

基于 VNS-GA 的 PID 和互补滤波控制的 自平衡车姿态解算

汪红,田莎莎

(中南民族大学 计算机科学学院,武汉 430074)

摘 要 自平衡车的姿态主要靠传感器来感知,通过传感器感知的角速度和加速度数据自动调整自平衡车的姿态角,从而维持其平衡.采用三轴陀螺仪和三轴加速度计分别采集自平衡车的角速度和加速度,通过互补滤波方法,对 2 种传感器采集到的数据进行融合,降低噪声和误差;然后,采用本文提出的融合变邻域搜索的遗传算法(VNS-GA)对 PID 控制器的 3 个参数进行寻优,从而对互补滤波方法获得的角度进行自适应调整,最终得到较精确的姿态角.为了验证基于 VNS-GA 的 PID 控制方法的性能,分别使用基于 GA 的 PID 控制方法和基于 VNS-GA 的 PID 控制方法来解算自平衡车的姿态角.实验结果表明:基于 VNS-GA 的 PID 控制方法得到的姿态角更接近于真实值,性能更好.

关键词 互补滤波;变邻域搜索;自适应控制;姿态角

中图分类号 TP274.5 **文献标识码** A **文章编号** 1672-4321(2019)04-0590-06

DOI 10.12130/znmjzk.20190420

引用格式 汪红,田莎莎.基于 VNS-GA 的 PID 和互补滤波控制的自平衡车姿态解算[J].中南民族大学学报(自然科学版),2019,38(4):590-595.

WANG Hong, TIAN Shasha. Self-balancing vehicle attitude solution calculation controlled by the complementary filter and the PID based on VNS-GA [J]. Journal of South-Central University for Nationalities(Natural Science Edition), 2019, 38(4): 590-595.

Self-balancing vehicle attitude solution calculation controlled by the complementary filter and the PID based on VNS-GA

WANG Hong, TIAN Shasha

(College of Computer Science, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

Abstract The attitude of the self-balancing vehicle is mainly perceived by the sensor. The attitude angle of the self-balancing vehicle is automatically adjusted through the angular velocity and acceleration data perceived by the sensor to maintain its balance. In this paper, tri-axis gyroscope and tri-axis accelerometer are used to collect the angular velocity and acceleration of self-balancing vehicle respectively. Through the complementary filtering method, the data collected by the two sensors are used to reduce noise and error. And then, the GA based on variable neighborhood search (VNS-GA) proposed in this paper is used to optimize the three parameters of the PID controller, and then the angle obtained by the complementary filtering method is adaptive adjusted by the PID to obtain a more accurate attitude angle. In order to verify the performance of the PID control method based on VNS-GA, the PID control method based on GA and the PID control method based on VNS-GA are respectively used to calculate the attitude angle of the self-balancing vehicle. The experimental results show that the attitude angles obtained by PID control method based on VNS-GA is more closer to the real values and has better performance.

Keywords complementary filtering; variable neighborhood search; self-adaptive control; attitude angle

收稿日期 2019-07-01

作者简介 汪红(1968-),女,副教授,研究方向:计算机系统结构、智能机器人技术,E-mail: 469044752@qq.com

基金项目 湖北省自然科学基金资助项目(2018CFB380)

近年来,国内外学者针对自平衡车的方向控制系统进行了广泛而深入的研究,有了一定的技术积累,相关产品层出不穷。2001 年美国发明家 Dean Kaman 正式公开了 Segway 自平衡车的原型车,并声称它是人类史上第一辆能够自动平衡的运输工具,经过多年的研发和改进,现在 Segway 自平衡车已经有了多个系列和多种车型。2005 年丰田公司公开展示了 L-Swing 自平衡车,2008 年又推出了新型的自平衡车 WingLet。2008 年中国农业大学研制了 BDS-Basic 自平衡车,2009 年推出了其升级版。现在,自平衡车已经成为了人们的代步工具。

