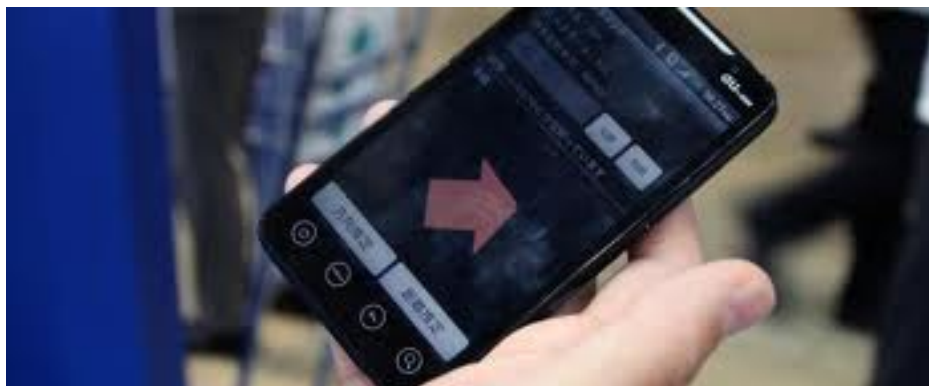
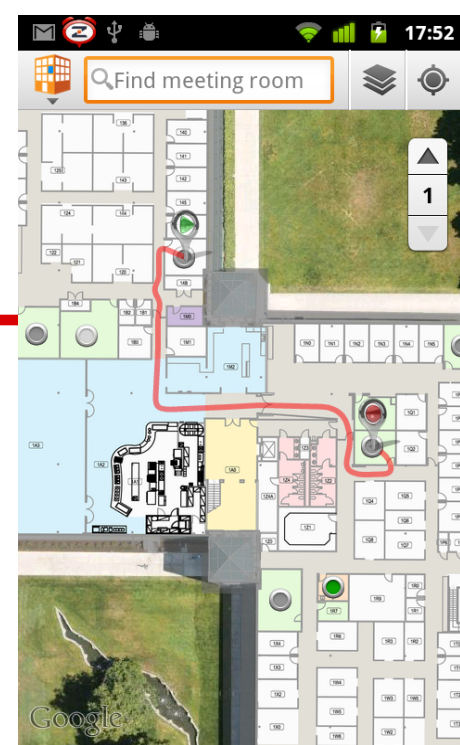

室内定位轨迹的参数化模型及其估计与 处理方法

周舒畅

2012.7

室内定位

- 应用广泛
 - 商场 / 机场导航
 - 位置相关社交
 - 自定义地标会合

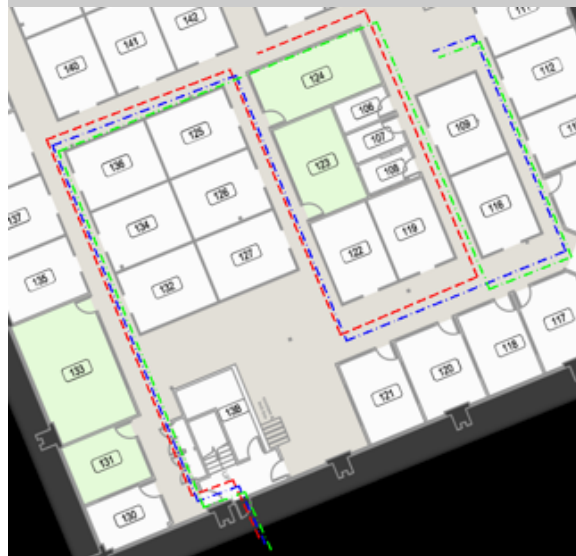
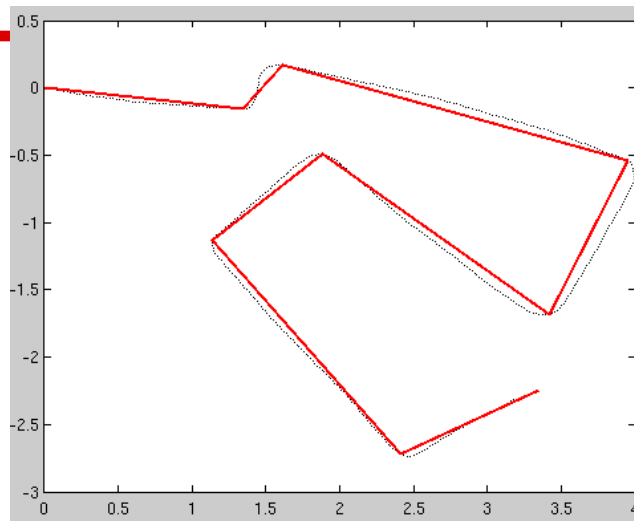
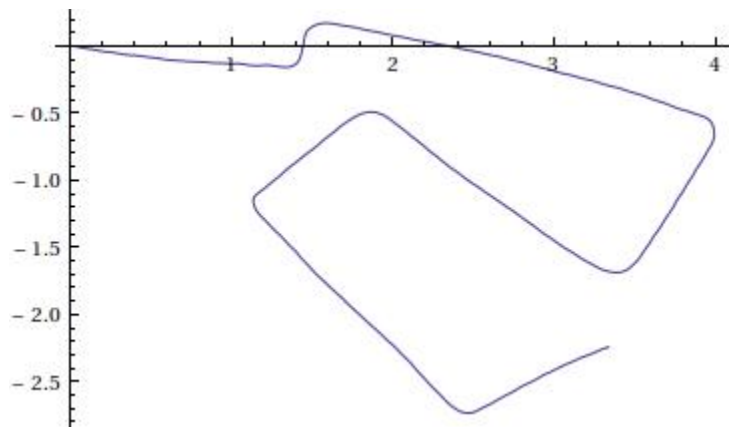


定位轨迹



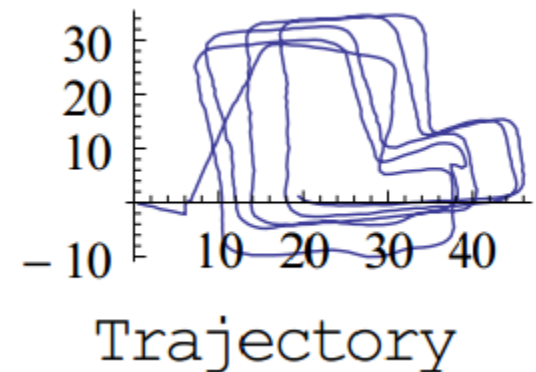
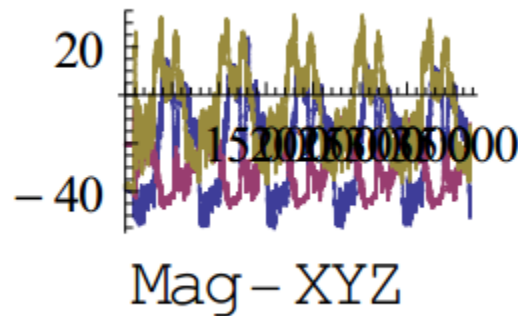
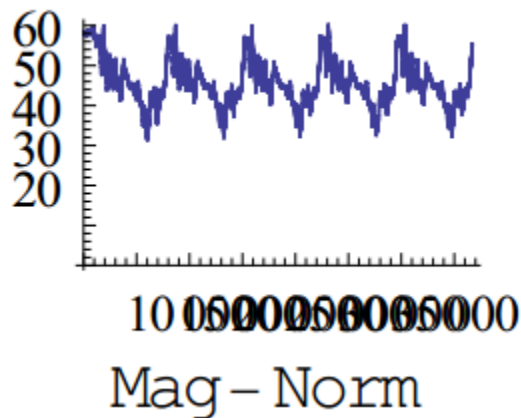
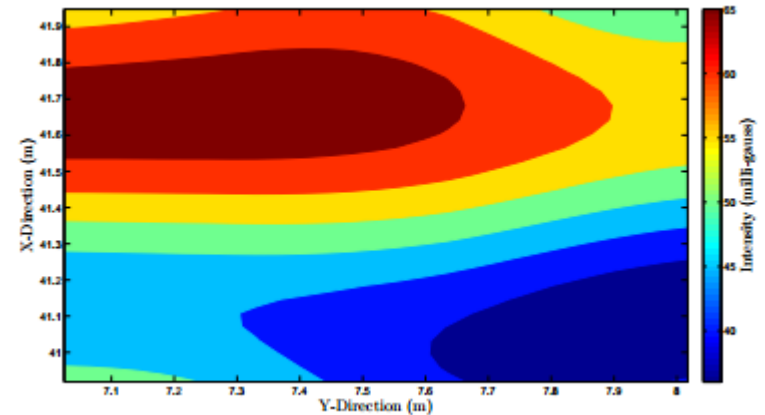
- 按时间排列的定位序列
 - (t_i, X_i) 二元组序列
- 用途
 - 定位导航
 - 允许采用均值 / 中值滤波等方法进行平滑
 - 志愿用户上传轨迹
 - 低成本, 数据及时
 - 可以实现自举。
 - 热路径图, 群体行为发现

轨迹路网匹配

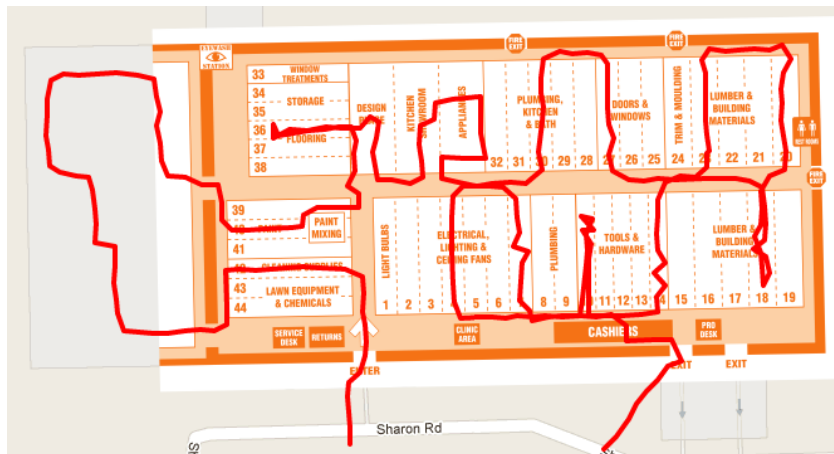
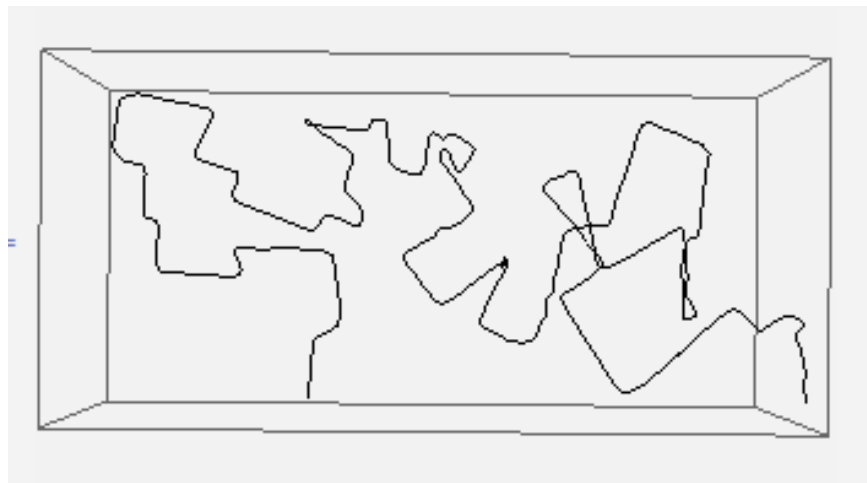
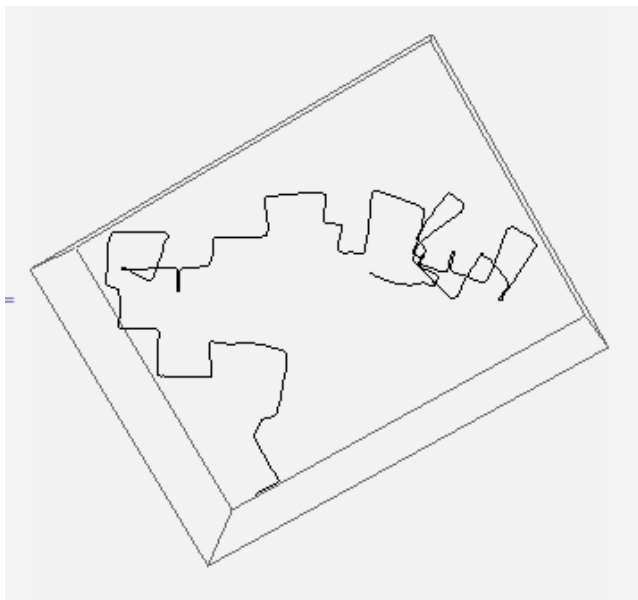


