

# 非仿射系统的控制器设计方法综述

宋永端\*<sup>1,2</sup> 宋琦<sup>1,2</sup>

1. 北京交通大学, 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044  
E-mail: ydsong@bjtu.edu.cn
2. 北京交通大学, 智能系统及再生能源研究中心, 北京 100044  
E-mail: 09111018@bjtu.edu.cn

**摘 要** 与仿射系统不同, 非仿射系统的控制输入是通过非线性隐含方式进入并影响系统的, 这给相应控制器设计带来挑战。本文通过介绍几种常见的控制器综合及分析方法, 总结了近年来非仿射控制系统的主要研究成果, 并简要阐述了非仿射控制系统设计仍然存在的一些难点问题。

**关键词** 非仿射系统, 神经网络, 模糊控制, 返步设计, 自适应控制

## Survey of the Latest Developments in Control of Non-affine Systems

SONG Yong-Duan\*<sup>1,2</sup> SONG Qi<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044  
E-mail: ydsong@bjtu.edu.cn
2. Center for Intelligent Systems and Renewable Energy, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044  
E-mail: 09111018@bjtu.edu.cn

**Abstract** It is quite challenging to synthesize control schemes for non-affine systems where the control inputs take their actions through a nonlinear and implicit way. This paper presents an overview on the latest developments in control of non-affine systems. Several typically utilized design tools and approaches for non-affine system control are summarized and discussed. Additional related issues in non-affine system control design are highlighted.

**Key Words** Non-affine Systems, Neural Network, Fuzzy Logic, Backstepping Design, Adaptive Control

### 1 引言

非仿射系统, 即控制输入不以线性比例方式通过控制增益进入并影响系统动态特性, 而是以非线性隐含的方式对系统产生作用。严格讲, 非仿射系统没有仿射系统中的“控制增益”和“控制方向”等概念。非仿射系统具有高度非线性、不确定性和复杂性。

对于非线性系统的控制问题, 近十几年来取得了较大进展。除了传统PI/PID[1]控制策略外, 越来越多的高级控制策略应运而生, 比如, 模糊控制, 基于神经网络的控制方法, 返步控制, 容错控制, 以及这些方法之间的互相结合运用, 等等。

针对一类SISO未知系统, 利用模糊系统对非线性系统的逼近特性, 文献[2]给出了模糊自适应控制策略。之后, 出现了针对不确定非线性系统的模糊自适应控制方法[3-7]。返步控制是另一种非传统的控制器设计方法。近年来, 已被成功运用于非线性不确定系统的稳定性问题分析中。文[8]将返步设计与神经网络相结合, 针对非线性不确定系统给出了基于神经网络

的返步控制策略; 通过将返步设计与局部高增益观测器的结合, 文[9]建立了一套自适应非线性输出反馈跟踪控制方法。容错控制也在非线性系统中得到应用, 其原始最早可以追溯到1971年, 以Niederlinski提出完整性控制(integral control)的新概念为标志[10], Siljak于1980年发表的关于可靠镇定的文章是最早开始专门研究容错控制的工作之一[11]。近十年来, 容错控制领域取得了很多有意义的成果。在最近刊出的文献[12]中, 系统动态特性以及执行器失效均被考虑进系统分析及容错控制器设计中。除了上述方法, 还有很多其他的高级控制策略被应用于非线性系统, 这里不再一一赘述。

但是, 诸多研究成果所针对的系统绝大部分是仿射系统, 即控制输入以线性形式出现在系统中。而在非仿射系统中, 控制信号以非线性隐含的方式进入系统, 影响系统动态特性。非仿射系统的这种特性, 使得已有的诸多对仿射系统行之有效的方法不能简单复制到非仿射控制系统中, 非仿射控制系统的设计有极大挑战性。另一方面, 大部分实际工程系统(如生化

\* 通讯作者。

此项工作得到国家自然科学基金(项目批准号: 60974052); 长江学者与创新团队(IRT0949); 北京交通大学基金(项目批准号: RCS2008ZT002, 2009JBZ001, 2009RC008)资助。

