

雷达传感的无人驾驶跟踪控制器设计及仿真^{*}

邓高旭, 邓 琛, 王一鸣, 李 萌

(上海工程技术大学 电子与电气工程学院, 上海 201620)

摘要:【目的】提出了一种基于 BP 神经网络的广义预测控制器用于无人车运输编队的路径跟踪,以弥补 PID 跟踪控制器的不足。【方法】通过将非线性系统网络线性展开,得到线性回归模型,并以非线性前馈增益方式弥补建模的误差。【结果】最后在 CARSIM 和 MATLAB 上进行控制器仿真,并得到了方向跟踪控制器仿真图和无人车编队路径跟踪轨迹图。【结论】仿真结果验证了所提出的方向控制策略在该研究领域的可行性和有效性。

关键词:雷达传感器;非线性系统;跟踪控制器;广义预测控制;无人车运输编队

中图分类号:TP391.9

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2017)03-0128-07

汽车给人们出行带来了巨大便利,提高了生活品质。随着科学技术的发展,各大汽车企业都通过先进的技术来增强车辆安全,比如 ABS 系统、辅助安全驾驶系统和辅助泊车系统等。随后人们更希望汽车能够实现自己从当前位置到达目标地点,自动寻优和避障。随着关于无人驾驶车辆研究的不断成熟,人们开始对无人驾驶的应用进行研究,主从式无人驾驶运输编队是无人驾驶的一种典型应用,对无人驾驶运输编队的安全有极强的现实意义。无人驾驶汽车和编队驾驶的结合,既可以增强编队驾驶的安全性、减少交通事故和无秩序道路拥堵,也可以极大地提高运输编队的运输效率。无人驾驶运输编队采用主从式编队控制的策略来实现多辆无人车的队列行驶,选取首车作为领航车,后车的输入信号就是它的位置信息和转角。领航车由驾驶员正常驾驶,其余跟随车辆为无人车,以领航车为导向实现跟踪。这就要求跟随无人车能够像司机一样对前方道路上的障碍物扫描,并实现转向的控制^[1-2],通过判断和前车的间距以及车速来决定该车的油门踏板和制动踏板的开合情况。从而使跟随无人车能够根据这些状态量来调整队列。

无人车的跟踪控制是靠雷达等传感设备进行预瞄,方向控制器根据反馈数据来做出快速响应,输出前轮转向角。设计控制器时使用较多的是 PID 算法,该算法使用简单,但是由于输入信号和控制器输出信号之间为非线性关系,采用广义预测控制算法将有更好的适应性,不会随着设定值的变化而波动,而且在全局过程中实时优化。

1 无人车 BP-GPC 纯跟踪控制器设计

基于几何原理,只考虑车体在二维平面上的运动。纯跟踪模型如图 1 所示,假设图中 X, Y 轴构成机体坐标系,点 (x, y) 是目标点, L_{fw} 为车体坐标系和点 (x, y) 弧段的弦长,也为前视距离, R 为弧段的曲率半径, l 为无人驾驶车辆前后轴距。由图 1 可得:

$$R = \frac{L_{fw}^2}{2x}, \quad (1)$$

$$\delta = \arctan\left(\frac{2lx}{L_{fw}^2}\right)。 \quad (2)$$

从上式可以看出在方向控制系统中弧段的曲率半径 R 和 L_{fw}^2 成线性关系,转向角 δ 和 L_{fw}^2 成非线性关系,为方向控制器的设计提供了理论依据。

^{*} 收稿日期:2016-06-07 修回日期:2016-09-30 网络出版时间:2017-05-02 17:24

资助项目:国家自然科学基金(No.61201244)

第一作者简介:邓高旭,男,研究方向为智能汽车与车联网,E-mail:markdggx@163.com;通信作者:邓琛,教授,E-mail:dc@sues.edu.cn