轨迹聚合：生成众包地图

- 众包Crowdsourcing
- 借助地标加速
 - WIFI
 - 磁场
 - 气压变化



轨迹聚合：生成众包地图

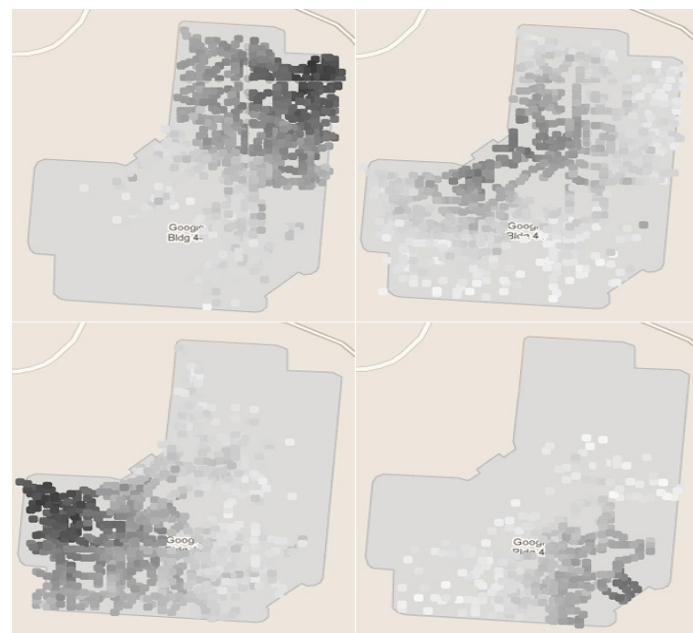
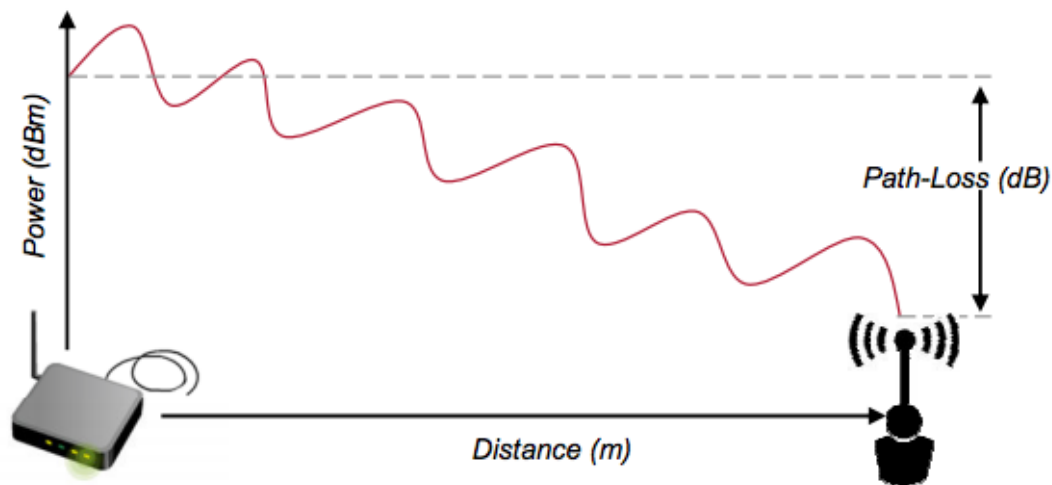


概要

- 轨迹的来源
 - 轨迹的参数化模型
 - 融合时参数估计
 - 聚合时参数估计
-

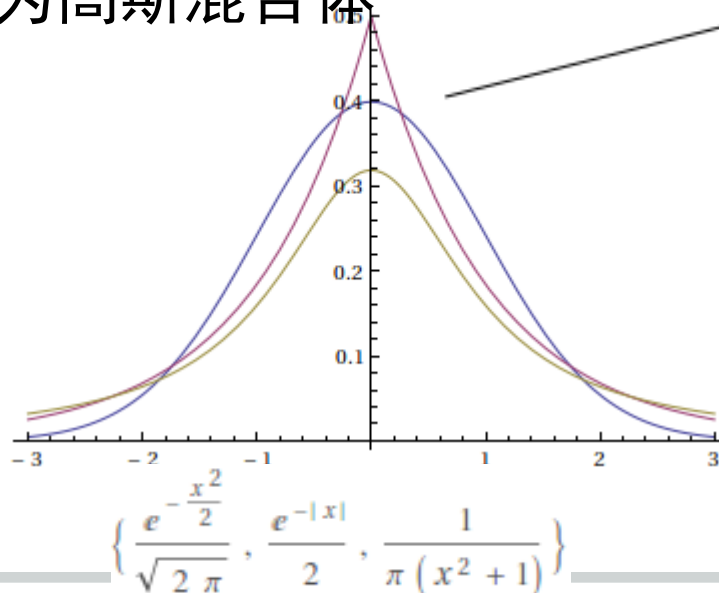
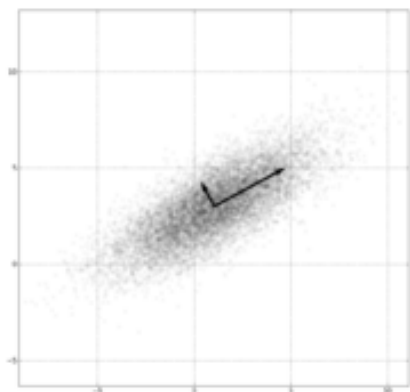
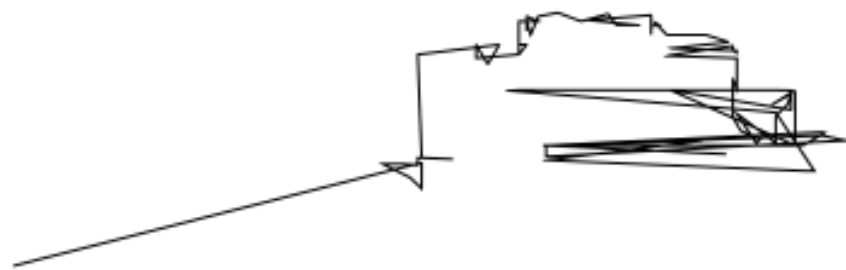
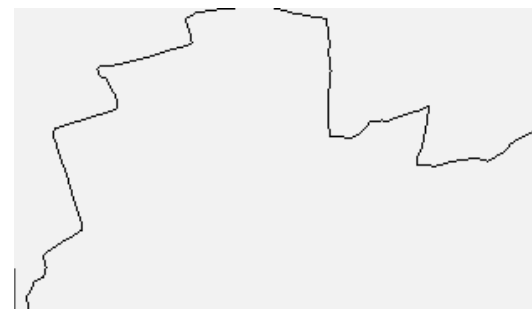
WIFI定位轨迹

- 基于信号强度
 - 与距离的对数成正比
 - 比率即衰减率
 - 受多道、干扰、衰减率影响
- 基于信号指纹
 - 按与已知位置指纹的相似性进行定位



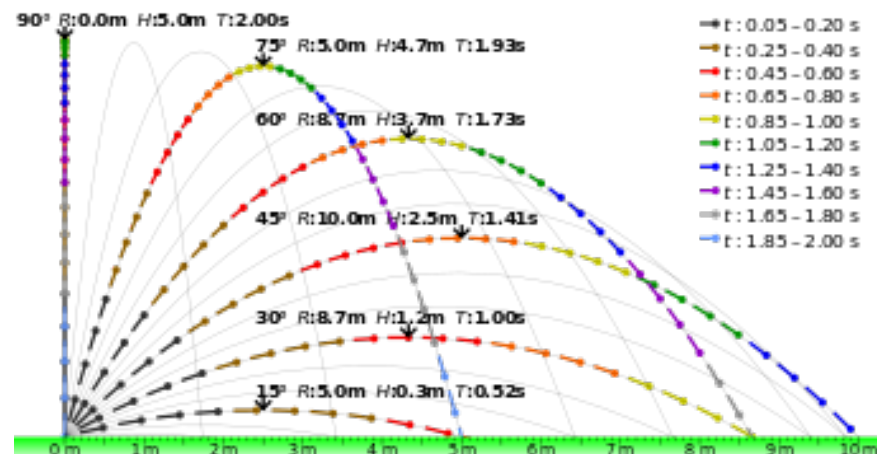
观测轨迹

- 无累计误差
- 跳变，不光滑
- 噪声参数
 - 高斯噪声
 - 非高斯噪声
 - 可表示为高斯混合体



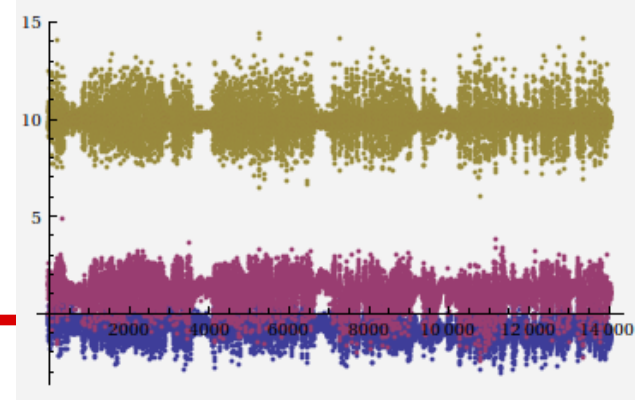
传感器定位轨迹

- 基于惯性导航的方法
 - 从移动传感器日志生成轨迹
 - 与地图匹配实现定位
- 移动设备传感器
 - 加速度计、陀螺仪、磁力计
 - 高噪声(低成本)
 - 未校准
 - 硬件不断进化

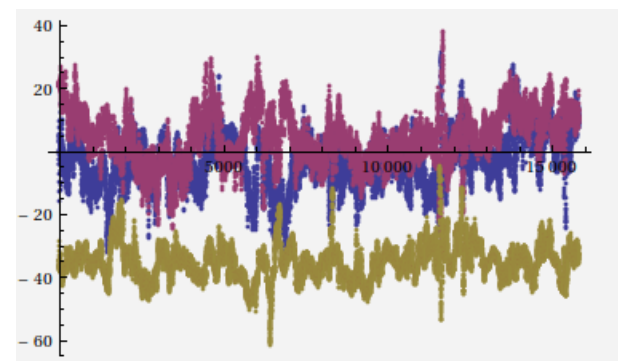


传感器定位轨迹

- 原理上，加速度积分两次即可得到位移
- 问题
 - 相对地球静止状态下，加速度计的结果有一平行且正比于重力的干扰
 - Δa 的系统误差两次积分后产生 $1/2 \Delta a T^2$ 的位移误差
- 强磁场干扰



加速度计



磁力计



传感器定位轨迹

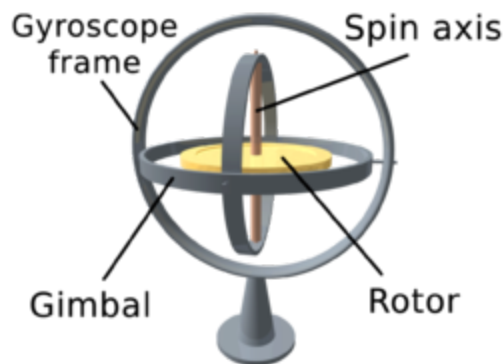
- 特定位置安装传感器

- 零速修正技术 (ZUPT)

