doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.043

基于信息融合的拖拉机组合导航定位系统研究

李忠利　刘小锋　陈修魁　高永升　杨淑君
(河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳 471003)

摘要: 针对拖拉机在田间作业时因地形倾斜、土质硬度不均、连续转弯而导致的定位误差问题,设计了一种基于 GA - BP 神经网络算法的多传感器信息融合导航定位系统。该组合导航系统主要由 RTK - GPS 和 IMU 组成,融合了 GA - BP 卡尔曼算法和误差分析,根据多传感器的导航参数,修正拖拉机的定位误差,使拖拉机的行驶轨迹更加平稳。根据基于 MK904 型拖拉机建立的导航定位系统试验平台,在洛阳孟津一拖产品试验基地得到原始的导航定位信息,在 Matlab 中进行算法验证。试验结果表明:在拖拉机直线行驶情况下,该组合导航定位系统侧倾角精度提高了 0.01 rad;在连续转弯过程中,左倾时侧倾角精度提高了 0.02 rad,右倾时侧倾角精度提高了 0.04 rad。说明基于 GA - BP 神经网络卡尔曼算法的组合导航系统能在一定程度上修正因田间地面起伏不定、土质硬度不均、连续转弯而导致的 GPS 定位误差,使拖拉机的行驶轨迹更加平稳。

关键词: 拖拉机; 组合导航; RTK - GPS; GA - BP 神经网络; 卡尔曼滤波
中图分类号: V249.32; S219　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)08-0382-09　　**OSID**:

Tractor Integrated Navigation and Positioning System Based on Data Fusion

LI Zhongli　LIU Xiaofeng　CHEN Xiukui　GAO Yongsheng　YANG Shujun
(*College of Vehicle and Traffic Engineering*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang* 471003, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of positioning errors caused by terrain tilt, uneven soil hardness, and continuous turning during tractor operation in the field, a multi-sensor data fusion navigation positioning system based on GA - BP neural network training was designed. The integrated navigation system was mainly composed of RTK - GPS and IMU, and integrated GA - BP Kalman algorithm and error analysis. Based on multi-sensor navigation parameters, the positioning error of the tractor was corrected to make the tractor's trajectory more stable. According to the established navigation and positioning system test platform based on the MK904 tractor, the original navigation and positioning information was obtained at the Luoyang Mengjin Yituo Product Test Base, and the algorithm was verified in Matlab. The test results showed that the accuracy of the roll angle of integrated navigation and positioning system was improved by 0.01 rad when the tractor was driving straight; during continuous turning, the accuracy of the roll angle was increased by 0.02 rad during the left turn, and the accuracy of the roll angle was increased by 0.04 rad during the right turn. According to the error analysis and the digital characteristics of the positioning information, it can be obtained that the GA - BP Kalman algorithm can correct the GPS positioning error caused by field fluctuations, uneven soil hardness, and continuous turning to a certain extent, so that the tractor's driving trajectory was more stable. It provided a reference for the follow-up research of tractor path tracking control.

Key words: tractor; integrated navigation; RTK - GPS; GA - BP neural network; Kalman filtering

0　引言

农业工程领域导航定位系统的广泛应用在很大程度上提高了农业生产和作业效率。由于单一的车辆定位技术都存在一定的局限性和适用范围,往往不能满足拖拉机田间作业的精度要求,因此以全球

收稿日期: 2019 - 12 - 27　修回日期: 2020 - 02 - 27
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701002)
作者简介: 李忠利(1969—),男,副教授,主要从事汽车电子控制技术研究,E-mail: lylzl69@163.com

定位系统(Global position system,GPS)和惯性导航联合的多传感器信息融合定位技术成为农业车辆导航定位系统的关键技术[1-4]。

华南农业大学研制的拖拉机自动导航定位控制系统在拖拉机速度为 2.88 km/h 时,拖拉机的跟踪误差保持在 0.3 m[5-6];中国农业大学研制的拖拉机自动导航控制系统能实时进行数据处理和定位导航,并且能够较好地进行路线追踪,最大横向偏差为 11 cm[7-8]。这些拖拉机自动导航定位系统虽然具有较高的导航定位精度,也能进行直线和转弯跟踪,但忽略了拖拉机车身姿态引起的定位误差。为了修正这一误差,须获得拖拉机姿态信息。拖拉机姿态信息可通过加速度计或陀螺仪获得。文献[9]基于捷联惯导系统结合四元数进行了姿态解算,文献[10]基于 RTK-GPS 双天线进行了姿态解算,文献[11]采用自适应扩展卡尔曼进行姿态解算。上述研究成果对于姿态解算都获得了很好的测姿效果,但当拖拉机产生侧向加速度时,由侧向加速度引起姿态解算偏差,对偏差进行定位修正的研究较少。因此基于多传感器数据融合的拖拉机组合导航定位修正研究对于农业车辆导航具有重要意义。

本文采用载波相位差分全球定位系统(Real time kinematic differential global position system,RTK-GPS)和惯性测量单元(Inertial measurement unit,IMU)组合定位方式,将多传感器信息进行融合,充分发挥各个导航系统的优势,以修正拖拉机在田间作业时因地形倾斜、土质硬度不均或连续转弯而引起的定位误差,从而提高系统的定位精度和可靠性。

1　组合导航定位方案

本文设计的组合导航系统主要由 RTK-GPS 和 IMU 组成。其中 RTK-GPS 主要包括基站移动站接收机、基站移动站无线数传电台、GPS 天线、基站移动站电台收发天线和移动电源;IMU 由 3 轴的加速度计和 3 轴的陀螺仪组成。RTK-GPS[12] 主要获得拖拉机的位置、速度、航向信息,拖拉机的侧倾角、俯仰角由加速度计、陀螺仪融合得到[13]。

RTK-GPS/IMU 组合导航的核心在于多传感器数据的融合,从而得到最优估计的定位信息[14]。多传感器融合的常用算法是卡尔曼滤波。但卡尔曼滤波需要建立精确的系统模型并且状态噪声和观测噪声应该满足正态分布才能得到比较准确的估计效果。而拖拉机在田间工作过程中,由于田间环境复杂多变,将导致模型的状态噪声和观测噪声特性发生改变。因此,当建立的卡尔曼模型与实际的拖拉机工作状态存在较大偏差时,将导致卡尔曼滤波失败。

遗传算法反向传播(Genetic algorithm back propagation,GA-BP)神经网络可以完美拟合任意非线性系统,可以和卡尔曼滤波算法融合,弥补卡尔曼算法的局限性[15]。因此,采用 GA-BP 神经网络卡尔曼滤波算法实现 RTK-GPS/IMU 组合导航的信息融合。其组合导航定位方案如图 1 所示。

