张智刚, 朱启明, 何杰, 等. 基于 RTK-GNSS 和 MEMS 陀螺仪的车辆航向角测量技术 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 34-37.
ZHANG Zhigang, ZHU Qiming, HE Jie, et al. Vehicle heading angle measure technology based on RTK-GNSS and MEMS gyroscope[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 34-37.

基于 RTK-GNSS 和 MEMS 陀螺仪的车辆航向角测量技术

张智刚，朱启明，何　杰，王　辉，岳斌斌，丁　凡
(华南农业大学 工程学院/南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室，广东 广州 510642)

摘要:【目的】更好地满足车辆自动驾驶时航向角测量的精度要求。【方法】提出卡尔曼滤波算法，把实时动态–全球导航卫星系统 (RTK-GNSS) 测量出来的经纬度和高程经过高斯投影转换为高斯平面坐标，和微电子机械系统 (MEMS) 陀螺仪测得的累积航向角进行融合处理，最终得到车辆更为精准的航向角。【结果】融合后的航向角度曲线既保持了 GNSS 航向的整体变化趋势，也保持了陀螺仪航向的细部变化趋势，且较 GNSS 和陀螺仪所得曲线更为平滑，可以跟踪车辆 180°调头的转弯动作。【结论】卡尔曼滤波算法可以实时在线且精准地测得车辆航向角数据，精度较 GNSS 测量结果提高 80% 以上。

关键词: RTK-GNSS; MEMS 陀螺仪; 车辆航向角测量; 卡尔曼滤波; 数据融合
中图分类号: S219.1; TP242　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1001-411X(2019)05-0034-04

Vehicle heading angle measure technology based on RTK-GNSS and MEMS gyroscope

ZHANG Zhigang, ZHU Qiming, HE Jie, WANG Hui, YUE Binbin, DING Fan
(College of Engineering, South China Agricultural University/Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To better meet the accuracy requirement of vehicle heading angle measure. 【Method】Kalman filter algorithm was proposed. The latitude, longitude and elevation measured by RTK-GNSS receiver were converted to plane coordinates using Gaussian projection. The Gaussian plane coordinates and the accumulated heading angle measured by gyroscope were integrated by Kalman filter, and finally more accurate heading angle was obtained. 【Result】The integrated curve kept the entire variation trend of the heading angle measured by GNSS receiver and the partial variation trend measured by MEMS gyroscope. The curve was smoother than that based on GNSS and gyroscope, and could follow action of vehicle 180° turning. 【Conclusion】The Kalman filter algorithm can measure the vehicle heading angle data in real time and the precision was improved 80% more than the result measured by GNSS.

Key words: RTK-GNSS; MEMS gyroscope; vehicle heading angle measure; Kalman filter; data fusion

自动驾驶技术研发中，行驶车辆的水平位置 (经度、纬度) 和航向角度是两大关键信息，主要为车辆控制系统的横向控制 (转向盘控制) 和纵向控制 (制动、加速控制) 提供参考数据，满足自动驾驶

收稿日期: 2019–05–25　　**网络首发时间:** 2019–07–25 11:31:05
网络首发地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20190724.1819.016.html
作者简介: 张智刚 (1977—)，男，副教授，博士，E-mail: zzg208@scau.edu.cn
基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0700400)

车辆定位导航的综合需求[1]。自动驾驶技术对车辆航向角测量精度要求非常高。对高速行驶的汽车而言，航向角轻微偏差都会导致汽车偏离原来的行驶路线。对农业机械而言，虽然对农机作业速度要求不高，但对导航作业精度要求很高 (特别是播种时需要达到 cm 级)，航向角的轻微偏差都会对导航作业精度产生很大影响。因此，提高车辆航向角的测量精度是非常必要的。车辆航向角测量方法主要有磁阻传感器法、双天线全球导航卫星系统 (Global navigation satellite system，GNSS) 定位定向法、单天线 GNSS 定位定向法和陀螺仪测航向法等。磁阻传感器受周围磁场环境影响大，精度和可靠性不高，在高压线等有磁场干扰的作业环境下容易受到影响[2-5]；双天线 GNSS 定位系统测航向，虽然测量精度高，但动态响应特性差，成本高[6-7]；单天线 GNSS 定位系统可输出航向角度信息，但是随机噪声大，且速度越低，噪声越大[8-11]；陀螺仪测航向一方面需要航向角度初始化，另一方面随机漂移误差会出现累积发散现象[12-15]。上述几种测量方法测得的航向角，均不能很好地满足车辆自动驾驶的精度要求。