- 足底接触地面时，加速度、速度为零

- 一般位置安装

- 捷联惯导假设



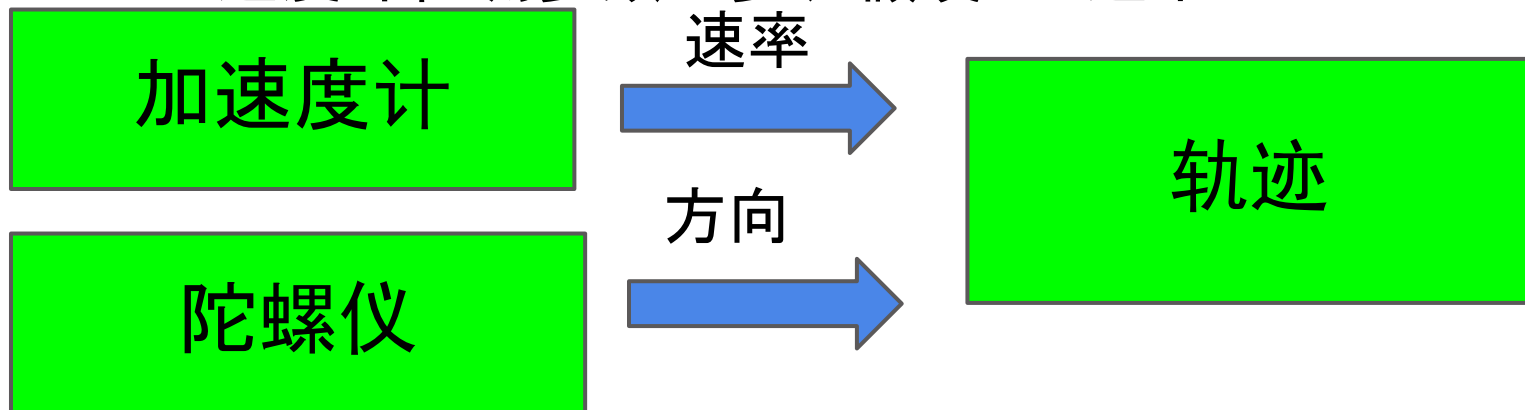
传感器定位轨迹

- 捷联惯导法生成轨迹

- 移动设备与运动方向间相对静止

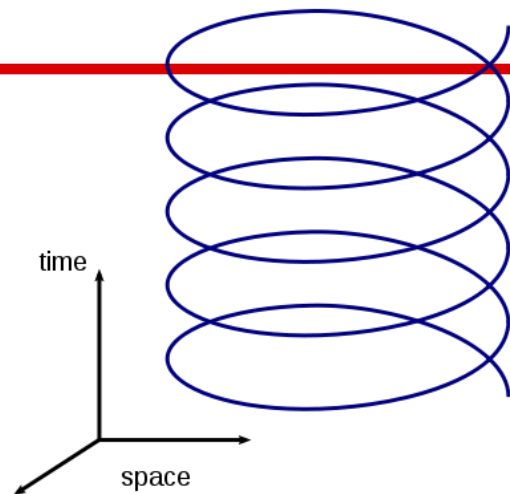
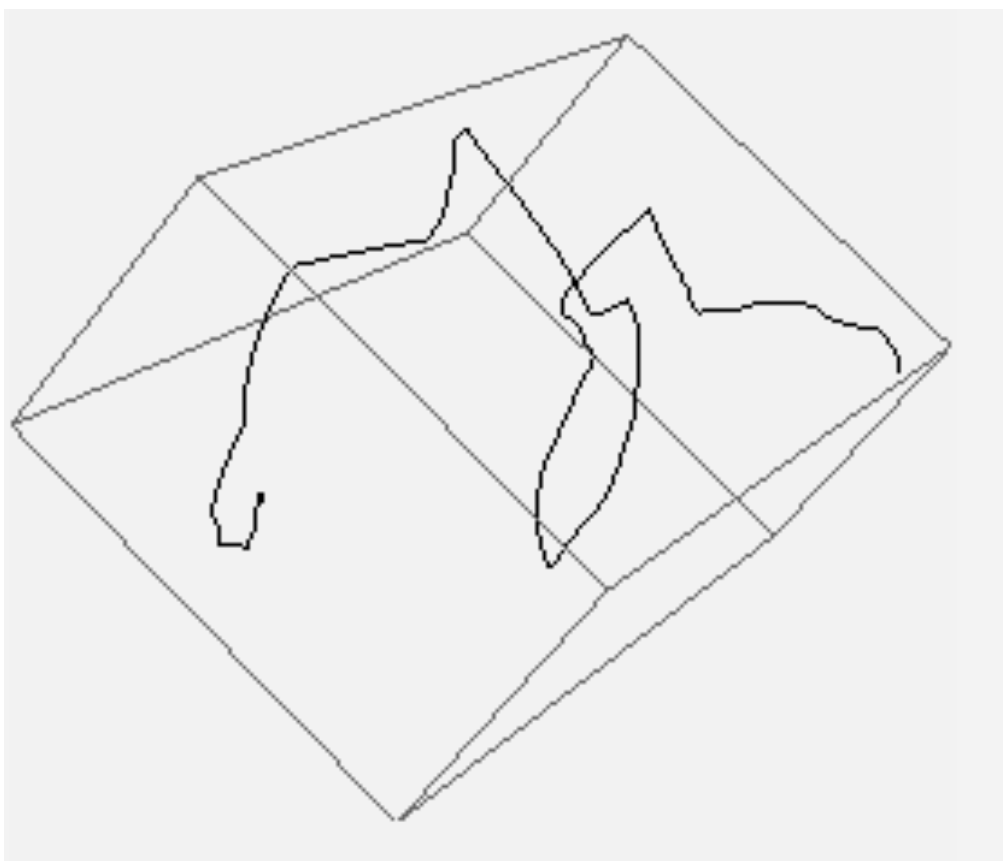
- 背包、衬衫/裤子口袋、稳定手持

- 加速度计检测步频+步长假设—>速率



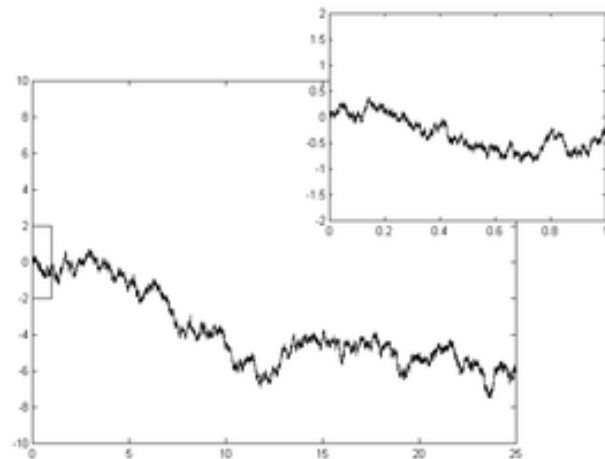
传感器定位轨迹噪声：陀螺仪偏置

3维转动



演化轨迹参数

- 积分量
 - 零阶：高斯分布
 - 一阶：布朗运动（维纳过程）
 - 二阶：积分布朗运动
- 非噪声参数
 - 积分误差
 - 与积分步长有关
 - 与积分格式有关
 - 影响拐弯处



$$\text{LTE} = y(t_0 + h) - y_1 = \frac{1}{2}h^2 y''(\xi).$$

轨迹的参数化模型 $M(t; \theta)$

- 观测轨迹噪声参数
 - 高斯分布
 - 非高斯分布
 - 演化轨迹噪声参数
 - 高斯分布
 - 布朗运动（维纳过程）
 - 积分布朗运动
 - 传感器模型
 - 偏置(bias)/比例因子(scale factor)
 - 非噪声参数
 - 安装角/步长
-

轨迹的参数化模型

- 固定参数模型
 - $\operatorname{argmax}_{\theta} P(M(s;\theta))$
- 参数的随机过程模型
 - 连续（或离散时满足Lipschitz条件）
 - 维纳过程
 - 陀螺仪偏置（随温度、时间缓慢变化）
 - 自适应，在线更新
 - 安装角(在背包中方位)
 - 优化能量函数，如Total Variation $E(x, y) + \lambda V(y)$.

$$V(y) = \sum_n |y_{n+1} - y_n|. \quad E(x, y) = \frac{1}{2} \sum_n (x_n - y_n)^2.$$

模型参数估计

- 融合时估计
 - 地磁/重力轨迹与陀螺仪轨迹融合为传感器轨迹
 - 陀螺仪偏置
 - 加速度计噪声参数
 - WIFI轨迹融合陀螺仪轨迹
 - 陀螺仪偏置
 - WIFI噪声参数
 - 安装角/步长
-

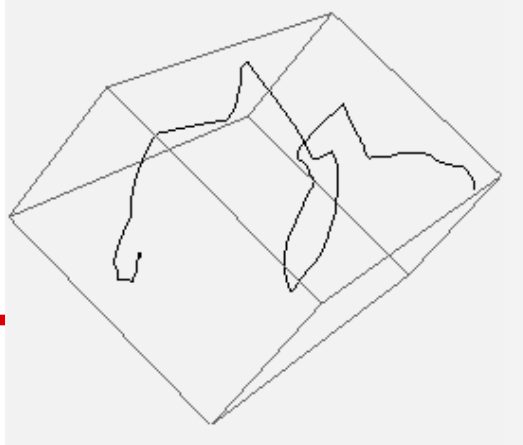
模型参数估计

- 匹配时估计
 - WIFI轨迹匹配WIFI轨迹
 - WIFI轨迹匹配陀螺仪轨迹
 - 陀螺仪轨迹匹配陀螺仪轨迹
 - 依WIFI指纹知对应点对 (Point Set Registration)
 - 未知对应点对 (Image Registration)
 - 磁场
 - 依形状、拓扑信息
-

轨迹的参数化模型

- 特点
 - 保留对轨迹误差来源的知识。模型反映了轨迹误差的特点。
 - 参数数目少, 避免了过拟合 (overfitting) 问题。
 - 训练集不必需, 而在有训练集时或通过考虑物理意义可以给参数建立先验分布。
-

融合时估计示例



- 陀螺仪偏置估计

- 地磁/重力轨迹与陀螺仪轨迹融合为传感器轨迹

- 卡尔曼滤波偏置估计[3]

- 状态量：姿态、偏置
- 观测量：地磁、重力

- 利用得到的姿态误差更新姿态、偏置

- 时域融合

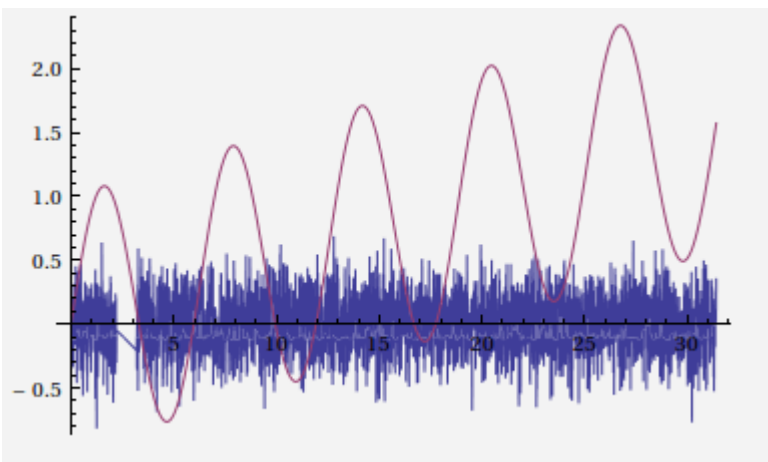
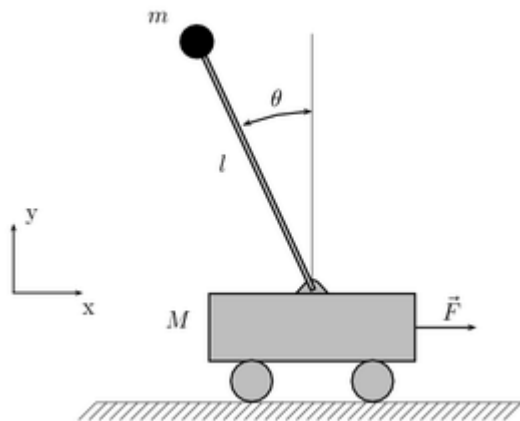
- $$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}) \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{S}_k^{-1} \mathbf{v}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{A} \mathbf{x}_k$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{S}_k^{-1} \mathbf{H}_k$$

- 互补滤波偏置估计

频域融合：互补滤波器^[1]

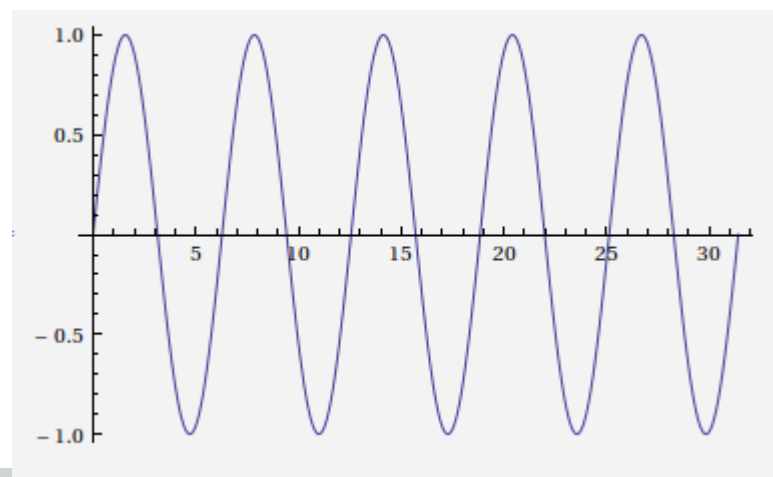
1维（线性）



高通



低通



一维互补滤波器

- 互补滤波

$$\dot{\hat{\Theta}} = \frac{\Theta_{\text{am}} - \hat{\Theta}}{\tau} + \dot{\Theta}_g$$

$$\hat{\Theta} = \frac{\Theta_{\text{am}}}{\tau s + 1} + \frac{\tau s \Theta_g}{\tau s + 1}$$

- 带偏置互补滤波

$$\dot{\hat{\Theta}} = \frac{\Theta_{\text{am}} - \hat{\Theta}}{\tau} - \mathbf{b} + \dot{\Theta}_g$$