自平衡车的姿态一般是由陀螺仪、加速度计或磁传感器来获取,根据所测得的数据,通过方向控制系统对自平衡车的方向进行调整,从而保持其平衡。本文采用三轴陀螺仪和三轴加速度计作为测量元件,对自平衡车进行方向测量。在实际的测量过程中,噪声和误差随时间积累,测量结果会有较大的误差,从而影响自平衡车方向的控制。因此,如何滤除噪声和消除误差是自平衡车方向控制系统的一个重要研究方向。传统的滤除噪声和消除误差的方法是卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF),KF 要求系统为线性,噪声为高斯白噪声^[1-3],而自平衡车方向控制系统是一个典型的非线性系统,其系统噪声也无法抽象为白噪声。为了解决这个问题,Bucy 提出了扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)。文献[4]构建了 EKF 滤波器,并设计了自适应测量噪声协方差矩阵修正法,文献[5]和[6]也采用了 EKF 进行数据融合,但是 EKF 只能用于弱非线性系统,系统的非线性越强,姿态的估计误差就越大。而采用多传感器融合的互补滤波技术可以适用于非线性系统,并且在抑制噪声方面也具有更优的性能^[7]。

描述姿态常用的方法有:欧拉角法、四元数法和方向余弦法。配合互补滤波,欧拉角法和方向余弦法虽然可以满足姿态控制的要求,但是欧拉角法存在奇点,方向余弦法计算量太大^[8,9]。同样配合互补滤波,四元数法虽然运算量较小、精度较高,但是当噪声大时,滤波的效果不好^[10,11]。为了得到一个运算量小、精度高、滤波效果好的姿态控制系统,本文对基于智能算法的 PID 控制器进行了深入研究。文献[12]采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)优化 PID 参数,将开源飞控的性能提高到接近工业级水准,从而大幅节省了培训成本,降低了事故风险。虽然 GA 的通用性强、模型简单,但是算法容易陷入早熟收敛。为了改进 GA,文献[13]利用遗传算法对模

糊控制器中的比例量化因子和隶属度函数进行了优化,提高了控制器参数配置的合理性和系统控制的精度。文献[14]采用多点交叉和均匀交叉相结合的交叉算子,并逐步增大均匀交叉概率来抑制短子串偏差,使搜索趋于稳健;采用动态变异率的变异算子,以及种群替代和个体替代相结合的移民算子来克服全局收敛的盲目性。文献[15]引入了交叉变异选择操作和自适应的思想,通过改进蜂群算法对小型固定翼无人机姿态控制模型进行了参数优化,分别对无人机的俯仰、滚转和偏航姿态进行 PID 控制。文献[16]采用神经网络对船舶姿态变化特点进行高精度逼近,提高了船舶姿态预报精度,克服了当前其它船舶姿态预报模型误差大的弊端。

基于上述分析,本文将变邻域搜索(Variable Neighborhood Search, VNS)融合 GA,提出了融合变邻域搜索的遗传算法(Genetic Algorithm based on Variable Neighborhood Search, VNS-GA),对 PID 的 3 个参数进行寻优,采用三轴陀螺仪和三轴加速度计作为测量器件,采用互补滤波及 PID 控制进行自平衡车四元数姿态解算。

1 四元数姿态解算算法

三轴传感器和三轴加速度计测得的分别是自平衡车在 3 个维度上的角速度和加速度,不能直接测得其姿态角,因此需要利用所测得的数据进行姿态解算,从而控制自平衡车的方向。本文采用的是四元数姿态解算方法,该方法包含这样一个过程,即根据一个坐标系中 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的一个方向矢量或者几个方向矢量转换到另一个坐标系的过程。转换示意图如图 1 所示。

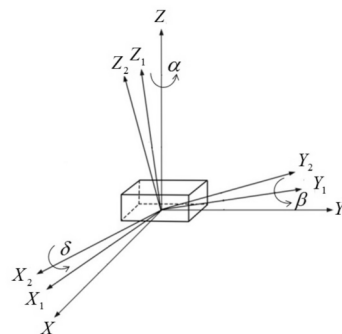


图 1 四元数坐标转换示意图

Fig.1 Diagram of quaternion coordinate transformation

系统可以在任意一个方向进行转动,假设系统原始状态为 $O-XYZ$ 坐标系,当系统沿 Z 轴进行转动

时,移动到新的坐标系 $O-X_1Y_1Z_1$,转动的角度为 α ;以新的坐标系为当前原始状态,当系统沿着 Y 轴进行转动时,移动到新的坐标系 $O-X_2Y_2Z_2$,转动的角度为 β ;以第二次的新坐标系为当前原始状态,当系统沿着 X 轴进行转动时,移动到新的坐标系 $O-X_3Y_3Z_3$,转动的角度为 δ .在系统变换的过程中 α 、 β 、 δ 分别为航向角、俯仰角和翻滚角.

四元数的主要处理步骤如图 2 所示.