系统[13], 振动系统[14], 飞行器系统, 以及一些黑箱系统等)即使不考虑建模误差也很难建立起精确仿射模型。因此, 直接针对非仿射系统设计控制器具有十分重要的理论和实际意义。本文的主要目的是通过介绍几种常见的控制器综合及分析方法, 总结近年来非仿射控制系统的主要研究成果, 并简要阐述非仿射控制系统设计仍然存在的一些难点问题。

## 2 非仿射系统模型及控制策略

本节主要介绍现有非仿射控制系统模型及控制器设计基本方法。

### 2.1 动态模型

非仿射系统模型通常表述成以下形式

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (1)$$

其中  $x \in R^n$  代表系统状态,  $u \in R^m$  代表控制输入,  $f(x, u)$  为非线性函数。

在控制器设计时, 需对  $f(x, u)$  做一些假设, 比如非线性函数  $f(\cdot)$  是关于  $x$  和  $u$  的解析函数;  $0 < a_0 \leq |\partial f / \partial u|$ ; 若为跟踪问题, 则被跟踪曲线及其一阶导数平滑有界等。

由于非仿射系统的非线性特性, 在系统分析设计中, 往往需要对模型进行简化处理, Taylor 级数展开和 Hadamard 引理[15]是两个常用方法。文献[16]利用 Hadamard 引理, 将非仿射系统模型(1)转化为如下的类似仿射形式

$$\dot{x} = f_0(x) + g_0(x)u + \sum_{j=1}^m u_j (R_j(x, u)u)$$

其中  $f_0(x) = f(x, 0)$ ,  $g_0(x) = \frac{\partial f}{\partial u}(x, 0)$ ,  $R_j(x, u)$  是  $m \times m$  维矩阵,  $u_j$  ( $1 \leq j \leq m$ ) 是向量  $u$  的组成元素。

文献[17]利用Taylor定理将  $f(x, u)$  在  $u = u_0(x)$  进行级数展开

$$f(x, u) = f(x) + g(x)u + \Delta(x, u)$$

其中

$$f(x) = f(x, u_0(x)) - \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \bigg|_{u=u_0(x)} u_0(x)$$

$$g(x) = \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \bigg|_{u=u_0(x)} u_0(x)$$

$\Delta(x, u)$  代表高阶部分,  $u_0(x)$  是令  $\|\Delta(x, u)\|$  最小的未知光滑函数。

以上两种模型是现有大部分非仿射系统控制设计中常用的形式。

在非仿射系统的控制设计中, 常用的方法与技巧可归纳为如表格1所示, 具体思想及代表性文献将在以下章节给出。

表 1. 非仿射系统常用控制策略及技巧总结

Table 1. Survey of the control strategies of nonaffine systems

非仿射系统	常用控制方法与技巧
控制输入与系统成非线性关系	PID
	模糊逻辑
	神经网络
	返步控制
	直接/间接自适应控制
	基于观测器的控制
	隐函数定理
	Taylor级数展开
	均值定理
	Hadamard引理

### 2.2 几种典型的控制方法

#### A. 逼近法策略 (NN, Fuzzy logic)

以神经网络, 模糊逻辑为代表的逼近技术在非线性系统中被广泛运用。目前的大量文献是借助此类近似手段对非线性未知部分进行模糊或神经网络逼近, 在此基础上设计出所谓的神经网络模糊自适应控制。文献[18]针对不确定SISO非仿射系统, 结合返步方法、输入-状态稳定性分析与小增益原理, 给出了自适应神经网络控制方法。文献[19]针对非仿射非线性不确定系统, 研究了其在外界扰动存在下的自适应神经网络控制方法。

