

4-8

非线性系统学习控制理论的发展与展望*

谢振东 谢胜利 刘永清 TP273.22
(华南理工大学自动控制工程系·广州, 510640)

TP13

摘要: 论述了学习控制的基本理论问题, 给出了学习与学习控制系统的基本定义, 着重讨论了学习控制方法产生的历史背景、目前非线性系统学习控制的研究状况, 提出了一些有待继续研究的问题。

关键词: 非线性系统; 学习控制; 发展与展望
控制理论

文献标识码: A

Development and Expectation for Learning Control Theory of Nonlinear Systems

XIE Zhendong, XIE Shengli and LIU Yongqing

(Department of Automatic Control Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510640, P. R. China)

Abstract: In this paper, the problem for the basic theory of learning control is discussed. After giving the basic definition of learning and learning control, we mainly discuss the background of learning control and the research status for learning control of nonlinear systems, and put forward some problems need to be researched.

Key words: nonlinear systems; learning control; development and expectation

1 非线性系统学习控制的研究背景 (Research background for learning control theory of nonlinear systems)

1.1 引言 (Introduction)

对于高速运动机械手的控制, Uchiyama 提出一个思想^[1]: 不断重复一个轨线的控制尝试, 并以此修正控制律, 能达到较好的控制效果. 日本学者 Arimoto^[2] 等人根据这种思想于 1984 年针对机器人系统的控制研究, 提出了迭代学习控制这一新颖方法. 这种控制方法只是利用控制系统先前的控制经验, 根据测量系统的实际输出信号和期望信号来寻求一个理想的输入, 使被控对象产生期望的运动. 而“寻找”的过程就是学习的过程, 在学习的过程中, 只需要测量系统的输出信号和期望信号, 不象适应控制那样, 对系统要进行复杂的参数估计^[3,4], 也不象一般控制方法那样, 不能简化被控对象的动力学描述. 特别是在一类具有较强的非线性耦合和较高的位置重复精度的动力学系统 (如工业机器人、数控机床等) 中, 学习控制有着很好的应用, 如 T. Sugie^[5], M. Katic^[6], H. Park^[7] 的工作. 迭代学习控制方法提出后, 受到了控制界的广泛关注, 人们不仅针对各种机器人系统的跟踪控制提出了相应的有效算法^[8,9], 而且这个方法也被应用到非线性系统的鲁棒控制上^[10-12]. 最近, 在离散系统^[13,14-15], 分布参数系统及广义系统上也有了相应的应用^[16-19]. 迭代学习控制已成了“智能控制”的一个重要组成部分, 并逐步发展成

为控制理论中的一个新的发展方向.

1.2 学习与学习控制系统的定义 (Definition of learning and learning control)

目前对学习控制尚无公认的统一定义, 这主要是因为人们对什么是“学习”尚有许多争议.

最一般的学习定义是由 Wiener 于 1965 年给出的. 它所描述的学习涵义甚至包括了物种随时间的变异, 他的定义为: 具有生存能力的动物, 是那些在它的一生中能被它所经历的环境所改造的动物. 一个能繁殖的动物, 至少能够产生和它自己大略相似的动物, 虽然这种动物不会相似到随着时间的推移而不再发生变化的程度. 如果这种变化是可自我遗传的, 则就有了一种能受自然选择影响的原料, 如果这种变化以某种行为形式显现出来, 则只要该行为不是有害的, 则这种变化就会一代一代的继续下去. 这种从一代到一代的变化形式就叫种族学习或系统发育学习, 而特定个体中发生的行为变化或行为学习, 则称为个体发育学习. Glorioso 于 1975 年给出的学习定义为: 一个能进行学习的系统, 若在 $t = 0$ 时, 环境状态有一个给定的变化, 则系统在时刻 T 时的性能指标一定高于 $t = 0$ 时刻的性能指标, 而且此指标应达到某个预定的水平. Tsytkin 于 1971 年给出了自学习的定义: 自学习就是不具有外来校正的学习, 或即不具惩罚和奖励的学习. 这里没有给出关于系统的反应正确与否的任何附加信息. Saridis 于 1977 年给出了学习系统的定义: 一个系统, 如果

* 基金项目: 国家自然科学基金(69874013), 广东省自然科学基金(980506)和广州市基础科学基金(99J00601)资助项目.