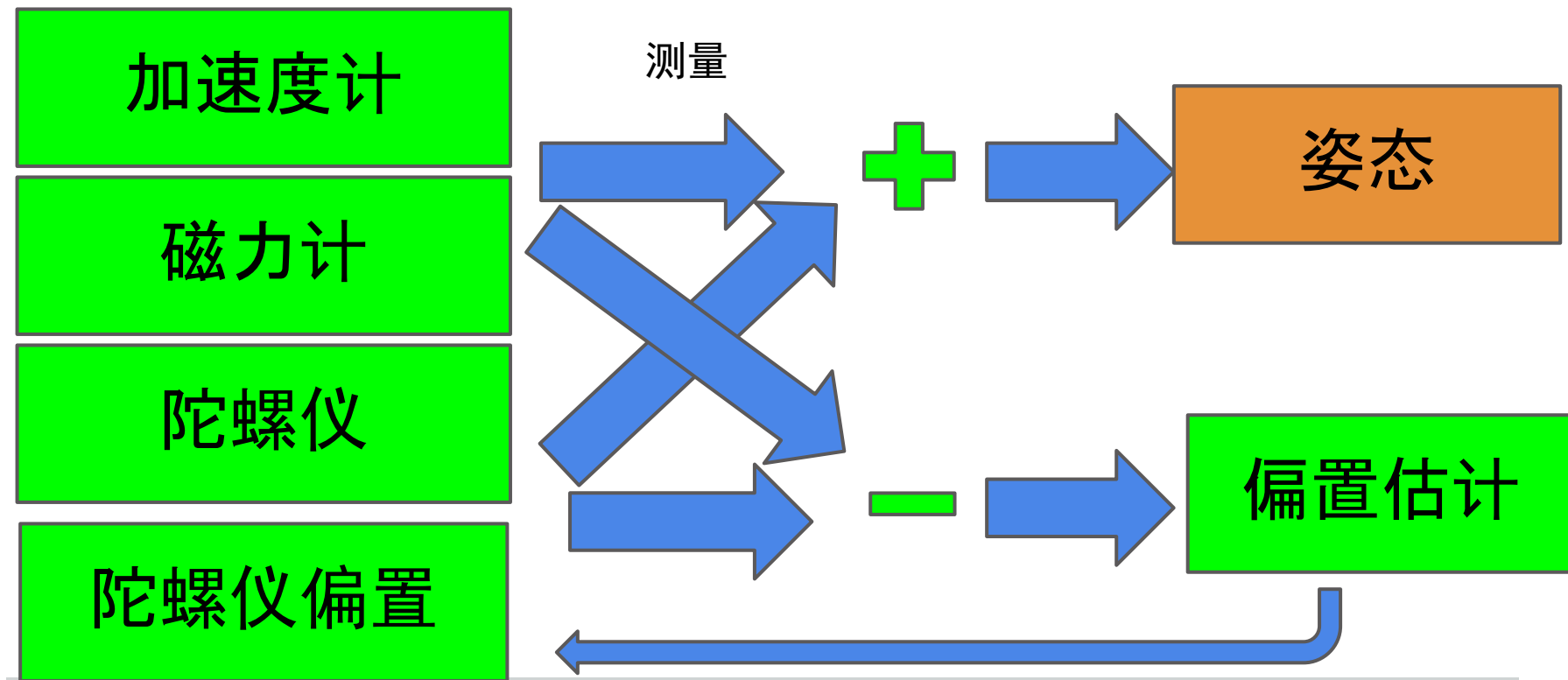
$$\dot{\mathbf{b}} = (\Theta_{\text{am}} - \hat{\Theta}) (-k_b)$$

$$\hat{\Theta} = \frac{\Theta_{\text{am}} \left(k_b + \frac{s}{\tau} \right)}{k_b + s^2 + \frac{s}{\tau}} + \frac{s^2 \Theta_g}{k_b + s^2 + \frac{s}{\tau}}$$

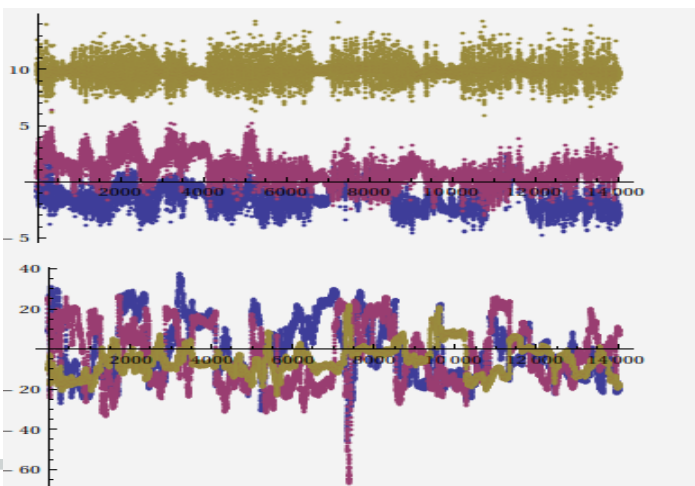
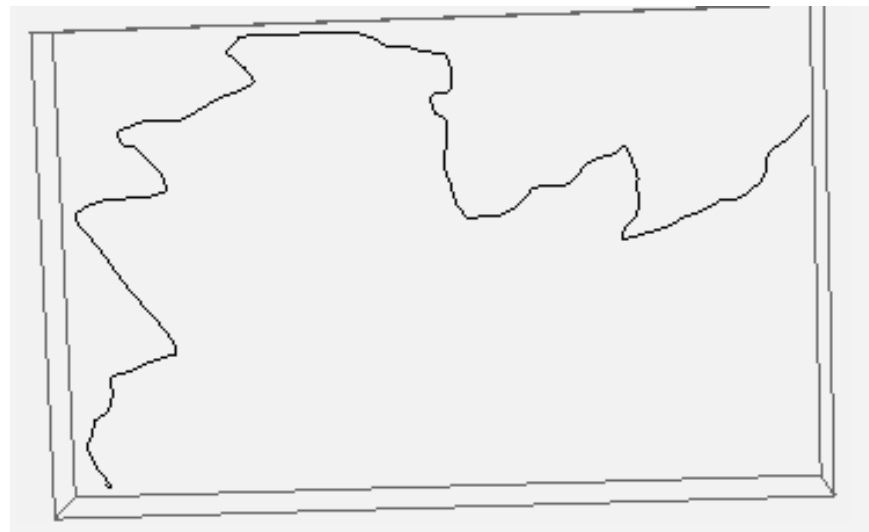
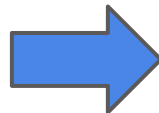
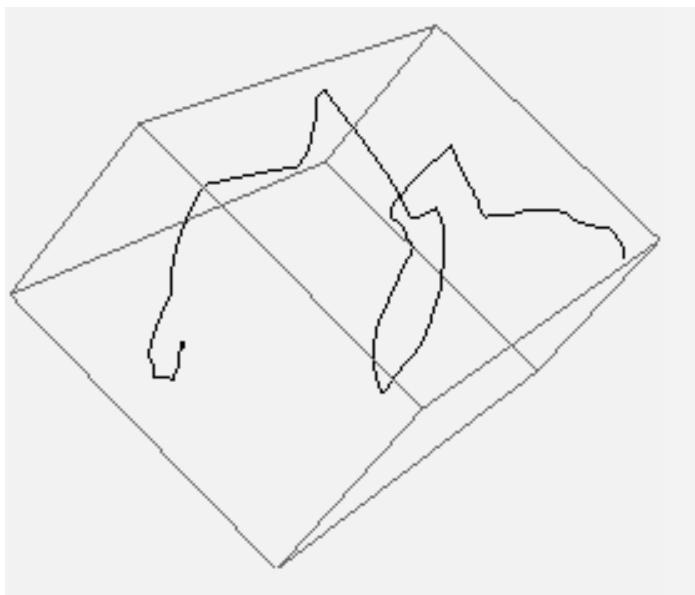
非线性互补滤波器

- 动态估计陀螺仪偏置
- 反馈机制

局部使用(不可靠)的磁力/加速度信息

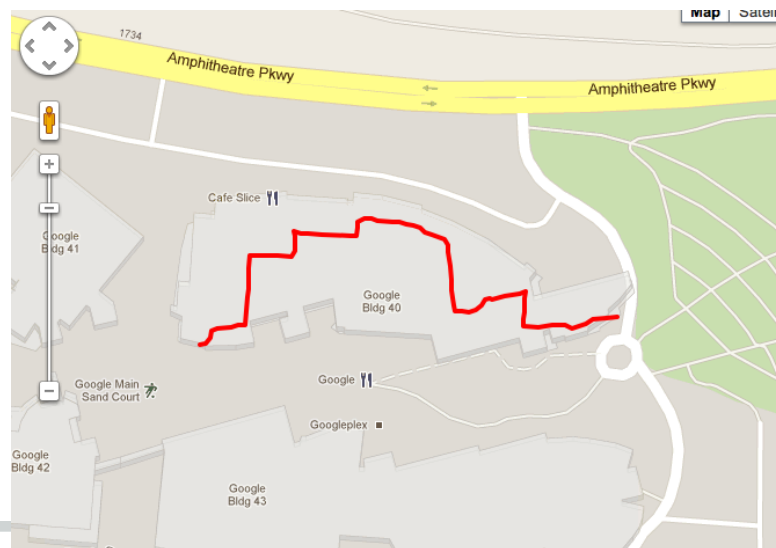


非线性互补滤波器



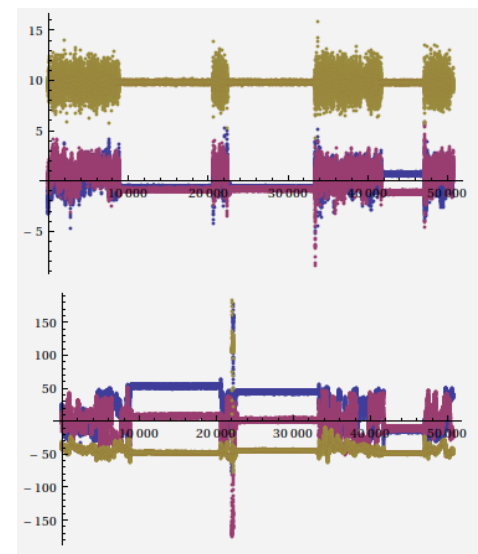
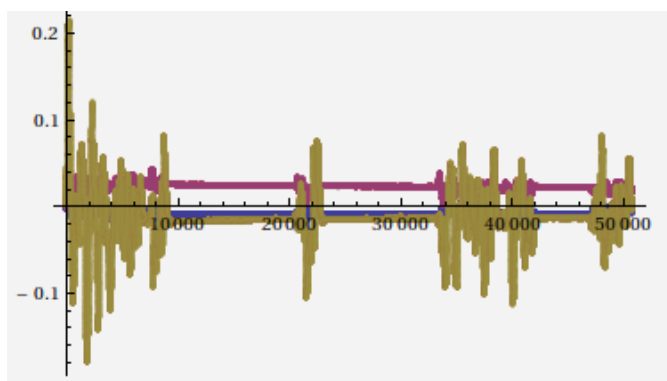
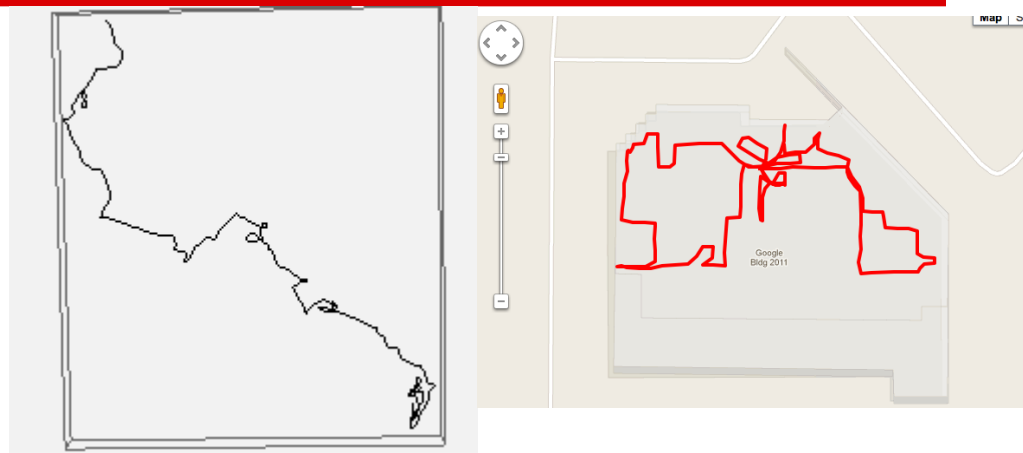
补偿后重力方向

