

# 改进的人工鱼群算法在机器人控制中的应用

刘晓丽,熊良鹏

(成都理工大学 工程技术学院,四川 乐山 614000)

**摘要:**研究机器人的自抗扰控制策略,先完成两连杆机械臂的正弦运动控制,再实现六自由度机器人对做圆周运动的目标的跟踪控制,构建了利用 Simulink 进行仿真的系统模型。针对控制器的参数选择和优化问题,引入改进的人工鱼群算法,编写了算法的 Matlab 程序,通过代码调用 Simulink 模型并实时更新系统参数,经过大量的仿真实验,达到了预期目标。实验结果验证了算法的有效性。研究成果对于优化机器人的控制方法具有一定的参考价值。

**关键词:**自抗扰控制器;人工鱼群算法;参数优化;机器人控制

中图分类号:TP301;TP342

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)05-0200-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.05.047

## Application of Robot Control Using Improved Artificial Fish Swarm Algorithm

LIU Xiao-li, XIONG Liang-peng

(Engineering and Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan 614000, China)

**Abstract:** The robot control strategy is researched. The sinusoidal motion control of the two-link manipulator is completed firstly and then the circular motion target tracking control of six degree-of-freedom robot is achieved. The Simulink models of control system are constructed. To solve the problem of setting and optimizing controller parameters, the improved artificial fish swarm algorithm is introduced and the Matlab program of the algorithm is wrote. Simulink models are called by the code and system parameters are updated in real-time. After a lot of simulation experiments, the desired goal is achieved and the simulation results verify the effectiveness of the proposed algorithm. The research results have a certain reference value for optimizing control method of robot.

**Key words:** Active Disturbance Rejection Controller (ADRC); Artificial Fish Swarm Algorithm (AFSA); parameter optimization; robot control

## 0 引言

机器人手眼协调系统是将机械臂及其末端执行器的运动与视觉传感器所获得的图像反馈信息相结合而形成的具备一定智能的控制系统,能够实现机器人的定位和跟踪控制。达到好的机器人视觉控制有较大的难度,也一直是机器人控制中具有挑战性的课题,吸引着很多学者的注意力<sup>[1-3]</sup>。

自抗扰控制器(Active Disturbance Rejection Controller, ADRC)是于 20 世纪 90 年代产生的一种非线性 PID 控制器<sup>[4]</sup>。ADRC 融合了经典 PID 控制技术的精华和现代控制理论的成果,利用非线性控制律达到良好的控制性能,可以自动补偿被控对象的模型内扰和外界干扰。多年来已经出现了大量关于 ADRC 参数

整定问题的研究,初步统计主要有经验试凑法、线性简化法、指标优化法等。

人工鱼群算法(Artificial Fish Swarm Algorithm, AFSA)是一种模拟鱼的觅食、聚群和追尾等主要行为的群体智能算法<sup>[5-7]</sup>,通过人工鱼个体局部寻优,进而在人工鱼群中突现全局最优。该算法具有并行性、简单性、全局性、快速性等优点,主要缺点是优化结果的精度有限而且后期的搜索带有一定的盲目性,故有了许多改进算法的版本。文献[8]对人工鱼的视野和步长采用自适应的选取方法,使其在算法运行初期保持最大值,并逐渐由大变小。

文中将该改进算法应用到自抗扰控制器参数的选取和优化中,实现了两连杆机械臂的运动控制和六自

由度机器人的无标定手眼协调控制。

## 1 自抗扰控制器

为了克服传统 PID 控制器的一些缺点,改善控制效果,韩京清等学者设计了主要由跟踪微分器、扩张状态观测器和非线性状态误差反馈等构成的自抗扰控制器。

通过跟踪-微分器(TD)安排过渡过程,用来缓解超调量与快速性之间的矛盾,也可以扩大误差及其各阶微分的反馈增益的选取范围,从而更容易整定参数;还可以扩大反馈增益所能适应的对象参数范围,增强控制器的鲁棒性。

扩张状态观测器(ESO)是自抗扰控制器的核心部分,它借用了状态观测器的一般思想,将多种扰动作用扩张成新的状态变量,并用特殊的反馈机制建立了观测器,用以观测被扩张的状态。它不依赖扰动的产生模型,也不需要直接测量就能得到扰动的估计值,还可以将非线性被控对象用非线性状态反馈化为“积分器串联型”,并且在一定范围内具有较好的鲁棒性和适应性。