对于系统存在大量未知参数的情况, 文献[20]提出了基于RBF神经网络的控制方法, 并用于飞行器控制中。文[21]介绍了一种分散自适应神经网络控制策略, 该方法主要针对一类大规模非线性系统, 其中包括未知非仿射子系统和未知关联子系统。文[22]针对一类未知非仿射非线性系统, 结合投影算法, 通过建立非仿射系统的T-S模糊神经模型, 构造了相应的自适应控制算法。通过引入一种特殊Lyapunov函数, 利用均值定理、模糊系统逼近和返步方法, 文[23]建立了一种自适应模糊控制策略, 克服了由未知非仿射系统带来的困难及嵌套子系统的耦合影响。利用Lyapunov直接方法, 文[24]给出了基于SHLNDO的能够任意逼近扰动影响的证明。结合已有的反馈线性控制 (FLC) 和SHLNDO技巧, 文中给出了一种新的鲁棒自适应反馈线性控制 (RAFLC) 算法, 以及误差有界条件。对一类非仿射非线性系统, 文[25]利用一个自组织模糊系统来近似逼近未知非线性部分, 为达到系统稳定并满足  $\ell_2$  跟踪标准[26], 文中给出了相应的鲁棒自适应控制器设计方法。依据集中不

确定部分与额外扰动的总和，文[25]中的  $\ell_2$  跟踪标准提供了跟踪误差的清晰表述。

在关注连续非仿射系统的同时，出现了离散非仿射系统的研究。文[27]用NARMAX (Nonlinear Auto Regressive Moving Average with Exogenous Inputs) 模型描述一类离散非仿射非线性系统，利用隐函数定理，证明了这类系统存在隐理想反馈控制，进而通过MNNs (Multi-layer Neural Network)逼近该理想反馈控制，建立了自适应多层神经网络控制策略。其中的投影算法被用以保证神经网络权重的有界性，同时避免了对持续激励的要求。

## B. 返步策略

前节提到的文[18]即是结合返步策略得到的自适应神经网络控制方法。然而，在逼近模型中引入的高阶导数会对控制性能产生无法预料的影响，为了解决该问题，文[28]给出了一种基于RBFNN自适应返步控制方法。文[32]进一步考虑了存在不匹配不确定因素，给出了非仿射系统的自适应返步神经网络控制方法，确保闭环系统一致最终有界。文中引入了非线性跟踪微分环节，用以解决返步策略带来的运算量大的问题。

## C. 直接/间接自适应策略

文献[30, 31]利用模糊系统对非线性系统的动态逼近，建立了SISO 非仿射非线性系统的间接自适应模糊控制方法。文[32]首次利用Taylor级数展开将非仿射系统转化为仿射形式，同时给出了间接自适应模糊控制策略。同样，文[33]利用Taylor展开方法，基于一些假设，将转化而得的仿射系统未知非线性函数用模糊系统逼近，构建出一套新的控制律。在该控制方法中加入了新的光滑鲁棒控制项，用以抵消模糊逼近误差带来的影响。

然而，间接自适应方法存在控制奇异问题，即，控制算法运行过程中涉及分母可能为零的问题。为此，出现了针对非仿射系统的直接自适应模糊控制方法。利用隐函数定理，文[34-37]论证了能够实现控制目标的理想控制策略的存在性。隐函数定理虽然保证了理想控制器的存在，但没有给出控制器的构建方法。文[34-37]通过构造神经网络来逼近未知理想隐式控制策略；提出了一些假设，将系统动态特性分解为两部分：仅依赖于控制输入的已知部分和独立于控制输入的未知部分；其控制由三部分组成：基于理想闭环动态特性的定常控制项，用以近似不确定因素的自适应模糊项，用以补偿干扰和逼近误差的鲁棒控制项。需注意的是，在文[35,36]中，闭环系统稳定性在很大程度上依赖于线性控制和鲁棒控制项，而模糊自适应控制项在整个自适应控制系统中仅起辅助作用，大量仿真实验也证实了这点。以上方法中的参数自适应算法是基于Lyapunov方法设计的，实际输出与理想输出间的误差信号被用来更新和调整权重参数。文[38]针对一类不确定连续SISO非仿射系统，给出了一类直接