收稿日期: 1998-10-20; 收修改稿日期: 1999-7-21.

能对一个过程或其环境的未知特征所固有的信息进行学习,并将得到的经验用于进一步估计、分类、决策或控制,从而使系统的品质得到改善,那么我们就称此系统为学习系统。Fu 于 1970 年给出了学习控制的定义:设计一个控制器,它能在系统运行中估计未知性信息并基于这个估计的信息确定最优控制,这样它就可以逐步地改进系统的性能。Saricis 于 1977 年给出了学习控制系统的定义:一个学习系统,若其学得的信息被用来控制一个具有未知特征的过程,我们就称它为学习控制系统。

自 60 年代开始,从学习到学习控制的研究经历了 30 多年的发展,已逐渐形成了某些认识较为统一的本质的特点,据此,邓志东等^[20]给出学习控制系统和自学习控制系统的定义:一个开放性系统,如果能够通过对环境与系统自身的学习获得经验,并在运用此经验于系统的控制之后,能够基于人机交互的性能评价器(有人监督),使系统的某个预先要求的性能指标得到改善,则称此系统为学习控制系统(Learning Control System);否则,如果性能评价器在无人参与(无人监督或再励)的情况下完全自动实现,则称此系统为自学习控制系统(Self-Learning Control System)。

在文献[21]中,对学习控制用数学语言简单描述为:在有限的时间域 $[0, T]$ 内,给出被控对象期望的响应 $y_d(t), t \in [0, T]$,寻求某种给定的 $u_k(t), t \in [0, T]$,使其响应 $y_k(t), t \in [0, T]$,在某种意义上比 $y_0(t)$ 有所改善,其中 k 为寻求次数,这一寻求过程称为学习控制过程,如果 $k \rightarrow \infty$ 时, $y_k(t) \rightarrow y_d(t)$,则称为学习控制过程收敛。

2 研究现状及存在的问题(Status and problems)

迭代学习控制系统虽有了较大的发展,但也还相应地存在一些问题,在此,我们将较全面地总结国内外有关研究资料,同时也提出这些研究中所存在的不足。

2.1 研究现状(Status)

• 国外的发展 对于非线性系统, Greg 等人(1992)^[21]、Kuc 等人(1992)^[22]、Gary (1995)^[23]、Ahn 等人(1993)^[24]、Pasquale(1994)^[25]、Sugie 等人(1991)^[51]进行了各种讨论,都对其给定算法的收敛性进行了论述,而 Bien(1989)、Amann(1996)^[26]、Hwang(1991)^[18]等分别对离散系统进行了研究,并给出了一些高阶的学习算法;针对不确定系统 Danwei 等人(1995)^[10]、Chien(1996)^[27]、Sun(1997)^[28]及 Lee(1995)^[29]也给出了相应的讨论;关于在机器人系统的跟踪控制上, Dusk(1995)^[6]、Danwei(1995)^[30]及 Sadao 等人(1988)^[31]分别获得了一些相应的结果;此外, Park(1996)^[17]对不确定机器人系统进行了学习控制与适应控制的结合研究,而 Jang 等人(1995)^[14]和 Amann(1996)^[32]分别对反馈控制进行了讨论。

• 国内动态 林辉、王林^[33]针对一类非线性系统采用闭环 P 型学习率讨论了其收敛性;曾南、应行仁^[34]对于一个未知的非线性连续系统或离散系统,改进了开环迭代学习的收敛条件,并提出闭环迭代学习算法,其结果说明了闭环算法在收敛条件、速度和抗干扰能力上都优于开环算法。他们认为,在实际操作中总会遇上干扰,有输入扰动,输出扰动等,

