

船舶航迹控制鲁棒自适应模糊设计

李铁山^{1,2}, 杨盐生², 洪碧光², 秦永祥²

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030; 2. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 研究了船舶直线航迹控制问题. 基于Lyapunov稳定性理论, 将Nussbaum增益技术融入Backstepping设计方法之中, 利用模糊系统逼近系统中的未知非线性, 提出一种鲁棒自适应模糊控制算法. 该算法保证了闭环系统的信号是一致最终有界的, 使得系统输出收敛到零的一个较小邻域, 从而能够实现船舶的直线航迹控制; 而且, 该算法不需要高频增益符号的任何信息, 还解决了可能存在的控制器奇异值问题. 计算机仿真结果验证了控制器的有效性.

关键词: 船舶; 航迹控制; 非线性控制; 鲁棒自适应模糊控制; 虚拟控制增益

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Robust adaptive fuzzy design for ships track-keeping control

LI Tie-shan^{1,2}, YANG Yan-sheng², HONG Bi-guang², QIN Yong-xiang²

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

2. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: The problem of ship linear path-keeping control is discussed. With the help of Lyapunov stability theory, Combined Nussbaum gain with the backstepping techniques, a novel algorithm is then proposed by employing fuzzy systems as approximator of those unknown nonlinearities in the system. It is also proved that the proposed algorithm could guarantee the closed-loop system to be uniformly ultimately bounded and the output converges to a small neighborhood of zero, so that ship linear path-keeping control can be implemented. Finally, simulation results are presented to validate the effectiveness.

Key words: ships; track-keeping control; nonlinear control; robust adaptive fuzzy control; virtual control gain

1 引言(Introduction)

在海上运输中, 商船在两个转向点之间的长距离航行司空见惯. 为节省时间、缩短距离和节约成本, 传统的航向自动舵因其不能直接控制航迹偏差已不能满足要求^[1], 对船舶进行直线航迹控制非常具有针对性和实践性, 也因此引起人们极大的关注, 并很快成为当今船舶运动控制研究中的一个热点^[2~5].

2 Nussbaum引理(Nussbaum lemma)

引理 1^[6] 设 $V(\cdot)$ 和 $\kappa(\cdot)$ 为定义在 $[0, t_f)$ 上的光滑函数, 其中 $V(t) \geq 0, \forall t \in [0, t_f)$, 并且 $N(\cdot)$ 为一光滑Nussbaum型函数^[7]. 如果 $\forall t \in [0, t_f)$, 下面不等式成立:

$$V(t) \leq c_0 + e^{-c_1 t} \int_0^t g(x(\tau)) N(\kappa) \dot{\kappa} e^{c_1 \tau} d\tau + e^{-c_1 t} \int_0^t \dot{\kappa} e^{c_1 \tau} d\tau.$$

其中: 常数 $c_1 > 0$, $g(x(\tau))$ 为时变函数, c_0 表示某一适当的常数.

则 $V(t)$, $\kappa(t)$ 和 $\int_0^t g(x(\tau)) N(\kappa) \dot{\kappa} d\tau$ 在 $[0, t_f)$ 上必有界(注: 根据文[8], Prop.2), 如果闭环解有界, 则 $t_f = \infty$).

3 问题的描述(Problem formulation)

考虑有风浪流的船舶直线运动数学模型

$$\begin{cases} \dot{y} = U \sin \psi + V_c \sin \psi_c, \\ \dot{\psi} = r, \\ \dot{r} = f(r) + bu + \Delta', \end{cases} \quad (1)$$

式中: U 代表船速, $f(r)$ 是转首角速度 r 的未知非线性函数, V_c , ψ_c 表示定常流速和流向, Δ' 表示风等外界干扰不确定项, b 表示控制增益. 目标是设计控制器 u 能够使得航迹偏差 y 、航向 ψ 和 r 一致最终有界.

