

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.026

基于改进模糊控制的飞行模拟器洗出算法研究*

孙薛鹏, 卢 颖*, 闫思齐

(空军航空大学 军事仿真技术研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对经典洗出算法参数固定, 参数的选取基本上依靠经验和飞行员现场操作时的感知调试的问题, 为了提高飞行模拟器动感模拟的逼真度, 将模糊控制应用到了算法的设计中, 对经典洗出算法的实时参数优化方法进行了研究。提出了一种改进的模糊控制洗出算法, 基于人体感知机理使用改进的模糊控制对经典洗出算法洗出滤波器的参数进行了优化, 使操作飞行模拟器过程中在模拟器上的运动感觉与真实飞行时的运动感觉误差最小, 并在参数清晰化过程中使用改进遗传算法提高了运动平台的空间利用率。在 Matlab 上对优化后的洗出算法进行了仿真试验。研究结果表明: 优化后的洗出算能够有效地提高飞行模拟器的模拟逼真度、加快平台回位速度而且充分地利用了平台空间, 达到了预期的效果。

关键词: 模糊控制; 洗出滤波; 六自由度; 遗传算法

中图分类号: TP391.9; V216.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1220-04

Flight simulator washout algorithm based on improved fuzzy control

SUN Xue-peng, LU Ying, YAN Si-qi

(Aviation University of Air Force Military Simulation Technology Research Institute, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the problems that parameters of washout filter parameters fixed, basically rely on the experience and the perception of pilot site operation debugging, and in order to improve the dynamic simulation of flight simulator fidelity, fuzzy control algorithm was applied to the design of the algorithm, the parameter optimization method of the classical washout algorithm in real time was researched. A method was presented to a washout algorithm of improved fuzzy control, which was based on fuzzy human perception mechanism using the improved control parameters on washout filter, making the motion perception of the simulator during the operation of the flight simulator is the smallest of the motion perception, and improved genetic algorithm was used to improve the utilization rate of the motion platform in the process of the parameters clearing. In the Matlab simulation experiment was carried out to wash out the optimized algorithm. The results indicate that the optimized algorithm can effectively improve the washout simulation of flight simulator fidelity, speed up the platform return speed and can make full use of the space platform, achieve the desired results.

Key words: fuzzy control; washout; 6DOF; genetic algorithm

0 引 言

当今社会, 运动模拟系统广泛应用于飞机、船舶和车辆等模拟训练设备, 在飞行模拟器当中, 作为驾驶员感知飞机位姿信息的途径之一, 运动系统的动感模拟逼

真与否严重影响着驾驶员的训练效果。如今比较完备的飞行模拟器常采用 6 自由度运动平台作为运动模拟系统的核心, 因为平台的运动空间有限, 不具有无限延展的能力, 不能够完全复现真实飞机飞行时的运动轨迹。在模拟训练过程中, 为了使飞行员能够真实感受到真实

收稿日期: 2017-04-18

基金项目: 吉林省自然科学基金资助项目(20130101069JC)

作者简介: 孙薛鹏(1993-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 主要从事飞行器仿真方面的研究。E-mail: qwe912535843@qq.com

通信联系人: 卢 颖, 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: 2533321295@qq.com

飞行时的所感受到的运动信息,需要采取洗出滤波算法来充分发挥运动平台的运动特性。通过算法使其在完成一次突发运动后,模拟器能够在不被感知的条件下返回中立位置,以便在下一次运动命令下达之前有足够的空间执行命令。在回到中立位置过程中,运动的过程必须在低于人体感觉门限下进行,从而使飞行员感受不到这种附加运动。为了使模拟器在有限空间内较为逼真地模拟真实飞行时的无限运动^[1],洗出算法性能的优劣直接关系到动感模拟的逼真程度。

在研究过程中,使用最为广泛的算法有 3 种,分别是经典洗出算法^[2]、自适应洗出算法^[3]、最优洗出算法^[4]。

经典洗出滤波算法结构简单但参数固定,难以适应复杂多变的动感模拟情况;自适应洗出算法尽管能实时调整增益,但参数变化有限,难以适应无限的空间动感模拟;最优洗出算法则存在低频加速感不足,无法充分利用平台运动空间的缺点。