如果要求每次重复都精确回到相同的位置是不可能的,它的偏差也可以示为一种扰动,开环控制抑制干扰能力较差,而闭环迭代学习控制在操作过程中既用到过去的经验,又根据现行观察进行调整;孙明轩、万伯任^[35]针对受扰非线性系统讨论了 N 阶 PI 型开闭环迭代学习控制,结果表明了高阶算法在输出跟踪和干扰抑制方面的有效性;皮道映、孙优贤^[36]针对离散非线性系统提出了开闭环 P 型迭代学习控制律,他们认为,开环迭代学习控制律的性能要比闭环的差,主要原因在于开环迭代律只利用了系统前次运行的信息,而闭环迭代律在利用当前运行信息改善控制性能的同时,舍弃了系统前次的运行的信息,因此,提出新的开闭环迭代律,它能同时利用系统前次运行和当次运行的信息,将能进一步改善控制性能;皮道映、孙优贤^[37]对于一类参数未知的非线性系统在有限的时域上的精确轨迹跟踪问题,提出了一种开闭环 PI 型迭代学习控制策略,给出了其收敛的充要条件,它可同时用于判定开环和闭环 PI 型迭代学习控制的收敛性;谢振东、谢胜利、刘永清^[13]讨论了 P 型学习控制算法在线性离散系统和非线性离散系统中的收敛性;谢胜利、樊晓平、韦岗^[38]、谢胜利、谢振东、韦岗^[39]也分别针对离散系统进行了讨论;任雪梅、高为炳^[40]则提出了任意初始状态下的学习控制方法,此方法包括两种学习,即同时进行系统的输入和初始状态的学习,因此,在学习开始时对系统的初始状态无要求,即不需要假设在每次循环过程中系统的初始状态和期望跟踪轨迹的初始状态都相等。此学习方法在一定程度上可以解决任意初始状态下的学习控制系统的跟踪问题;对于连续非线性系统史忠科^[41]提出了一般性的迭代学习控制方法,给出了 PID 型学习控制算法的收敛条件,该方法可以逼近任意轨线;谢胜利、张剑、韦岗^[42]及谢胜利、田森平^[43]针对一类不确定非线性系统的学习控制进行了探讨,他们的跟踪结果既不依赖于理想控制,也不依赖初始状态。

目前,对于分布参数系统和广义系统的迭代学习控制研究远不及连续非线性系统和离散系统的迭代学习控制研究,谢胜利、谢振东、韦岗、刘永清等人将迭代学习控制方法用于分布参数系统和广义系统的目标跟踪控制上。

对于分布参数系统的目标跟踪问题,谢振东、刘永清^[16]给出了一种二阶 P 型学习算法,并对该算法的收敛性进行了分析,获得了系统在相应空间中目标跟踪的结果。谢振东、谢胜利、韦岗^[19]对非线性分布参数系统进行了研究,不仅获得了在 $L_2(\Omega)$ 、 $W^{1,2}(\Omega)$ 空间中的跟踪结果,而且还获得了在 $\Omega \times [0, T]$ 上的一致跟踪结果,并且,他们的方法对被控对象的建模要求很低,仅仅是一些定性的限制;而谢振东、谢胜利^[44]针对相应的不确定分布参数系统进行了研究,获得了跟踪控制相应的结果。

对于广义系统的状态跟踪问题,谢胜利、樊晓平、韦岗^[18]、谢胜利、谢振东、刘永清^[19],也采用了学习控制的方法,给出了相应的学习控制算法,并对学习算法的收敛性和状态跟踪的可能性进行了分析。最近,谢胜利、谢振东、韦岗^[45]及谢振东、田传俊^[46]将他们得到的新算法用于终端受

限机器人跟踪控制上,获得了较理想的结果,大大地改进了 Danwei(1995)^[30]、Soh(1995)^[10] 等人的工作,其控制算法的收敛性不依赖于理想力、理想运动及初始运动等数据。在文献[47]中,还就一类不满足收敛性条件的退化系统进行了探讨,因为在这种情况下,通常的学习控制方法遇到困难,对此,他们给出了一种新的方法——吸收流形方法,通过构造一个相应于所给系统稳定而吸引的流形,且在构造的同时设计出学习控制序列,以使完成对所给期望目标的跟踪。

2.2 存在的问题(The existing problems)

由于迭代学习控制方法产生不久,其基本理论还远未形成,学习控制要发展成为一种具有完整理论基础的控制方法,并且更好地应用于实际工程中,还需要人们投入相当的精力和时间,进行深入地研究。

根据所查到的文献资料表明,学习控制理论研究的成果不仅零散,而且在研究中还存在着这样或那样的不足,主要表现在以下几个方面:

- 学习控制不收敛,导致目标跟踪精度太差,例 Danwei^[30]、Soh^[10]、Greg^[11]等。

- 学习控制算法不是全局而只是局部收敛,很大程度上依赖于初始输入信号,如 Tomcho^[12]、Pasgual^[25]等。而这在实际工程应用中是很难把握的。

- 学习控制过程依赖于看起来似乎已知,但实际上是未知的理想输入 $u_d(t)$ 的一些信息,而 $u_d(t)$ 正是我们学习控制所要“寻找”的对象,例 Jang^[14]、Kuc^[24]、Ahn^[48]等对机器人系统轨迹跟踪控制的研究。

- 学习控制过程的收敛性依赖于非线性函数的 Lipschitz 常数,但该常数对一类不确定系统来说,只是定性条件,而不是定量条件。

- 在学习控制过程中,都要求每次学习过程要经过相同的初始状态,而在有些实际工程的运用中,每次都会存在一定的误差,不可能完全一样。

就目前而言,学习控制方法一般都要求在学习控制的过程中,寻找“学习矩阵”,而这些“学习矩阵”要满足一些必要的收敛条件,在系统不满足目前的一般收敛条件的情况下能否利用这一方法,需要哪样的技术处理及新的改进措施。

另外,如何充分利用控制系统先前经验的所有信息,以及这些信息利用与学习控制过程收敛的关系;学习控制方法与目前较成熟的适应控制方法的区别与联系是什么,如何将这一方法与适应控制方法结合起来,使得对系统的参数辨识和跟踪控制同时进行。

以上诸多问题都是学习控制能真正发展成为控制理论中既具有坚实理论基础,又具有广泛应用前景的新方向而需要解决的问题。

3 学习控制理论的展望(Expectation of the learning control theory)

学习控制在理论上所要研究的系统包括:不确定线性系统、分布参数系统、离散时间系统及 2-D 离散系统、广义系统和它们相应的滞后系统;而跟踪控制的形式包括调节跟踪、

输入输出和状态跟踪;初始误差形式包括零初始误差、非零初始误差,而非零初始误差里又分下面二种情况:每次学习时有相同的初始值和有不同初始值。此外,要寻求系统退化情况(即不满足一般收敛性条件)下的研究方法,及学习控制与适应控制的差别与联系,目前,迭代学习控制方法在分布参数系统上的应用仅仅开始,由于其系统的复杂性及收敛性的多样性,无论是在基本概念上,还是在方法技巧上都有待发展,此外,对于广义系统的研究,除了文献[18,19]以外,目前国内外没有其他任何结果在应用上如何将迭代学习控制方法更有效地从机器人系统扩展到其他实际工程中(如最近电子加油计数器的应用)。

就以由常微分方程定义的集中参数系统(包括线性和非线性系统)为主要研究对象来说,第一,寻求新的算法和研究手段,使学习控制过程全局收敛(即与初始输入信号无关)且不依赖于理想输入信号,这样保证结果在应用于实际工程时的可实现性;第二,如何充分利用控制系统过程先前控制经验的所有信息,以及这些信息利用与学习控制过程收敛的关系,这样为实际设计提供更多的可靠信息;第三,当系统处于退化情况下时,如何进行学习控制设计,分析能或不能的原因;第四,研究非零初始误差的情况,因为在有些实际应用中,每次学习控制的初始值不可能完全一样,相应地如何将以上研究扩展到含有滞后、不确定的各种系统的学习控制上,都是有待研究的问题。

4 总结(Conclusion)

在实际应用中,往往要求控制系统在相当广泛的运行条件范围内,保持系统的完善功能和期望性能,实际的被控对象及系统的性能指标常常具有一定的复杂性和不确定性,例如:被控对象存在非线性和时变性;缺乏关于系统的必要的先验知识、系统建模不良,存在未建模动态;系统控制所依赖的观测信息不完备等,这些客观存在实际情况给系统的控制任务的实现带来了不可避免困难,尤其在要求宽环境运行时,难度更大,以至于用常规的控制方法无法获得满意的性能。