定义坐标变换^[4]

$$x_1 = \psi + \arcsin\left(\frac{ky}{\sqrt{1+(ky)^2}}\right), x_2 = r. \quad (2)$$

式中 $k > 0$ 为设计参数. 则式(1)可变为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(\cdot) + x_2 + \Delta_1, \\ \dot{x}_2 = f_2(x_2) + bu + \Delta_2, \\ \dot{y} = U \sin(x_1 - \arcsin(\frac{ky}{\sqrt{1+(ky)^2}})) + V_c \sin \psi_c, \\ \zeta = x_1, \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f_1(\cdot) = \frac{k}{1+(ky)^2} U \sin \psi$, $f_2(x_2) = f(r)$, $\Delta_1 = \frac{k}{1+(ky)^2} V_c \sin \psi_c$, ζ 表示系统的可调输出。

与文献[4]相似, 不难看出, 只要系统(3)的 $\dot{y}$ 子系统是零动态稳定的, 系统(3)就是一个最小相位系统, 进而可以简化设计. 为此, 先提出如下定理.

定理 1 系统(3)的 $\dot{y}$ 子系统是零动态一致最终有界稳定的, 进而, 系统(3)是一个最小相位系统.

证 显然系统(3)的相对阶为2, 且其零动态为:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= -\frac{kU}{\sqrt{1+(ky)^2}} y + V_c \sin \psi_c = \\ &= -\frac{kU}{\sqrt{1+(ky)^2}} y + \gamma(V_c, \psi_c). \end{aligned} \quad (4)$$

从式(4)中可以看出, 在没有外界干扰时($\gamma(V_c, \psi_c) = 0$), 该零动态是指数稳定的. 下面利用Lyapunov稳定性理论来证明该定理, 选取Lyapunov函数 $V_y = \frac{1}{2}y^2$, 易得

$$\begin{aligned} \dot{V}_y &= -\frac{kU}{\sqrt{1+(ky)^2}} y^2 + yV_c \sin \psi_c \leq \\ &= -\frac{kU}{\sqrt{1+(ky)^2}} y^2 + |y||V_c \sin \psi_c| \leq \\ &= -\frac{kU}{\sqrt{1+(ky)^2}} y^2 + k_c |y| \leq \\ &= -(\frac{kU}{\sqrt{1+(ky)^2}} - \frac{1}{4\rho^2}) y^2 + \rho^2 k_c^2. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: k_c 是 $|V_c \sin \psi_c|$ 的上界, $\rho > 0$ 为设计常数.

至此, 由一致最终有界定理可以得出结论: 只要 $\kappa(U, y) = (\frac{kU}{\sqrt{1+(ky)^2}} - \frac{1}{4\rho^2}) > 0$, 系统(3)的零动态(4)是一致最终有界稳定的. 而对于某一个 U , 给定一个 y , 通过调整设计参数 k 和 ρ , $\kappa(U, y) > 0$ 总能得到满足. 定理得证.

至此, 只要子系统 (x_1, x_2)

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \theta_1^T f'_1 + x_2 + \Delta_1, \\ \dot{x}_2 = f_2(x_2) + bu + \Delta_2 \end{cases} \quad (6)$$

得到镇定, 则系统(3)以至于系统(1)都得到了镇定.

假设 1 $b_i \neq 0$ 是符号未知的有界未知常数.

假设 2 不确定项 $\Delta_i(t, x)$, $i = 1, 2$, 满足

$$|\Delta_i(t, x)| \leq \lambda_i \phi_i(\bar{x}_i),$$

其中: ϕ_i 为已知非负光滑函数, λ_i 为正未知常数.

注 由于式(6)的第一个方程结构已知(由船舶运动学方程经坐标变换所得), 可将式(3)中的 f_1 分解为 $\theta_1^T f'_1$, 其中 $f'_1 = \frac{k}{1+(ky)^2} \sin \psi$, θ_1 表示船速 U 存在参数摄动; 同时将 Δ_1 分解为 $\Delta_1 = \lambda_1 \phi_1$, 其中函数 $\phi_1 = \frac{k}{1+(ky)^2}$, 外界干扰幅值 $\lambda_1 = V_c \sin \psi_c$ 为一个未知常数(假定流为定常均匀流). 因此, 根据上述特性和 $g_1 = 1$, 可以针对(6)的第一个方程采用常规Backstepping设计, 可避免在文[6]中采用的解耦Backstepping方法所出现的“过参数化”现象.