补偿后磁北

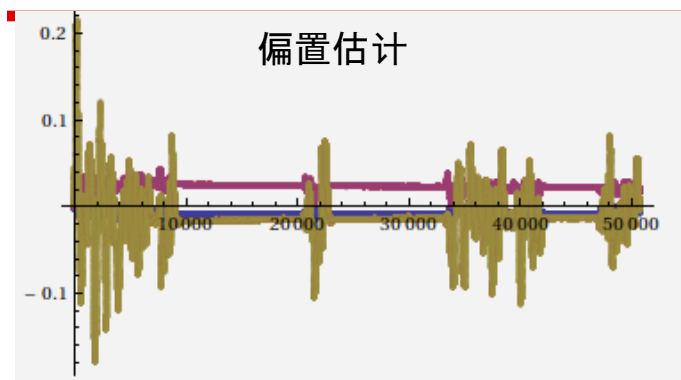


非线性互补滤波器

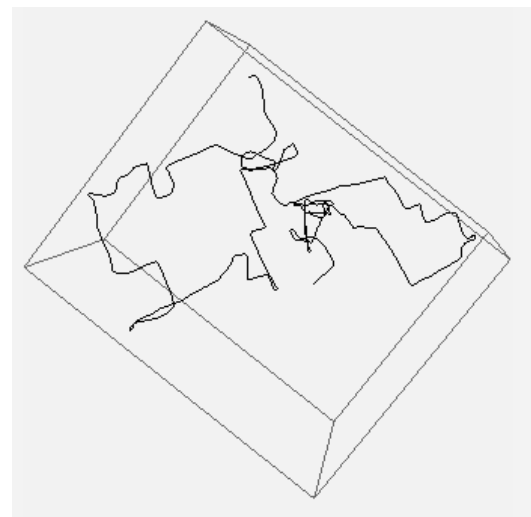
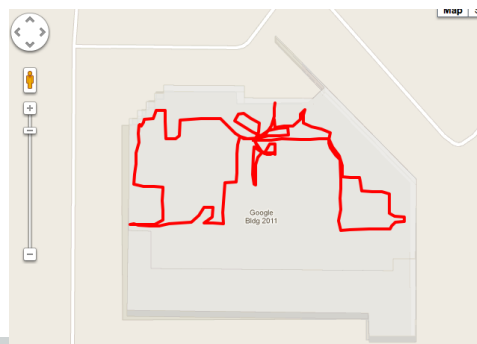
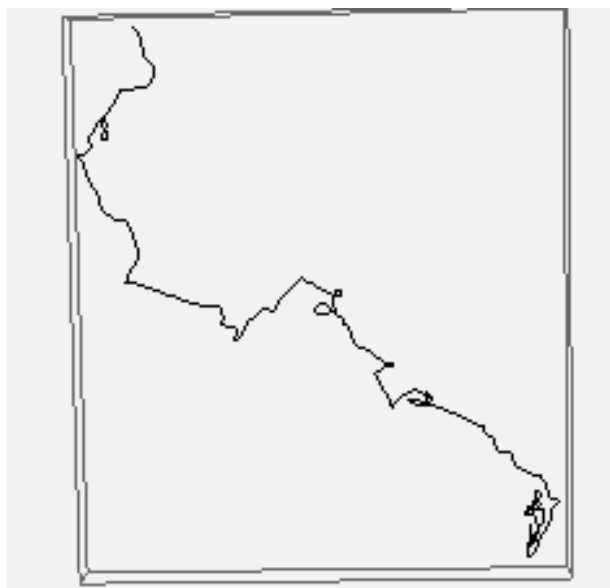
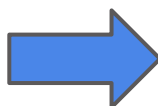
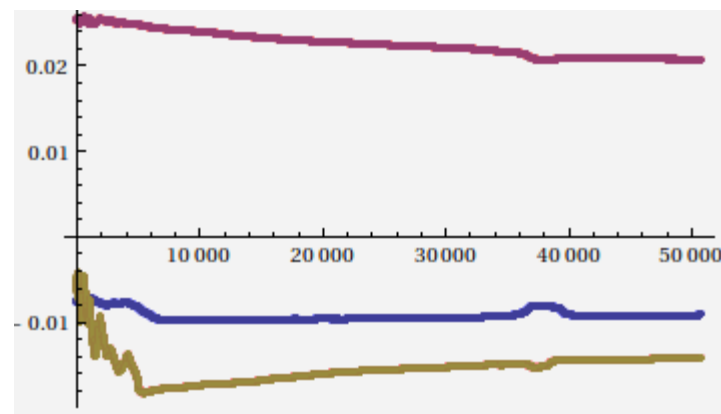
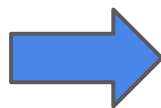
- 磁场扰动大时失败
- 偏置估计不光滑



中值滤波 + 非线性互补滤波

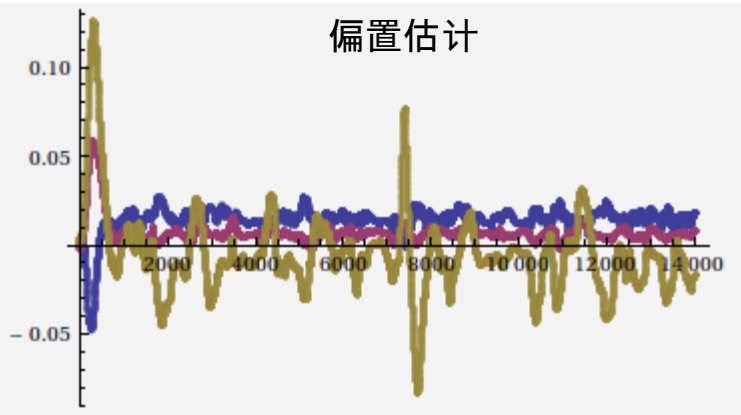


中值滤波

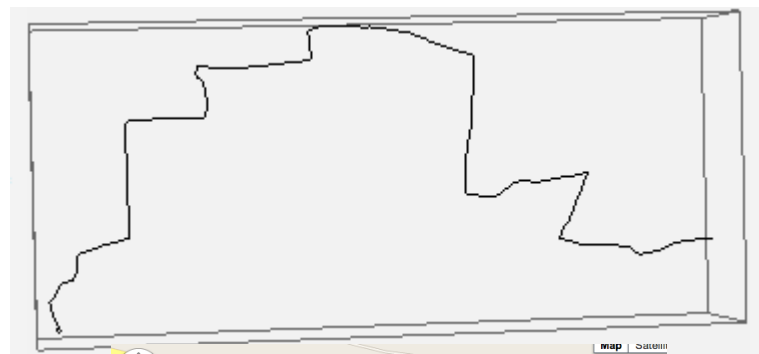
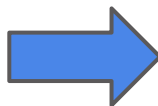
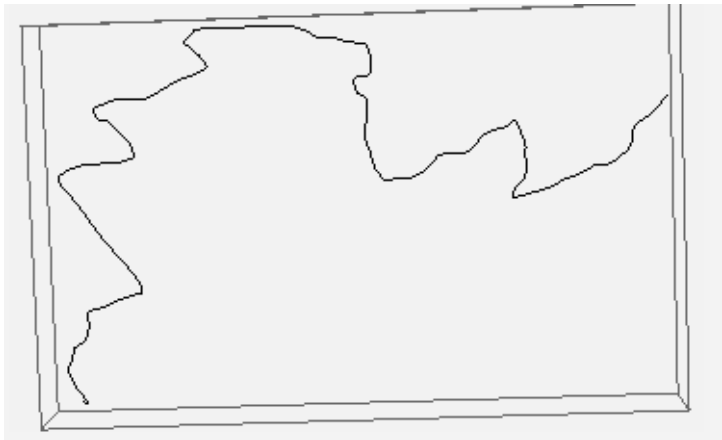
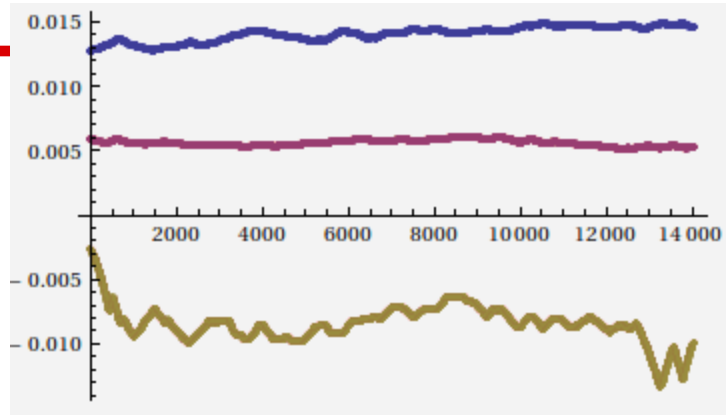
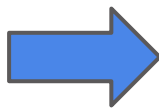


中值滤波 + 非线性互补滤波

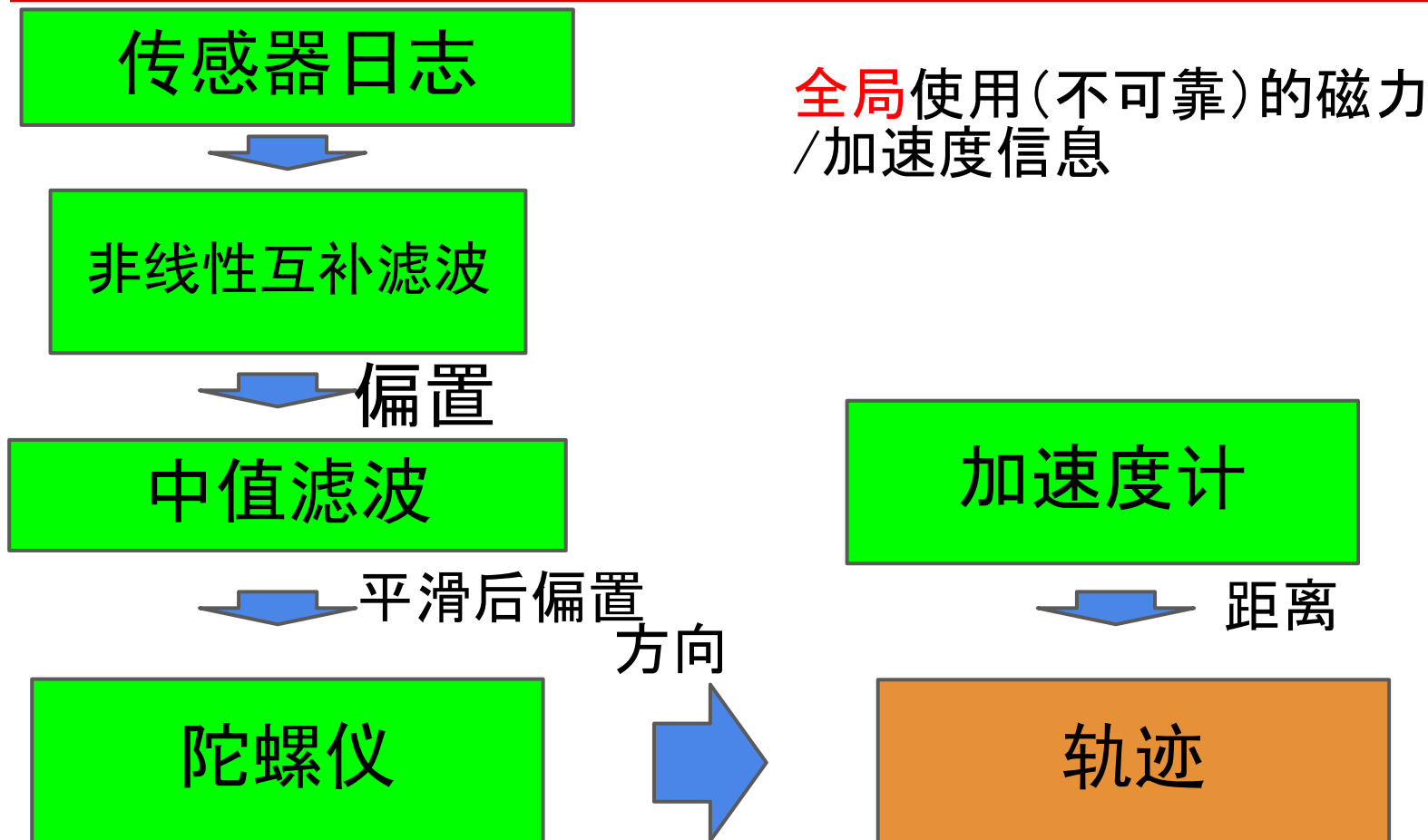
偏置估计



Median Filter

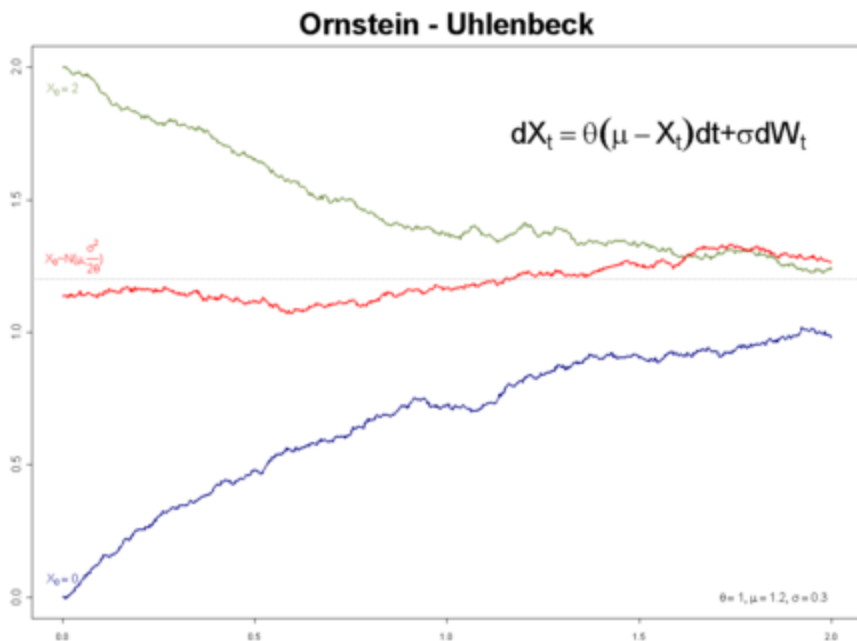


离线重建



向心互补滤波器

- Ornstein–Uhlenbeck 过程
- 无向心力时，估计偏置时的高斯误差会导致偏置的布朗运动
- 向心力的存在保证偏置满足高斯分布



$$f_s(x) = \sqrt{\frac{\theta}{\pi\sigma^2}} e^{-\theta(x-\mu)^2 / \sigma^2}.$$

任意势能下分布

- Fokker-Plank方程

$$dX_t = \mu dt + \sqrt{2D} dW_t \quad \frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{\partial(\mu f)}{\partial x} + \frac{\partial^2(D f)}{\partial x^2}$$

