

# WMS515 零速修正的行人导航 Matlab

版本 20250518

## 1. 概述

### 1.1. 功能

代码包根据一组脚步惯性测量装置 IMU 的数据，计算行人导航。程序语言 Matlab。

直接运行 instance1.m 即可。根据陀螺仪和加速度计导航；当判断为零速时，计算卡尔曼滤波，修正速度、姿态、陀螺仪零偏、加速度计零偏；实现零速时限制惯性导航误差的效果。

处理实验数据有较多技巧。建议需要处理实验数据的用户联系本店定作。

### 1.2. 部分代码截图

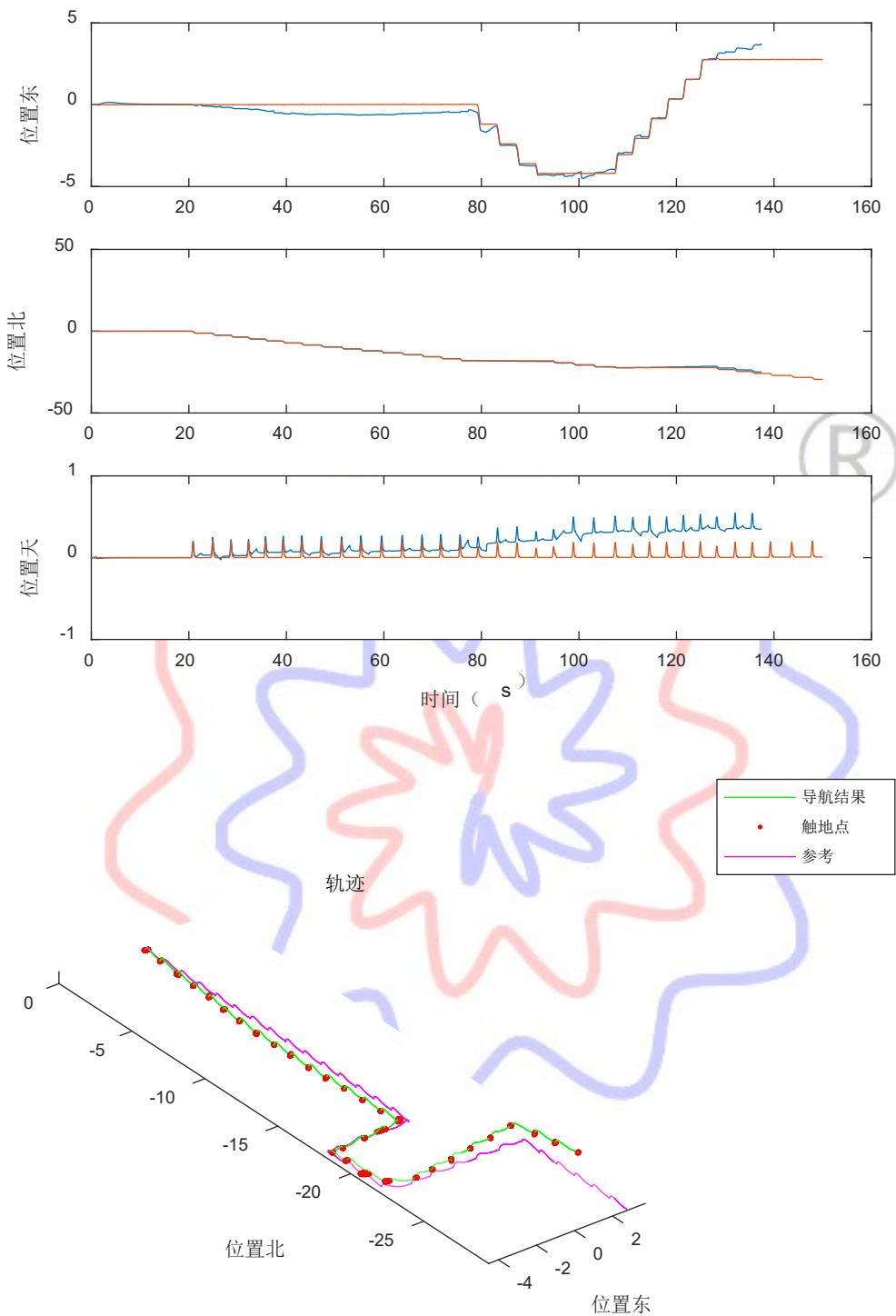
(由于版本迭代，实际代码可能与截图有轻微差别)