4 控制器设计(Controller design)

第1步 定义 $z_1 = x_1$, $z_2 = x_2 - \alpha_1$. 并取

$$V_1 = \frac{1}{2}z_1^2 + \frac{1}{2}\tilde{\theta}_1^T \Gamma_1^{-1} \tilde{\theta}_1 + \frac{1}{2}\gamma_1^{-1} \tilde{\lambda}_1^{*2}, \quad (7)$$

其导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1 \dot{z}_1 - \tilde{\theta}_1^T \Gamma_1^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_1 - \gamma_1^{-1} \tilde{\lambda}_1^* \dot{\tilde{\lambda}}_1^* = \\ &= z_1 (\hat{\theta}_1^T f_1 + z_2 + \alpha_1 + \tilde{\lambda}_1^* \bar{\phi}_1) - \tilde{\theta}_1^T (\Gamma_1^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_1 - f_1 z_1) - \\ &= \tilde{\lambda}_1^* (\gamma_1^{-1} \dot{\tilde{\lambda}}_1^* - \bar{\phi}_1 z_1). \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $\bar{\phi}_1 = \phi_1$, $\lambda_1^* = \lambda_1$, $\lambda_1^* = \hat{\lambda}_1^* + \tilde{\lambda}_1^*$; $\theta_1 = \hat{\theta}_1 + \tilde{\theta}_1$.

现在取中间镇定函数:

$$\alpha_1 = -c_1 z_1 - \hat{\theta}_1^T f_1 - \hat{\lambda}_1^* \bar{\phi}_1, \quad (9)$$

代入上式, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1 z_2 - c_1 z_1^2 - \tilde{\theta}_1^T (\Gamma_1^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_1 - f_1 z_1) - \\ &= \tilde{\lambda}_1^* (\gamma_1^{-1} \dot{\tilde{\lambda}}_1^* - \bar{\phi}_1 z_1). \end{aligned} \quad (10)$$

第2步 定义

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z_2^2 + \frac{1}{2}\tilde{\theta}_2^T \Gamma_2^{-1} \tilde{\theta}_2 + \frac{1}{2}\gamma_2^{-1} \tilde{\lambda}_2^{*2}. \quad (11)$$

因为

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_1 &= [\frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} (g_1 x_2 + \theta_1^T f'_1) + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y} \theta_1 \sin \psi + \\ &= \frac{\partial \alpha_1}{\partial \psi} x_2] + (\frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \phi_1 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y} \lambda_1 - \beta_2, \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $\beta_2 = -(\frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}_1} \dot{\tilde{\theta}}_1 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\lambda}_1} \dot{\tilde{\lambda}}_1^*)$, 则

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 = g_2(x)u + f_2'' + \Delta_2'. \quad (13)$$

其中:

$$\Delta_2' = \Delta_2 - ((\frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \phi_1 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y} \lambda_1),$$

$$f_2'' = (f_2(x_2) - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \psi} x_2) + \beta_2 -$$

$$[\frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} (x_2 + \theta_1^T f'_1) + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y} \theta_1 \sin \psi].$$

用乘积模糊推理机、单点模糊器、中心平均去模糊化和某类隶属函数构造的Mamdani型模糊系统 $y = F(x) = \sum_{i=1}^K y_i \xi_i(x) = \theta^T \xi(x)$ 逼近(根据一致逼近定理, 该模糊系统可以一致逼近任意实连续函数^[9]). 其中 $\xi(x) = [\xi_1(x), \xi_2(x), \dots, \xi_K(x)]^T$; $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_K]^T$ 为加权向量; $\xi_i(x) = \prod_{j=1}^n \mu_{h_j}^i(x_j) / \sum_{i=1}^K [\prod_{j=1}^n \mu_{h_j}^i(x_j)]$ 为模糊基函数.