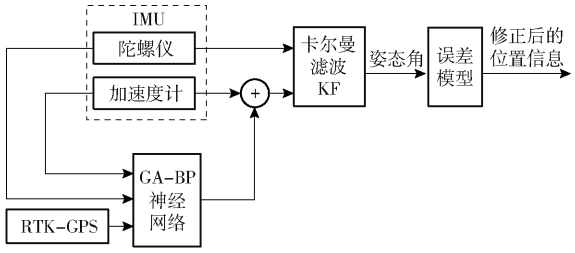


图 1　组合导航定位方案图

Fig. 1　Integrated navigation positioning plan diagram

2　基于 GA-BP 神经网络的卡尔曼滤波器设计

2.1　GA-BP 神经网络模型

2.1.1　BP 神经网络模型

BP 神经网络是一种以信号前向传递,误差逆向传播的多层前馈神经网络[16-17]。在 BP 神经网络学习训练过程中,输入信号经过权值、阈值和激活函数处理之后依次到达隐含层和输出层。如果输出层的输出值与期望值之间的均方根误差没有达到设定的网络精度,则误差将反向传播,以修改网络的权值和阈值。多次迭代训练,使得 BP 神经网路的预测输出不断逼近期望值,从而建立输入输出的非线性模型。BP 神经网络模型可以采用 3 层网络结构,将 JY61 型六轴姿态角度传感器的 X 轴加速度 X_{acc}、Y 轴加速度 Y_{acc}、Z 轴加速度 Z_{acc}、Z 轴角速度 w 和 RTK-GPS 速度信息 v 的乘积 wv 作为网络的输入变量,由 Kolmogorov 公式计算得出隐含层神经元的个数为 9,侧向加速度在 X、Y、Z 轴的分量 X_{noise}、Y_{nosie}、Z_{noise}作为 BP 神经网络的输出。

在构建的 BP 神经网络中,隐含层传递函数为正切 S 型 tansig 函数,输出层传递函数为线性 purelin 函数。权值学习训练函数为 trainlm 函数,此函数采用 Levenberg-Marquardt 算法[18],可以使得权值快速收敛,达到网络训练目标的要求。

2.1.2　权值与阈值优化

因为 BP 神经网络权值和阈值的随机初始化导致网络的泛化能力不强,容易陷入局部最优解,所以采用遗传算法优化网络的初始权值和阈值以提高神

经网络的训练效果[19]。遗传算法优化 BP 神经网络的权值和阈值流程图如图 2 所示。

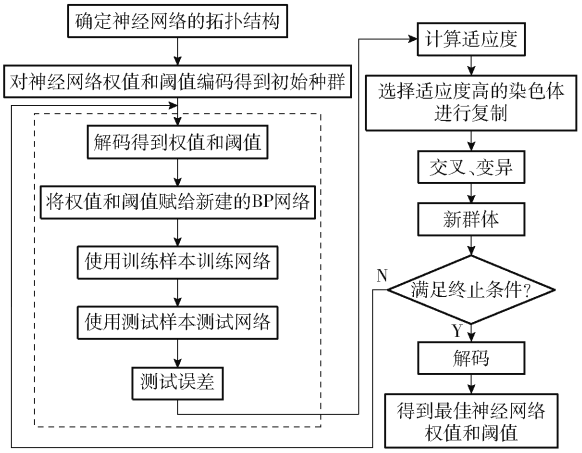


图 2 遗传算法优化神经网络的权值和阈值流程图

Fig. 2 Genetic algorithm optimization of weight and threshold flow chart of neural network

2.1.3 Matlab 仿真训练

由于无法从传感器上得到 BP 神经网络的训练数据,需要用理论数据样本对神经网络进行训练。依据拖拉机在田间的工作情况大致可以确定拖拉机速度、角速度、俯仰角、侧倾角以及 Z 轴加速度的取值范围,并以表 1 中拖拉机角速度和速度乘积作为拖拉机的侧向加速度 L_{acc}。已知侧倾角、俯仰角、Z 轴加速度即可求出 X 轴加速度 X_{acc} 和 Y 轴加速度 Y_{acc},将拖拉机侧向加速度 L_{acc} 根据勾股定理分解在 X、Y、Z 轴上,从而得到 BP 神经网络所需的输入 X_{input}、Y_{input}、Z_{input} 和输出 X_{noise}、Y_{noise}、Z_{noise}。根据表 1 中拖拉机参数的取值范围编写了 BP 神经网络样本生成软件,该软件以合适的间隔对这些特征信息的范围进行细化,遍历所有可能的组合,用理论值对神经网络进行训练。表 2 为生成 BP 神经网络的部分训练样本数据。X_{noise} 为侧向加速度在 X 轴的分量,Y_{noise} 为侧向加速度在 Y 轴的分量,Z_{noise} 为侧向加速度在 Z 轴的分量。从而可得:X_{input}、Y_{input}、Z_{input}、L_{acc} 为 BP 神经网络的输入特征,X_{noise}、Y_{noise}、Z_{noise} 为 BP 神经网络的输出。

表 1 拖拉机参数的取值范围

Tab. 1 Value range of various tractor parameters

参数	起始值	终止值
拖拉机速度/(m·s^{-1})	0.833	3.330
拖拉机角速度/(rad·s^{-1})	0.30	1.57
俯仰角/rad	0	1.047
侧倾角/rad	0	1.047
Z 轴加速度/(m·s^{-2})	4.9	29.4

表 2 BP 神经网络样本数据

Tab. 2 BP neural network sample data

m/s^2

X_{acc}	X_{noise}	X_{input}	Y_{acc}	Y_{noise}	Y_{input}	Z_{acc}	Z_{noise}	Z_{input}	L_{acc}
0.084	0.002	0.086	0.176	0.140	0.316	1.400	0.185	1.585	0.232
0.072	0.002	0.074	0.132	0.048	0.180	0.800	0.180	0.980	0.186
0.128	0.002	0.130	0.148	0.094	0.242	1.600	0.160	1.760	0.186
0.128	0.002	0.130	0.052	0.002	0.054	1.200	0.140	1.340	0.140
0.084	0.002	0.086	0.144	0.094	0.238	1.600	0.160	1.760	0.186
0.128	0.048	0.176	0.068	0.002	0.070	1.200	0.180	1.380	0.186
0.104	0.002	0.106	0.132	0.048	0.180	1.400	0.005	1.405	0.048
0.144	0.094	0.238	0.016	0.002	0.018	0.600	0.005	0.605	0.094
0.048	0.002	0.050	0.120	0.048	0.168	1.400	0.180	1.580	0.186
0.084	0.048	0.132	0.108	0.002	0.110	1.800	0.005	1.805	0.048