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20170502.1724.004.html>

1.1 方向控制系统的模型结构

在真实的无人车方向控制中,控制模型不会将所有的输入信号考虑进去。如果所选模型的输入输出响应和无人车方向控制器的输入输出响应相同,可以选择该模型作为无人车控制器模型。若建立的模型可以控制真车,那么需要考虑的因素就会变多,会降低模型的精准度,控制器在设计时便存在着准确性和庞杂性的对立问题,找出适中的解决方法就成为建立无人车方向控制器模型的重要切入点,这里采用 BP-GPC 非线性系统。

带有延时的有不确定扰动项的非线性系统^[3]:

$$y(k) = y_l(k) + y_n(k), \quad (3)$$

其中, $y_l(k)$ 是系统输出端的线性支流信号; $y_n(k)$ 是系统输出端的非线性支流信号,也为系统在建模过程中存在的误差。

1) 方向控制器线性部分模型结构^[4]。对方向控制器的线性建模,由 GPC 的理论如 CARIMA 模型表示:

$$y_l(k) = \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + B(z^{-1})u(k-1) + C(z^{-1})\varepsilon(k)/\Delta, \quad (4)$$

其中, $B(z^{-1}) = \sum_{i=1}^n b_i z^{-i}$; $C(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^q c_i z^{-i}$; 差分算子 $\Delta = 1 - z^{-1}$; $\varepsilon(k)$ 是均值为零的白噪声。则线性部分的传递函数为:

$$G(z^{-1}) = \frac{z^{-1}B(z^{-1})}{A(z^{-1})}. \quad (5)$$

2) 方向控制器非线性部分模型结构^[5]。了解到神经网络算法对广泛的非线性函数有较强的对应效果, $y_s(k)$ 可用 BP 神经网络来步步逼近^[6]:

$$y_p(k) = f_s[y(k-1), \dots, y(k-n), u(k-1), \dots, u(k-m-1), \mathbf{W}], \quad (6)$$

其中, $\mathbf{W}$ 为方向控制器非线性结构的衍生神经网络对应的 BP 网络中的权矩阵。

选择 Sigmoid 函数为接近 $y_p(k)$ 的 BP 网络中的非显性层传递函数,响应函数为线性函数^[9]。作用层的节点数为 $n+m$,非显性层的节点数由接近函数的类型决定,凑出的响应层节点数目为 1。

3) 方向控制器整体模型结构。考虑控制器系统中线性结构和非线性结构所建的模型^[10],方向控制器系统结构的建模类型为:

$$y(k) = y_l(k) + y_p(k) = \Phi(k-1)\theta(k) + f_s(\Phi(k-1), \mathbf{W}), \quad (7)$$

其中, $\Phi(k-1) = [y(k-1), \dots, y(k-n), u(k-1), \dots, u(k-m-1)]$; $\theta(k) = [a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m]^T$ 。因此,系统结构模型可由如图 2 所示的复合多层前馈神经网络^[11]来描述。

图 2 中,与 $y_p(k)$ 相对应的子神经网络的权值矩阵为 $\mathbf{W}$,与 $y_l(k)$ 相对应的子神经网络的权值矩阵为 $\theta(k) = [a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m]^T$, $y_n(k)$ 与 $y(k)$ 及 $y_l(k)$ 与 $y(k)$ 之间的连接权值均为 1,即

$$y(k) = y_l(k) + y_n(k)。$$

1.2 控制器系统模型参数的辨识

因为神经网络算法^[12]的控制速度达不到要求,所以采用 DLS 在达到收敛速度较快的前提下实时调整神经网络中的权值。DLS 对于

非线性参数的优化效果是很显著的。Kasparian 等人将该方法迁移到 BP 神经网络的在线学习中,仿真结果比较明显。该模拟结果显示,在很多情况下,该方法的优化速度相比于 BP 算法^[13]快 10 倍左右,而且该方法的递推式计算方法对动态学习非常有优势。DLS 的理论基础就是将非线性的改进变量所依靠的映射近似为不受线性约束的映射关系,将系统的非线性优化问题简化为序贯线性二次优化问题进行处理^[14],与其他方法相比,该算法会将一个反映拟阶梯信息的 Hessian 阵 $\mathbf{H}(k)$ 留存得更多,与参数近似求解的 RLS 算法中的信息协方差阵 $\mathbf{P}(k)$