本文采用单天线 GNSS 定位和微电子机械系统 (Micro electro mechanical system, MEMS) 陀螺仪相结合的方式，通过融合算法实现车辆航向角的测量。提出基于卡尔曼滤波器的车辆航向角估计模型，把实时动态–全球导航卫星系统 (Real time kinematic-GNSS，RTK-GNSS) 测量出来的经纬度和高程经过高斯投影变换为导航平面坐标，与陀螺仪测量的车辆角速度经过积分得出的航向角做融合处理，得到更为精准的航向角。该方法克服了 GNSS 因更新频率低出现的数据延迟和 MEMS 陀螺仪因随机漂移引起的累积误差等问题，不仅能够得到更为精准的航向角数据，还能保证良好的实时性。

1　传感器组合

本文测量车辆航向角采用的导航传感器主要有 Trimble®BD970 GNSS 嵌入式板卡和内置于 Xsens MTi-300 微型姿态参考系统的 MEMS 陀螺仪。

1.1　Trimble®BD970 GNSS 嵌入式板卡

Trimble®BD970 GNSS 嵌入式板卡是一款紧凑型的多星接收机板卡，专为满足各种精确到 cm 级的定位精度应用需求而设计。系统模块不仅支持 GPS L1/L2、L2C、L5，而且支持 GLONASS L1/L2 信号在内的各种卫星信号。该板卡易于集成且坚固可靠，支持因特网、USB、RS232 和 CAN 等多种接口，串口输出波特率最高达 115 200 bps，可实现高达 50 Hz 的原始测量与定位输出。基准站输出支持 CMR、CMR+、RTCM 2.1、2.2、2.3、3.0、3.1 等协议格式；定位数据输出支持 ASCII：NMEA-0183 GSV、AVR、RMC、HDT、VGK、VHD、ROT、GGK、GGA、GSA、ZDA、VTG、GST、PJT、PJK、BPQ、GLL、GRS、GBS 以及二进制：TrimbleGSOF。低延时 RTK 定位模式的水平定位精度可达±(8 mm+1 ppm)RMS，垂直定位精度可达±(15 mm+1 ppm)RMS，延迟时间小于 20 ms，最大输出频率 50 Hz。GNSS 板卡物理特性如下，尺寸：100 mm×60 mm×11.6 mm；电源：3.3 V DC(−3%~5%)；典型功耗：1.4 W (L1/L2 GPS) 或 1.5 W (L1/L2 GPS 和 G1/G2 GLONASS)；质量：62 g；连接器 I/O：24 排针转接口和 6 排针转接口；天线：MMCX 插座；工作温度：−40~75 ℃；储存温度：−55~85 ℃；振动限值：随机 8 g RMS。

1.2　Xsens MTi-300 微型姿态航向参考系统

Xsens Technologies B.V.公司研发的 MTi-300 微型姿态航向参考系统内部包括：3D 速率陀螺、3D 加速度计和 3D 磁场感应计。运行于 DSP 上的卡尔曼滤波算法融合上述传感器信息，给出运动载体的精确 3D 姿态角度[8]。系统通过 RS232 接口按设定格式输出 3D 姿态角度。MTi 内置的 3D 速率陀螺的测量范围可达±300°/s，零偏稳定性为 1°/s，随机游走系数 0.05°/(s·Hz)，校准误差 0.1°，带宽 40 Hz，A/D 分辨率 16 位，更新速率最大为 120 Hz。本文利用 3D 速率陀螺中的 Z 轴陀螺实现车辆航向角的角速率累积测量。

2　航向角估计算法设计

2.1　GNSS 定位数据预处理

GNSS 定位数据预处理主要将 Trimble®BD970 GNSS 板卡测量得到的 WGS-84 大地坐标系的经度、纬度和高程向大地导航坐标系转换，通过高斯投影将 WGS-84 大地坐标转换为与 WGS-84 椭球对应的高斯平面坐标，这种转换是为了使 GNSS 板卡输出的 WGS-84 大地坐标定位数据能够用于车辆的导航控制系统。

本文使用的 Gauss-Kruger 投影坐标系的主要参数[12] 包括：中央经线为 114.000 000 (3 度带)；水平偏移量为 500 km；地理坐标系为 GCS_WGS_1984；大地参照系为 D_WGS_1984；参考椭球体为 WGS_1984；椭球长轴为 6 378 137.000 000；椭球扁率为 0.003 352 810 7。