学习控制在解决由于对象存在非线性或建模不良所造成的不确定性问题方面具有得天独厚的优越性,它能在系统运行过程中,对未知信息进行在线学习,在学习过程中不断弥补缺乏的先验知识,进而使系统性能得到逐步改善。

从迭代学习控制方法产生至今已有十多年的历史,人们对它的研究已经越来越重视,从线性系统到非线性系统,从连续系统到离散系统,从集中参数系统到分布参数系统,从非奇异系统到广义系统,人们的研究工作由浅到深,由表及里,使得迭代学习控制方法得以进一步的完善。

从目前的研究工作来看,学习控制研究已经发展成为智能控制的一个新的发展方向,因此,对非线性系统的学习控制研究已经成为一种必然,并且,我们相信,在不久的将来,非线性系统的学习控制研究将会成为最热门的研究课题之一,也将在实际工程中越来越被广泛地应用。

参考文献(References)

- [1] Uchiyama M. Formulation of high-speed motion of a mechanical arm by trial[J]. Trans. of Science, 1978, 14: 706 - 712
- [2] Arimoto S, Kawamura S and Miyazaki F. Bettering operation of robotics by learning[J]. J. Robotic System, 1984, (1,2): 123 - 140
- [3] Guo L. Performance analysis of general tracking algorithms[J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1995, 40(8): 1388 - 1402
- [4] Guo L and Ljung L. Self-convergence of weighted leastsquares with applications to stochastic adaptive control[J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1996, 41(1): 78 - 89
- [5] Toshiharu Sugie and Toshiro Ono. An iterative learning control law for dynamical systems[J]. Automatica, 1991, 27(4): 729 - 732
- [6] Džurk M Katic and Miomir K Vukobratovic. Highly efficient robot dynamics learning by decomposed connectionist feedforward control structure[J]. IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, 1995, 25(1): 145 - 158
- [7] Park B H, Kuc T-Y and Lee J S. Adaptive learning control of uncertain robotic systems[J]. Int. J. Control, 1996, 65(5): 725 - 744
- [8] Hwang D H, Bien Z, Oh S R. Iterative learning control method for discrete-time dynamic systems[J]. IEE Proceedings-D, 1991, 138(2): 139 - 144
- [9] Geng Zheng, Carroll R and Xie Jahong. Two-dimensional model and algorithm analysis for a class of iterative learning control systems[J]. Int. J. Control, 1990, 52(4): 833 - 862
- [10] Soh Y C and Cheah C C. Robust motion and force control of constrained manipulators by learning[J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1992, 37(1): 110 - 114
- [11] Grey H, Fenwick D, Paden B and Miyazaki F. Stability of learning control with disturbances and uncertain initial conditions[J]. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1995, 11(3): 432 - 441
- [12] Torihide N and Arimoto S. Learning control for robot tasks under geometric endpoint constraints[J]. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1995, 11(3): 432 - 441
- [13] 谢振东, 谢胜利, 刘永清. 离散系统跟踪控制的学习算法及其收敛性[J]. 系统工程与电子技术, 1998, 20(10): 45 - 48
- [14] Jang T J, Cho H and Aha H S. Iterative learning control in feedback system[J]. Automatica, 1995, 31(2): 243 - 248
- [15] Chien Chuang-Ju and Liu Jing-Sin. A P-type iterative learning controller for robust output tracking of nonlinear time-varying systems[J]. Int. J. Control, 1996, 64(2): 319 - 334
- [16] 谢振东, 刘永清. 分布参数系统目标跟踪的二阶 P-型学习算法. 暨南大学学报, 1998, 19(1): 60 - 64
- [17] 谢胜利, 谢振东, 韦岗. 非线性分布参数系统跟踪控制的学习算法[J]. 自动化学报, 1999, 25(5): 635 - 640
- [18] Xie Shengli, Fan Xiaoping, Wei Gang. Learning Control Algorithm for Trajectory Tracking of the Singular Systems with Delay[J]. Automatica, 2000
- [19] 谢胜利, 谢振东, 刘永清. 滞后广义系统状态跟踪的学习控制算法[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(5): 10 - 16
- [20] 邓志东, 张再兴, 孙增圻. 学习控制系统[J]. 信息与控制, 1996, 25(2): 94 - 102
- [21] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996
- [22] Kuo T Y, Lee Jin S and Nam K. An iterative learning control[J]. theory a class of nonlinear dynamic system[J]. Automatica, 1992, 28(6): 1215 - 1221
- [23] Gary M Bone. A novel iterative learning control formulation of generalized predictive control[J]. Automatica, 1995, 31(10): 1483 - 1487
- [24] Ahn H S, Choi C H and Kim K B. Iterative learning control for a class of nonlinear systems[J]. Automatica, 1993, 29(6): 1575 - 1578
- [25] Pasquale L. State steering by learning for a class of nonlinear control system[J]. Automatica, 1994, 30(9): 1463 - 1468
- [26] Amann N, Owens O H, Rogers E. Iterative learning control for discrete-time system with exponential rate of convergence[J]. IEE Proc. Control Theory Appl., 1996, 143(2): 217 - 221
- [27] Chien C J and Liu J S. A P-type learning control[J]. Control Theory and Applications, 1997, 14(1): 12 - 18
- [28] Sun M X. Robustness of higher-order P-type learning control[J]. Control Theory and Applications, 1997, 14(1): 12 - 18
- [29] LEE Hak-Sung and Bien Z. Study on robustness of iterative control with non-zero initial error[J]. Int. J. Control, 1996, 64(3): 345 - 359
- [30] Wang Danwei. A simple iterative learning control for manipulators with flexible joints[J]. Automatica, 1995, 31(9): 1341 - 1344
- [31] Sadao Kawamura, Fumio Miyazaki and Arimoto. Realization of robot motion based on a learning method[J]. IEE Trans. on Systems Man and Cybernetics, 1988, 18(1): 126 - 133
- [32] Amann N, Owens D H and Rogers E. Iterative learning control using optimal feedback and feedforward actions[J]. Int. J. Control, 1996, 65(2): 277 - 293
- [33] 林辉, 王林. 非线性系统闭环 P 型迭代学习控制的收敛性[J]. 控制理论与应用, 1995, 12(6): 742 - 746
- [34] 曾南, 应行仁. 非线性系统迭代学习算法[J]. 自动化学报, 1992, 18(2): 168 - 176
- [35] 孙明轩, 万伯任. 非线性系统高阶迭代学习算法[J]. 控制与决策, 1994, 9(3): 195 - 199
- [36] 皮道映, 孙优贤. 离散非线性系统开闭环 P 型迭代学习控制律及其收敛性[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(2): 157 - 161
- [37] 皮道映, 孙优贤. 非线性系统开闭环 PI 型迭代学习控制律及收敛性[J]. 控制理论与应用, 1998, 15(3): 400 - 403
- [38] Xie Shengli, Fan Xiaoping, Wei Gang. A Learning control method for nonlinear discrete systems[A]. Proceedings of International Conference Systems Science and Systems Engineering'98[C], Beijing, 1998, 638 - 443
- [39] 谢胜利, 谢振东, 韦岗. 非线性离散系统的学习控制方法[J]. 华南理工大学学报, 1998, 26(12): 7 - 13
- [40] 任雪梅, 高为炳. 任意初始状态下的学习控制[J]. 自动化学报, 1994, 20(1): 74 - 79
- [41] 史忠科. 连续非线性系统的迭代学习控制方法[J]. 控制理论