根据设置的取值范围生成满足条件的 80 500 组数据样本,其中 200 组作为测试样本,剩余的数据作为训练样本。为了使得神经网络快速收敛、训练时间短且激活函数的区分度明显,要对输入的样本数据进行归一化处理[20]。归一化公式为

$$S = \frac{I_i - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \tag{1}$$

式中 S——样本归一化值

I_i——样本数据

I_{max}——样本数据最大值

I_{min}——样本数据最小值

经过多次仿真试验,设学习率 L_r 为 0.3,网络精度为 0.000 01[21],迭代次数为 2 000 次时,网络训练较好。

遗传算法对于 BP 神经网络有很好的优化效果,在优化过程中需要对算法的一些参数进行设置。种群规模表示初始解集的大小,太少容易丢失种群多样性,导致无法寻找到最优解;太多则会增加计算量。种群规模设置为 50;染色体编码采用浮点编码形式;选择函数为 normGeomSelect,传递选择参数为 0.09;交叉函数为 arithXover,传递交叉参数为 2;变异函数为 nonUnifMutation,传递变异参数为[2,100,3];迭代次数为 100 次[22]。

依据搭建的 GA - BP 神经网络模型在 Matlab 2018 工作环境下进行 BP 神经网络的训练。真实值与神经网络预测值对比如图 3 所示;侧向加速度在各个轴分量真实值与神经网络预测值误差如图 4 所示。

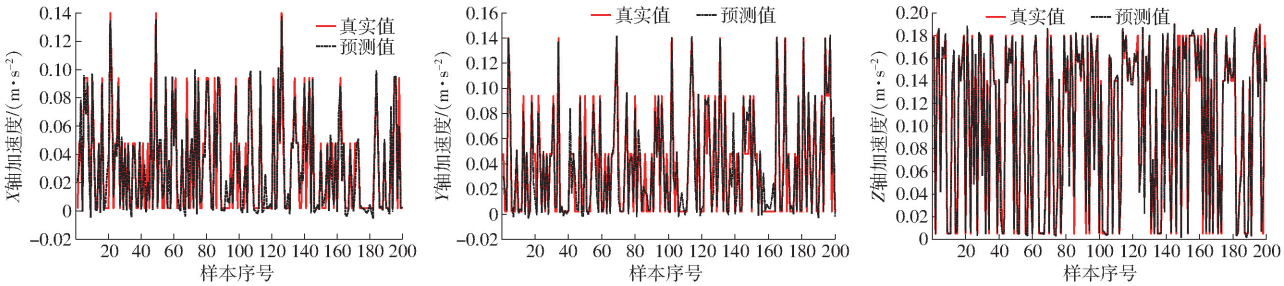


图 3　真实值与神经网络预测值对比

Fig. 3　Comparison between true value and predicted value of neural network

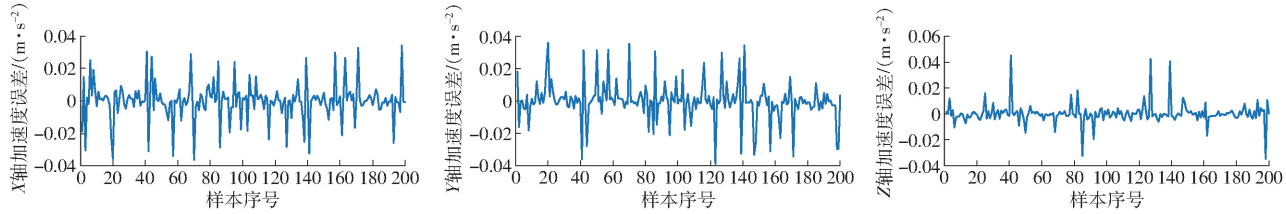


图 4　侧向加速度在各个轴分量真实值与神经网络预测值误差

Fig. 4　Error between true value of lateral acceleration component on each axis and predicted value of neural network

由图 3 可知，虽在一些样本点处拟合的效果不理想，但整体预测值拟合结果较好，这也验证了所构建的 GA－BP 神经网络具有较好的预测效果。

从图 4 可以看到，侧向加速度在 X、Y、Z 轴分量的真实值和预测值误差在 ± 0.04 m/s^2 的范围内波动，主要集中在 ± 0.02 m/s^2 的区间范围内。

2.2　卡尔曼滤波器设计

拖拉机姿态解算中的卡尔曼滤波是建立姿态角的状态方程和观测方程，然后通过预测更新过程得到较准确的姿态角[23－24]。将陀螺仪积分得到的姿态角 A 和陀螺仪偏差 B 作为卡尔曼滤波状态方程的状态量，加速度计得到的姿态角 A_{acc} 作为观测值。该组合导航系统的状态方程和观测方程为

$$\begin{bmatrix}\dot{A}\\ \dot{B}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & -1\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}A\\ B\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\ 0\end{bmatrix}w_{\mathrm{gyro}}+\begin{bmatrix}w_g\\ 0\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$A_{\mathrm{acc}}=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}A\\ B\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}v_{\mathrm{acc}}\\ 0\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中　w_{gyro}——陀螺仪角速度输出

w_g——陀螺仪噪声

v_{acc}——加速度计的测量噪声

设 w_g 与 v_{acc} 相互独立且为满足正态分布的白噪声。令系统的采样时间为 dt，则离散系统的状态方程和观测方程为

$$\begin{bmatrix}\theta\\ \varphi\\ w_{Xb}\\ w_{Yb}\end{bmatrix}_k=\begin{bmatrix}1 & 0 & -\mathrm{d}t & 0\\ 0 & 1 & 0 & -\mathrm{d}t\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}_k\begin{bmatrix}\theta\\ \varphi\\ w_{Xb}\\ w_{Yb}\end{bmatrix}_{k-1}+\begin{bmatrix}\mathrm{d}t & 0 & 0 & 0\\ 0 & \mathrm{d}t & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}_k\begin{bmatrix}w_X\\ w_Y\\ 0\\ 0\end{bmatrix}_k+N(0,\boldsymbol{Q}_k) \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix}\theta_{\mathrm{acc}}\\ \varphi_{\mathrm{acc}}\\ 0\\ 0\end{bmatrix}_k=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}_k\begin{bmatrix}\theta\\ \varphi\\ 0\\ 0\end{bmatrix}_k+N(0,\boldsymbol{R}_k) \tag{5}$$

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}q_\theta & 0 & 0 & 0\\ 0 & q_\varphi & 0 & 0\\ 0 & 0 & q_{bX} & 0\\ 0 & 0 & 0 & q_{bY}\end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}r_\theta & 0 & 0 & 0\\ 0 & r_\varphi & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \tag{7}$$

