h_m(x+i\delta x,y+j\delta y)-h_r(i)]^2 \Rightarrow \text{MIN}$$

10.4 地磁匹配和惯性/地磁组合导航



10.4 地磁匹配和惯性/地磁组合导航

➢ **惯导/地磁匹配组合系统状态方程的建立**

$$X(t)=[\phi_E\ \phi_N\ \phi_U\ \delta v_E\ \delta v_N\ \delta L\ \delta\lambda\ \delta h]^T$$

$$\dot{X}(t)=F(t)X(t)+W(t)$$

➢ **惯导/地磁匹配组合系统量测方程的建立**

$$Z(t)=\begin{bmatrix}L_I-L_T\\ \lambda_I-\lambda_T\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\delta L+N_N\\ \delta\lambda+N_E\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\delta L\\ \delta\lambda\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}N_N\\ N_E\end{bmatrix}=H(t)X(t)+V(t)$$

$$H=\begin{bmatrix}0&0&0&0&0&1&0&0\\ 0&0&0&0&0&0&1&0\end{bmatrix}$$

10.4 地磁匹配和惯性/地磁组合导航

➢ **系统状态方程的建立**

$$X=\begin{bmatrix}\delta x & \delta y & \delta z & \delta v_x & \delta v_y\end{bmatrix}^T$$

$$X_{k+1}=\Phi_{k+1,k}X_k+\Gamma_k\omega_k$$

$$\Phi_{k,k-1}=\begin{bmatrix}1&0&0&T&0\\0&1&0&0&T\\0&0&1&0&0\\0&0&0&1&0\\0&0&0&0&0\end{bmatrix}\qquad \Gamma_k=\begin{bmatrix}T&0&0&T^2/2&0\\0&T&0&0&T^2/2\\0&0&T&0&0\\0&0&0&T&0\\0&0&0&0&T\end{bmatrix}$$

10.4 地磁匹配和惯性/地磁组合导航

➢ **量测方程的建立**

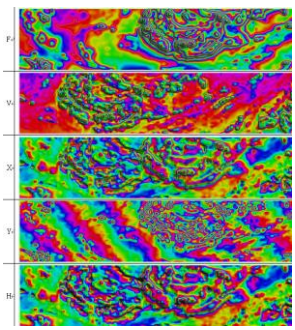
$$Z=-\frac{\partial M_r(x,y)}{\partial x}\delta x-\frac{\partial M_r(x,y)}{\partial y}\delta y+\delta M-\gamma_m-\gamma_r-\gamma_l$$

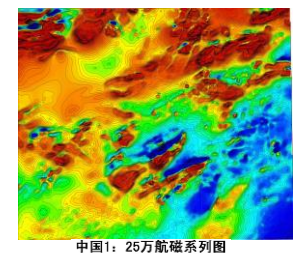
$$M_x=\frac{\partial M_r(x,y)}{\partial x}\quad M_y=\frac{\partial M_r(x,y)}{\partial y}\quad \gamma=\delta h-\gamma_m-\gamma_r-\gamma_l$$

$$Z=HX+\gamma$$

$$H=\begin{bmatrix}-M_x & -M_y & 1 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