2.2 卡尔曼滤波器设计

设定 k 时刻车辆本体的真实航向角度为 ψ_k'，车辆本体的真实前进速度是 v_k'，则

$$\psi_k' = \psi_k + \varepsilon_{\psi k} + \xi_{\psi k}, \tag{1}$$

$$v_k' = v_k + \xi_{vk}, \tag{2}$$

式中，ψ_k、v_k 分别指航向角度、前进速度的测量值，$\varepsilon_{\psi k}$ 指航向角度的测量偏差值，$\xi_{\psi k}$、ξ_{vk} 分别指航向角度和前进速度的随机测量误差。

基于航位推算原理，建立车辆导航控制点在 2D 平面坐标系下的运动方程：

$$x_{ck} = x_{ck-1} + v_k' \cos\theta_k' \mathrm{d}t, \tag{3}$$

$$y_{ck} = y_{ck-1} + v_k' \sin\theta_k' \mathrm{d}t, \tag{4}$$

式中，x_{ck}、y_{ck} 为 k 时刻车辆本体的高斯投影平面坐标，x_{ck-1}、y_{ck-1} 为 k−1 时刻车辆本体的高斯投影平面坐标，dt 为航位推算的时间间隔。

将 (1) 和 (2) 式代入上述表达式，得到：

$$x_{ck} = x_{ck-1} + v_k \cos\psi_k \mathrm{d}t + \varepsilon_{\psi k}\cos\psi_k \mathrm{d}t - v_k \varepsilon_{\psi k} \sin\psi_k \mathrm{d}t, \tag{5}$$

$$y_{ck} = y_{ck-1} + v_k \sin\psi_k \mathrm{d}t + \varepsilon_{\psi k}\sin\psi_k \mathrm{d}t + v_k \varepsilon_{\psi k} \cos\psi_k \mathrm{d}t。 \tag{6}$$

将上述等式以卡尔曼滤波器状态转移方程的形式表示为：

$$\boldsymbol{X}_k = \boldsymbol{A}_k \boldsymbol{X}_{k-1} + \boldsymbol{b}_k + \boldsymbol{u}_k, \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{X}_k$=[x_{ck}, y_{ck}, $\varepsilon_{\psi k}$]，表示 k 时刻的状态空间向量；$\boldsymbol{X}_{k-1}$=[x_{ck-1}, y_{ck-1}, $\varepsilon_{\psi k-1}$]，表示 k−1 时刻的状态空间向量；

$$\boldsymbol{A}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & (\cos\psi_k - v_k \sin\psi_k)\mathrm{d}t \\ 0 & 1 & (\sin\psi_k + v_k \cos\psi_k)\mathrm{d}t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

是 k 时刻状态转移矩阵，由陀螺仪累积航向角度和前进速度的测量值实时更新；

$$\boldsymbol{b}_k = \begin{bmatrix} v_k \cos\psi_k \mathrm{d}t \\ v_k \sin\psi_k \mathrm{d}t \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{u}_k = \begin{bmatrix} 0, & 0, & \xi_{\psi k} \end{bmatrix},$$

是状态转移方程的白噪声序列；系统过程噪声协方差矩阵为 $\boldsymbol{Q}_k$，表示状态转移方程的误差大小，本文中 $\boldsymbol{Q}_k$ 设定为常数矩阵，在仿真和试验过程中整定矩阵参数。

以 GNSS 天线在大地导航坐标系下的定位坐标作为观测向量，得到卡尔曼滤波器的测量方程如下：

$$\boldsymbol{Z}_{gk} = H_k X_k + \boldsymbol{v}_k \tag{8}$$

式中，

$$\boldsymbol{Z}_{gk} = \begin{bmatrix} x_{gk} \\ y_{gk} \end{bmatrix},$$

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

$$\boldsymbol{v}_k = \begin{bmatrix} \xi_{gxk} \\ \xi_{gyk} \end{bmatrix},$$

式中，x_{gk}、y_{gk} 为 GNSS 天线处的定位坐标，$\boldsymbol{H}_k$ 为卡尔曼滤波器 k 时刻的测量矩阵，ξ_{gxk}、ξ_{gyk} 为 OEM GNSS 板卡定位在水平面坐标系下的随机定位误差。

测量向量的噪声方差矩阵为：

$$\boldsymbol{R}_k = \begin{bmatrix} r_{xk}^2 & 0 \\ 0 & r_{yk}^2 \end{bmatrix}, \tag{9}$$