式中　θ、φ——陀螺仪得到的俯仰角、侧倾角

w_{Xb}——X 轴角速度偏差

w_{Yb}——Y 轴角速度偏差

w_X、w_Y——陀螺仪 X、Y 轴的噪声

$N(0,\boldsymbol{R}_k)$——加速度计噪声的正态分布特征

θ_{acc}、φ_{acc}——加速度计得到的仰俯角、侧倾角

k——离散系统时间，下标表示时刻

$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$——过程噪声和观测噪声的协方差矩阵

q_θ、q_φ——陀螺仪积分得到俯仰角和侧倾角的噪声协方差

q_{bX}、q_{bY}——陀螺仪 X、Y 轴偏差噪声的协方差

r_θ、r_φ——加速度计得到的俯仰角和侧倾角噪声协方差

$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$ 表示卡尔曼滤波器对其传感器得到数据的信任程度,值越小,表明信任程度越高。通过对采集到的大量试验数据进行分析,可得:q_θ 为 0.002、q_φ 为 0.005、q_{bX} 为 0.01、q_{bY} 为 0.01、r_θ 为 3、r_φ 为 3,代入即可得到 $\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{R}$。卡尔曼滤波整个工作过程分为时间更新和观测更新。时间更新即根据前一时刻的状态估计值推算当前时刻的状态变量先验估计值和误差协方差先验估计值;观测更新负责将先验估计和新的测量值结合起来构造改进的后验估计,以次递归找到最优结果。

3 试验准备及误差分析

3.1 坐标系建立

选用高斯平面坐标系,y 轴指向坐标东为正,x 轴指向坐标北为正。车体坐标系为右手坐标系,X' 轴指向车辆前进的方向,Y' 轴垂直于车辆前进方向且指向驾驶员右侧,Z' 轴为通过汽车质心指向上方。由于 GPS 的定位信息所使用的坐标系为 WGS84 大地坐标系统,所以需要对 WGS84 大地坐标系进行高斯投影正解计算,得到相对应的高斯平面坐标[25-27]。坐标系示意图如图 5 所示。

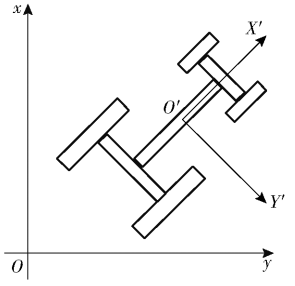


图 5 坐标系示意图

Fig. 5 Schematic of coordinate system

3.2 拖拉机导航参数

将车体前进方向与真北方向的夹角定义为拖拉机的航向角 ψ,规定正方向为顺时针方向。将 X' 轴与水平面之间的夹角定义为拖拉机的俯仰角 θ,规定拖拉机前轮下倾为正,上倾为负。将车体 Y' 轴与水平面之间的夹角定义为拖拉机的侧倾角 φ,规定沿车体前进方向右倾为正,左倾为负。拖拉机的导航参数如图 6 所示。

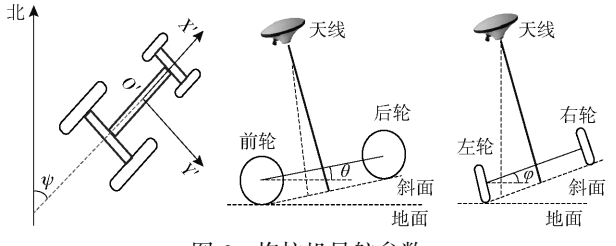


图 6 拖拉机导航参数

Fig. 6 Tractor navigation parameters

3.3 RTK-GPS 和 IMU 安装

试验选用的拖拉机为东方红 MK904 型轮式拖拉机,安装设备主要包括 GPS 双天线、移动站接收机、移动站无线数传电台、IMU,GPS 天线安装在拖拉机顶部中心横轴线上,两边各一个,距离地面约 2 580 mm。移动站无线数传电台安装在拖拉机前盖上,移动站接收机放在驾驶室内。基站 GPS 天线、接收机、无线数传电台放在田间试验场,RTK-GPS 设备全程采用移动电源供电。IMU 选用 JY61 型六轴姿态角度传感器,输出 3 轴加速度信息、3 轴角速度信息和拖拉机姿态信息,安装在拖拉机的质心位置,X 轴与 X' 轴重合、Y 轴与 Y' 轴重合、垂直于模块向外为 Z 轴。本次试验需要使用编写的上位机数据采集软件将原始的 RTK-GPS 和 IMU 的定位信息进行保存,用于后续在 Matlab 中使用已经训练的 GA-BP 神经网络进行处理以及对 GA-BP 神经网络卡尔曼滤波算法的验证。GPS 和 IMU 安装位置图如图 7 所示。



图 7 RTK-GPS 和 IMU 安装位置图

Fig. 7 RTK-GPS and IMU installation diagram

1. 电台天线 2. 移动站无线数传电台 3. 计算机 4. 移动站接收机 5. JY61 型六轴姿态角度传感器 6. GPS 天线

3.4 上位机数据采集软件

上位机数据采集软件是基于 Visual Studio 开发软件使用 C#语言开发。上位机数据采集软件同时对多传感器的信息进行采集并同步传感器数据,用于后续的算法验证和处理。上位机数据采集软件主要有两大功能:①对传感器信息的显示,这也更加直观地了解到传感器当前的状态信息。②对传感器的信息进行保存,方便后续的算法处理。上位机数据采集软件界面如图 8 所示。从图 8 可以看到,姿态传感器 3 轴加速度、3 轴角速度、绕 3 轴转动的角度、UTC 时间、定位方式、定位信息、速度信息以及航向信息,还能通过曲线实时看到数据的动态变化,从而判断采集到的数据是否正确。

3.5 GPS 误差分析

由于田间情况复杂、地面起伏不定、土质硬度不均,拖拉机在田间耕作或连续转弯期间,车身极易受到这些因素影响而发生倾斜,从而导致 GPS 接收天线发生倾斜,产生定位误差。为了提高拖拉机自主

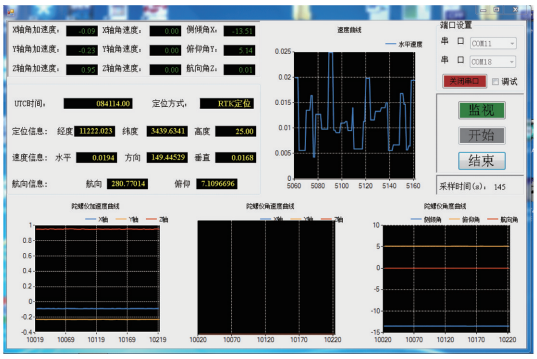


图 8　上位机数据采集软件界面

Fig. 8　PC data acquisition software

耕作的导航精度，实现精细作业，必须要对车体倾斜误差进行修正，从而得到较准确的 GPS 定位信息。当车体发生倾斜时，其在车体坐标系上 X'、Y'轴在水平面上投影的偏差为

$$e'_x = H\sin\theta \tag{8}$$

$$e'_y = H\sin\varphi \tag{9}$$

式中　H——GPS 天线距离水平地面的高度

由于 e'_x、e'_y 是居于车体坐标系下 X'、Y'轴水平面上投影的偏差，而定位所采用的坐标系是高斯平面坐标系，因此需要进行坐标变换，将车体坐标系下的坐标转换到高斯平面坐标系下的坐标[24-27]。设在高斯平面下坐标为(e_x, e_y)，其对应的车体坐标系下的坐标为(e'_x, e'_y)，它们的转换关系为