本文将提出一种在经典洗出算法的基础上利用改进的模糊控制实时调整洗出滤波器参数的方法,并进行仿真对比试验。

1 人体感知模型

前庭平衡器官由半规管和耳石组成,能够感受运动和位置的变化,其中耳石感受外界线加速度^[5],人体耳石模型的传递函数为:

$$H_{OTO(s)} = \frac{L[f']}{L[f]} = \frac{K(\tau_a s + 1)}{(\tau_L s + 1)(\tau_s + 1)} \quad (1)$$

式中: f —飞行员大脑前庭中心处某方向的比力输入;
 f' —飞行员感受到的该方向的比力; K —增益; τ_a , τ_s , τ_L —耳石模型物理参数。

半规管能感受旋转运动的刺激,经过简化后的半规管的传递函数为:

$$H_{SCC(s)} = \frac{T_L T_a s^2}{(T_L s + 1)(T_s s + 1)(T_a s + 1)} \quad (2)$$

式中: T_a , T_s , T_L —半规管模型物理参数。

2 基于改进模糊控制的洗出算法设计

传统洗出算法难以随着飞行模拟器的不同操作而实时调整,并且调整的实时性、准确性也难以考量,由于高性能飞机的动作复杂、需要模拟的情况也比较多,简单的经典洗出算法已不足以满足训练需求。考虑到人体的模糊运动感觉特性,并且对于飞行模拟器洗出算法的调整是一个复杂的非线性问题,利用模糊控制解决该问题是最直接、有效的方法^[6-9]。因此本研究将无法实

时调整参数的经典洗出算法同结构简单,易于调整的模糊控制结合起来,利用模糊控制实时调节洗出算法中的滤波器参数,并且在参数清晰化过程中使用改进的遗传算法提高运动平台的空间利用率,从而提高模拟逼真度。

2.1 基于改进模糊控制系统的算法设计

以纵向为例,基于改进的模糊优化的洗出滤波器的设计原理图如图 1 所示。

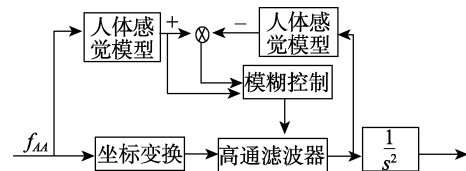


图 1 模糊控制洗出算法原理图

洗出算法滤波器的主要参数为阻尼比和自然频率。在调试过程中发现,阻尼比的调节对输出参数的影响较小,起主要作用的为自然频率,因此在模糊控制中只对自然频率进行实施调节,模糊控制的输入信号为人体感知模型实际感受到的信号以及它与经滤波器调节后感受到的信号误差,输出滤波器的自然频率,在参数清晰化过程中,在保证逼真度和在平台规定范围内运行的基础上使用改进的遗传算法将模糊推理的结果变为清晰的控制信号,进而控制运动平台,提高运动平台工作空间的利用率,提高洗出算法的模拟逼真度。

2.2 模糊规则及其论域的建立

人体感知运动具有模糊性,不能够感觉到精确地信息,只能感觉到有无大小,根据飞行模拟器纵向输入信号、人体感觉模型感受到的误差以及滤波器自然频率取值关系建立规则^[10],模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

ω_n	f_{AA}						
e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZO	PS	PS	PM	PM	PB	PB

根据洗出算法的设计要求,人体的感觉误差 error 的论域为 $[-0.17 \text{ m/s}^2, 0.17 \text{ m/s}^2]$,纵向输入比力 f_{AA} 的论域为 $[-4.5 \text{ m/s}^2, 4.5 \text{ m/s}^2]$,洗出滤波器自然频率 ω_n 的论域为 $[1.7 \text{ rad/s}, 4.98 \text{ rad/s}]$ 。

模糊控制规则如图 2 所示。

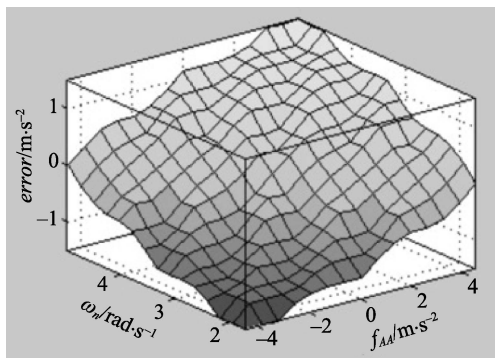


图 2 模糊控制规则图

洗出算法输出的控制信号应该是确切的清晰量,因此需要在模糊控制的最后将模糊推理的结果清晰化进而转变为精确的数字量。对于飞行模拟器来说,在保证人体感觉逼真度的同时,提高飞行模拟器 6 自由度运动平台的空间利用率,能够提升模拟器的潜在模拟效果。因此,为了提高飞行模拟器的潜在模拟效果,提升运动平台的空间利用率,模糊控制的清晰化过程采用改进的遗传算法来实现。