定义

$$F_2(Z_2) = f_2'', Z_2 = [x_2, \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1}, \frac{\partial \alpha_1}{\partial y}, \beta_2]^T,$$

有

$$F_2(Z_2) = \theta_2^T \xi_2(Z_2) + \varepsilon_{Z_2}. \quad (14)$$

其中: $\xi_2(Z_2) = [\xi_1^2(Z_2), \xi_2^2(Z_2), \dots, \xi_K^2(Z_2)]^T$; $\theta_2^T = [\theta_1^2, \dots, \theta_K^2]^T$, ε_{Z_2} 为逼近误差, 有上界: $|\varepsilon_{Z_2}| \leq \varepsilon_{Z_2}^*$, $\varepsilon_{Z_2}^*$ 是其已知上界. 则有

$$\dot{z}_2 = g_2(x)u + \theta_2^T \xi_2(Z_2) + \varepsilon_{Z_2} + \Delta_2', \quad (15)$$

得 V_2 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -c_1 z_1^2 + z_2(z_1 + \hat{\theta}_2^T \xi^2(Z_2) + g_2 u + \hat{\lambda}_2^* \bar{\phi}_2) - \\ & \tilde{\theta}_1^T (\Gamma_1^{-1} \dot{\hat{\theta}}_1 - \xi^1(Z_1) z_1) - \tilde{\lambda}_1^* (\gamma_1^{-1} \dot{\hat{\lambda}}_1^* - \bar{\phi}_1 z_1) - \\ & \tilde{\theta}_2^T (\Gamma_2^{-1} \dot{\hat{\theta}}_2 - \xi^2(Z_2) z_2) - \tilde{\lambda}_2^* (\gamma_2^{-1} \dot{\hat{\lambda}}_2^* - \bar{\phi}_2 z_2). \end{aligned} \quad (16)$$

其中:

$$\begin{aligned} \lambda_2^* &= \max(\lambda_1^*, \lambda_2, \varepsilon_{Z_2}), \\ \bar{\phi}_2(\cdot) &= 1 + \phi_2 + (|\frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1}| \phi_1 + |\frac{\partial \alpha_1}{\partial y}|). \end{aligned}$$

现在借助Nussbaum增益处理系统中符号未知的不确定虚拟控制增益. 取控制律和自适应律如下:

$$u = N(\kappa_2) s_2, \quad (17)$$

$$\dot{\kappa}_2 = s_2 z_2, \quad (18)$$

$$s_2 = c_2 z_2 + z_1 + \hat{\theta}_2^T \xi^2(Z_2) + \hat{\lambda}_2^* \bar{\phi}_2 \tanh(\frac{z_2 \bar{\phi}_2}{\varepsilon_2}), \quad (19)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_1 = \Gamma_1 [f_1 z_1 - \sigma_1 (\hat{\theta}_1 - \theta_1^0)], \quad (20)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_2 = \Gamma_2 [\xi^2(Z_2) z_2 - \sigma_2 (\hat{\theta}_2 - \theta_2^0)],$$

$$\dot{\hat{\lambda}}_i^* = \gamma_i z_i \bar{\phi}_i \tanh(\frac{z_i \bar{\phi}_i}{\varepsilon_i}) - \gamma_i \sigma_{\lambda_i} (\hat{\lambda}_i^* - \lambda_i^0), \quad i = 1, 2. \quad (21)$$

代入式(16), 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -\sum_{i=1}^2 c_i z_i^2 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sigma_i |\tilde{\theta}_i|^2 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sigma_{\lambda_i} |\tilde{\lambda}_i^*|^2 + \\ & \delta_2 + (g_2 N(\kappa_2) + 1) \dot{\kappa}_2 \leq \\ & -d_2 V_2 + (g_2 N(\kappa_2) + 1) \dot{\kappa}_2 + \delta_2, \end{aligned} \quad (22)$$

$$d_2 := \min\{c_1, c_2, \frac{\sigma_i}{\lambda_{\max}(\Gamma_i^{-1})}, \sigma_{\lambda_i} \gamma_i\}, i = 1, 2,$$

$$\delta_2 = 0.2785 \sum_{i=1}^2 \lambda_i^* \varepsilon_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sigma_i |\theta_i - \theta_i^0|^2 +$$