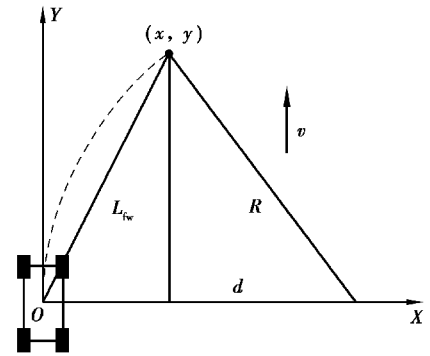


图 1 纯跟踪几何模型图

Fig. 1 Pure trace geometry model

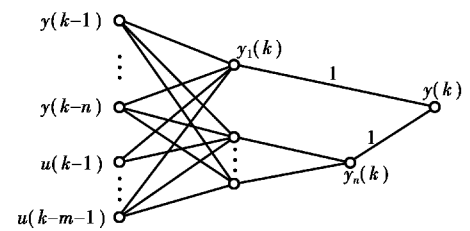


图 2 非线性系统的复合多层前馈神经网络

Fig. 2 Composite multilayer feedforward neural networks for nonlinear systems

具有类似功能。

1.3 方向控制器模型的设计

辨识出参数后,将 GPC 用到控制器结构中。则有:

$$A(z^{-1})y_f(k) = B(z^{-1})u(k-1) + \tilde{A}(z^{-1})y_n(k) + \xi(k)/\Delta, \quad (8)$$

其中, $A(z^{-1}) = 1 - a_1 z^{-1} - \dots - a_n z^{-n}$; $\tilde{A}(z^{-1}) = a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$ 。

由丢番图方程得 $E_j(z^{-1})A(z^{-1})\Delta = 1 - z^{-j}F_j(z^{-1})$ 。非线性系统控制^[15]对象所基于的目标函数为:

$$J = \sum_{j=1}^N [y(k+j-\omega)(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^M \lambda(j) [\Delta u(k+j-1)]^2, \quad (9)$$

其中, $\omega(k+j)$ 为参考轨线,由下式产生:

$$\omega(k+j) = a^j y(k) + (1-a^j) y_r, \quad (10)$$

其中, $j=1, 2, \dots, N$; $y_r, y(k), \omega(k)$ 分别为预设值、响应和标准参照线; a 为柔化系数, $0 < a < 1$ 。

方向控制器系统的广义预测控制器的控制律为:

$$u(k) = u(k-1) + [1 \ 0 \ \dots \ 0] \{[(BE)^T(BE) + \lambda I]^{-1} (BE)^T(Y_r - Fy - EY_n)\}, \quad (11)$$

2 仿真结果研究

2.1 无人车方向控制系统的仿真

朱秋琴^[16]在非线性的广义预测控制算法研究中使用了 BP-GPC 模型,文献[2]中高子林在非线性的自适应滑模跟踪研究中使用了 T-S 模型,为了验证无人车方向控制器设计算法,采用 BP-GPC 作为无人车控制系统的数学模型,即

$$y(k+1) = 0.8 \sin(y(k)) + 1.2 u(k) + 2 u(k-1),$$

其中, $u(k)$ 为方向控制器输入信号,表示前视距离; $y(k)$ 为方向控制器输出的转向角。

神经网络及方向控制器的参数: $y_r=1$; $N=3$; $M=3$; $a=0.4$; $\lambda=0.55$; $v=\rho=0.99$; 仿真步数为 30。用图 2 所示的多层 BP 网络在建模上逼近非线性结构,输入层节点数为 3;非线性结构所对应的分支网络非显性层过渡函数为 Sigmoid 函数^[17],节点数为 6,响应层过渡函数为线性函数,节点数为 1。