非线性状态误差反馈(NLSEF)将系统分割成采用不同控制增益的多个线性区间,误差小则增益大,误差大则增益小,从而快速获得良好的调节效果,而且系统的控制精度得以提高,静态误差呈数量级减小。

以一阶自抗扰控制器为例,其结构图如图1所示。

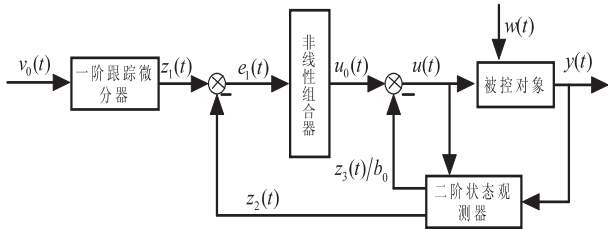


图1 一阶自抗扰控制器结构图

TD:

$$\dot{z}_1 = -rsat(z_1 - v_0, \delta_0) \quad (1)$$

ESO:

$$\begin{cases} e = z_2 - y \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{01} \text{fal}(e, \alpha, \delta_1) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_{02} \text{fal}(e, \alpha, \delta_1) \end{cases} \quad (2)$$

NLSEF:

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - z_2 \\ u = \beta \text{fal}(e_1, \alpha, \delta) - z_3/b_0 \end{cases} \quad (3)$$

以上各模块中的非线性函数的方程为:

$$\text{sat}(x, \delta) = \begin{cases} \text{sign}(x) & |x| \geq \delta \\ x/\delta & |x| < \delta \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{fal}(x, \alpha, \delta) = \begin{cases} |x|^\delta \text{sign}(x) & |x| \geq \delta \\ x/\delta^{1-\alpha} & |x| < \delta \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $r, \delta_0, \beta_{01}, \beta_{02}, b_0, \alpha, \delta_1, \delta, \beta$  均为待调节参数。

自抗扰控制器寻求一种解决不确定性为高度非线性以及非参数化情形的自适应控制问题。因为 ADRC 的思想框架中并未限定被估计的不确定动态的具体数学描述,并且它的控制结构就是一般的非线性形式,故自抗扰控制的思想可以应用于众多领域,吸引了众多学者进行各种应用研究。然而,控制器中有较多参数需要人为设定,成为其应用中的一个难点所在,因此,文中引入人工鱼群算法来解决此问题。

## 2 改进的鱼群算法

近年来,人工鱼群算法(AFSA)越来越多地应用到各种工程之中,也成为了研究领域的热点<sup>[9-12]</sup>。它是一种把鱼群寻找食物的行为类比为社会行为的智能优化算法。种群的每个个体称为一个人工鱼(AF),每个人工鱼游动在一个搜索空间,并根据自己的经验以及附近的伙伴来寻找有食物的地区。随着共享的社会信息、来自于之前搜索的经验和发现的食物浓度,AFSA有能力在很宽的空间找到更好的解决方案,有效地自适应搜索到全局最优。

人工鱼所在环境主要包括解空间和其他人工鱼的状态。它的下一个行为取决于它现在的状态和地方环境状况,包括解决目前问题的特性和周围同伴的状态。人工鱼将会通过自己的活动影响环境和它同伴的活动。

向量  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  是人工鱼个体的状态,其中的  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  是需要优化的变量,  $Y=f(X)$  是人工鱼的食物浓度,其中,  $Y$  为目标函数值。Visual 是人工鱼的视野范围, Step 是人工鱼移动的步长,  $\delta$  是拥挤度因子。人工鱼视野和步长的调整方法如式(6):

$$\begin{cases} \text{Visual} = \text{Visual} \times a + \text{Visual}_{\min} \\ \text{Step} = \text{Step} \times a + \text{Step}_{\min} \\ a = e^{-30(t/T_{\max})} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\text{Visual}_{\min}$  和  $\text{Step}_{\min}$  分别是相应变量的最小值;  $t$  是当前迭代次数;  $T_{\max}$  是最大迭代次数;  $a$  的变化速率  $s$  为大于1的整数。

(1) 觅食行为。

设  $X_i$  是人工鱼的当前状态,  $X_j$  是随机选择的另一个状态,并且不超过其视野范围。以求极小值为例,如果  $Y_j < Y_i$ ,则向  $X_j$  方向移动一步,否则,重新随机选择一个状态  $X_j$ ,并再次判断是否满足移动的条件。如果