- 与应用, 1997, 14(2): 878-882
- [42] 谢胜利, 张剑, 韦岗. 非线性系统的迭代学习控制方法[J]. 中山大学学报, 1998, 32(1): 30-33
- [43] Xie S L, Tian S P. Tracking control learning algorithms for nonlinear systems [A]. Proceedings of IEEE Hongkong Symposium on Robotics Control'99[C], Hongkong, 1999, 1: 79-84
- [44] Xie Zhendong, Xie Shengli. Iterative learning control for uncertain distributed parameter systems [A]. Proceedings of International Conference Systems Science and Systems Engineering'98[C], Beijing, 1998, 644-649
- [45] 谢胜利, 谢振东, 韦岗. 非线性学习控制理论及其在机器人系统上的应用 [A]. 中国控制会议文集 [C]. 北京: 国防大学出版社, 1998, 957-961
- [46] Xie Z D, Tian C J. A learning algorithm for target tracking control of a class of terminal restricted robot manipulators with flexible-joints [A]. Proceedings of IEEE Hongkong Symposium on Robotics Control'99[C], Hongkong, 1999, 1: 175-180
- [47] 谢胜利. 非线性系统迭代学习控制理论及应用 [R]. 华南理工大学博士后研究报告, 1997
- [48] Pi Daoying and Sun Youxian. On the convergence of open-closed loop P-type iterative learning control scheme for nonlinear discrete system [J]. Control Theory and Applications, 1997, 14(2): 157-161
- [49] Sun Mingxuan. Robustness of higher-order P-type learning control [J]. Control Theory and Applications, 1997, 14(1): 12-24
- [50] Ishihara T K A and Takeda H. A discrete-time design of robust iterative learning controllers [J]. IEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, 1992, 22(1): 74-84