对网络的初始值进行选取,该初始值对神经网络的收敛速度产生作用,所以对模型实参数的求解和控制时,需要解出理想的网络初始数据,提高系统的可靠性。图 3 为基于神经网络模型的非线性广义预测控制器的仿真图^[16]。

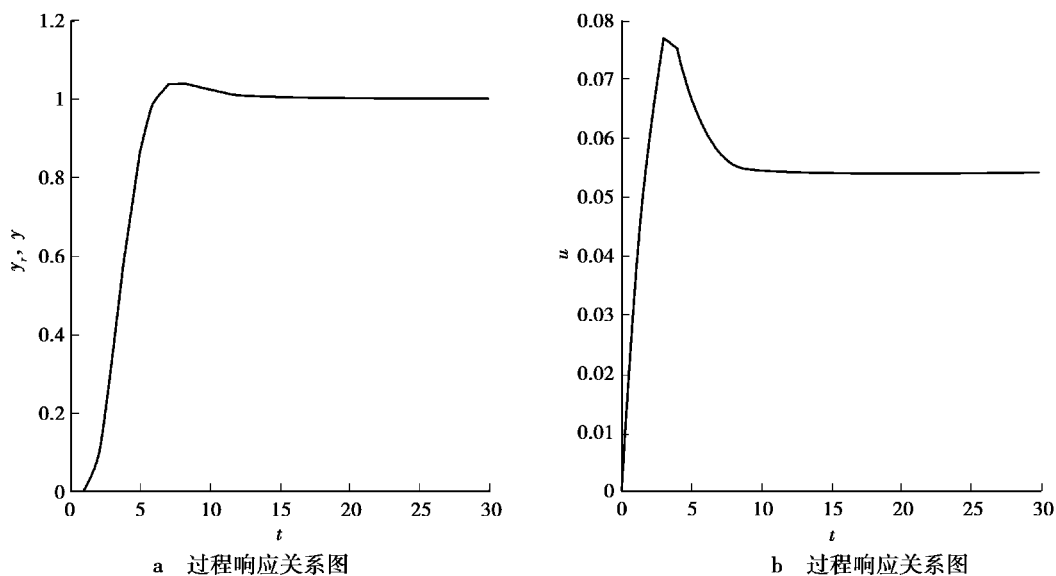


图 3 BP-GPC 系统仿真图

Fig. 3 BP-GPC system simulation diagram

图 3a 表示所控制对象响应 $y(k)$ 预设值 y_r 为 1 的过程响应关系图。由图 3a 可知, BP-GPC 控制器在无离线测试的情况下, 能很快接近非线性结构预设值, 跟随速度快, 控制效果平稳、理想。图 3b 为 BP-GPC 控制器的方向控制误差分析图, 可以看出与控制器的控制量变化趋势一致, 最大为 0.075 的误差, 理论上具有非常准确的方向跟随效果。

采用 CARSIM 与 MATLAB/Simulink 进行联合仿真。在控制算法的开发阶段把 MATLAB/Simulink 开发的控制算法与 CARSIM 的自适应控制对象进行联合仿真, 以检验算法是否满足控制器设计要求。