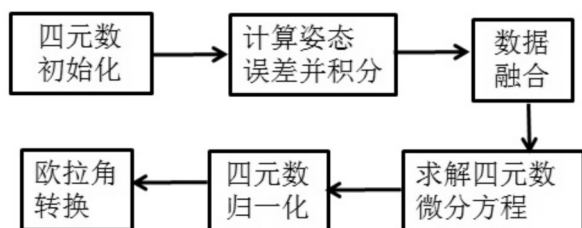


图 2 四元数处理过程

Fig.2 Quaternion processing

在传感器采集数据对角速度进行更新的过程中,会导致四元数的更新存在误差.在不断累积的过程中,四元数的规范化会越来越差.考虑到这个因素,先要进行归一化处理.相关的归一化方程如下:

$$q_i = \frac{q_i}{\sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}}, \quad (1)$$

其中 q_0 、 q_1 、 q_2 、 q_3 是通过四元微分方程得到的更新后的四元数 i 为四元数的标号.

通过归一化后得到新的四元数,带入转换方程 (2)、(3)、(4),分别得到航向角 α ,俯仰角 β ,翻滚角 δ :

$$\alpha = -\arcsin 2(q_1q_3 - q_0q_2), \quad (2)$$

$$\beta = \arctan \left(\frac{2(q_0q_1 + q_2q_3)}{1 - 2(q_1^2 + q_2^2)} \right), \quad (3)$$

$$\delta = -\arctan \left(\frac{2(q_1q_2 + q_0q_3)}{1 - 2(q_1^2 + q_2^2)} \right). \quad (4)$$

2 互补滤波算法

陀螺仪用于测量平衡车的角速度,经过积分得到姿态角,其短期精度较高,但是由于漂移误差的存在,随着时间的积累,其累计误差较大.加速度计的短期精度较差,但其误差不随时间积累.所以,利用这 2 种传感器的互补关系,可以设计互补滤波器来消除测量误差.以航向角为例,互补滤波器的原理如图 3 所示.

图 3 中 θ_{a1} 和 θ_{a2} 分别表示加速度计和陀螺仪测

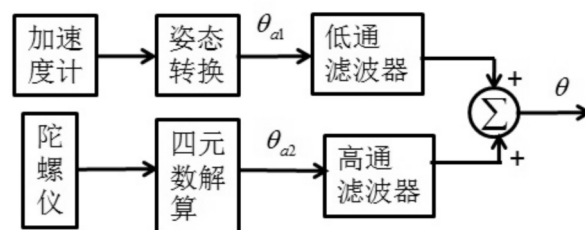


图 3 互补滤波器原理框图

Fig.3 Principle diagram of complementary filter

得并进行转换之后的航向角, θ 表示经过互补滤波之后得到的航向角.

由于加速度计受到高频抖动的干扰,因此对其数据进行低通滤波.而由于陀螺仪的测量误差主要由时间累积而来,所以对其数据进行高通滤波.之后将 2 个滤波器测得的数据进行融合.

3 基于 VNS-GA 算法的 PID 控制互补滤波器

3.1 变邻域搜索

在组合优化问题中,邻域的概念是:根据给定的转换规则,对给定的问题域上的节点进行操作,从而得到的问题域上的节点的集合.这里的“操作”又被称为“邻域动作”.邻域动作可以根据具体情况来设定.为了说明什么是邻域动作,简单举例如下:对于一个布尔问题,假设当前的解为 $x = 10010010$,定义邻域动作为左右对称位置处的 bit 位相互交换,则其邻域解的集合为 $N = \{00010011, 11010000, 10010010, 10001010\}$.

变邻域搜索算法是一种改进型的局部搜索算法,它利用不同的邻域动作生成的邻域结构进行交替搜索,在集中性和疏散性之间达到一种平衡.

3.2 互补滤波器 PID 控制的自平衡车姿态解算

以航向角为例,加入了 PID 控制和互补滤波之后的平衡车姿态解算原理如图 4 所示.在图 4 中, β 表示预设的航向角,经过 PID 控制对航向角进行精确的解算和控制. k_p 、 k_i 、 k_d 是根据工程师的经验不断调试得到的.如此得到的参数不具有通用性,换一个环境就需要重新调试.为此,本文提出了 VNS-GA 算法,并采用该算法对 PID 的 3 个参数进行寻优.