进行 try\_number 次仍不能向  $X_j$  方向移动,那么人工鱼将随机移动一步。

(2) 聚群行为。

设  $X_i$  是人工鱼的当前状态,  $X_c$  是人工鱼的中心位置,  $n_f$  是人工鱼视野范围内的伙伴数量, 如果  $Y_c < \delta Y_i / n_f$ , 则意味着人工鱼的中心具有较好的适应度值并且周围的人工鱼数量不是很多, 那么它就向当前的中心方向移动一步, 否则执行觅食行为。

(3) 追尾行为。

设  $X_i$  是人工鱼的当前状态,  $X_j$  是在其视野范围内的最优状态, 如果  $Y_j < \delta Y_i / n_f$ , 则意味着  $X_j$  具有较好的适应度值并且周边环境不是很拥挤, 那么它就向  $X_j$  方向前进一步, 否则执行觅食行为。

人工鱼群算法很简单, 需要调整的算法参数不多。因此, AFSA 吸引了众多来自不同领域的学者的关注。一般情况下, 证明 AFSA 是可以稳健快速解决工程优化问题的。然而, 作为一个新型的优化方法, AFSA 仍处于起步阶段, 很有必要作进一步的研究和发展。

### 3 基于改进鱼群算法的 ADRC 参数优化

仿真实验中采用如下离散一阶 ADRC 方程:

$$\begin{cases} z_1(n+1) = z_1(n) - hrsat(z_1(n) - z_0, \delta_0) \\ e = z_2(n) - y \\ z_2(n+1) = z_2(n) + h(z_3(n) - \beta_{01}fal(e, \alpha_{01}, \delta_1) + b_0u(n)) \\ z_3(n+1) = z_3(n) - h\beta_{02}fal(e, \alpha_{02}, \delta_2) \\ e_1 = z_1(n) - z_2(n) \\ u(n) = \beta fal(e_1, \alpha, \delta) - z_3(n)/b_0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, 非线性函数 sat, fal 见式(4)和式(5);  $h$  是仿真步长;  $z_0$  是给定输入;  $y$  是实际输出; 可调节参数有  $r, \delta_0, \beta_{01}, \beta_{02}, \alpha_{01}, \alpha_{02}, \delta_1, \delta_2, b_0, \alpha, \delta, \beta$ 。一般做法是使  $0 < \alpha_i \leq 1.0$ , 并保持选定的  $\alpha_i, \delta_i$  不变, 只对起主要作用的决策变量  $\beta, \beta_{01}, \beta_{02}$  等进行优化。

改进的人工鱼群算法寻找控制器参数的步骤如下<sup>[13-14]</sup>:

(1) 对人工鱼群进行初始化, 选定人工鱼种群规模大小、拥挤度标准和试探次数的初值等参数;

(2) 按要求计算人工鱼的目标函数值, 若优于公告板, 则用自身状态取代公告板状态, 并找出当前最优值及其对应的人工鱼个体;

(3) 进行视野范围和步长的自适应变化操作;

(4) 当前鱼群通过执行觅食、追尾、聚群等行为进行位置更新;

(5) 判断是否达到最大迭代次数, 若不满足, 返回(2), 继续循环; 若满足, 则结束运行, 输出最优解。

## 4 仿真研究

### 4.1 两连杆机械臂

两连杆长度分别为  $l_1$  和  $l_2$ , 其运动方程为:

$$\begin{cases} x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (8)$$

其逆雅可比为:

$$J^{-1}(q) = \frac{1}{l_1 l_2 \sin \theta_2} \begin{bmatrix} l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ -l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中,  $(x, y)$  为连杆 2 末端的位置矢量;  $(\theta_1, \theta_2)$  为关节矢量。

仿真中取  $l_1 = 0.8 \text{ m}$  和  $l_2 = 0.5 \text{ m}$ ; 给定输入为幅值  $1.0 \text{ m}$ , 频率  $0.2 \text{ rad/s}$  的正弦信号。为使系统快速性更好, 避免相位延迟, 特去掉 ADRC 中的 TD 模块。采用鱼群算法优化式(7)中的  $\beta_{01}, \beta_{02}$  和  $\beta$ , 鱼群大小为 20, 进化代数 50, 目标函数是使误差量最小, 最后得到 ADRC 参数为

$$\begin{aligned} \delta &= 0.2, \beta = 27.1589, \beta_{01} = 3.5629, \beta_{02} = 3.0225 \\ \alpha &= 0.25, \delta_1 = \delta_2 = 0.03, \alpha_{01} = \alpha_{02} = 0.05, b_0 = 0.8 \end{aligned}$$