在 CARSIM 汽车仿真软件中, 图 4 为 BP-GPC 控制算法 Simulink 仿真结构图^[19], 图 5 为控制器的仿真模型图。

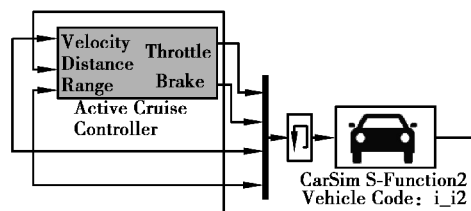


图 4 Simulink 系统控制框图

Fig. 4 Simulink system control block diagram

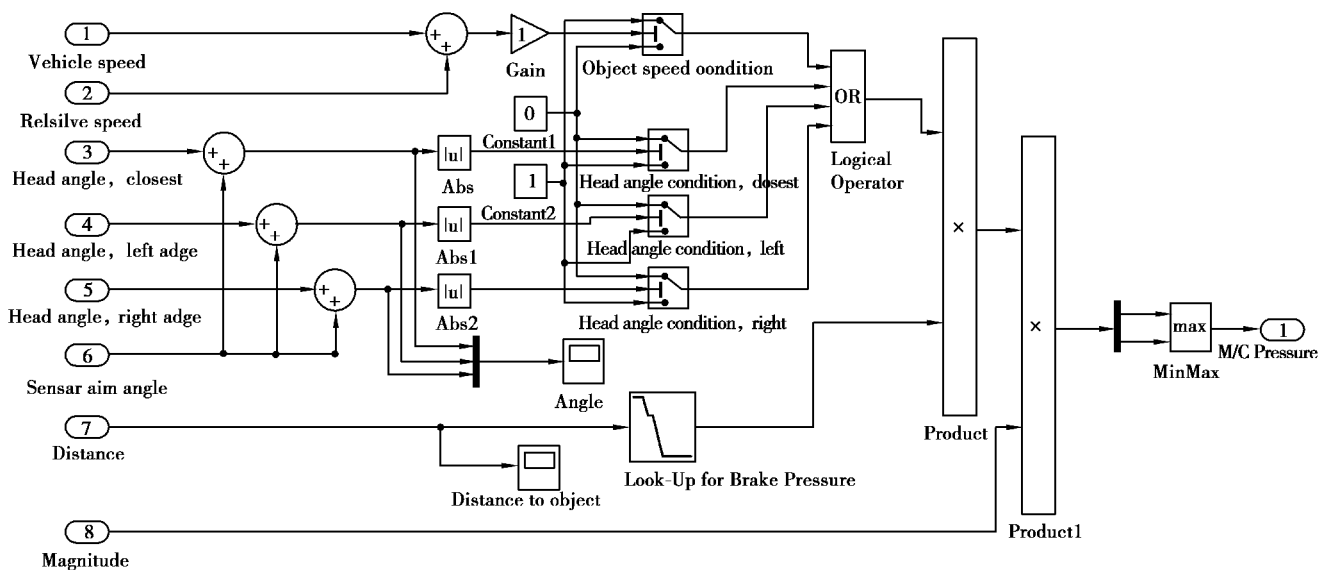


图 5 Simulink 控制器仿真模型

Fig. 5 Simulink controller simulation model

将控制器算法连接 CARSIM 动态仿真, 可得图 6 所示的仿真动画模拟图:

由仿真实验可知, 尽管该方向控制器比较复杂, 但是在 CARSIM 中仍然可以很好地通过雷达预瞄方向控制器控制无人车的转向角, 响应速度快, 能够较理想地实现无人车的智能控制。

2.2 无人车编队控制系统的仿真实验

在编队跟踪控制中, 各无人车的准确位置和车速的适当调整, 可以降低方向控制系统的难度, 提高编队的稳定性和安全系数。所以设想出虚拟车来辅助车辆纵向控制用以编队控制中无人车相对位置定位。虚拟车, 是依靠 A 车的信息在 B 车的相邻车道假想出一辆无人车 A' , 在车辆的纵向控制下 B 无人车与虚拟车 A' 维持在一定相对位置, 从而在两车间形成一定的位置关系。

编队跟踪控制仿真主要包括 3 辆无人车, 首车为引导车, 方向控制器添加到后面的两辆车。在 CARSIM 软件里, 将雷达传感器探测的前视距离输出到 Simulink 仿真模型, 同时输入到汽车模型的控制器中, 然后返回无人车的转向角。Simulink 系统仿真框图和仿真动画模拟图如图 7、图 8 所示。