2.3 参数清晰化过程的优化

遗传算法是一种受人工生命启发,基于生物进化原理,而开发出的随机搜索方法。遗传算法通过对复杂的结构进行简单的编码,从任意一个初始种群出发,通过适应度值评价测试、选择、交叉、和变异操作,从而产生新的个体,这些个体适应性更强,通过不断进化,最终得到一群对环境适应性最强的个体,具有实用、高效、鲁棒性强等优点^[11]。

由于基本遗传算法所采用的进化策略固定不变,对其参数的设定存在收敛速度和局部最优的矛盾。为了提高算法的收敛速度,并且使算法不陷入局部最优解,本研究通过改变变异概率,随着算法的不断进化,变异概率进行相应的自适应调整,从而寻找出最优解。

变异概率的调整应符合以下要求^[12]:

(1) 符合优胜劣汰,适者生存的生物进化规律,在当变异的个体的适应度大于当前平均适应度,变异个体具有越高的适应度,该个体的变异概率则应越小,而变异概率越小,个体就越不容易发生变异,从而保证优良个体尽可能的不被破坏;

(2) 当要变异的个体的适应度小于当前种群的平均适应度时,个体为非优良个体,不适应生存,通过给予该类型个体较高的变异概率,使非优良个体向优良个体发展。

为了提高运动平台的空间利用率,即在保证模拟逼真度的条件下,输出的位移最大,所以设定改进遗传算法的目标函数为:

$$\max |d| = \left| aT_H \frac{1}{s^2} \right| \quad (3)$$

式中: d —洗出算法输出位移, m; a —输入的加速度, m/s^{-2} 。

变异概率公式为^[13]:

$$p_m = \begin{cases} p_{\max} - \frac{(p_{\max} - p_{\min})(f - f_{\text{avg}})}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ p_{\max}, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: p_m —将要变异个体的变异概率, p_{\max} —最大变异概率, p_{\min} —最小变异概率, f —将变异个体的适应度, f_{\max} —种群里最大的适应度, f_{avg} —进化中当前每一代种群的平均适应度。

约束条件包括:运动平台空间位置的限制;回位时间应小于最大回位时间,平台回位加速度和回位角速度应大于最小回位加速度和最小回位角速度,并且要小于人体感知比力门限;返回初始位置时间限制。

3 仿真实验

本研究在 Simulink 中建立经典洗出算法的仿真模型,以纵向/俯仰方向为例,运用在 Matlab 中使用改进的模糊控制算法进行参数优化所得到的参数与传统方法选择参数作对比,验证优化后经典洗出算法的动感模拟效果。在纵向/俯仰方向输入加速度为 5 m/s^{-2} ,角速度为 0.6 rad/s 的信号进行仿真验证。