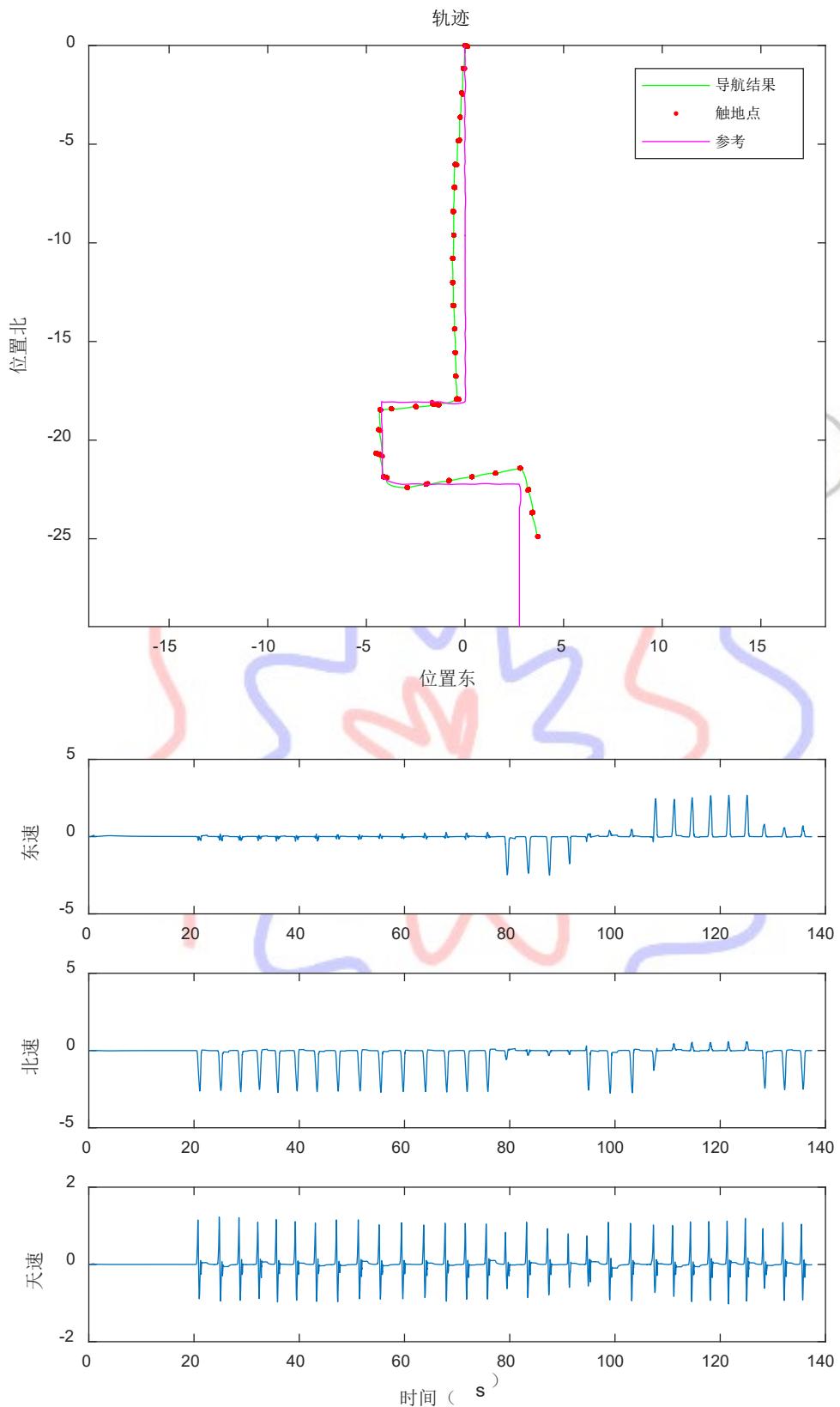
```

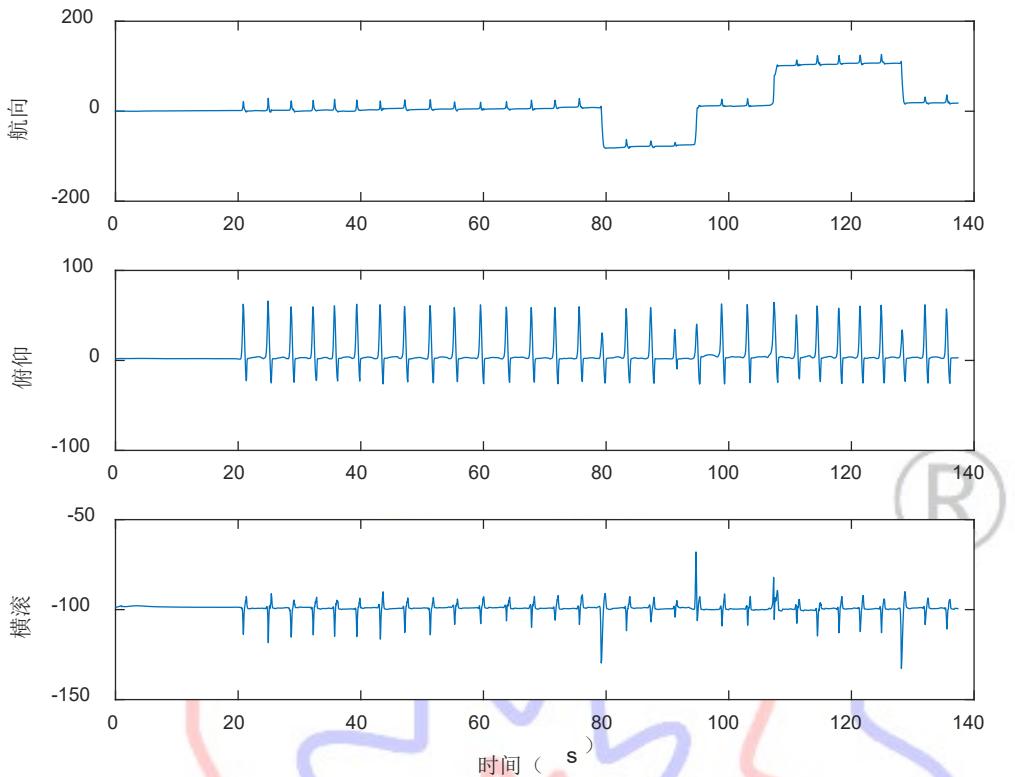
52 - marker=0;
53 - sxsy0;
54 - data0=zeros(L, 30);
55 -
56 % 导航
57 - for k=1:L
58 -
59 -     gyro=gyro(k,:);
60 -     acc=acc(k,:);
61 -
62 -     [att1,speed1,pos1,accl1]=insgyroacc(gyro,acc,
63 -                                         biasacc,biasgyro);
64 -
65 -     %更新用于卡尔曼滤波的偏差
66 -     Pkgetfk(att1,accl1);
67 -     IPk=eye(15)+Pk*dIins;
68 -     Phi1=IPk*Phi1;
69 -     Q1=Q1+Q0*dIins;
70 -
71 -     if (k>=200)
72 -         sx=sun(abs(gyro((k-199):k,1)));
73 -         sy=sun(abs(gyro((k-199):k,2)));
74 -         sz=sun(abs(gyro((k-199):k,3)));
75 -         smax10;
76 -         if ((sx>smax)&&(sy>smax)&&(sz>smax))%零速修正的卡尔曼滤波
77 -             marker=1;
78 -             I1=speed1;
79 -             [X1,Pk1]=kalA(I1,H,Pk1,Q1,R,Phi1);
80 -             Phi1=eye(15);
81 -             Q1=zeros(15);
82 -             pos1=pos-X1(1:3,1);
83 -             speed1=speed1-X1(4:6,1);
84 -             att1=update(att1,(cbn(att1))'*X1(7:9,1));
85 -             biasgyro=biasgyro-X1(10:12,1);
86 -             biasgyro=biasgyro-X1(13:15,1);
87 -
88 -         else
89 -             marker=0;
90 -         end
91 -
92 -         %数据保存
93 -         data0(k,1:10)=[getoula(att1)',speed1',pos1',marker];
94 -         data0(k,11:13)=[sx,sy,sz];
95 -         %data0(k,13:15)='1';
96 -         %data0(k,16:30)='1';
97 -
98 -     end
99 -
100 -     t1=imu(:,1);
101 -
102 -     ref=load('ReferPos.txt');
103 -     ref=ref(1:30000,:);
104 -     ref=ref(:,1);
105 -     t2=ref(:,1);