图 6 CARSIM 仿真动画模拟

Fig. 6 CARSIM simulation animation

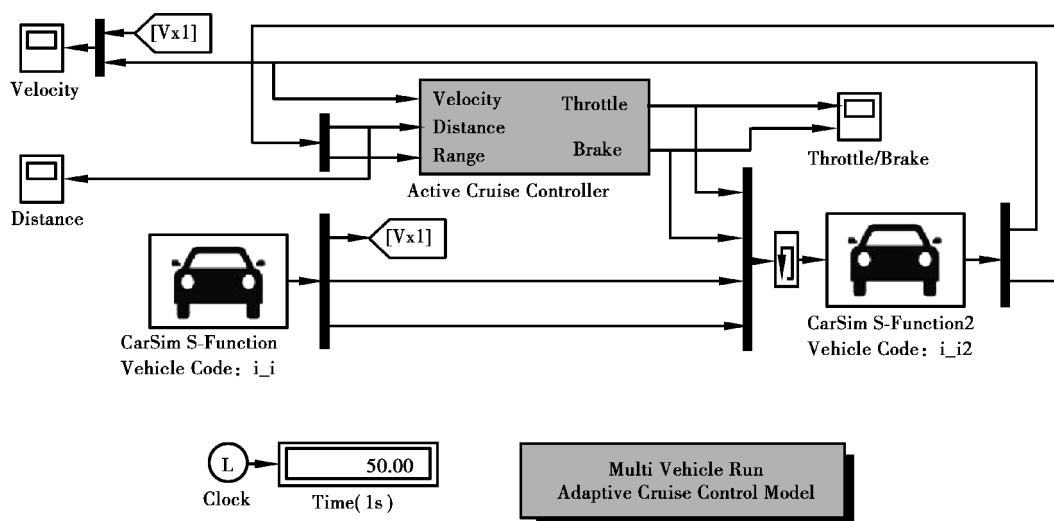


图 7 Simulink 仿真框图

Fig. 7 Simulink control block diagram

图 9 为 BP-GPC 控制算法设计的方向控制器在无人车编队控制中的跟踪路径与 PID 控制算法设计下的跟踪路径效果对比图。

从上述仿真图可知, BP-GPC 控制器用于无人车运输编队控制时, 2 号无人车和 3 号无人车均可以在转弯处通过雷达传感器和广义预测非线性方向控制器来实现稳定、理想的控制, 使用传统的 PID 控制算法虽然整体上跟随效果不错, 但是弯道处的瞬间转弯效果不好, 有明显的偏差, 图 10 为 PID 控制器的误差分析图。

根据上述的误差分析图可得, PID 算法设计的方向控制器控制无人车运输编队跟踪时的最大误差为 0.4, BP-GPC 算法设计的方向控制器控制编队跟踪时的最大误差为 0.2, 所以 BP-GPC 算法设计的方向控制器使无人车在运输编队跟踪上的效果更好, 可以有效地改进原有的方向控制器。