- 势能下静态分布

$$\mu = -\frac{\partial U}{\partial x} \quad -\frac{\partial U}{\partial x} f = \frac{\partial(D f)}{\partial x}$$

- 设D恒定

$$f = \frac{e^{-\frac{U}{D}}}{D}$$

势能	力	分布
$(x - \mu)^2$	$-2(x - \mu)$	$e^{-(x-\mu)^2}$
$ x - \mu $	$-\text{Abs}'(x - \mu)$	$e^{- x-\mu }$
$\log((x - \mu)^2 + 1)$	$-\frac{2(x-\mu)}{(x-\mu)^2 + 1}$	$\frac{1}{(x-\mu)^2 + 1}$
$\sqrt{(x - \mu)^2 + 1} - 1$	$-\frac{x-\mu}{\sqrt{(x-\mu)^2 + 1}}$	$e^{1-\sqrt{(x-\mu)^2 + 1}}$

向心滤波器

- 优点
 - 在线，无延迟
 - 抑制零偏
 - 直接控制值域
 - 缺点
 - 非频域模型
 - 参数需保证稳定性
-

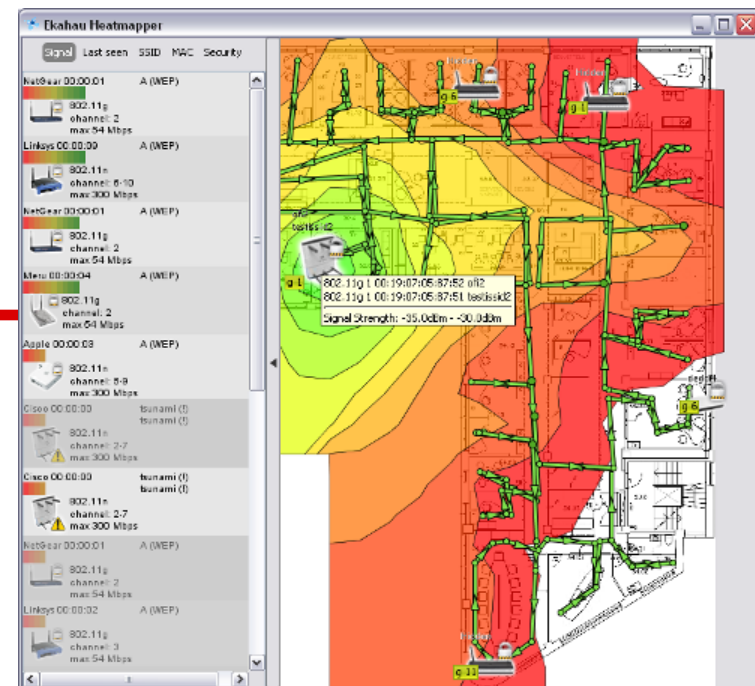
融合时估计示例二

- WIFI轨迹与传感器轨迹
 - 传感器轨迹起始点与方向未知
 - 陀螺仪偏置未知
 - 安装角未知, 步长未知
 - 随时间缓慢变化
 - 刚性匹配：相关系数矩阵
 - 旋转平移无关
 - 最大化迹或行列式
-

聚合时估计示例

- WIFI衰减率地图
 - WIFI信号衰减:自由空间

$$P \propto 1/r^2$$
- 衰减率在空间中缓慢变化
 - 高斯混合体建模



Typical Environment	Path Loss Exponent, n
Free Space	2
Outdoor Urban Area	2.7 to 3.5
Outdoor Shadowed Urban Area	3 to 5
In-Building, Line-of-sight	1.6 to 1.8
In-Building, Soft Cubicle Partitions	3 to 3.5
Obstructed in Building	4 to 6
Obstructed in Factories	2 to 3

Material	Typical Attenuation (Loss) @ 5GHz
Cubical Wall	2dB
Drywall or Sheetrock	3dB
Brick Concrete or Block Wall	15dB
Elevator Shaft	10dB
Glass or Window	3dB
Concrete Floor	11dB

匹配时估计示例

- 传感器轨迹+WIFI轨迹+路网
 - 传感器轨迹起始点与方向未知
 - 陀螺仪偏置未知
 - WIFI轨迹系统偏移（向信号源偏移）
- 地标（WIFI/磁场）辅助匹配
 - WIFI轨迹确定位置粗估计
 - 传感器轨迹根据形状/磁场确定路网中路径
- 贝叶斯滤波匹配
 - 隐马尔科夫模型[2]
 - 粒子滤波
 - 非参数模型，按蒙特卡洛模拟
 - 大计算量换取较大的适用范围

预期研究成果及创新之处

- 同时估计参数的轨迹融合算法
 - 参数化演化轨迹之间，与参数化观测轨迹之间的融合与参数估计算法。
 - 当参数以随机过程建模时的参数估计算法。
 - 当状态演化为非交换矩阵序列时的综合时域与频域信息的参数估计算法。
- 同时估计参数的轨迹与路网匹配算法
 - 匹配时同时估计参数的方法
 - 通过建立轨迹与地图的简化层级从而利用低分辨率的版本的快速匹配加速更高分辨率版本的匹配的方法。
- 以上融合与匹配算法的在线版本

已有工作基础

- 已有资源：

- X个楼层的现场调查WIFI信号指纹数据与传感器日志
- 可用于收集传感器日志的Android应用程序

- 已进行工作：

- 加速度计 / 陀螺仪的基本校准算法与实现
 - 两种传感器融合算法：非线性互补滤波器与扩展卡尔曼滤波器的实现
 - 离线传感器轨迹生成时抑制噪声与参数估计的算法与实现
 - 基于搜索的轨迹与地图匹配算法与实现
 - 基于方差、频谱的计步器算法与实现
-

研究计划及预期进展

- 2012/03 – 2012/08 建立传感器轨迹的按随机过程建模的参数模型并设计实现该模型下的参数估计与时域频域轨迹融合算法。
 - 2012/09 – 2013/01 设计实现参数化传感器轨迹之间匹配以生成路网的算法。综合前一步写一篇小论文。
 - 2013/02 – 2013/06 建立WIFI轨迹的参数模型，并设计实现该模型下WIFI轨迹与传感器轨迹融合算法。
 - 2013/07 – 2013/12 参数化轨迹与地图的按拓扑/几何/地标信息进行匹配并同时同时进行参数估计的算法。综合前一步写一篇小论文。
 - 2014/01 – 2014/04 技术改进，大论文写作
-

结论

- 轨迹的参数化模型

- 鲁棒的轨迹表示，保留轨迹的误差模型在后续处理中持续估计参数以达到最优
- 模型的参数本身具有意义，如观测轨迹的噪声参数可用于最优融合
- 降低了某些处理的计算复杂度。比如在轨迹融合时，能将问题转化为优化问题直接求解

- 用随机过程建模与用反馈估计

- 具有自适应性，能容忍参数的缓慢变化。
 - 通过虚拟力能方便的限制参数的变化范围。
 - 参数更新在线进行。
 - 通过局部泰勒展开，可用于非线性系统的参数估计。
-

参考

- [1] Metni N., Hamel T. (2006) Attitude and Gyro Bias Estimation for a VTOL UAV. Control Engineering Practice Journal, Elsevier, Volume 14 (12), pp. 1511-1520, December.
 - [2] Arvind Thiagarajan, Probabilistic Models For Mobile Phone Trajectory Estimation, Phd Thesis, MIT Press, 2011.
 - [3] Nikolas Trawny and Stergios I. Roumeliotis, Indirect Kalman Filter for 3D Attitude Estimation, A Tutorial for Quaternion Algebra, 2005.
 - 雷地球等, 一种基于WiFi的室内定位系统设计与实现, 2010.
 - 刘军发等, 基于WiFi的室内定位方法及系统, 信息技术快报, 2010
 - 杨华等, 一种基于多终端动态协同的室内定位方法, 计算机应用研究, 2012
-

Backup

室内地图

- 路网法
 - 地图离散化为路口与连接线
 - 保留拓扑信息
 - 可保留距离信息
 - 显著降低复杂度
- 转移概率网格法
 - 网格密度可控
 - 易实现层次模型
 - 与轨迹匹配时常用粒子滤波法