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi \\ -\sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e'_x \\ e'_y \end{bmatrix} \tag{10}$$

其中，航向角由 RTK－GPS 双天线测得，具有很高的精度。得到了高斯平面坐标系下的偏差，就可以用此偏差修正原始的 RTK－GPS 定位信息，从而提高导航精度。

4　田间试验

为了验证所设计的基于 GA－BP 神经网络卡尔曼滤波算法的有效性，利用搭建的组合导航系统试验平台，在洛阳孟津一拖产品试验基地选取一块未被耕种的试验田进行试验。主要包括拖拉机的直线行驶试验和拖拉机连续转弯试验。在拖拉机直线行驶试验中对拖拉机进行了 4 次的数据采集，在拖拉机连续转弯试验中对拖拉机进行了 2 次数据的采集。将 GA－BP 神经网络卡尔曼滤波算法的组合导航方案对拖拉机的位置信息进行实时估计，同时，记录 RTK－GPS 和 IMU 的原始定位信息。RTK－GPS 具有双天线，且横向安装只能得到拖拉机的侧倾角，其动态精度为 0.08°。由于 RTK－GPS 侧倾角的更新频率为 1 Hz，将 RTK－GPS 测得的侧倾角进行插值处理后作为参考角度来验证算法的效果。图 9 为拖拉机直线行驶过程中侧倾角在不同算法下的对比。从图 9 可以得到，在拖拉机直线行驶情况下，GA－BP 卡尔曼和卡尔曼 2 种算法获得的侧倾角基本跟随 GPS 参考角度变换，且 GA－BP 卡尔曼和卡尔曼 2 种算法得到的侧倾角曲线变化趋势大致相同。图 10 为拖拉机直线行驶过程中不同算法下的侧倾角与 GPS 参考角度的误差图。从图 10 可以得到，GA－BP 卡尔曼算法得到的侧倾角与 GPS 参考角度的最大误差为 0.07 rad，最小值为 －0.04 rad，大部分误差的范围为 －0.01 ~0.04 rad；卡尔曼算法得到的侧倾角与 GPS 参考角度的最大误差为 0.09 rad，最小误差为 －0.05 rad，大部分误差的范围为 －0.02 ~0.05 rad。由于 GA－BP 神经网络已经训练完毕且数据处理设备为计算机 CPU，所以 GA－BP 卡尔曼算法和传统卡尔曼算法的响应时间差距为纳秒级，可忽略不计，拖拉机转弯行驶也如此。由此可得，拖拉机在直线行驶情况下，GA－BP 卡尔曼算法获得的侧倾角比卡尔曼得到的侧倾角精度提高了 0.01 rad。

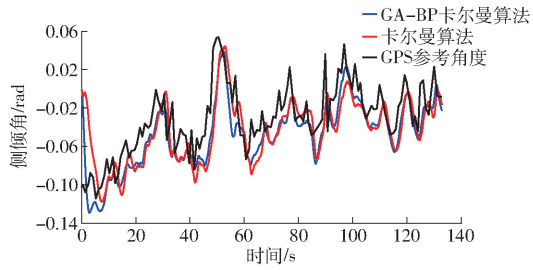


图 9　拖拉机直线行驶过程中在不同算法下侧倾角对比

Fig. 9　Angle comparison chart of tractor's roll angle by different algorithms during straight driving

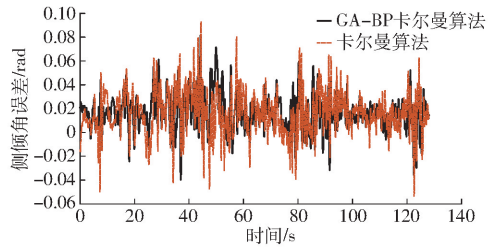


图 10　拖拉机直线行驶过程中不同算法下的侧倾角与 GPS 参考角度的误差曲线

Fig. 10　Error graph of roll angle and GPS reference angle by different algorithms during tractor straight driving

图 11 为拖拉机连续转弯过程中侧倾角在不同算法下的对比。从图 11 可以得到，在拖拉机连续转弯过程中，2 种算法获得的侧倾角的动态变换趋势同 GPS 参考角度一致，但卡尔曼算法得到的侧倾角的变换幅度相对于 GA－BP 卡尔曼算法变化幅度较剧烈。图 12 为拖拉机连续转弯过程中不同算法下的侧倾角与 GPS 参考角的误差。从图 12 可得，

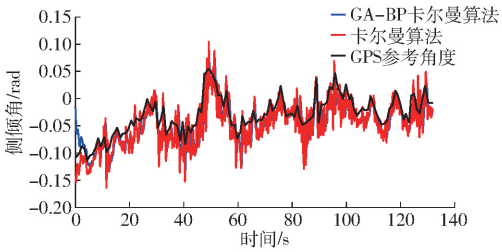


图 11 拖拉机连续转弯过程中在不同算法下侧倾角对比

Fig. 11 Comparison of roll angle of tractor during continuous turning by different algorithms

GA -BP 卡尔曼算法得到的侧倾角与 GPS 参考角度的最大误差为 0.08 rad,最小值为 -0.04 rad,大部分误差的范围为 -0.02 ~0.04 rad;卡尔曼算法得到的侧倾角与 GPS 参考角度的最大误差为0.11 rad,最小误差为 -0.06 rad,大部分误差的范围为 -0.04 ~0.08 rad。由此可得,拖拉机在连续转弯过程中,GA -BP 卡尔曼算法获得的侧倾角比卡尔曼得到的侧倾角在左倾时精度提高了 0.02 rad,右倾时精度提高了 0.04 rad。即在转弯过程中 GA -BP 卡尔曼算法比卡尔曼算法得到的侧倾角具有更好的精度。