图 8 仿真动画模拟

Fig. 8 Simulation animation diagram

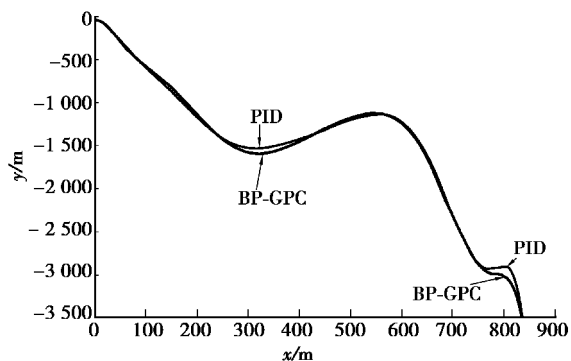


图 9 跟踪效果比较图

Fig. 9 Tracking expectation diagram

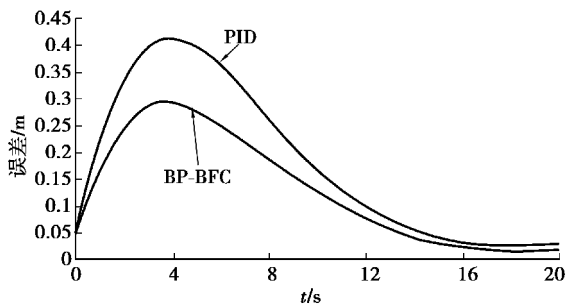


图 10 PID 误差分析图

Fig. 10 PID error analysis diagram

3 结语

在当前所研究的智慧交通领域中, 无人驾驶中的编队行驶在研究内容中举足轻重。BP-GPC 自适应方向控

制器改善了普通控制策略对无人车的不精确的控制。BP-GPC 控制策略利用 BP 神经网络对整个方向控制器进行建模,采用 DLS 对权值矩阵实时调整,使用递推最小二乘法实现参数求解,使得 BP-GPC 算法设计的无人车方向跟随控制器可以很迅速接近非线性结构并进行瞬间控制,确保每一辆无人车在单独行驶和编队跟踪行驶中达到理想的控制效果,改进无人车跟踪效果。

参考文献:

- [1] 王浩,林菜,张尧文.基于模拟退火算法的无人驾驶车辆轨迹跟踪控制[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2015,29(11):106-111.
WANG H, LIN F, ZHANG Y W. Research on trajectory tracking control of self-driving vehicle based on simulated annealing algorithm[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2015, 29(11): 106-111.
- [2] 高子林,熊江,潘勇,等.基于 T-S 模型的一类非线性系统自适应滑模跟踪控制及仿真[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2016,33(5):128-132.
GAO Z L, XIONG J, PAN Y, et al. Adaptive sliding mode tracking control and simulation for a class of nonlinear systems based on T-S model[J]. Journal of Chongqing Normal University(Natural Science), 2016, 33(5): 128-132.
- [3] 邹晶,李雷.基于逼近的动态面滑膜智能控制算法的研究[J].计算机技术与发展,2015,25(6):6-11.
ZOU J, LI L. Research on the intelligent control algorithm of dynamic surface based on approximation[J]. Computer Technology and Development, 2015, 25(6): 6-11.
- [4] 王志臻.某型小涵道比双轴涡扇发动机执行机构建模研究[D].吉林:东北大学,2012.
WANG Z Z. A low bypass turbofan engine to perform research on modeling mechanism of double shaft[D]. Jilin: Northeastern University, 2012.
- [5] 郭红戈,李国勇,郭鹏.一种可分非线性系统的自校正广义预测[J].太原理工大学学报,2005,36(4):431-433.
GUO H G, LI G Y, GUO P. Self tuning generalized predictive of a separable nonlinear system[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36(4): 431-433.
- [6] 韩红桂,李森,乔俊飞.基于模型输出敏感度分析的动态神经网络结构设计[J].电子学报,2010,24(3):731-736.
HAN H G, LI M, QIAO J F. Dynamic neural network architecture design based on model output sensitivity analysis[J]. Electronic Journal, 2010, 24(3): 731-736.
- [7] 刘志强,张硕辉,汪澎.基于 PCA 与 BP 神经网络的制动行为模型[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2015,29(1):1-5.
LIU Z Q, ZHANG S H, WANG P. Driver's braking behavior research based on PCA and BP neural network[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015, 29(1): 1-5.
- [8] 田增山,崔永全.基于 BP 神经网络的 GPS/SINS 姿态测量融合算法[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2014,26(4):478-482.
TIAN Z S, CUI Y Q. Attitude measurement fusion algorithm in GPS/SINS based on BP neural-network[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2014, 26(4): 478-482.
- [9] 牟洪波.基于人工神经网络的木材缺陷检测研究[D].东北:东北林业大学,2006.
MOU H B. Research on wood defect detection based on artificial neural network[D]. Dongbei: Northeast Forestry University, 2006.
- [10] 于灵慧,房建成.一种非线性自适应逆噪声控制器设计及其仿真[J].系统仿真学报,2006,18(1):165-168.
YU L H, FANG J C. Design and simulation of a kind of nonlinear adaptive inverse noise controller[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(1): 165-168.
- [11] 盛维涛,张文君,袁宇鹏,等.基于自适应神经网络模糊推理系统的心电信号检测[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2015,32(6):140-144.
SHENG W T, ZHANG W J, YUAN Y P, et al. Detection of ECG signal based on adaptive neural network fuzzy inference system[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2015, 32(6): 140.
- [12] 韩运磊.卫星干扰源定位参数 TDOA 和 FDOA 估计方法的研究[D].北京:北京交通大学,2009.
HAN Y L. Research on TDOA and FDOA estimation method for satellite interference source location parameter[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [13] 李秀云,石慧霞,岳元龙.多移动机器人鲁棒容错编队控制算法研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2016,33(5):121-127.
LI X Y, SHI H X, YUE Y L. Research on robust fault tolerant control algorithm for multi mobile robots[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2016, 33(5): 121-127.
- [14] 张健中.一类连续化工生产过程的模型辨识及非线性预测控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
ZHANG J Z. Model identification and nonlinear predictive