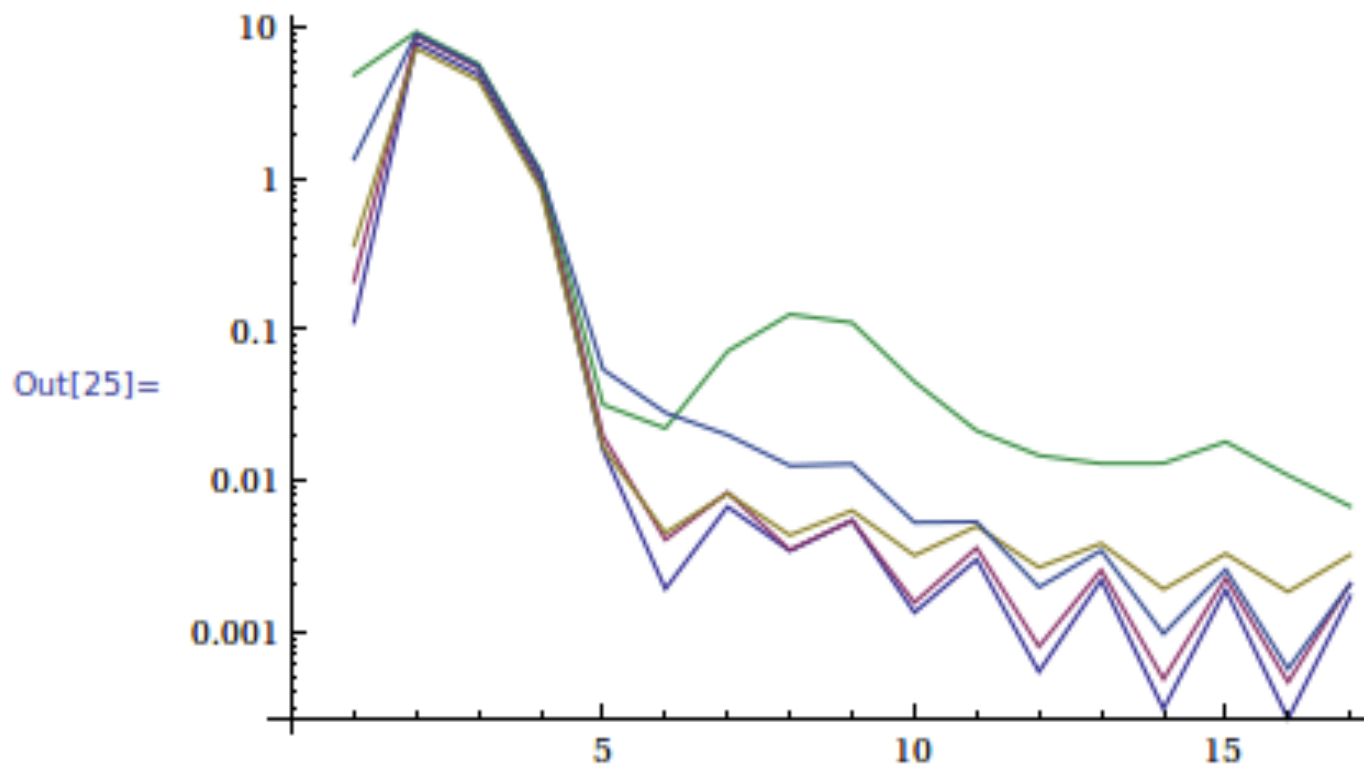
交通模式检测

- 加速度计读数的频域分析

- 步频信息

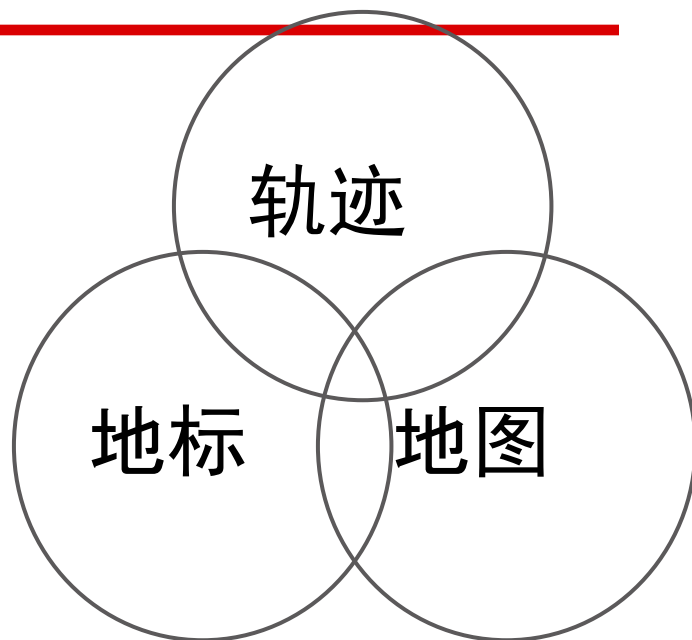
- 10 步频信息

```
In[25]:= ListLogPlot[Map[Mean, Map[Map[Mean, Transpose[
```



研究目标与**技术路线**

- 传感器日志→轨迹
- 轨迹→地图
 - 轨迹+地标→地图
- 轨迹+地图→定位
 - 轨迹+地标+地图→定位



轨迹→地图

- 交通模式检测（众包轨迹选择）
 - 轨迹与地图匹配
 - 折线近似法
 - 轨迹与轨迹匹配
 - 折线近似法：比较增量
 - 曲率扭度速率法
-

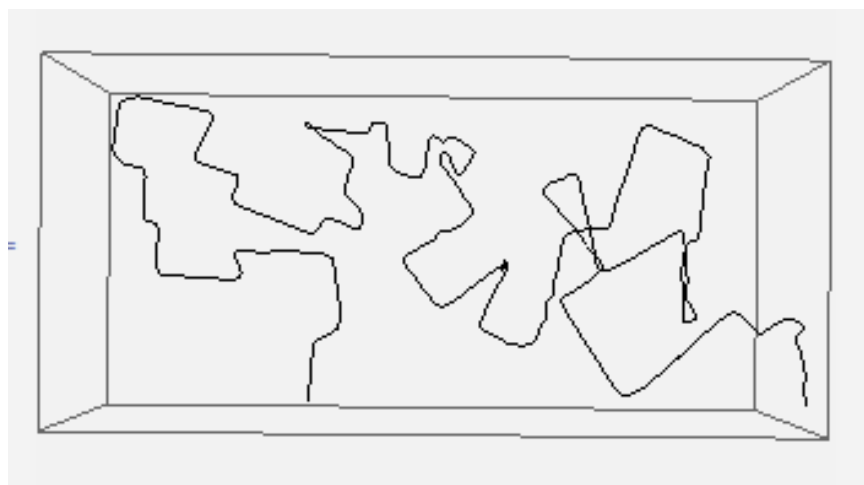
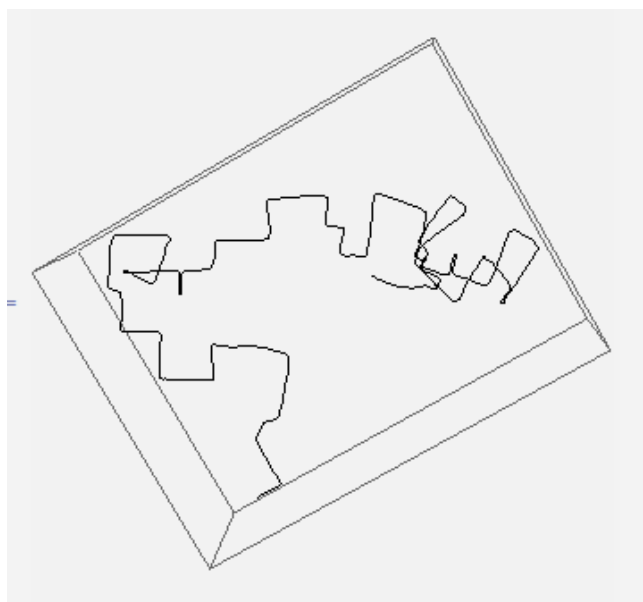
传感器定位轨迹

- 传感器的校准算法
 - 离线 / 在线
- 目标
 - 估计陀螺仪的零偏 / 噪声方差
 - 加速度计的零偏 / 噪声方差



轨迹与轨迹匹配

- 空间曲线匹配
- 地标加速

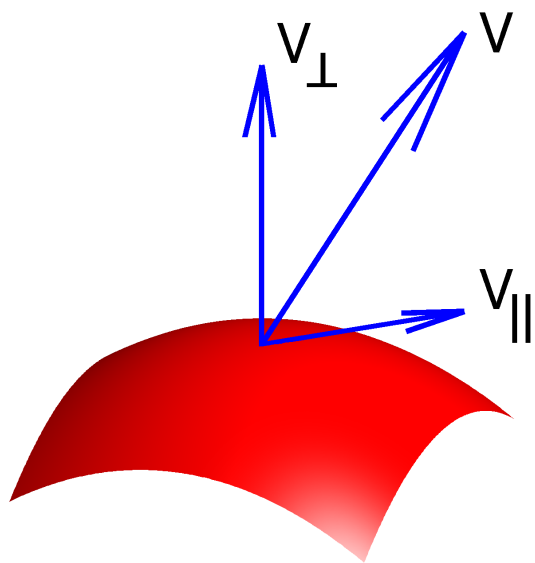


空间曲线匹配

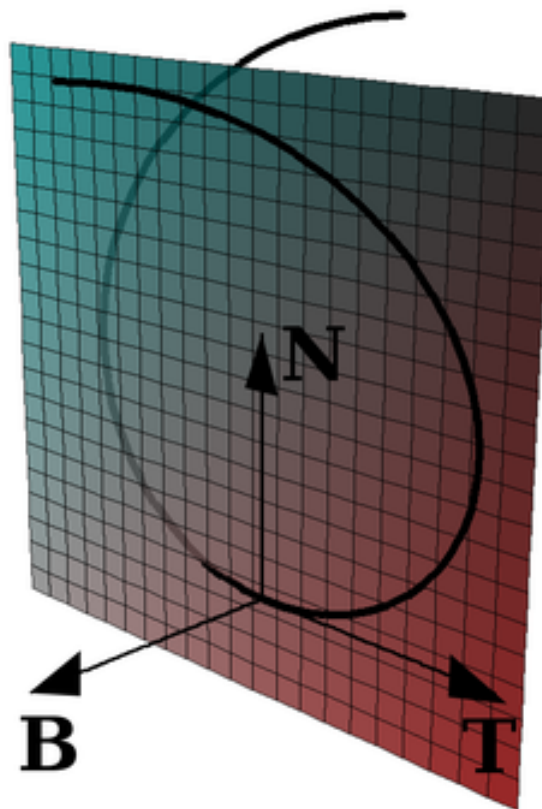
- XYZ表示的匹配
 - 直接比较：误差累积
 - 间接比较：比较差分的模，与差分的方位角的差分
- 曲率 + 扭度 + 速率表示的匹配
 - 无误差累积
 - 噪声敏感，需先平滑

Frenet Serret 参照系

空间曲线 = 曲率 + 扭度 + 速率



$$\begin{bmatrix} \mathbf{T}' \\ \mathbf{N}' \\ \mathbf{B}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \kappa & 0 \\ -\kappa & 0 & \tau \\ 0 & -\tau & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}.$$



移动设备上传感器

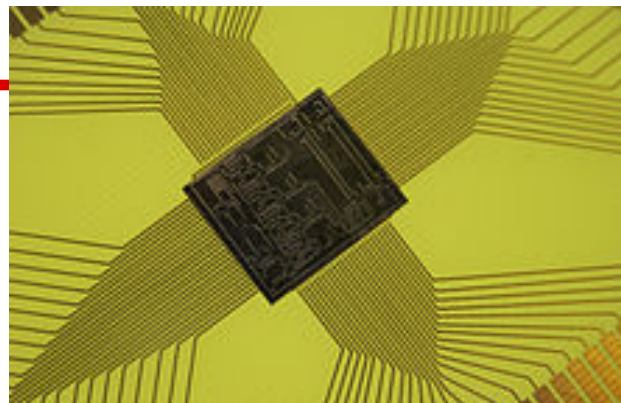
- 常见

- 加速度计、陀螺仪、磁力计
- 温度计（主要受电池温度影响）
- Proximity Sensor
- Light sensor(检测环境光)
- 麦克风（与扬声器相结合能实现声纳）

- 新兴：气压计

- 特点

- 高噪声(低成本)
- 未校准
- 不断进化



时域融合算法

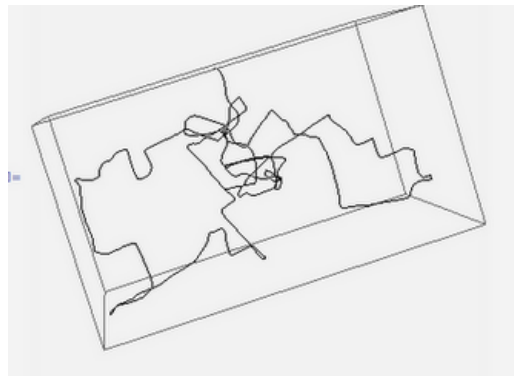
- 卡尔曼滤波
 - 满足以下时最优
 - 状态方程准确
 - 噪声为符合高斯分布的白噪声时
 - 噪声协方差矩阵已知
 - 贝叶斯滤波
 - 隐马尔科夫模型
 - 粒子滤波
 - 非参数模型, 按蒙特卡洛模拟
 - 大计算量换取较大的适用范围
-

离线重建

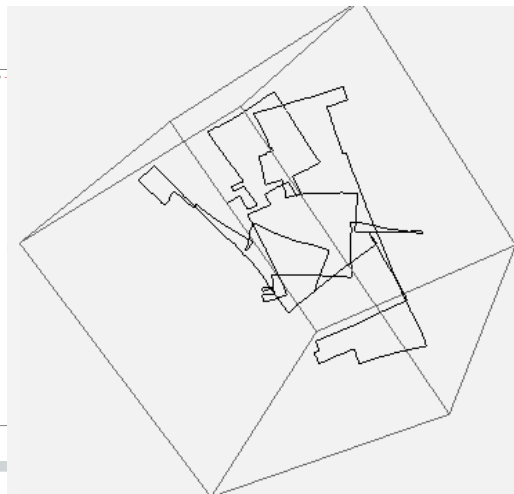
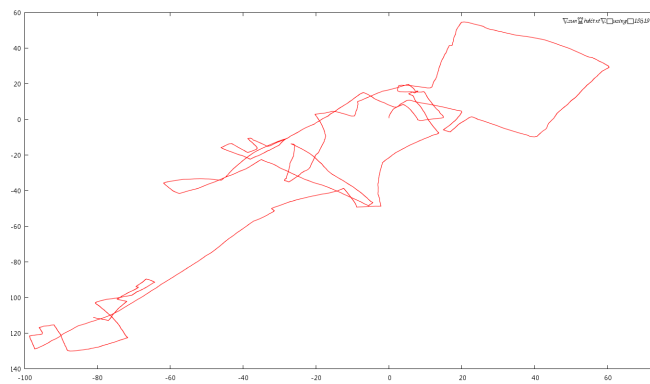
INSlib