3.3 VNS-GA 算法

GA 对于所求解的问题没有要求,无论其目标函数是线性的还是非线性的,离散的还是连续的,都可以采用 GA 来进行求解.但是,GA 也有一些缺点,

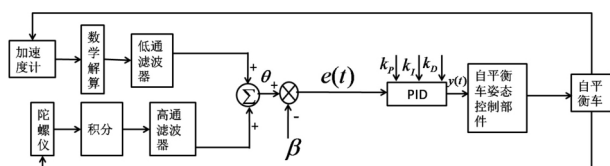


图4 基于互补滤波和PID控制的自平衡车姿态解算原理框图

Fig.4 Principle diagram of self-balancing vehicle attitude solution calculation based on complementary filter and PID control

比如在算法执行的后期,解的多样性降低,搜索域缩小,容易陷入早熟收敛.针对GA的这些缺点,本文提出了融入变邻域搜索的GA,即VNS-GA算法,在算法执行的后期,扩大搜索域,克服早熟收敛,提高解的精确度.

VNS-GA 算法流程图如图5所示.

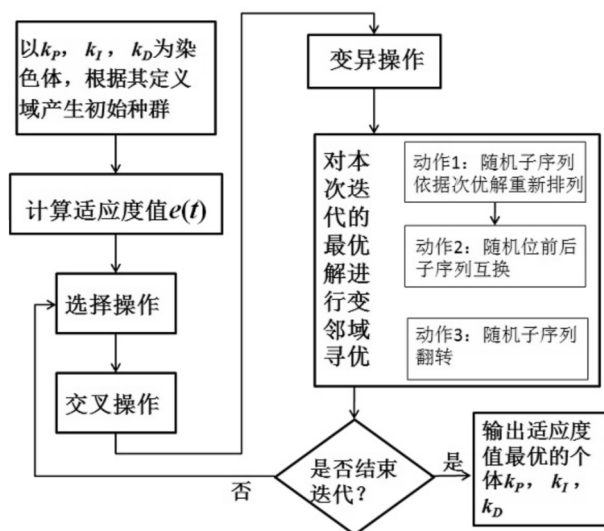


图5 VNS-GA 算法流程图

Fig.5 Flow chart of VNS-GA algorithm

VNS-GA 算法在GA算法的基础上融入了变邻域搜索,在GA的每次迭代结束之前,采用VNS策略对每次迭代产生的最优解进行变邻域搜索,从而扩展了搜索域,避免早熟收敛.下面将详细介绍所加入的变邻域搜索策略.

本文的变邻域搜索策略对传统的变邻域搜索进行了改进,包括如下几个方面:

(1) 设置了串行的3个邻域动作来产生邻域解,从而扩大搜索域;

3个邻域动作分别为:

①依据若干次优解,对本次迭代最优解中的随机子序列进行替换;

②本次迭代最优解的随机位前后子序列互换;

③本次迭代最优解中的随机子序列翻转.

邻域动作①以次优解为依据,对本次迭代最优解中的随机子序列进行替换,从而对本次迭代最优

解进行邻域搜索,次优解基因的引入有助于本次迭代的最优解吸收次优解的优良基因,生成更优的解;邻域动作②令本次迭代最优解的随机位的子序列互换,有助于保留最优解的优秀基因,产生更优的解;邻域动作③令本次迭代最优解的随机子序列翻转,基因突变,有助于扩展搜索域.串行执行的3个邻域动作相互配合,可以在保留最优解和次优解优秀基因的同时,扩展搜索域,提高解的多样性.

(2) 随着迭代次数的增加,自适应地调整邻域动作.

邻域动作的自适应调整遵循如下规则:

①在收敛速度较快的阶段,不进行邻域搜索;

②设定一个阈值,当收敛速度超过该阈值,开始进行邻域搜索;

③随着迭代次数的增加,增加所产生的邻域解的数目.

具体地,设产生邻域解的最大个数为 n ,总的迭代次数为 C ,当前的迭代次数为 c ,当收敛速度超过阈值时算法进行至第 a 代,每一代产生的邻域解的个数可由式(5)计算得到:

$$N = \left\lfloor \frac{c/a}{C/a} \right\rfloor \cdot n. \quad (5)$$

此规则可以保证在算法陷入或即将陷入早熟收敛的时候才对其进行邻域搜索,且随着算法陷入早熟收敛的可能性越大,邻域搜索的范围越大.整体而言,避免了早熟收敛,提高了算法的精度.