- control for a class of continuous chemical processes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [15] 杨勇. 基于 PCL-812PG 的电加热炉温度半实物仿真系统的设计[D]. 吉林: 东北大学, 2007.
- YANG Y. Design of electric heating furnace temperature hardware in the loop simulation system based on PCL-812PG[D]. Jilin: Northeastern University, 2007.
- [16] 朱秋琴, 黄云龙. 非线性广义预测控制算法及其仿真研究[J]. 机电工程, 2008, 25(11): 101-104.
- ZHU Q Q, HUANG Y L. Nonlinear generalized predictive control algorithm and its simulation[J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2008, 25(11): 101-104.
- [17] 卫明社, 李国勇. 可分非线性系统的自校正广义预测控制[J]. 太原科技大学学报, 2008, 29(1): 9-11.
- WEI M S, LI G Y. Self tuning generalized predictive control for a separable nonlinear system[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2008, 29(1): 9-11.
- [18] 韩新峰. 基于神经网络与模糊控制的光伏 MPPT 复合控制的研究[D]. 江西: 南昌航空大学, 2013.
- HAN X F. Study on hybrid control of photovoltaic MPPT based on neural network and fuzzy control[D]. Jiangxi: Nanchang Hangkong University, 2013.
- [19] 李凌, 曾杰. 基于 Simulink 的巡航系统 PID 控制方法研究[J]. 沈阳化工大学学报, 2015, 29(3): 273-278.
- LI L, ZENG J. Research on PID control method of cruise control system based on Simulink[J]. Journal of Shenyang University of Chemical Engineering, 2015, 29(3): 273-278.

The Design and Simulation of Unmanned Tracking Controller for Radar Sensor

DENG Gaoxu, DENG Chen, WANG Yiming, LI Meng

(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: [Purposes] Aiming at the shortage of the controller, a generalized predictive controller based on BP neural network is used to track the path of unmanned fleet is proposed. [Methods] Linear regression model is obtained by linear expansion of nonlinear system, and the nonlinear feed forward gain compensate modeling error. [Findings] Finally, the controller is simulated on CARSIM and MATLAB, and obtains the direction tracking controller simulation diagram and the Trajectory diagram of the unmanned fleet path tracking. [Conclusions] Simulation results verify the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy in the research area.

Keywords: radar sensor; nonlinear system; tracking controller; generalized predictive control; unmanned vehicle transport formation

(责任编辑 游中胜)