自适应控制策略，该方法主要基于对模糊逼近误差构成的二次成本函数最小化，利用梯度下降自适应算法对模糊系统的参数进行更新和调整。文[39]利用多层神经网络提出了一类不确定非仿射系统的直接自适应控制策略。在[40]基础上，[41]结合状态观测器、模糊参考系统与鲁棒控制技巧，提出了较[40]有所改进的鲁棒分散直接自适应输出反馈模糊控制方法。

## D. Lyapunov函数策略

对于形如

$$\dot{\Sigma} : \dot{x} = f_0(x) + g_1(x)u + g_2(x)u^2 + \cdots + g_l(x)u^l$$

或解析函数

$$\dot{x} = f(x, u)$$

的非仿射系统，如果存在一个正定且在  $\mathbf{R}^n$  上有意义的  $C^r (r \geq 1)$  函数  $V : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ ，且  $\Sigma$  满足相应的能控条件（由Lie bracket  $[f_0, g_i]$  描述），同时可以建立一个有界光滑状态反馈控制策略使得  $\Sigma$  全局渐进稳定，由此还可推出对系统  $\dot{x} = f(x, u)$  的光滑状态反馈控制算法。基于上述条件，文[42]建立了针对系统  $\Sigma$  的全局分离理论。

对于一类普遍存在的不含漂移的非线性系统，文[43]给出了通过时变状态反馈保证其全局渐进稳定的充分条件；结合有界状态反馈策略、李亚普诺夫方法和无损系统理论提出了一种时变光滑状态反馈控制新方法。文[44]主要研究由连续非线性常微分方程描述的非仿射系统的稳定性问题。首先，利用李亚普诺夫函数得到的稳定性条件给出了理论上的非结构化约束结果；然后，考虑了某些特殊的非仿射系统（一阶，二阶，三阶）的控制器设计问题（对于类似高阶系统也讨论了相关方法）。该文的主要贡献是对于此类系统给出了一种结构化的反馈设计思路。

## E. 基于观测器的控制及其他策略

观测器通常运用在系统状态不能完全测量的情形。基于观测器的方法也用到了非仿射系统中。文[45]运用隐函数定理及Taylor级数展开，提出了基于观测器的直接自适应模糊神经网络控制策略。利用T-S(Takagi-Sugeno)模糊模型近似系统中的非仿射部分，文[46]给出了基于观测器的自适应模糊控制算法，其中模糊模型的参数在线更新算法根据Lyapunov稳定理论得到。文[47]同样利用了T-S模糊逼近与观测器的结合，针对一类非仿射非线性系统设计出了基于观测器的T-S模糊输出跟踪控制策略，设计过程考虑了外界干扰的影响。文[48]研究了状态不完全可测的一类非仿射系统控制问题，通过在输入通道引入积分器，将系统转换为增广仿射非线性系统，提出了一种结合滑模和Luenberger观测器设计控制器的方法。

ILC(Iterative Learning Control)策略也曾被尝试用于非仿射控制系统设计中。利用输入输出数据，文[49]针对离散非线性非仿射系统给出了两级优化ILC策略。结合模糊神经网络，[50]探讨了一类具有重复控

制任务的非仿射非线性互联系统的ILC控制方法,该方法只需要部分子系统信息。ILC算法适用于具有重复运动性质的被控系统,应用于干扰小或干扰重复出现的情况,抗干扰能力不足;但其方式简单,所需先验知识和计算量较少。

## F. PID控制

由于PID控制算法具有结构简单的特点,在实际工业系统得到广泛使用。然而,由于非仿射系统自身的特性,关于非仿射系统的PID控制研究结果较少。文[51]针对SISO最小相位非仿射系统,构建了可实现稳定跟踪的PID控制算法,它在一定条件下等同于动态逆方法,因而可以利用奇异摄动理论证明其稳定性。文[52]利用时标分离和奇异摄动理论提出了一种基于动态逆逼近的非仿射控制方法。该方法与文[51]的广义PI方法在鲁棒特性方面有一定的等效性。最近,文[53]提出了基于PI的非仿射控制器设计方法,在系统满足李普希兹条件的前提下,该方法可以保证一致最终有界跟踪,且整个控制器设计无需任何系统具体信息,不涉及任何繁琐的控制器参数整定过程,并证明该方法还具有一定的容错能力。唯一需要的系统信息是,广义控制方向已知[53]。