Median-NCF



真实值



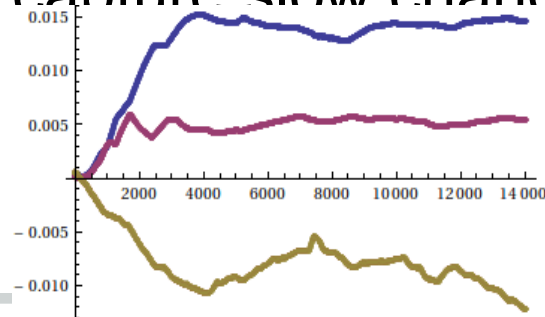
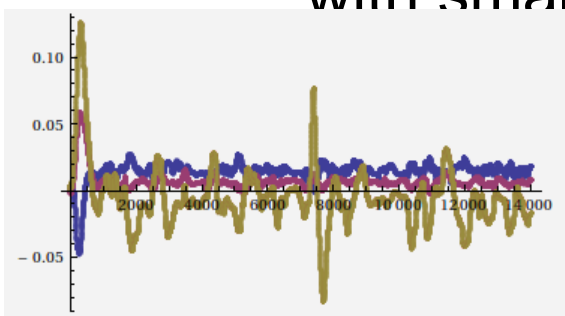
两级互补滤波器

- 收敛率-光滑性矛盾

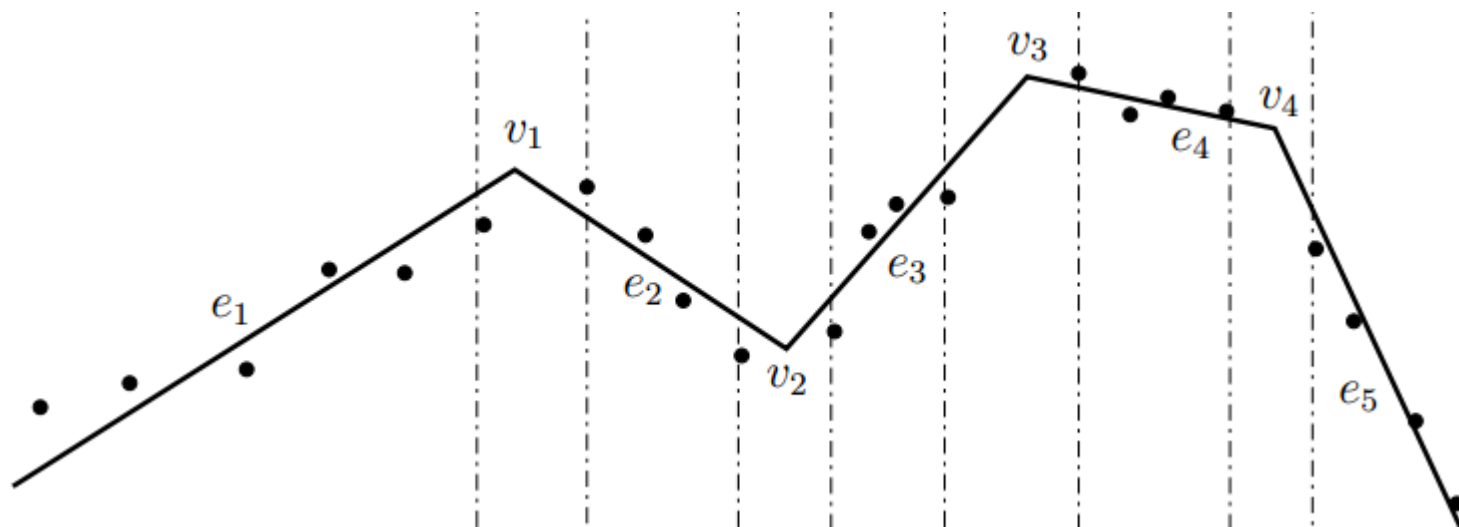
- Free (low theta) NCF converge to true bias fast, but not smooth
- Concentrated (high theta) NCF converges slowly, but smooth

- Two-step

- First step: low theta NCF gives an estimate, like median of bias
- Second step: high theta NCF centered around bias, with small adaptation to capture slow change in bias

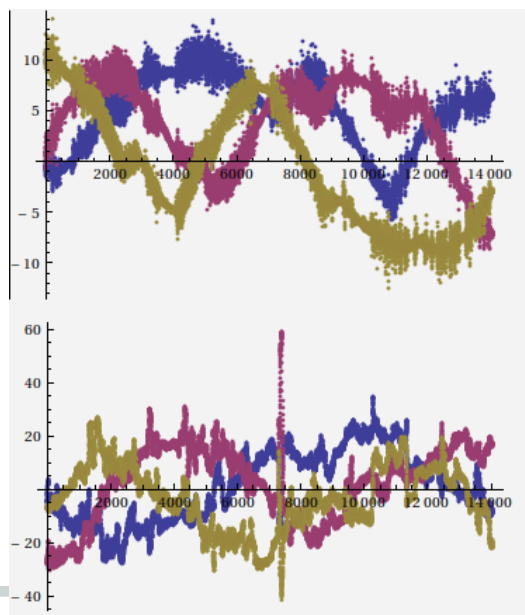


轨迹+地标+地图→定位



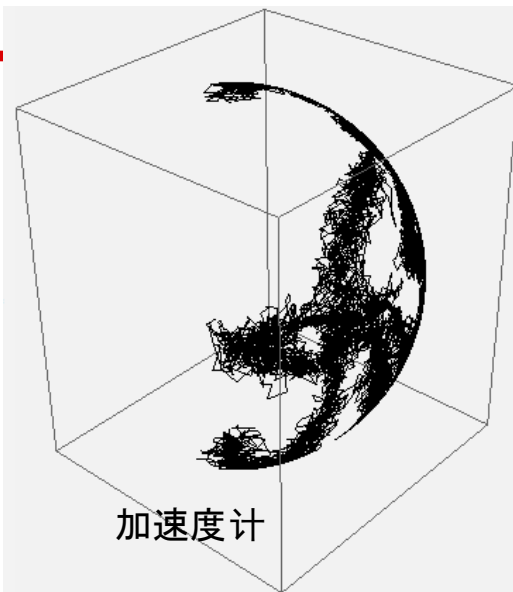
三维旋转

- 旋转矩阵: $R_1 R_2 \neq R_2 R_1$
 - 投影到2维不可行

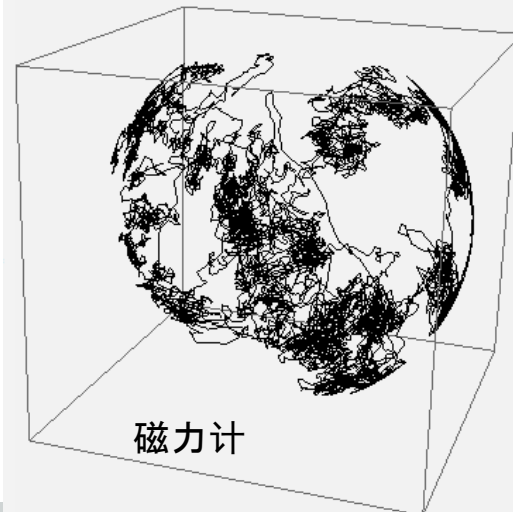


加速度计

磁力计



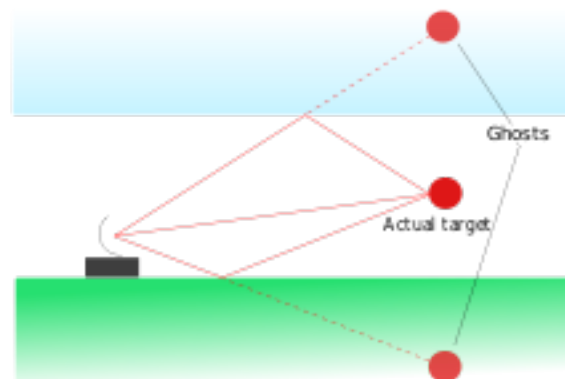
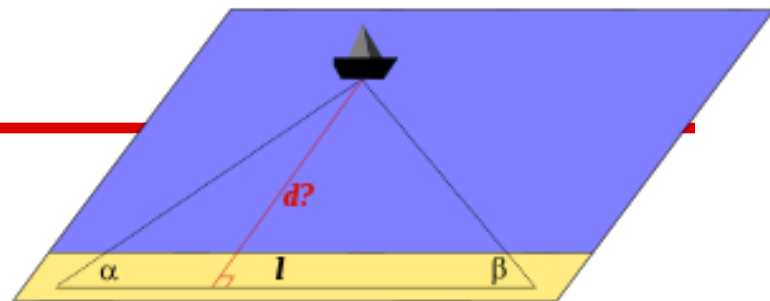
加速度计



磁力计

卫星定位轨迹

- 卫星导航系统
 - GPS, 北斗, GLONASS
 - 高精度的卫星位置广播+终端三角化
- 室内环境
 - 墙体吸收衰减
 - 反射面众多造成多道效应
- 仍能为室内定位提供粗估计
 - 帮助选择楼层地图
 - 确定初始点



轨迹来源

- 观测轨迹
 - 演化轨迹
-

在线光滑估计

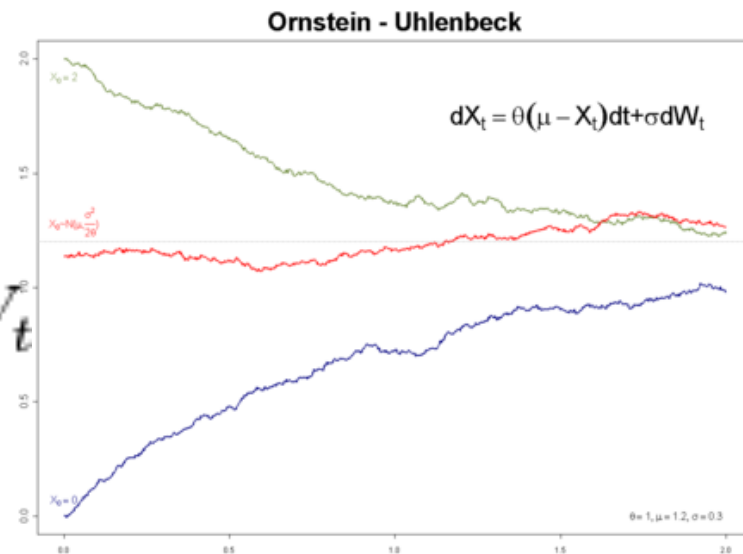
- Ornstein-Uhlenbeck过程

$$dx_t = \theta(\mu - x_t)dt + \sigma dW_t$$

-

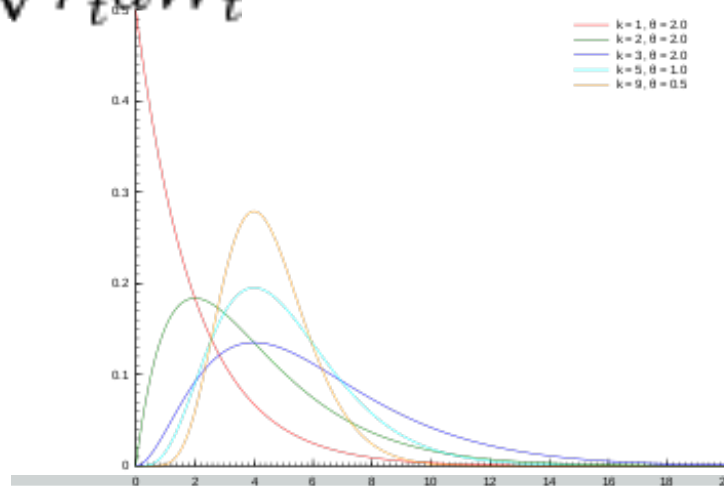
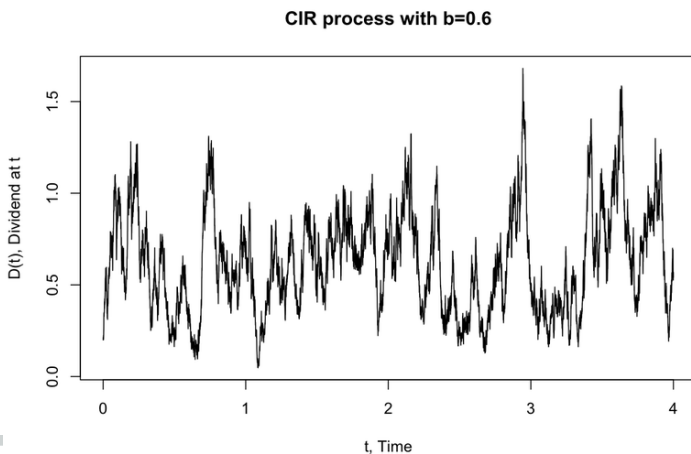
- 静态分布为高斯分布

$$f_s(x) = \sqrt{\frac{\theta}{\pi\sigma^2}} e^{-\theta(x-\mu)^2/\sigma^2}$$



- CIR过程: 静态分布为Gamma 分布

$$dr_t = \theta(\mu - r_t)dt + \sigma \sqrt{r_t}dW_t$$



信号源定位轨迹

- 手机基站

- 手机信号强度三角化定位
- 网格密度限制
- 精度数百米

- WIFI信号

- 信号强度/指纹
- 众包WIFI与GPS的互相对应关系并在云端聚合 (Google Maps)