4 实验分析及算法验证

为了验证本文所提出的VNS-GA算法,以及其在自平衡车姿态解算上的应用效果,本文进行了2个方面的实验.首先分别采用GA和VNS-GA对一个经典的函数进行寻优;其次,分别采用GA和VNS-GA算法对PID参数进行寻优,从而进行互补滤波和PID控制下的自平衡车姿态解算.

4.1 GA和VNS-GA算法比较与分析

采用式(6)的经典函数对GA和VNS-GA算法进行性能比较.式(6)有无数个局部最优点,且在(0,0)处取最大值.

$$y = \frac{\sin \sqrt{x_1^2 + x_2^2}}{x_1^2 + x_2^2} + e^{(\cos 2\pi x_1 + \cos 2\pi x_2)/2} - 2.71289. \quad (6)$$

将每个算法运行1000次,实验结果如图6所示.在图6中,横坐标表示进化代数,纵坐标表示最优个体每代平均适应度值,可以看出,VNS-GA算法

的收敛速度和寻优精度均大于 GA.

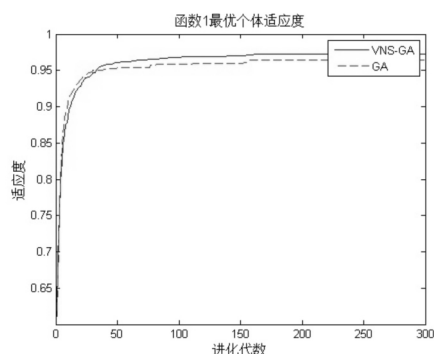


图 6 VNS-GA 和 GA 的收敛速度和寻优精度比较

Fig.6 Comparison of convergence speed and optimization accuracy between VNS-GA and GA

4.2 基于 GA 和 VNS-GA 算法的自平衡车姿态解算比较

本文分别采用 GA 和 VNS-GA 算法对 PID 参数进行寻优,配合互补滤波分别解算了自平衡车的航向角 α 、俯仰角 β 和翻滚角 δ .图 7、图 8 和图 9 分别为用 2 种方法解算的姿态角和其真实值的实验结果对比图,可以看出,相较于 GA,采用 VNS-GA 算法进行参数寻优的 PID 控制方法解算出的姿态角,更加接近真实值.

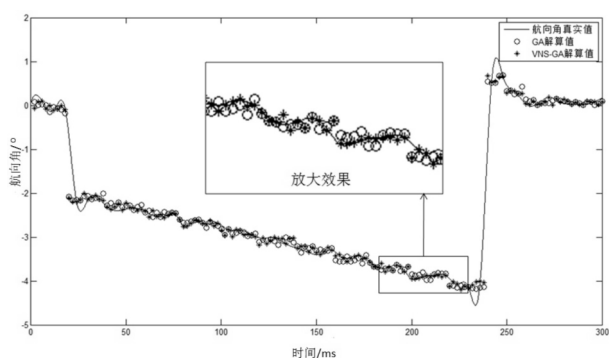


图 7 基于 2 种姿态解算方法的航向角及其真实值对比

Fig.7 Comparison of the heading angle computed by two attitude algorithms and its true value

5 结论

本文通过研究 GA、变邻域搜索、四元数姿态解算、互补滤波算法和 PID 控制器的原理及其优缺点,针对自平衡车的姿态解算,提出了 VNS-GA 算法,并配合互补滤波,用 VNS-GA 算法来对 PID 控制器的参数进行寻优,对自平衡车进行姿态解算.本文所提出的方法,不仅采用了互补滤波和 PID 控制

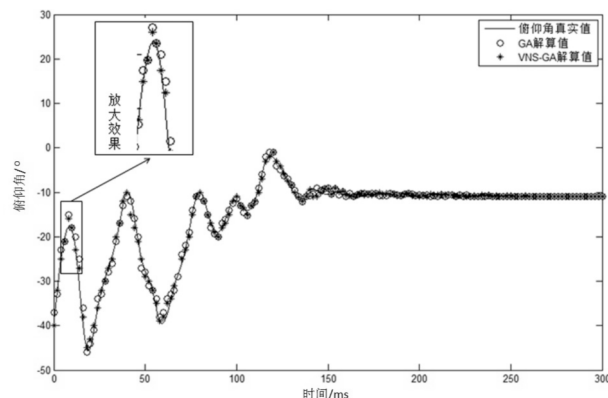


图 8 基于 2 种姿态解算方法的俯仰角及其真实值对比

Fig.8 Comparison of the pitch angle computed by two attitude algorithms and its true value