## 3 非仿射控制系统设计中的几个问题

通过多种方法和技巧的结合,非仿射系统的控制研究取得了一些有意义的结果。同时我们注意到,在对非仿射控制系统进行设计的过程中,大部分方法需借助模型线性化或模糊/神经网络逼近等策略,或将非仿射系统转化为仿射系统(或分解为仿射部分与非仿射部分)进行处理,这些方法的结合运用为控制器设计提供便利的同时,也因模型精度的下降、系统关键信息的忽略等降低了控制策略的实用性及有效性。另一方面,大多数已有结果还没有系统考虑以下问题。

### 1) 容错能力

设备故障、设计失策以及模型系统不匹配等原因会带来系统运行不稳甚至更严重后果。由于系统设备缺乏自维护能力,执行器、传感器等容易出现失效问题。同时,由于噪声的存在及干扰的多样性,模型系统不匹配不可避免。基于这些因素,对非仿射系统而言如何设计有效的容错控制策略仍是极具挑战性的问题。容错控制研究已经取得了很多有意义的结果,然而,大部分是针对仿射系统,极少针对非仿射系统。文献[53]在这方面作了初步尝试。

### 2) 过渡过程

对于非仿射系统,在保证系统稳定的同时,如何确保系统具有良好的动态特性是值得关注的问题。系统动态特性包括控制误差收敛速度,控制误差正负超调量和稳态误差等。文[54]最先提出了基于速度转换的收敛速度可调方法并用于机器人控制,其中速度转换

函数包括指数函数和一大类其他函数。类似的方法在最近文献[55]中用到,并考虑了控制误差超调可控问题。其基本思想在于,为调整动态特性,引入性能函数:  $\rho(t) = (\rho_0 - \rho_\infty)\exp(-lt) + \rho_\infty$ 。其中  $\rho_0$ ,  $\rho_\infty$  和  $l$  为适当的正实数。在此基础上,引入输出误差转化函数,形如:

$$\varepsilon(t) = l \left( \frac{e(t)}{\rho(t)} \right)$$

其中  $l$  为光滑严格递增函数。之后建立的转换系统,其有界性被证明足以达到规定的性能。文[55]依然需要对系统模型进行近似化处理。文献[12]将这一方法用到容错控制中,但考虑的是仿射系统。将这一设计思路推广到非仿射系统的容错控制中无疑是有益的。

### 3) 控制信号初始冲击问题

为了达到良好的稳态控制效果,有时需要选取较大的控制增益,这将给控制系统带来一些负面影响,尤其在系统起步阶段,此时如果初始误差较大将会产生较大的控制冲击信号,可能对实际系统造成损害。如果控制信号为电压或电流信号,过大的冲击电压或电流会造成设备损坏。因此,在控制器设计过程中,需尽量避免较大的冲击性控制信号的产生。一种可能的解决办法是引入相对误差,使得任何非零实际误差都被转换为零或接近于零的相对误差,从而降低初始控制冲击。

## 4 结论

大多数实际工程系统本质上是非仿射的,研究专门针对非仿射系统的控制问题具有重要理论和实际意义。目前大多数控制方法主要是通过线性化或神经网络/模糊逼近等手段建立的。线性化方法将非仿射系统转换为仿射系统,然后进行控制器设计。很显然,线性化方法降低了系统模型的精确性,同时也可能使一些重要的非线性特征丢失,使得所设计控制策略的应用范围大为减小。神经网络和模糊逼近方法的有效性在很大程度上取决于所构造的神经-模糊单元是否足够复杂足够庞大,而且有关基函数/隶属度函数的选取有很大的随意性,使得这类控制器的实际效果不尽人意。可以说,有关非仿射系统的控制仍存在许多值得深入研究的问题,包括适用性、有效性和通用性等。

## 参考文献

- [1] C. A. Desoer and C. A. Lin, "Tracking and disturbance rejection of MIMO nonlinear systems with PI controller," IEEE Trans. On Automatic Control, vol. 30, no. 9, pp. 861-867, 1985.
- [2] L.X. Wang, "Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 1, no. 2, pp. 146-155, 1993.