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sigma_{\lambda_i} |\lambda_i^* - \lambda_i^0|^2.$$

设 $\rho_2 = \delta_2/d_2$, 在式(22)两端乘以 $e^{d_2 t}$, 再对其在 $[0, t]$ 上进行积分, 得

$$V_2 \leq \rho_2 + V_2(0) + e^{-d_2 t} \int_0^t (g_2 N(\kappa_2) + 1) \dot{\kappa}_2 e^{d_2 \tau} d\tau. \quad (23)$$

根据上述过程以及引理1, 可得如下结论:

定理2 针对系统(6), 鲁棒自适应模糊控制律(17)和中间控制函数(9)及参数自适应律(18)~(21), 可以使得闭环系统的所有信号以及系统的状态一致最终有界.

5 应用实例与仿真(Application example and simulation)

在模糊系统(14)中, 将每一个变量划分为5个模糊集, 其隶属函数分别取为

$$\begin{aligned} \mu_i^k(x) &= \exp(-\frac{(x + 0.5k)^2}{0.2}), \\ i &= 1, 2, 3, 4, 5; k = 2, 1, 0, -1, -2. \end{aligned}$$

在仿真中采用大连海事大学远洋实习船“育龙”轮实船数据参数^[4]. 初始条件选为 $y_0 = 500$ m, $\psi_0 = 10^\circ$; 外界干扰信号取为 $\Delta_1 = 0.5$, $\Delta_2 = 0.1$. 取Nussbaum函数 $N(\kappa) = \kappa^2 \cos \kappa$, $\kappa(0) = 0.5\pi$. 利用MATLAB Simulink工具箱进行仿真, 结果如图1所示.

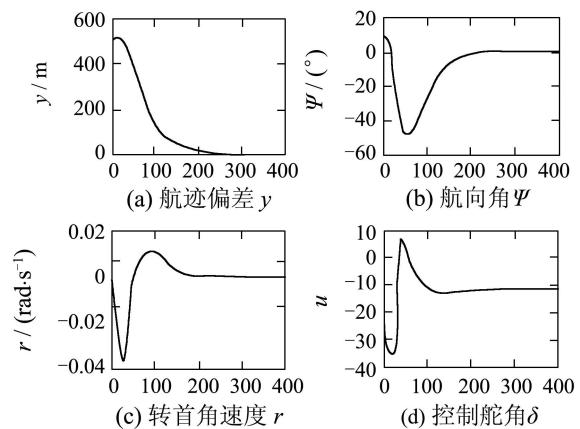


图1 定常风流干扰下, 本文控制器下的历时曲线

Fig. 1 Time response with the proposed controller

图1表明, 在定常风流作用下, 本节提出的鲁棒自适应模糊控制器可以使得船舶的航迹偏差以指数速率渐近收敛到零点的一个较小邻域(该邻域的大小可以通过调整设计参数来使之尽可能地小). 值得注意的是, 文献[2~5]中都没有考虑流对船舶位置产生

的影响,因而所设计的控制器不能抑制“流致”航迹偏差. 仿真结果验证了本文控制器具有较好的控制性能和鲁棒性.

6 结论(Conclusion)

本文针对船舶直线航迹控制问题,基于Lyapunov稳定性理论,将Nussbaum增益技术融入Backstepping方法,提出一种鲁棒自适应模糊控制算法,保证了闭环系统的信号是一致最终有界的,从而实现了船舶在恒定流干扰情况下的直线航迹控制.