仿真结果图如图 3 所示。

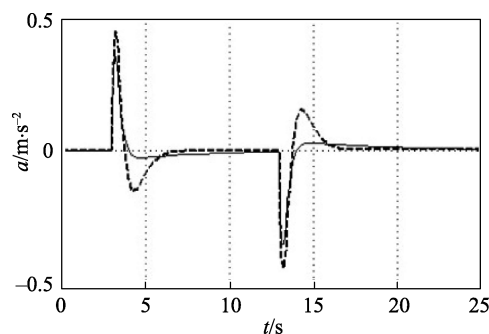


图 3 线加速度输出曲线

图 3 中实线为优化前的输出曲线,虚线为优化后的输出曲线。

线位移输出曲线如图 4 所示。

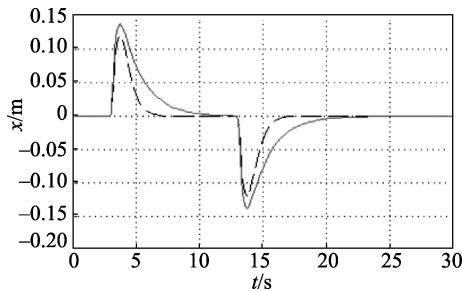


图 4 线位移输出曲线

角位移输出曲线如图 5 所示。

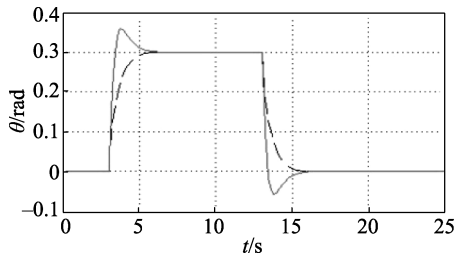


图 5 角位移输出曲线

从图 3、图 4 可知, 在线加速度方面, 基于经验和改进模糊算法的两种参数选择都没有很明显的错误暗示, 但经过改进模糊算法优化后, 操作人员感受到的加速度要比优化之前更加明显; 回位时间缩短 2.3 s, 并且回位加速度没有超出人体的感知比力门限 0.02 g, 平台能够在不被人感知的状态下更快地返回中立位置。若两次动作中时间间隔较短, 经典洗出算法会导致运动平台出现无法在规定时间内回到中立位置的情况。图 5 表示角位移输出曲线, 从两种算法的对比中能够看出, 未经参数优化的平台角速度较大, 优化前的角位移不仅已经超过了平台的极限, 会损坏平台硬件, 而且存在着运动感知的错误暗示, 经改进模糊算法优化后角位移曲线更加平顺, 角速度低于人体感知阈值, 操作人员不会感知到运动平台的倾斜协调动作。

4 结束语

洗出算法能够使飞行模拟器利用有限的空间来模拟真实飞机无限的运动, 洗出算法设计的好坏对飞行模拟器的动感模拟逼真度有着至关重要的影响。针对经典洗出算法, 基于改进的模糊控制算法, 提出了以人体感知模型为基础的目标函数, 在运动平台运动范围、回位时间、人体感知阈值等要求下, 实时优化飞行模拟器经典洗出算法参数的新方法。

本文通过 Matlab/Simulink 对改进的参数优化方法和传统的经典洗出算法进行对比实验, 实验证明: 改进的洗出算法能够实时调整洗出算法参数, 有效地提高了飞行模拟器的动感逼真度, 在同等较小比力输入下线位移提高 0.03 m, 充分利用了平台的运动空间, 提高了模拟器潜在的模拟效果; 平台回位时间有效缩短 2.3 s, 使运动平台在执行下一次命令前能够回到中立位置, 并减少了错误暗示。实验证明此方法有效。此方法也能够根据不同的要求为其他种类的模拟器洗出算法的参数选择提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] 延 皓, 李洪人, 姜洪洲, 等. 六自由度运动模拟器的动感模拟算法研究[J]. 机械工程师, 2003(11): 25-28.
- [2] PARRISH R V, DIEUDONNE J E, MARTIN J D. Motion software for a synergistic six-degree-of-freedom motion base[R]. New York: NASA, 1974.
- [3] PARRISH R V, DIEUDONNE J E, BOWLES R L, et al. Coordinated adaptive washout for motion simulators[J]. *Journal of Aircraft*, 1973, 12(1): 44-50.
- [4] SIVAN R, SHALOM J I, HUANG J K. An optimal control approach to the design of moving flight simulators[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 1982, 12(6): 818-827.
- [5] 王 勇. 基于力传感器的飞行模拟器运动平台控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学机电工程学院, 2012.
- [6] 龙升照. 人操作者的模糊控制模型[J]. 航天医学与医学工程, 1988, 1(2): 97-101, 151-152.
- [7] 王小亮, 李 立, 张卫华. 列车驾驶模拟器模糊自适应洗出算法研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(2): 31-36.
- [8] 宋晓华. 基于 PID 与模糊控制的切削加工过程双模控制[J]. 轻工机械, 2015, 33(2): 61-64.
- [9] NASERI A, GRANT P. An improved adaptive motion drive algorithm[C]. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, San Francisco: AIAA, 2013.
- [10] 王小亮. 高速列车驾驶仿真器动感模拟系统研究[D]. 成都: 西南交通大学机械工程学院, 2009.
- [11] 吉根林. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(2): 69-73.
- [12] 于光帅, 于宪伟. 一种改进的自适应遗传算法[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(19): 259-264.
- [13] 王福林, 朱会霞, 王吉权, 等. 遗传算法的一种改进进化策略[J]. 数学的实践与认识, 2014(9): 211-217.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

孙薛鹏, 卢 颖, 闫思齐. 基于改进模糊控制的飞行模拟器洗出算法研究[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1220-1223.

SUN Xue-peng, LU Ying, YAN Si-qi. Flight simulator washout algorithm based on improved fuzzy control[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(10): 1220-1223.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>