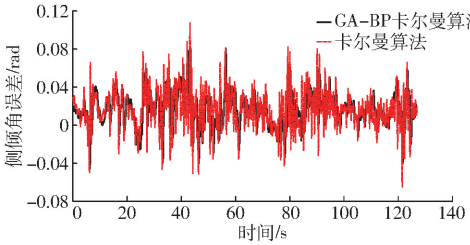
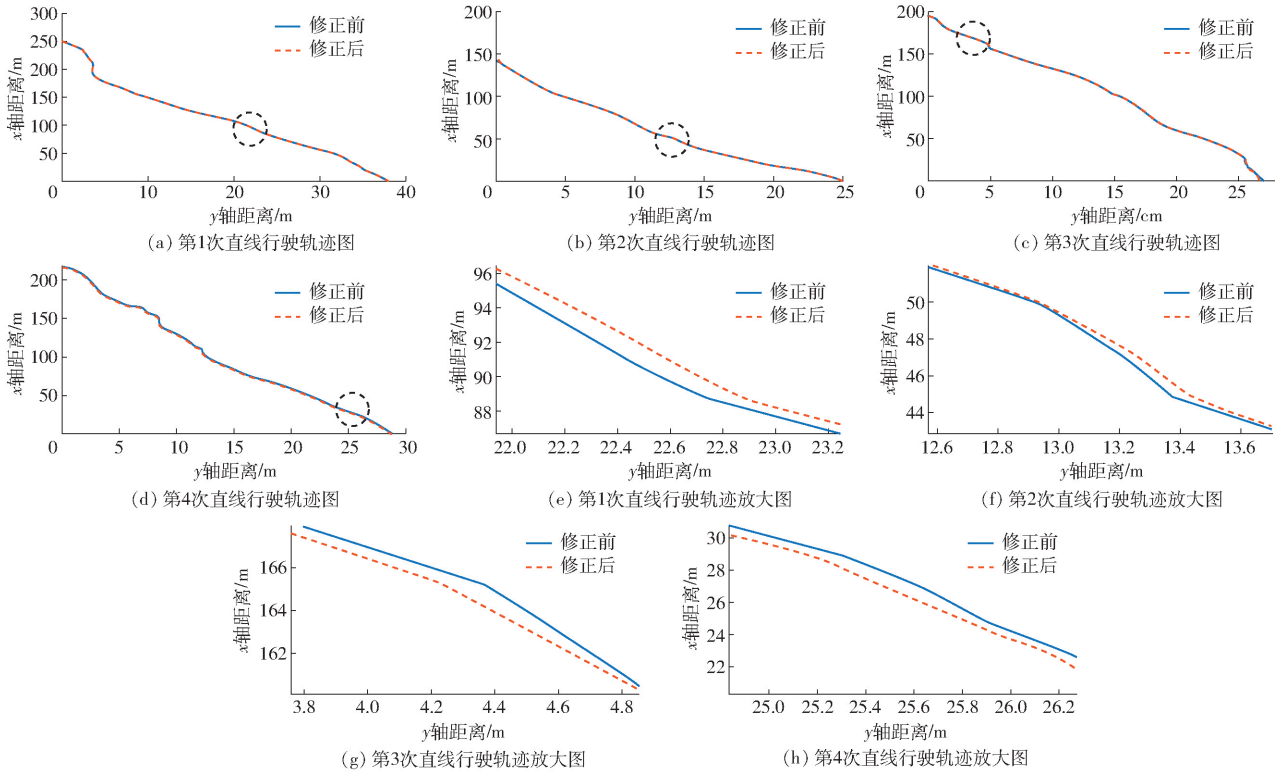


图 12 拖拉机连续转弯过程中不同算法下的侧倾角与 GPS 参考角度的误差曲线

Fig. 12 Error graph of roll angle and GPS reference angle by different algorithms during tractor continuous turning

将原始的 RTK - GPS 定位信息和经过误差修正之后的定位信息进行比较从而验证误差修正的效果。由于试验环境限制且拖拉机连续转弯行驶无法精确规划路径,所以没有以规划的直线路径和转弯路径作为参考,进而通过分析定位信息的数字特征来间接验证修正效果。图 13 为拖拉机直线行驶轨迹及局部放大图。图 14 为拖拉机连续转弯行驶轨迹及局部放大图。图中所示都为高斯平面相对坐标,x 轴对应坐标北向,y 轴对应东向。在图 13a、13b、13c、13d、14a、14b 中圆圈对应的放大图 13e、13f、13g、13h、14c、14d 中可以看到,拖拉机实际轨迹会出现曲折的波动,这些波动主要是由于田间地面起伏不定、土质硬度不均导致的车身倾斜而造成的定位偏差。经过 GA - BP 神经网络卡尔曼滤波算法及误差修正后的拖拉机行驶轨迹相对于原始拖拉机轨迹整体更加平稳。表 3 为拖拉机在直线和转弯行驶过程中定位信息的协方差和相关系数。从表 3 可以得到,只有第 1 次转弯的定位信息为正相关,其余情况都为负相



(a) 第1次直线行驶轨迹图 (b) 第2次直线行驶轨迹图 (c) 第3次直线行驶轨迹图

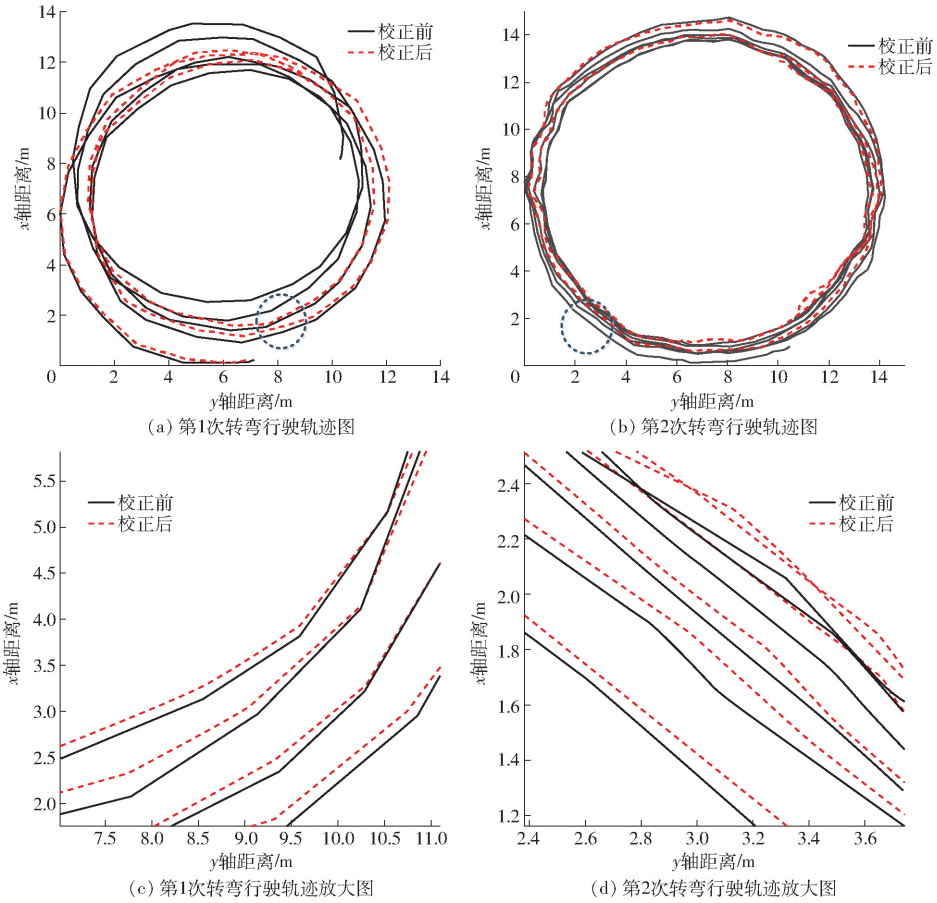
(d) 第4次直线行驶轨迹图 (e) 第1次直线行驶轨迹放大图 (f) 第2次直线行驶轨迹放大图