```

### 1.3. 运行结果







## 2. 工作原理

### 2.1. 主程序

主程序为 `instance1.m`。直接运行即可。

程序主要工作流程为：

```

设定初值
while(1)
{
    惯性导航计算
    更新状态方程
    if(角速度很小)
    {
        计算卡尔曼滤波
        根据卡尔曼滤波的计算结果补偿惯性导航的误差
    }
    保存数据
}
绘图

```

### 2.2. 惯性导航

计算姿态、速度、位置。

姿态计算采用四元数。四元数定义为

$$\mathbf{q} = \left[ \cos \frac{\theta}{2} \quad u_x \sin \frac{\theta}{2} \quad u_y \sin \frac{\theta}{2} \quad u_z \sin \frac{\theta}{2} \right]^T \quad (2-1)$$

其中  $\theta$  是旋转的角度， $[u_x \quad u_y \quad u_z]^T$  是旋转轴的单位向量。

四元数姿态微分方程为

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \mathbf{q} \quad (2-2)$$

引入 4 维的角增量矩阵

$$[\boldsymbol{\theta}] = \begin{bmatrix} 0 & -\theta_x & -\theta_y & \theta_z \\ \theta_x & 0 & \theta_z & -\theta_y \\ \theta_y & -\theta_z & 0 & \theta_x \\ \theta_z & \theta_y & -\theta_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

四元数更新姿态的公式为

$$\mathbf{q}(t+T) = \left( \cos \frac{|\boldsymbol{\theta}|}{2} \mathbf{I} + \frac{\sin \frac{|\boldsymbol{\theta}|}{2}}{|\boldsymbol{\theta}|} [\boldsymbol{\theta}] \right) \mathbf{q}(t) \quad (2-4)$$

简化的速度和位置计算为

$$\boldsymbol{\omega}_{nb}^b = \boldsymbol{\omega}_{ib}^b \quad (2-5)$$

$$\dot{\mathbf{V}}_{en}^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{f}_b + \mathbf{g} \quad (2-6)$$

### 2.3. 零速修正

#### 2.3.1. 原理概述

连续计算惯性导航；当获取卫星数据时，采用扩展卡尔曼滤波修正导航误差。

卡尔曼滤波可以理解为：根据方差求权重，做加权平均。

原始的卡尔曼滤波适用于线性系统。因为导航系统不是线性的，所以采用扩展卡尔曼滤波。扩展卡尔曼滤波的主要方法是，选用误差量，利用一阶微分近似为线性系统。滤波得到误差量估计值后，立刻补偿误差。

有的文献把 EKF 算法进一步细化为 ESKF 算法，严格意义上本代码包的方法属于 ESKF 算法。但是大量的文献没有把 EKF 算法进行如此细致的划分，本代码包的算法完全可以说就是 EKF 算法。

#### 2.3.2. 卡尔曼滤波

比较复杂的系统中，一方面系统具有多个自由度，另一方面被测量随着时间而变化。因此用状态空间方程的形式描述系统的关系，并把加权平均数计算方法用矩阵表示，则得到卡尔曼滤波。

系统表示为：

$$\mathbf{x}_k = \Phi \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (2-7)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H} \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (2-8)$$

其中是  $\mathbf{x}$  状态量，是希望获得而又难以准确测量的量。式(2-7)描述了被测量的变化关系，这里是离散形式。 $\mathbf{z}$  表示量测量，是能测量得到但是包含随机误差的量。式(2-8)描述了量测量与状态量的关系。 $\mathbf{w}$  和  $\mathbf{v}$  是随机噪声。有的系统中  $\mathbf{w}$  和  $\mathbf{v}$  会乘以系数矩阵，但是大多数惯性导航装置的三轴传感器精度大体相当，因此没必要引入标准卡尔曼滤波的  $\Gamma$  矩阵。