仿真结果如图 2 和图 3 所示。

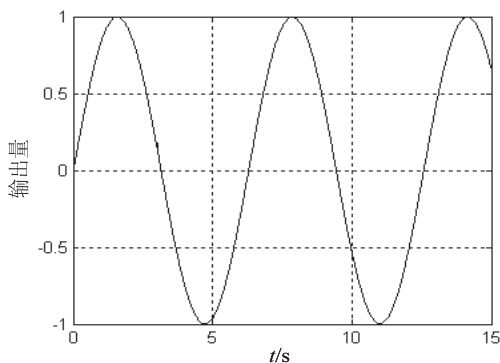


图2 输出量

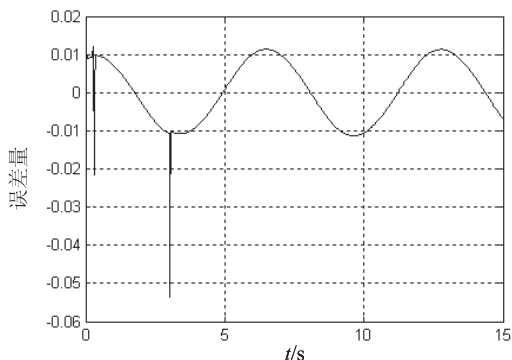


图3 误差量

由图可知, 采用鱼群算法优化 ADRC 实现了平面两连杆水平方向的跟踪控制, 误差为  $0.01 \text{ m}$ 。

4.2 六自由度机器人

MOTOMAN-SV3 机器人有六个自由度且六个关节均为旋转关节,六个坐标轴对应六个关节,采用 D-H 方法描述各连杆坐标系,由公式和连杆参数计算得到机器人的正向运动学方程和机器人的雅可比矩阵。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\varphi - \sin\psi\cos\varphi & \cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\varphi + \cos\psi\cos\varphi & \sin\psi\sin\theta\cos\varphi + \cos\psi\sin\varphi \\ -\cos\theta & \cos\theta\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix}$$

(10)

内部参数包括:有效焦距 $f=6\text{ mm}$ ,即图像平面到投影中心的距离; $x,y$  方向的比例系数  $N_x=0.008\ 2$ ,  $N_y=0.007\ 2$ ,即 CCD 阵列上  $x,y$  方向两相邻像素点间的距离;CCD 阵列的中心在图像中的位置  $X_c=165$ ,  $Y_c=140$ 。

三维世界坐标系中点  $W(x_w,y_w,z_w)$  (单位:mm)到图像坐标  $P(p_x,p_y)$  (单位:pixel)的变换关系为:

$$P = \begin{bmatrix} f_x \frac{(\mathbf{R}\mathbf{W} + \mathbf{T})^T \vec{x}_0}{(\mathbf{R}\mathbf{W} + \mathbf{T})^T \vec{z}_0} + X_c \\ f_y \frac{(\mathbf{R}\mathbf{W} + \mathbf{T})^T \vec{y}_0}{(\mathbf{R}\mathbf{W} + \mathbf{T})^T \vec{z}_0} + Y_c \end{bmatrix} = g(W)$$

(11)

其中, $f_x=f/N_x,f_y=f/N_y,\vec{x}_0=[1\ 0\ 0]^T,\vec{y}_0=[0\ 1\ 0]^T,\vec{z}_0=[0\ 0\ 1]^T$ 。

目标作圆周运动(单位:pixel):

$$\begin{cases} x = 50\sin t/5 \\ y = 50\cos t/5 + 20 \end{cases}$$

(12)

鱼群算法优化六个决策变量即水平方向的 $\beta,\beta_{01},\beta_{02}$ 和垂直方向的 $\beta,\beta_{01},\beta_{02}$ ,鱼群大小为30,进化代数数为150,目标函数的形式为:

$$J = \int_0^\infty (te^2(t) + |u(t)|)dt$$

(13)

获得优化后的 ADRC 参数如下:

水平方向:

$$\alpha = 0.75, \delta = 0.5, \beta = 45.36, \beta_{01} = 0.254\ 4, \beta_{02} = 0.021\ 4$$

$$r = 12, \delta_0 = 0.5, \delta_1 = \delta_2 = 0.5, \alpha_{01} = \alpha_{02} = 0.95, b_0 = 0.55$$