(g) 第3次直线行驶轨迹放大图 (h) 第4次直线行驶轨迹放大图

图 13 拖拉机直线行驶轨迹及局部放大图

Fig. 13 Straight track of tractor and partial enlarged view

关。从其对应的协方差和相关系数的原始和修正值可以得到修正后的定位信息协方差和相关系数比原始定位信息都有明显减小。即修正后的定位信息比起原始信息幅值变化小、集中且平稳。根据图 13、14 和表 3 可得 GA－BP 卡尔曼算法及误差分析在一定程度上修正了车身姿态倾斜引起的定位误差，使拖拉机在复杂的地形或连续转弯情况下都有较好的定位精度。



(a) 第1次转弯行驶轨迹图　(b) 第2次转弯行驶轨迹图

(c) 第1次转弯行驶轨迹放大图　(d) 第2次转弯行驶轨迹放大图

图 14　拖拉机连续转弯行驶轨迹及局部放大图

Fig. 14　Continuous turning track of tractor and partial enlarged view

表 3　拖拉机在直线和转弯过程中定位信息的协方差和相关系数

Tab. 3　Covariance and correlation coefficient of tractor positioning information during straight and turning

参数		第 1 次直线行驶	第 2 次直线行驶	第 3 次直线行驶	第 4 次直线行驶	第 1 次转弯行驶	第 2 次转弯行驶
协方差/cm	原始	－9 287 967	－3 842 142	－5 164 936	－5 991 786	7 722	－10 323
	修正	－9 278 029	－3 836 685	－5 147 534	－5 974 465	6 580	－9 782
相关系数	原始	－0. 984 6	－0. 987 2	－0. 994 8	－0. 992 7	0. 050 6	－0. 046 6
	修正	－0. 984 5	－0. 986 8	－0. 994 2	－0. 992 8	0. 042 1	－0. 043 3

5　结论

(1)针对拖拉机在田间作业时因车身倾斜导致的定位误差问题，结合卡尔曼算法和 BP 神经网络算法的优点，设计了一种基于 GA－BP 神经网络算法的多传感器信息融合导航定位系统。

(2)基于设计的信息融合导航定位系统，实现多传感器信息融合导航定位，包括 GA－BP 神经网络卡尔曼滤波器的设计及误差分析。

(3)利用搭建的组合导航系统试验平台对定位修正进行验证，结果表明：以 GA－BP 神经网络卡尔曼滤波算法为核心的 RTK－GPS/IMU 组合导航系统能在一定程度上修正因田间地面起伏不定、土质硬度不均、连续转弯而导致的 GPS 定位误差，使拖拉机行驶轨迹更加平稳。

参　考　文　献

[1]　王檀彬，陈无畏，焦俊，等. 多传感器融合的智能车辆导航研究[J]. 中国机械工程，2009，20(11)：1381－1385.

WANG Tanbin, CHEN Wuwei, JIAO Jun, et al. Research on intelligent vehicle navigation based on multi-sensor fusion [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(11): 1381 - 1385. (in Chinese)

[2] YE Meisong, XIAO Shide, ZHANG Zhifeng, et al. Autonomous navigation of intelligent electric vehicle of multi-sensor data fusion[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(9): 84 - 87.

[3] 朱忠祥, 韩科立, 宋正河, 等. 基于置信度加权的拖拉机组合导航融合定位方法[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 210 - 215.
ZHU Zhongxiang, HAN Keli, SONG Zhenghe, et al. Tractor integrated navigation fusion positioning method based on confidence weighting [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 210 - 215. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2013S138&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.038. (in Chinese)

[4] 李军, 马蓉. 基于多传感器融合的拖拉机自动导航技术[J]. 农机化研究, 2011, 33(12): 237 - 240.
LI Jun, MA Rong. Tractor automatic navigation technology based on multi-sensor fusion [J]. Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(12): 237 - 240. (in Chinese)

[5] 黎永键, 赵祚喜, 黄培奎, 等. 基于 DGPS 与双闭环控制的拖拉机自动导航系统[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 11 - 19.
LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Automatic tractor navigation systembased on DGPS and double closed loop control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 11 - 19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170202&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.002. (in Chinese)

[6] 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红 X - 804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139 - 145.
LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, ZHAO Zuoxi, et al. DGPS automatic navigation control system of Dongfanghong X - 804 tractor [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139 - 145. (in Chinese)

[7] 周建军, 郑文刚, 李素, 等. 基于 ISO 11783 的拖拉机导航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 190 - 194.
ZHOU Jianjun, ZHENG Wen'gang, LI Su, et al. Design and experiment of tractor navigation control system based on ISO 11783 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 190 - 194. (in Chinese)

[8] 纪朝凤, 刘刚, 周建军, 等. 基于 CAN 总线的农业车辆自动导航控制系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 28 - 32.
JI Chaofeng, LIU Gang, ZHOU Jianjun, et al. Agricultural vehicle automatic navigation control system based on CAN bus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 28 - 32. (in Chinese)

[9] 杜海龙, 张荣辉, 刘平, 等. 捷联惯导系统姿态解算模块的实现[J]. 光学精密工程, 2008(10): 1956 - 1962.
DU Hailong, ZHANG Ronghui, LIU Ping, et al. Implementation of strapdown inertial navigation system attitude resolution module [J]. Optical Precision Engineering, 2008(10): 1956 - 1962. (in Chinese)

[10] 邢普, 周丽娟, 尹修杰. 基于 RTK - GPS 双天线拖拉机的测姿算法[J]. 信息技术, 2015(7): 84 - 87.
XING Pu, ZHOU Lijuan, YIN Xiujie. Attitude measurement algorithm based on RTK - GPS dual-antenna tractor [J]. Information Technology, 2015(7): 84 - 87. (in Chinese)

[11] 张欣, 白越, 赵常均, 等. 多旋翼姿态解算中的改进自适应扩展 Kalman 算法[J]. 光学精密工程, 2014(12): 238 - 244.
ZHANG Xin, BAI Yue, ZHAO Changjun, et al. Improved adaptive extended Kalman algorithm in multi-rotor attitude solution [J]. Optics and Precision Engineering, 2014(12): 238 - 244. (in Chinese)

[12] SUN H, SLANGHTER D C, PEREZ R, et al. RTK GPS mapping of transplanted row crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(1): 32 - 37.