式中，r_{xk}^2、r_{yk}^2 分别为 ξ_{gxk}、ξ_{gyk} 的方差统计值。

综合上述推导，采用线性离散卡尔曼滤波器的递归差分方程进行状态向量预测和测量向量校正：

预测方程组为：

$$\hat{x}_k = \boldsymbol{A}_k \hat{x}_{k-1} + \boldsymbol{b}_k, \tag{10}$$

$$\boldsymbol{P}_k = \boldsymbol{A}_k \boldsymbol{P}_{k-1} \boldsymbol{A}_k^T + \boldsymbol{Q}_{k-1}, \tag{11}$$

式中，$\hat{x}_k$表示 k 时刻的预测结果，$\hat{x}_{k-1}$表示 k−1 时刻的预测结果，$\boldsymbol{A}_k$ 表示状态转移矩阵，$\boldsymbol{A}_k^T$代表 $\boldsymbol{A}_k$ 的转置，$\boldsymbol{P}_k$ 对应$\hat{x}_k$在 k 时刻的系统过程噪声方差预测值，$\boldsymbol{P}_{k-1}$ 对应$\hat{x}_{k-1}$在 k−1 时刻的系统过程噪声方差预测值，$\boldsymbol{Q}_{k-1}$ 为 k−1 时刻的系统过程协方差。

校正方程组为：

$$\boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{P}_k \boldsymbol{H}_k^T (\boldsymbol{H}_k \boldsymbol{P}_k \boldsymbol{H}_k^T + \boldsymbol{R}_k)^{-1}, \tag{12}$$

$$\hat{x}_k' = \hat{x}_k + \boldsymbol{K}_k \left(\boldsymbol{Z}_{gk} - \boldsymbol{K}_k \hat{x}_k\right), \tag{13}$$

$$\boldsymbol{P}_k = (I - \boldsymbol{K}_k \boldsymbol{H}_k)\boldsymbol{P}_k。 \tag{14}$$

式中，$\boldsymbol{K}_k$ 为 k 时刻的卡尔曼滤波增益，$\boldsymbol{H}_k^T$为 $\boldsymbol{H}_k$ 的转置，$\hat{x}_k'$是 k 时刻最优化估计值，$\boldsymbol{Z}_{gk}$ 是 k 时刻的测量更新值，$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

3 结果与分析

采用 GNSS 板卡和 MEMS 陀螺仪在轮式拖拉机平台上进行原始数据采集。GNSS 天线安装于车辆后轮轴中心点的正上方。内置 MEMS 陀螺仪的 MTi 尽可能安装于车辆质心位置处，以减少车辆颠簸晃动对 MTi 的干扰。

轮式拖拉机的行驶路线分直线型和 S 型 2 种情况。用 C++编程语言开发卡尔曼滤波器和原始数据仿真测试的程序。最后将测得的数据以文本文件的方式导入 Matlab 程序中，测得的曲线图如图 1、2 所示。

图 1 为拖拉机直线行驶时，GNSS、陀螺仪和卡尔曼滤波融合后得到的 3 条航向角度对比曲线。GNSS 航向误差幅度超过 5°，陀螺仪累积航向的偏移在 300 s 左右超过 2°，融合后的航向角度都在

38°左右，偏移不超过 1°，较原始 GNSS 航向角度的精度提高 80% 以上。

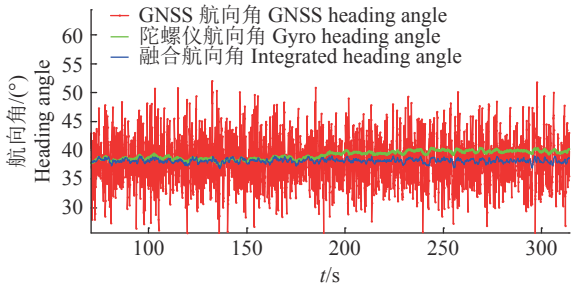

图 1　直线行驶时拖拉机航向角的估计结果

Fig. 1　The estimation result of heading angle of the tractor running in straight trajectory

图 2 为拖拉机以 S 型轨迹行驶时，GNSS、陀螺仪和卡尔曼滤波融合后得到的 3 条航向角度对比曲线。融合后的航向角度可以跟踪拖拉机 180°换向的转弯动作，曲线既保持了 GNSS 航向的整体变化趋势，也较 GNSS 和陀螺仪所得结果更为平滑，符合拖拉机实际运动状态。