垂直方向:

$$\alpha = 0.75, \delta = 0.5, \beta = 34.26, \beta_{01} = 0.745\ 5, \beta_{02} = 0.033\ 2$$

$$r = 12, \delta_0 = 0.5, \delta_1 = \delta_2 = 0.5, \alpha_{01} = \alpha_{02} = 0.95, b_0 = 0.55$$

仿真结果如图4至图6所示。

由仿真结果可知,机器人跟踪上给定目标的时间不超过5 s,稳定后的跟踪误差小于2个像素,达到了较好的控制效果。

摄像机参数包括外部参数和内部参数。外部参数是由三个分量  $T_x,T_y,T_z$  构成的平移矢量  $\mathbf{T}=[40,10,1\ 500]^T$ ,以及用欧拉角即倾侧角 $\psi=80^\circ$ 、俯仰角 $\theta=-70^\circ$ 、旋转角 $\varphi=-160^\circ$ 表示的旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 。

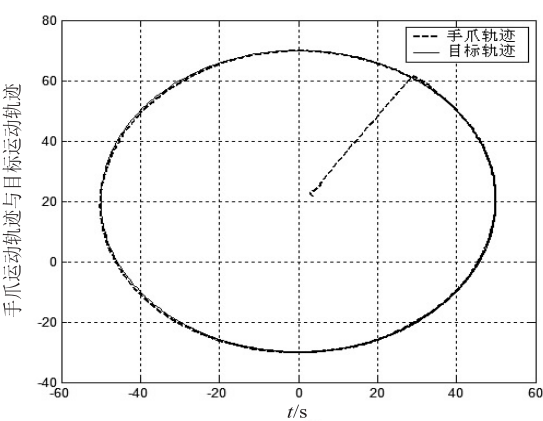


图4 手爪运动轨迹与目标运动轨迹

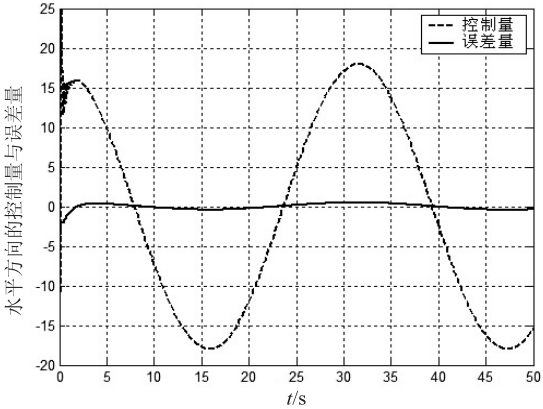


图5 水平方向的控制量与误差量

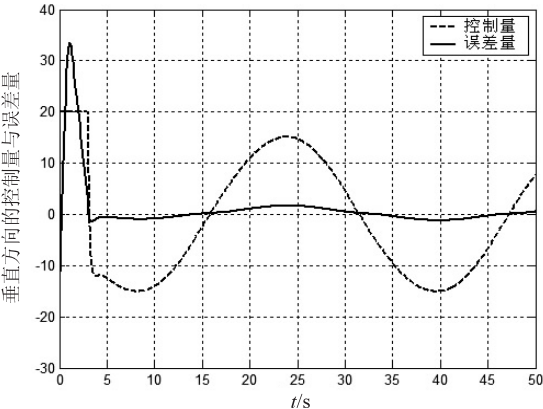


图6 垂直方向的控制量与误差量

5 结束语

由于自抗扰控制系统的应用日益广泛,对控制器



参数整定的要求也越来越高,很多学者已提出了大量有效的算法。文中提出了改进的人工鱼群算法进行控制器主要参数的优化选取,在机器人跟踪控制仿真实验中,获得了满意的实验结果。

#### 参考文献:

- [1] 苏剑波. 机器人无标定手眼协调[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [2] 马文罗,胡建新,钱东海. 基于视觉的运动目标伺服跟踪研究[J]. 计算机工程,2012,38(8):183-185.
- [3] Cardenas A, Goodwine B, Skaar S, et al. Vision-based control of a mobile base and on-board arm[J]. International Journal of Robotics Research, 2003, 22(9):677-698.
- [4] 汪明媚,程启明,王映斐,等. 基于自适应 GA 自抗扰控制在蒸汽发生器水位控制中的应用研究[J]. 核动力工程, 2011, 32(6):28-33.
- [5] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法-人工鱼群算法[D]. 杭州:浙江大学,2003.
- [6] 徐晓晴,朱庆保. 动态环境下基于多人工鱼群算法和避碰规则库的机器人路径规划[J]. 电子学报,2012,40(8):1694-1700.
- [7] 潘 喆,吴一全. 二维 Otsu 图像分割的人工鱼群算法[J]. 光学学报,2009,29(8):2115-2121.