状态量的变化也可以描述为连续方程

$$\dot{\mathbf{x}}_k = \mathbf{F} \mathbf{x}_{k-1} \quad (2-9)$$

如果采样间隔足够小，离散方程与连续方程的关系为

$$\Phi = \mathbf{I} + \mathbf{F}T \quad (2-10)$$

其中  $T$  为采样间隔， $\mathbf{I}$  为单位矩阵。

卡尔曼滤波的解算过程就是根据  $\mathbf{z}$  估计  $\mathbf{x}$ ，具体方法如下：

如果不考虑误差，前后时刻的  $\mathbf{x}$  具有关系

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \Phi \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad (2-11)$$

$\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ 是前一时刻 $\mathbf{x}$ 的估计值， $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ 是推算的后一时刻的 $\mathbf{x}$ 。但是因为误差的存在，这个推算并不准确，需要根据 $\mathbf{z}$ 修正，因此取

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + K_k (\mathbf{z}_k - H \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}) \quad (2-12)$$

其中 $K_k$ 是反映权重的滤波增益。这个增益由如下方法计算

$$P_{k|k-1} = \Phi P_{k-1} \Phi^T + Q \quad (2-13)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H^T (H P_{k|k-1} H^T + R)^{-1} \quad (2-14)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_{k|k-1} (I - K_k H)^T + K_k R K_k^T \quad (2-15)$$

其中 $P$ 、 $Q$ 、 $R$ 分别是 $\hat{\mathbf{X}}$ 、 $\mathbf{w}$ 、 $\mathbf{v}$ 的方差矩阵。

上述公式给出了线性系统的卡尔曼滤波方法。非线性系统可以局部微分而近似为线性系统，采用扩展卡尔曼滤波方法解算。扩展卡尔曼滤波中的 $\mathbf{x}$ 是误差量，扩展卡尔曼滤波获得误差量后，及时修正，使得误差量总维持在较小范围内；在误差量较小时，局部微分得到的线性系统与原始的非线性系统基本一致，卡尔曼滤波能取得较好效果。

代码包采用闭环反馈校正的方式，滤波后修正惯导误差，所以标准卡尔曼滤波中的 $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ 取0，简化后的计算公式为

$$\hat{\mathbf{X}}_k = K_k \mathbf{z}_k \quad (2-16)$$

### 2.3.3. 状态方程

采用15维状态量，包括位置误差、速度误差、姿态误差、陀螺仪零偏、加速度计零偏各3个自由度。

卡尔曼滤波的状态方程矩阵，简化为

$$F = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & I_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & F_{av} & \mathbf{0}_3 & C_b^n \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & -C_b^n & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

### 2.3.4. 零速修正

一段时间内，角速度很小，判断其处于静止状态，进行零速修正。

零速时，进行扩展卡尔曼滤波。

观测矩阵为

$$H = [\mathbf{0}_3 \quad I_3 \quad \mathbf{0}_3 \quad \mathbf{0}_3 \quad \mathbf{0}_3] \quad (2-18)$$

## 3. 著作权和服务

### 3.1. 工作原理参考什么资料

为防止非法转卖，代码本身注释较少。但是本店提供人工答疑、纸质资料、讲解视频等，有效帮助用户理解代码。

纸质资料《组合导航应用笔记》，联系本店微信索要。

讲解视频，B站（哔哩哔哩）搜索 WMSOFT。

### 3.2. 著作权声明

本店保留著作权。

电路、说明书、全部附属代码（以下简称本代码包）仅限于学习和研究用途的少量使用；包含改编文件、写入嵌入式系统的编译后程序，所有副本总计不得超过5份。

本代码包有偿使用。

严禁转卖或公开发布本代码包的全部或一部分。

大规模应用本代码包需要额外取得本店的授权。

对于违反上述要求的用户，本店有权要求停止销售、撤稿、赔偿损失等。

### 3.3. 服务内容

赠送 30 分钟语音答疑服务，用于解决较为复杂的疑问。赠送长期文字答疑，用于解决简单的、零散的疑问。加微信答疑。

答疑服务仅限直接购买人本人使用。答疑服务不能转让、不能共享。用户需要保留购买凭证截图。

疑问较多的用户，可以付费购买额外的语音答疑服务。

本店可提供数据判读、数据处理、定制化修改代码等服务，但是需要额外收费。

### 3.4. 联系方式

**WMSOFT**

组合导航二次开发生态系统

微信扫描二维码添加好友



电子邮箱: braun@wmsoft.wang

网站: <http://wmsoft.xyz>

哔哩哔哩、知乎、闲鱼账号均为 WMSOFT。