[13] 张承岫, 李铁鹰, 王耀力. 基于 MPU6050 和互补滤波的四旋翼飞控系统设计[J]. 传感技术学报, 2016, 29(7): 1011 - 1015.
ZHANG Chengxiu, LI Tieying, WANG Yaoli. Design of quad-rotor aircraft fight control system based on MPU6050 and adaptive complementary filter[J]. Journal of Sensing Technology, 2016, 29(7): 1011 - 1015. (in Chinese)

[14] LEEMANS V, DESTAIN M F. Line cluster detection using a variant of the Hough transform for culture row localisation[J]. Image & Vision Computing, 2006, 24(5): 541 - 550.

[15] 李松, 刘力军, 解永乐. 遗传算法优化 BP 神经网络的短时交通流混沌预测[J]. 控制与决策, 2011, 26(10): 1581 - 1585.
LI Song, LIU Lijun, XIE Yongle. Chaos prediction of short-term traffic flow using genetic algorithm to optimize BP neural network [J]. Control and Decision, 2011, 26(10): 1581 - 1585. (in Chinese)

[16] WEN Jinwei. The improvements of BP neural network learning algorithm[C]// Processing Society. Proceedings of 2000 5th International Conference on Signal Processing (Volume Ⅲ of Ⅲ). The Chinese Institute of Electronics (CIE), Signal Processing Society: IEEE Beijing Section, 2000: 263 - 265.

[17] DING Shifei, SU Chunyang, YU Junzhao. An optimizing BP neural network algorithm based on genetic algorithm [J]. Artificial Intelligence Review, 2011, 36(2): 153 - 162.

[18] 李仲, 刘明地, 吉守祥. 基于枸杞红外光谱人工神经网络的产地鉴别[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(3): 720 - 723.
LI Zhong, LIU Mingdi, JI Shouxiang. Origin identification of artificial neural network based on infrared spectrum of wolfberry [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(3): 720 - 723. (in Chinese)

(下转第 399 页)

[16] CHEN C, ZOU L, LIAO W H. Regenerative magnetorheological dampers for vehicle suspensions[C]// Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2015. International Society for Optics and Photonics, 2015, 9435: 94353K.

[17] LI Z, ZUO L, KUANG J. Energy-harvesting shock absorber with a mechanical motion rectifier[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(2): 025008.

[18] YU M, PENG Y, WANG S, et al. A new energy-harvesting device system for wireless sensors, adaptable to on-site monitoring of MR damper motion[J]. Smart Materials & Structures, 2014, 23(7): 07700.

[19] BAI X, ZHONG W M, ZOU Q, et al. Principle, design and validation of a power-generated magnetorheological energy absorber with velocity self-sensing capability[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(7): 256 - 268.

[20] BOGDAN S, MACIEJ R, MARCIN W. Evaluation of an energy harvesting MR, damper-based vibration reduction system[J]. Journal of Theoretical & Applied Mechanics, 2015, 311(2): 758 - 769.

[21] 胡国良, 刘丰硕, 卢昀. 功能集成型磁流变阻尼器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 384 - 390.
HU Guoliang, LIU Fengshuo, LU Yun. Design and experiment of multi-functional magnetorheological damper[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 384 - 390. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20161152&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.052. (in Chinese)

[22] HU Guoliang, LU Yun, SUN Shuaishuai, et al. Performance analysis of a magnetorheological damper with energy harvesting ability[J]. Shock and Vibration, 2016:2959763.

[23] HU Guoliang, LU Yun, SUN Shuaishuai, et al. Development of a self-sensing magnetorheological damper with magnets in-line coil mechanism[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 255(5): 71 - 78.

(上接第 390 页)

[19] MAULIK U, BANDYOPADHYAY S. Geneticalgorithm-based clustering technique[J]. Pattern Recognition, 2000, 33(9): 1455 - 1465.

[20] 蒋波. 基于主成分分析和归一化 RBF 神经网络优化的财务综合评价[J]. 系统工程, 2009, 27(9): 87 - 90.
JIANG Bo. Comprehensive financial evaluation based on principal component analysis and normalized RBF neural network optimization [J]. Systems Engineering, 2009, 27(9): 87 - 90. (in Chinese)

[21] 王桂娟, 徐红东, 王佐勋, 等. 基于 MATLAB 仿真的神经网络控制器的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(3): 742 - 745.
WANG Guijuan, XU Hongdong, WANG Zuoxun, et al. Design and implementation of neural network controller based on MATLAB simulation [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(3): 742 - 745. (in Chinese)

[22] 王彪, 沈春林. 利用遗传算法进行稠密视差图估计[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(2): 184 - 191.
WANG Biao, SHEN Chunlin. Dense disparity map estimation using genetic algorithms[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 35(2): 184 - 191. (in Chinese)

[23] 张栋, 焦嵩鸣, 刘延泉. 互补滤波和卡尔曼滤波的融合姿态解算方法[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(3): 62 - 65, 69.
ZHANG Dong, JIAO Songming, LIU Yanquan. A fusion attitude solution method based on complementary filtering and Kalman filtering [J]. Sensors and Microsystems, 2017, 36(3): 62 - 65, 69. (in Chinese)

[24] RAO B S, DURRANT-WHYTE H F. Fully decentralised algorithm for multisensor Kalman filtering[J]. IEE Proceedings. Part D, 1991, 138(5): 413 - 420.

[25] 成英燕, 李夕银. 适用于不同椭球的高斯平面坐标正反算的实用算法[J]. 测绘科学, 2004, 29(4): 26 - 27, 84.
CHENG Yingyan, LI Xiyin. Practical algorithm for forward and inverse calculation of Gaussian plane coordinates of different ellipsoids [J]. Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(4): 26 - 27, 84. (in Chinese)

[26] HU Wusheng, SHA Yuejin. A new method for transforming GPS elevation based on neural network[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2003(1): 53 - 57.

[27] 王解先, 王军, 陆彩萍. WGS - 84 与北京 54 坐标的转换问题[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(3): 70 - 73.
WANG Jiexian, WANG Jun, LU Caiping. The conversion problem between WGS - 84 and Beijing 54 coordinates [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003, 23(3): 70 - 73. (in Chinese)