- [3] S.C. Tong, T. Wang, J.T. Tang, "Fuzzy adaptive output tracking control of nonlinear systems," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 111, no. 2, pp. 169–182, 2000.
- [4] S.N. Huang, K.K. Tan, T.H. Lee, "Nonlinear adaptive control of interconnected systems using neural networks," *IEEE Transaction on Neural Networks*, vol. 17, no. 1, pp. 243–246, 2006.
- [5] H.X. Li, S.C. Tong, "A hybrid adaptive fuzzy control for a class of nonlinear MIMO systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 24–34, 2003.
- [6] B. Chen, X.P. Liu, "Fuzzy approximate disturbance decoupling of MIMO nonlinear systems by backstepping and application to chemical processes," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 13, no. 6, pp. 832–847, 2005.
- [7] S.S. Ge, C. Wang, "Adaptive neural control of uncertain MIMO nonlinear systems," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 15, no. 3, pp. 674–692, 2004.
- [8] Y. Zhang, P. Y. Peng, Z.P. Jiang, "Stable Neural Controller Design for Unknown Nonlinear Systems Using Backstepping," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 11, no. 6, pp. 1347 – 1360, 2000.
- [9] Mrdjan Jankovic, "adaptive nonlinear output feedback tracking with a partial high-gain observer and backstepping," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 42, no. 1, pp.106-113, 1997.
- [10] Niederlinski A., "A heuristic approach to the design of linear multivariable interacting control systems," *Automatica*, vol. 7, no. 6, pp. 691-701, 1971.
- [11] Saljak D. D., "Reliable control using multiple control systems," *International Journal of Control*, no. 31, no.2, pp. 303-329, 1980.
- [12] Wei Wang and Changyun Wen, "Adaptive actuator failure compensation control of uncertain nonlinear systems with guaranteed transit performance," *Automatica*, vol. 46, no. 12, pp. 2082-2091, 2010.
- [13] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, P.V. Kokotovic, *Nonlinear and Adaptive Control Design*, Wiley, New York, 1995.
- [14] A.S. Shiriaev, H. Ludvigsen, O. Egeland, A.L. Fradkov, "Swinging up of non-affine in control pendulum," in *Proceedings of American Control Conference*, San Diego, California, USA, pp. 4039–4044, 1999.
- [15] Nestruev J, *Smooth manifolds and observables*. Berlin: Springer. ISBN 0-387-95543-7.
- [16] Shiriaev AS, Fradkov AL, "Stabilization of invariant sets for nonlinear non-affine systems," *Automatica*, vol. 36, no. 11, pp. 1709-1715, 2000.
- [17] Salim Labiod and Thierry Marie Guerra, "Indirect adaptive fuzzy control for a class of non-affine nonlinear systems with unknown control directions," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 903-907, 2010.