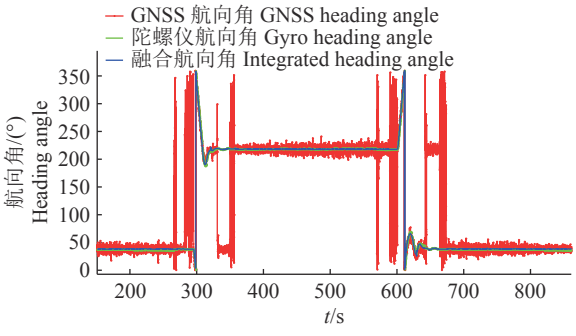

图 2　S 型路线行驶时拖拉机航向角的估计结果

Fig. 2　The estimation result of heading angle of the tractor running in S type trajectory

从图 1、2 中可看出，未经处理的陀螺仪累积航向角度和 GNSS 定位测量的航向角度有较大波动，经卡尔曼滤波融合后，有效抑制了陀螺仪累积航向的发散，减少了零偏和随机漂移带来的误差。融合后的航向角度曲线既保持了 GNSS 航向的整体变化趋势，也保持了陀螺仪航向的细部变化趋势，且较 GNSS 和陀螺仪所得曲线更为平滑。

4　结论

本文采用卡尔曼滤波器对 RTK-GNSS、MEMS 陀螺仪所得的拖拉机航向角进行融合处理，得出了更为精确的航向角融合估计结果，仿真测试结果表明本文所用方法可用于在线测量拖拉机航向角。

RTK-GNSS 航向角和 MEMS 陀螺仪累积航向角在采样频率方面，分别属于低频型和高频型；在误差特性方面，分别为零均值随机误差和偏移型缓变误差。2 种传感器互补性强，研究结果表明多传感器融合的方法能够很好地弥补这 2 种传感器单独测量数据时存在的噪声误差。

参考文献：

[1] 别韦苇, 卢飞腾, 胡进, 等. 基于多器件的航向角优化算法[C]// 2018 中国汽车工程学会年会论文集. 上海: 中国汽车工程学会, 汽车环境保护技术分会. 2018: 104-107.

[2] 卢志才, 米东, 徐章遂, 等. 基于改进巨磁阻传感器的地磁定向系统[J]. 传感技术学报, 2011, 24(2): 304-307.

[3] 李秉玺. 基于系统芯片的捷联式定向系统研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.

[4] HE P, CARDOU P, DESBIENS A, et al. Estimating the orientation of a rigid body moving in space using inertial sensors[J]. Multibody Syst Dyn, 2015, 35(1): 63-89.

[5] LI Y, EFATMANESHNIK M, DEMPSTER A G. Attitude determination by integration of MEMS inertial sensors and GPS for autonomous agriculture applications[J]. GPS Solut, 2012, 16(1): 41-52.

[6] 刘永彪. 基于 GNSS 双天线的定向研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.

[7] 夏佩, 王峰, 黄祖德, 等. 基于双天线的 RTK-GNSS 定向方法[J]. 中国新通信, 2018, 20(22): 58-60.

[8] 甘雨, 隋立芬, 戚国宾, 等. 陆地导航中 GNSS/陀螺仪组合实时测姿方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(3): 379-383.

[9] HE J, XIE J, HE X, et al. Analytical study and compensation for temperature drifts of a bulk silicon MEMS capacitive accelerometer[J]. Sens Actuators A Phys, 2016, 239: 174-184.

[10] 陈亮, 杨柳庆, 肖前贵. 基于梯度下降法和互补滤波的航向姿态参考系统[J]. 电子设计工程, 2016, 24(24): 38-41.

[11] 姚卓. 基于双天线的车载 GNSS/INS 组合导航技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.

[12] 张智刚, 罗锡文, 胡炼, 等. 4 种 DGPS 模块动态定位精度测试与分析[J]. 华南农业大学学报, 2010, 31(1): 102-107.

[13] MOUSAZADEH H. A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles[J]. J Terramechanics, 2013, 50(3): 211-232.

[14] NAGASAKA Y, SAITO H, TAMAKI K, et al. An autonomous rice transplanter guided by global positioning system and inertial measurement unit[J]. J Field Robot, 2010, 26(6/7): 537-548.

[15] CECHOWICZ R. Bias drift estimation for MEMS gyroscope used in inertial navigation[J]. Acta Mechanica Et Automatica, 2017, 11(2): 104-110.

【责任编辑　李庆玲】