(上接第 199 页)

台设备联合起来控制,合理分配每台设备,提高组合利用率。而红绿灯设计也可采用这样的思想,实现对红绿灯的群控能够更大限度地利用道路资源<sup>[13,15]</sup>,提高人们出行的效率。

#### 参考文献:

- [1] McKenney D, White T. Distributed and adaptive traffic signal control within a realistic traffic simulation[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(1):574-583.
- [2] 青 木. 德国红绿灯根据车流变长短[J]. 金融博览, 2011(15):23-23.
- [3] Sun C. An investigation in the use of inductive loop signatures for vehicle classification[J]. Partners for Advanced Transit and Highways, 2000, 4:4-15.
- [4] 王成勇. 智能交通灯控制系统[J]. 广东技术师范学院学报, 2006(4):92-94.
- [5] Orozco J, Barceló J. Reactive and proactive routing strategies with real-time traffic information[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012, 39:633-648.
- [6] Cheng H, Gau V, Huang C, et al. Advanced formation and delivery of traffic information in intelligent transportation systems

- [8] 王联国,洪 毅,赵付青,等. 一种改进的人工鱼群算法[J]. 计算机工程,2008,34(19):192-194.
- [9] Cheng Y M, Liang L, Chi S C, et al. Determination of the critical slip surface using artificial fish swarms algorithm[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(2):244-251.
- [10] Rocha A M A C, Martins T F M C, Fernandes E M G P. An augmented Lagrangian fish swarm based method for global optimization[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2011, 235(16):4611-4620.
- [11] Shen Wei, Guo Xiaopen, Wu Chao, et al. Forecasting stock indices using radial basis function neural networks optimized by artificial fish swarm algorithm[J]. Knowledge-based Systems, 2011, 24:378-385.
- [12] Lu Zhigang, Liu Jian, Wu Jie, et al. Application of artificial fish swarm algorithm in power distribution network planning[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3):565-568.
- [13] 彭 勇,唐国磊,薛志春. 基于改进人工鱼群算法的梯级水库群优化调度[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(6):1118-1125.
- [14] 汪 照,李有明,陈 斌,等. 基于鱼群算法的 OFDMA 自适应资源分配[J]. 物理学报, 2013, 62(12):128802.

- [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(9):8356-8368.
- [7] Li X, She Y, Luo D, et al. A traffic state detection tool for free-way video surveillance system[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013, 96:2453-2461.
- [8] 夏 丽. 基于视频检测技术的车流量统计算法研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
- [9] 许火勇. 自适应交通灯智能控制系统[J]. 科技风, 2011(11):91-91.
- [10] 孙玉芳. 一种新型的智能交通灯控制系统[J]. 黑龙江科技信息, 2011(24):71-71.
- [11] 朱胜华,胡福乔,施鹏飞. 平面交叉路口信号灯自动配时方案的优化算法[J]. 交通与计算机, 2002, 20(4):3-8.
- [12] 李群芳,张士军,黄 建. 单片微型计算机原理与接口技术[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [13] Stoilova K, Stoilov T. Traffic noise and traffic light control[J]. Great Britain, 1998, 3(6):399-417.
- [14] 曹树志. 智能红绿灯对城市交通节能减排效果的仿真[J]. 电脑知识与技术:学术交流, 2011, 7(5):3097-3099.
- [15] Garcia-Nieto J, Alba E, Olivera A C. Swarm intelligence for traffic light scheduling: application to real urban areas[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25:274-283.

# 改进的人工鱼群算法在机器人控制中的应用

作者：[刘晓丽](#)，[熊良鹏](#)，[LIU Xiao-li](#)，[XIONG Liang-peng](#)  
作者单位：[成都理工大学 工程技术学院, 四川 乐山, 614000](#)  
刊名：[计算机技术与发展](#)  
英文刊名：[Computer Technology and Development](#)  
年，卷(期)：2015(5)

引用本文格式：[刘晓丽](#).[熊良鹏](#).[LIU Xiao-li](#).[XIONG Liang-peng](#) [改进的人工鱼群算法在机器人控制中的应用](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(5)