- [18] C. Wang, D.J. Hill, S.S. Ge, G.R. Chen, "An ISS-modular approach for adaptive neural control of pure-feedback systems," *Automatica*, vol. 42, no. 5, pp. 723–731, 2006.
- [19] H.B. Du, H.H. Shao, P.J. Yao, "Adaptive neural network control for a class of low-triangular-structured nonlinear systems," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 17, no. 2, pp. 509–514, 2006.
- [20] Li Y, Sundararajun N, Saratchandran P, "Neuro-controller design for nonlinear fighter aircraft maneuver using fully tuned RBF networks," *Automatica*, vol.37, no.8, pp. 1293-1301, 2001.
- [21] Bahram karimi, Mohammad Bagher Menhaj, "Non-affine nonlinear adaptive control of decentralized large-scale systems using neural networks," *Information Sciences*, vol. 180, no. 17, pp. 3335-3347, 2010.
- [22] Wei-Yen Wang, Yi-Hsing Chien, Yih-Guang Leu, Tsu-Tian Lee, "Adaptive T-S fuzzy-neural modeling and control for general MIMO unknown nonaffine nonlinear systems using projection update laws," *Automatica*, vol. 46, no. 5, pp. 852-863, 2010.
- [23] Y. Liu, Wei W., "Adaptive fuzzy control for a class of uncertain non-affine nonlinear systems," *Information Sciences*, vol. 177, no. 18, pp. 3901-3917, 2007.
- [24] L. Zhu, P. Lu, "A new robust adaptive control scheme for non-affine nonlinear systems based on SHLNN disturbance observer," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 5, no. 6, pp. 1633-1642, 2009.
- [25] Pin Cheng Chen, Chi Hsu Wang and Tsu-Tian Lee, "Robust adaptive self-structuring fuzzy control design for nonaffine, nonlinear systems," *International Journal of Systems Science*, vol. 42, no. 1, pp. 149-169, 2011.
- [26] W. Y. Wang, M. L. Chan, C. C. Hsu, and T. T. Lee, " $H_\infty$  tracking-based sliding mode control for uncertain nonlinear systems via an adaptive fuzzy-neural approach," *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 32, no. 4, pp. 483-492, 2002.
- [27] S. S. Ge, J.Zhang, T. H. Lee, "Adaptive MNN control for a class of non-affine NARMAX systems with disturbances," *Systems & Control Letters*, vol. 53, no.1, pp. 1-12, 2004.
- [28] W. Y. Wang, C. M. Hong, "RBF neural network adaptive backstepping controllers for MIMO non-affine nonlinear systems," *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics San Antonio, TX, USA*, pp. 4946-4951, October 2009.
- [29] Z. Xu, J. Min, "Adaptive control of a class of non-affine systems," *IEEE International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling Workshop*, pp. 62 – 65, 2008.
- [30] R. Boukezzoula, S. Galichet, L. Foulloy, "Fuzzy adaptive control for non-affine systems," in *Proceedings of the IEEE Internat. Conf. Fuzzy Systems*, pp. 543–548, 2003.
- [31] P.-S. Yoon, J.-H. Park, G.-T. Park, "Adaptive fuzzy control of non-affine nonlinear systems using Takagi–Sugeno fuzzy models," in *Proceedings of the*