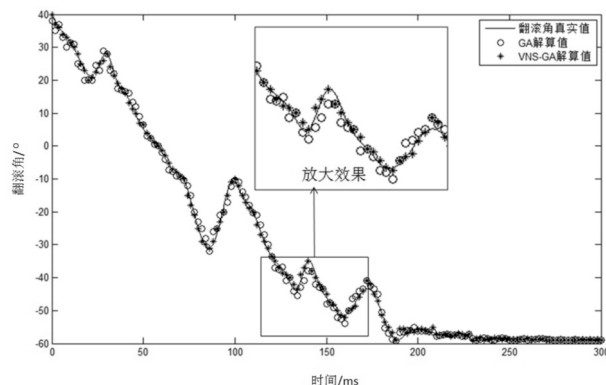


图 9 基于 2 种姿态解算方法的翻滚角及其真实值对比

Fig.9 Comparison of the roll angle computed by two attitude algorithms and its true value

器,而且采用了寻优精度更高的 VNS-GA 算法对 PID 控制器的 3 个参数进行寻优,有效地避免了传统 GA 的早熟收敛,并且在进行变邻域搜索时采用自适应的邻域解产生方式,随着收敛速度和迭代次数的变化,自适应地产生相应数目的邻域解.经过实验验证,本文提出的方法比传统的方法性能更优,该方法还可以扩展到智能轮椅、无人机、机器人等运动物体的姿态解算和平衡控制方面.

参 考 文 献

- [1] WANG S H, YANG Y. Quadrotor aircraft attitude estimation and control based on Kalman filter[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(9): 5634-5639.
- [2] 叶锐峰,冯恩信.基于四元数和卡尔曼滤波的两轮车姿态稳定方法[J].传感技术学报,2012,25(4): 524-528.
- [3] LI W, WANG J. Effective adaptive kalman filter for

- MEMS-IMU/Magnetometers integrated attitude and heading reference systems [J]. Journal of Navigation, 2013, 66(1): 99-113.
- [4] 宋宇,翁新武,郭昕刚.基于四元数EKF算法的小型无人机姿态估计[J].吉林大学学报(理学版),2015,53(3):511-518.
- [5] 吴和龙,白越,裴信,等.基于CPF-EKF算法的大载荷植保无人机姿态解算方法[J].农业机械学报,2018,49(6):24-31,77.
- [6] HONG D, LIU G B, CHEN H M, et al. Application of EKF for missile attitude estimation based on "SINS/CNS" integrated guidance system [C]//IEEE. 2010 3rd International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics. Harbin: IEEE, 2010: 1101-1104.
- [7] 陈孟元,谢义建,陈跃东.基于四元数改进型互补滤波的MEMS姿态解算[J].电子测量与仪器学报,2015,29(9):1391-1397.
- [8] 梁延德,程敏,何福本,等.基于互补滤波器的四旋翼飞行器姿态解算[J].传感器与微系统,2011,30(11):56-61.
- [9] 刘辉邦,褚金奎,支炜,等.基于STM32的无人机姿态测量系统设计[J].传感器与微系统,2013,32(8):108-110.
- [10] 张利,秦海春,王文彬,等.超声波与航迹推算融合的智能轮椅定位方法[J].电子测量与仪器学报,2014,28(2):62-68.
- [11] 孙金秋,游有鹏,傅忠云.基于共轭梯度法和互补滤波相结合的姿态解算算法[J].传感技术学报,2014,27(4):524-528.
- [12] 白祥,崔广军,赵海彬.基于PIXHAWK的飞行控制系统设计[J].南方农机,2019,50(11):28-36.
- [13] 宋一可,李志宇,王从庆,等.基于遗传算法的无人直升机模糊PID姿态控制[J/OL].指挥控制与仿真,2019(4):1-7. [2019-07-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1759.TJ.20190613.1331.006.html>.
- [14] 林阳,赵欢,丁汉.基于多种群遗传算法的一般机器人逆运动学求解[J].机械工程学报,2017,53(3):1-8.
- [15] 林峰,王晓桐,曲晓光.基于改进型蜂群算法的无人机姿态控制参数优化[J].沈阳航空航天大学学报,2015,32(6):59-64.
- [16] 程允丽,李传芹.基于改进神经网络方法的船舶姿态高精度预报研究[J].舰船科学技术,2018,40(18):37-39.

(责任编辑 曹东)