10.4 地磁匹配和惯性/地磁组合导航



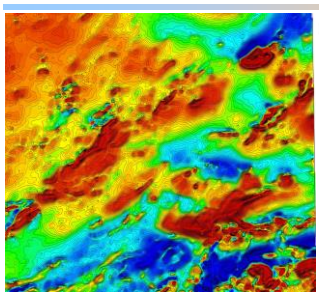


中国1：25万航磁系列图

L50C004003
西乌珠穆沁旗

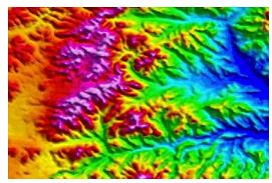
航磁△T等值线平面图

10.4 地磁匹配和惯性/地磁组合导航



中国1：25万航磁系列图

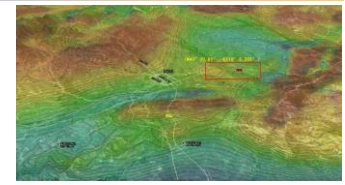
K50C001003
林西县



数字高程模型（DEM）

10.4 地磁匹配和惯性/地磁组合导航







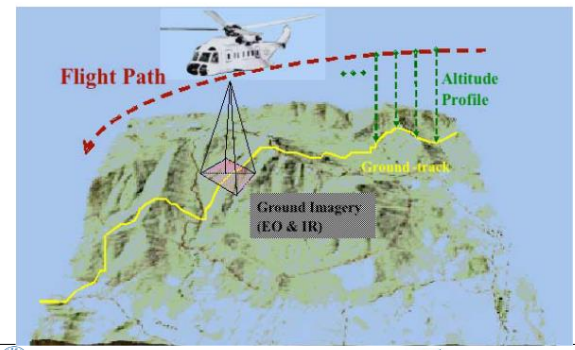


10.4 地磁匹配和惯性/地磁组合导航

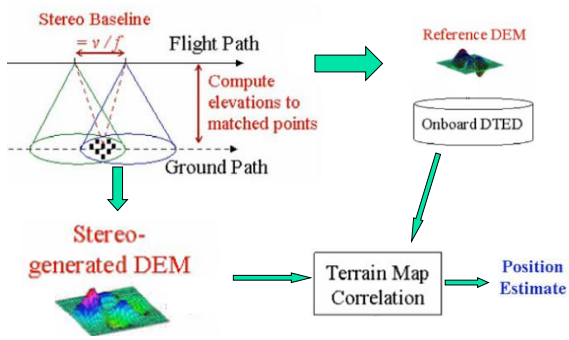


地理信息科技进步二等奖

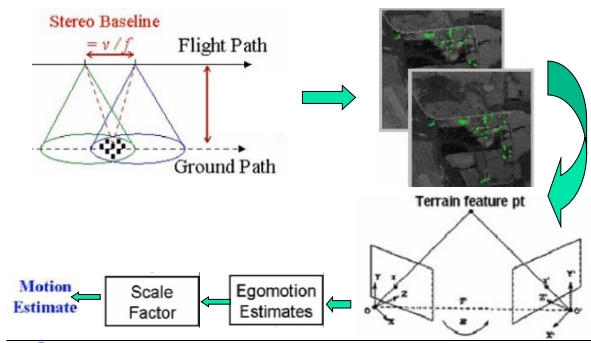
10.5 视觉导航技术和惯性/视觉组合导航技术



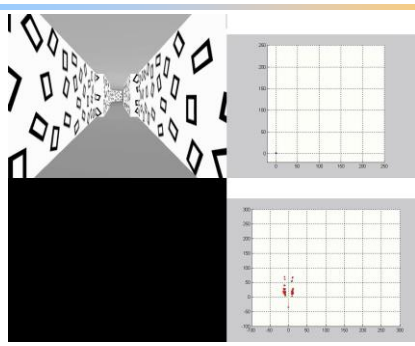
10.5 视觉导航技术和惯性/视觉组合导航技术



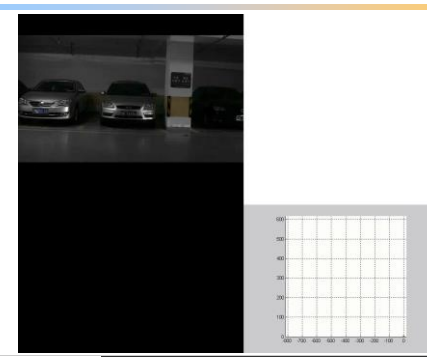
10.5 视觉导航技术和惯性/视觉组合导航技术



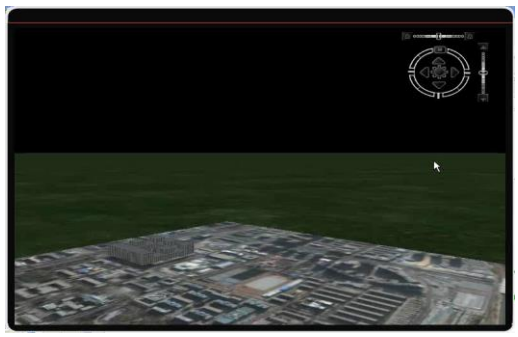
10.5 视觉导航技术和惯性/视觉组合导航技术



10.5 视觉导航技术和惯性/视觉组合导航技术



10.5 视觉导航技术和惯性/视觉组合导航技术



本章小结

1、地球物理场导航的定义和分类。

2、地球物理场导航和视觉导航系统的工作原理。

3、惯性/地球物理场组合导航系统的数学模型。