- IEEE Internat. Conf. Fuzzy Systems, pp. 642–645, 2001.
- [32] J. Wang, S. S. Ge, T. H. Lee, “Adaptive fuzzy sliding mode control of a class of nonlinear systems,” in *Proceedings of the Third Asian Control Conf.*, pp. 599–604, 2000.
- [33] Salim Labiod and Thierry Marie Guerra, “Indirect adaptive fuzzy control for a class of non-affine nonlinear systems with unknown control directions,” *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 903–907, 2010.
- [34] S. S. Ge, J. Zhang, “Neural-network control of non-affine nonlinear system with zero dynamics by state and output feedback,” *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 14, no. 4, pp. 900–918, 2003.
- [35] J.-H. Park, S.-H. Kim, “Direct adaptive output-feedback fuzzy controller for non-affine nonlinear system,” *IEE Proc. Control Theory Appl.*, vol. 151, no. 1, pp. 65–72, 2004.
- [36] J.-H. Park, G.-T. Park, S.-H. Kim, C.-J. Moon, “Direct adaptive self-structuring fuzzy controller for non-affine nonlinear system,” *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 153, no. 3, pp. 429–445, 2005.
- [37] T. Zhang, S.S. Ge, C.C. Hang, “Direct adaptive control of non-affine nonlinear system using multilayer neural networks,” in *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 515–519, 1998.
- [38] Salim Labiod, Thierry Marie Guerra, “Adaptive fuzzy control of a class of SISO non-affine nonlinear systems,” *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 158, no. 10, pp. 1126–1137, 2007.
- [39] Jin Yuqiang, Liang Ruisheng, Shen Hao. “Neural adaptive control for a class of nonlinear systems,” *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, vol. 22, no. 2, pp. 222–226, 2007.
- [40] Y. S. Huang, D. Q. Zhou, and X. Chen, “Decentralized direct adaptive output feedback fuzzy  $H_\infty$  tracking design of large-scale nonaffine nonlinear systems,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 58, no. 1, pp. 153–167, 2009.
- [41] Y. S. Huang, Min Wu, “Robust decentralized direct adaptive output feedback fuzzy control for a class of large-scale nonaffine nonlinear systems,” *Information Sciences*, vol. 181, no. 11, pp. 2394–2404, 2011.
- [42] Wen Lin, “Bounded smooth state feedback and a global separation principle for non-affine nonlinear systems,” *Systems & Control Letters*, vol. 26, no. 1, pp. 41–53, 1995.
- [43] Wen Lin, “Time-varying feedback control of nonaffine nonlinear systems without drift,” *Systems & Control Letters*, vol. 29, no. 2, pp. 101–110, 1996.
- [44] Emmanuel Moulay and Wilfrid Perruquetti, “Stabilization of nonaffine systems: a constructive method for polynomial systems,” *IEEE Trans. On Automatic Control*, vol. 50, no. 4, pp. 520–526, 2005.
- [45] Yih-Guang Leu, Wei-Yen Wang, and Tsu-Tian Lee, “Observer-based direct adaptive fuzzy-neural control for non-affine nonlinear systems,” *IEEE Trans. On Neural Networks*, vol. 16, no. 4, pp. 853–861, 2005.
- [46] Wen-Shyong Yu, “Observer-based adaptive fuzzy control design for a class of non-affine nonlinear systems,” *processing on 2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 2013–2017, 2008.
- [47] Wei-Yen Wang, Yi-Hsing Chien, and Tsu-Tian Lee, “Observer-based T-S fuzzy control for a class of general nonaffine nonlinear systems using generalized projection update laws,” *Fuzzy Systems*, accepted for publication, 2011.
- [48] Giorgio Bartolini and Elisabetta Punta, “Reduced-order observer in the sliding-mode control of nonlinear non-affine systems,” *IEEE Trans. On Automatic Control*, vol. 55, no. 10, pp. 2368–2373, 2010.
- [49] CHI Rong-Hu, Hou Zhong-Sheng, “Dual-stage optimal iterative learning control for nonlinear non-affine discrete-time systems,” *Acta Automatica Sinica*, vol. 33, no. 10, pp. 1061–1065, 2007.
- [50] Ying-Chung Wang and Chiang-Ju Chien, “Decentralized adaptive fuzzy neural iterative learning control for nonaffine nonlinear interconnected systems,” *Asian Journal of Control*, vol. 13, no. 1, pp. 94–106, 2011.
- [51] Justin Teo, Jonathan P. How, and Eugene Lavretsky, “Proportional-Integral Controllers for Minimum-Phase Non-affine-in-Control Systems,” *IEEE Trans. On Automatic Control*, vol. 55, no. 6, pp. 1477–1482, 2010.
- [52] N. Hovakimyan, E. Lavretsky, and C. Cao, “Dynamic inversion for multivariable non-affine-in-control systems via time-scale separation,” *Int. J. Control*, vol. 81, no. 12, pp. 1960–1967, Dec. 2008.
- [53] Q. Song and Y. D. Song, “PI-like Fault-tolerant Tracking Control of Nonaffine Systems with Actuator Failures,” *Acta Automatica Sinica* (under review).
- [54] Y. D. Song, R. H. Middleton and J. N. Anderson, “Study on the Exponential Path Tracking Control of Robot Manipulators via Direct Adaptive Methods,” *International Journal of Robotics and Autonomous Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 271–282, 1992.
- [55] Charalampos P. Bechlioulis and George A. Rovithakis, “Robust adaptive fuzzy control of non-affine systems guaranteeing transient and steady state error bounds,” in *Proceedings of the 17th Mediterranean Conference on Control & Automation, Greece*, pp. 862–867, 2009.