参考文献(References):

- [1] FOSSEN T I. *Recent Developments in Ship Control Systems Design*[M]. London: Sterling Publications Limited, 2000: 115 – 116.
- [2] PETTERSEN K Y, LEFEBER E. Way-point tracking control of ships[C] // *Proc of IEEE Conf on Decision and Control*. New York: IEEE Press, 2001, 1: 940 – 945.
- [3] 李铁山, 杨盐生, 郑云峰. 不完全驱动船舶航迹控制输入输出线性化设计[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(7): 945 – 948. (LI Tieshan, YANG Yansheng, ZHENG Yunfeng. Input-output linearization designs for straight-line tracking control of underactuated ships[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(7): 945 – 948.)
- [4] 李铁山, 杨盐生. 基于耗散理论的不完全驱动船舶直线航迹控制设计[J]. 应用科学学报, 2005, 23(2): 204 – 208. (LI Tieshan, YANG Yansheng. Robust design for linear-course trajectory control for underactuated ships via dissipation theory[J]. *J of Applied Sciences*, 2005, 23(2): 204 – 208.)
- [5] LI T S, YANG Y S, HONG B G. Adaptive robust dissipative designs on strait-line trajectory control for underactuated ships[J]. *J of Systems Engineering and Electronics*, 2006, 17(1): 177 – 181.
- [6] GE S S, HONG F, LEE T H. Adaptive neural control of nonlinear time-delay systems with unknown virtual control coefficients[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 2004, 34(1): 499 – 516.
- [7] NUSSBAUM R D. Some remarks on the conjecture in parameter adaptive control[J]. *Systems & Control Letters*, 1983, 3(5): 243 – 246.
- [8] RYAN E P. A universal adaptive stabilizer for a class of nonlinear systems[J]. *System & Control Letters*, 1991, 16(3): 209 – 218.
- [9] WANG L X. *A Course in Fuzzy Systems and Control*[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1997.

作者简介:

李铁山 (1968—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为非线性控制、模糊控制及其在船舶运动控制中的应用, E-mail: tieshanli@126.com;

杨盐生 (1957—2005), 男, 教授, 研究方向为非线性控制、自适应控制、鲁棒控制、模糊控制及其在船舶运动控制中的应用;

洪碧光 (1955—), 男, 教授, 研究方向为船舶运动与控制、船舶操纵与安全评价, E-mail:hongbiguang@tom.com;

秦永祥 (1976—), 男, 硕士生, 目前研究方向为交通信息工程及控制, E-mail: qingyongxiang@163.com.

(上接第444页)

- [4] WILSON W J, HULLS C C, BELL G S. Relative end-effector control using Cartesian position based visual servoing[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1996, 12(5): 684 – 696.
- [5] DISTANCE C, ANGLANI A, TAURISANO F. Target reaching by using visual information and Q-learning controllers[J]. *Autonomous Robots*, 2000, 9(1): 41 – 50.
- [6] WILLIAMS R L. Simple statistical gradient-following algorithms for connectionist reinforcement learning[J]. *Machine Learning*, 1992, 8(3-4): 229 – 256.
- [7] SUTTON R S. Learning to predict by the methods of temporal differences[J]. *Machine Learning*, 1988, 3(1): 9 – 44.
- [8] WATKINS C J. *Learning from delayed rewards*[D]. England: University of Cambridge, 1989.
- [9] CICHOSZ P, MULAWKA J J. Fast and efficient reinforcement learning with truncated temporal differences[C] // *Proc of Int Conf on Machine Learning*. San Francisco: Morgan Kaufman, 1995: 99 – 107.

作者简介:

叶剑 (1980—), 男, 主要研究方向为自主机器人以及计算智能, E-mail: sword_nesta@hotmail.com;

乔俊飞 (1968—), 男, 教授, 主要研究方向为智能优化与智能控制, E-mail: junfeiq@bjut.edu.cn;

李明爱 (1966—), 女, 北京工业大学电控学院副教授, 主要研究方向为智能控制理论、神经元控制及在机器人领域中应用;

阮晓钢 (1958—), 男, 北京工业大学电控学院博士生导师, 主要研究方向为人工智能以及生物信息学.