本文作者简介

谢振东 1966年生, 华南理工大学控制理论与控制工程博士生. 在非线性系统稳定性、迭代学习控制、变结构控制方面发表论文近10篇, 曾获省级优秀教学成果奖和自然科学奖. 目前感兴趣的方向是非线性系统的迭代学习控制理论及应用

谢胜利 1958年生, 控制理论与控制工程博士, 电子与通信博士后, 华南理工大学无线电与自动控制研究所教授. 一直从事非线性系统的稳定性理论、振动性理论、变结构控制、迭代学习控制及自适应回流信号消除领域的教学与科研工作, 在国内外学术刊物上发表论文近70篇, 出版专著(国家九五重点图书)一部, 目前感兴趣的领域为非线性系统迭代学习控制理论, 自适应多回路信号消除理论, 数学预测及应用等.

刘永清 1930年生, 华南理工大学电子与信息学院教授, 博士生导师. 主要研究方向为复杂系统及系统工程.

(上接第3页)

- [6] Costa D, Hertz A and Dubuis O. Imbedding of a sequential algorithm within an evolutionary algorithm for coloring problem in graphs [J]. J. of heuristics, 1989, 20(1): 105-128
- [7] Dorigo M, Maniezzo V and Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1996, 26(1): 28-41
- [8] Dorigo M, Maniezzo V and Colomi A. Ant system: an autocatalytic optimizing process [R]. Technical Report 91-016, Politecnico di Milano, 1991
- [9] Watkins C. Learning with delayed rewards [D]. England: Psychology Department, University of Cambridge, 1989
- [10] Dorigo M and Luca M. A study of some properties of ant-Q [A]. In: H M Voigt, W Ebeling and I Rechenberg, et al eds. Proc of 4th Int. Conf. on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN) [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1996, 656-665
- [11] Luca M, Gambardella and Dorigo M. Ant-Q: an reinforcement learning approach to the traveling salesman problem [A]. In: Proc. of 12th Machine Learning Conf. [C]. France: Morgan Kaufmann, 1995, 252-260
- [12] Thomas stützle and Holger Hoos. Max-min ant system and local search for combinatorial optimization problems [A]. In: Proc of 2nd Int. Conf. on Metaheuristics [C]. Wien: Springer-Verlag, 1997
- [13] Stützle T and Hoos H. Improvements on the ant system: introducing max-min ant system [A]. In: Proc. Int. Conf. Artificial Neural Network and Genetic Algorithm [C]. Wien: Springer-Verlag, 1997
- [14] 张纪会, 徐心和. 带遗忘因子的蚁群算法 [J]. 系统仿真学报, 2000, (2)
- [15] 张纪会, 徐心和. 具有变异特征的蚁群算法 [J]. 计算机研究与发展, 2000, (1)
- [16] 张纪会, 徐心和. 一种新型的模拟进化算法——蚁群算法 [J]. 系统工程理论与实践, 1999, (3): 84-87

本文作者简介

张纪会 1969年生, 博士. 主要研究方向为: 离散事件动态系统, 智能调度, 智能计算, 混合系统等

高齐圣 1966年生, 博士, 副教授. 主要研究方向为: 智能优化, 智能管理等.

徐心和 1940年生, 东北大学教授, 博士生导师. 主要研究方向为离散事件动态系统, 计算机控制与仿真, 混合系统等.