

# 基于模糊补偿的机械手鲁棒自适应模糊控制研究<sup>\*</sup>

## Research on the Robust Adaptive Fuzzy Control of Manipulators Based on Fuzzy Compensation

董立红

DONG Li-Hong

(西安科技大学计算机科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

(School of Computer Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**摘要:**多关节机械手系统中普遍存在摩擦特性、随机干扰及负载变化等非线性因素的影响。针对传统的PID控制和模糊控制很难对该类系统实现快速高精度的跟踪控制等问题,本文在模糊信息已知并且所有状态变量均可测得的情况下,设计了一种基于模糊补偿的鲁棒自适应模糊控制律。同时,为了减少模糊逼近的计算量,提高运算效率,采用了对不同的扰动补偿项加以区分、分别逼近的方法。仿真实验结果表明,这种改进的带模糊补偿的鲁棒自适应模糊控制可以很好地抑制摩擦、扰动及负载变化等非线性因素的影响。

**Abstract:** There are friction characteristics, random disturbances, load variations and other nonlinear influencing factors in the multi-joint manipulator system generally. According to the problem that the traditional PID and fuzzy control are difficult to achieve rapid and high-precision tracking control for this kind of systems, a robust adaptive fuzzy control law is designed based on fuzzy compensation under the circumstance that the fuzzy information can be known and all the state variables can be measured. Simultaneously, in order to reduce the computational load of fuzzy approximation and improve the efficiency of mathematical operation, a method of distinguishing different disturbance compensation terms and approximating each of them respectively is adopted. The simulation results show that the robust adaptive fuzzy control based on fuzzy compensation can restrain friction, disturbance, load variations and other nonlinear influencing factors.

**关键词:**模糊补偿;机械手;鲁棒自适应模糊控制;非线性

**Key words:** fuzzy compensation; manipulator; robust adaptive fuzzy control; nonlinear

**doi:**10.3969/j.issn.1007-130X.2012.01.030

**中图分类号:**TP273

**文献标识码:**A

## 1 引言

多关节机械手系统中普遍存在摩擦、随机干扰等非线性因素的影响。对于这种强耦合非线性动态系统,其交叉耦合特性还在很大范围内随机机械手的位置及运动状况发生变化<sup>[1]</sup>。常规的PID控制

很难实现快速高精度的跟踪控制,而传统的模糊控制对较强的非线性干扰控制效果较差。于是,众多学者相继提出了误差补偿、时滞补偿、摩擦补偿等多种补偿控制策略,以及模糊神经网络控制、基于观测器的模糊控制、小波神经网络控制等多种智能控制方法<sup>[2]</sup>。本文在模糊信息已知并且所有状态变量均可测得的情况下,设计了一种基于模糊补偿

\* 收稿日期:2011-05-20;修订日期:2011-08-26

通讯地址:710054 陕西省西安市雁塔中路58号西安科技大学计算机学院

Address: School of Computer Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, 58 Yanta Rd Middle, Xi'an, Shaanxi 710054, P. R. China

的鲁棒自适应模糊控制律。与文献[4]中将系统分为线性和非线性部分分别采用不同的控制方法相比,这里为了减少模糊逼近的计算量,提高运算效率,采用对不同的扰动补偿项加以区分、分别逼近的方法。文献[7]中控制系统的影响因素是刚性的,而本文所研究的摩擦、扰动和负载变化都是不确定性的。仿真实验结果表明,这种改进的带模糊补偿的鲁棒自适应模糊控制可以很好地抑制摩擦和扰动等非线性因素的影响。

## 2 系统描述

机械手系统的动态方程为<sup>[3]</sup>:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \tau \quad (1)$$

其中,  $D(q)$  为惯性力矩,  $C(q, \dot{q})$  是向心力和哥氏力矩,  $G(q)$  是重力项,  $F(q, \dot{q}, \ddot{q})$  是由摩擦  $F_r$ 、扰动  $\tau_d$ 、负载变化的不确定项组成的。

## 3 基于模糊补偿的鲁棒自适应模糊控制律设计

假设  $D(q)$ 、 $C(q, \dot{q})$  和  $G(q)$  为已知,且所有状态变量均可测得。定义滑模函数为<sup>[4]</sup>:

$$s = \dot{q} + \Lambda \tilde{q} \quad (2)$$

其中,  $\Lambda$  为正定阵,  $\tilde{q}(t)$  为跟踪误差。

定义:

$$\dot{q}_r(t) = \dot{q}_d(t) - \Lambda \tilde{q}(t) \quad (3)$$

定义 Lyapunov 函数为:

$$V(t) = \frac{1}{2} (s^T D s + \sum_{i=1}^n \tilde{\theta}_i^T \Gamma_i \tilde{\theta}_i) \quad (4)$$

其中,  $\tilde{\theta}_i = \theta_i^* - \theta_i$ ,  $\theta_i^*$  为理想参数,  $\Gamma_i > 0$ 。

由于:

$$s = \dot{q} + \Lambda \tilde{q} = \dot{q} - \dot{q}_r \quad (5)$$

所以:

$$D\dot{s} = D\ddot{q} - D\dot{q}_r = \tau - C\dot{q} - G - F - D\ddot{q}_r \quad (6)$$

则:

$$\dot{V}(t) = -s^T (D\ddot{q}_r + C\dot{q}_r + G + F - \tau) + \sum_{i=1}^n \tilde{\theta}_i^T \Gamma_i \dot{\tilde{\theta}}_i \quad (7)$$

其中,  $F(q, \dot{q}, \ddot{q})$  是未知非线性函数,采用基于 MIMO 的模糊系统  $\hat{F}(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta)$  来逼近  $F(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 。设计以下基于模糊补偿的鲁棒自适应模糊控制律。

设计控制律为<sup>[5]</sup>:

$$\tau = D(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\dot{q}_r + G(q) + \hat{F}(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta) - K_D s \quad (8)$$

其中,  $K_D = \text{diag}(K_i)$ ,  $K_i > 0, i = 1, 2, \dots, n$ , 且:

$$\hat{F}(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta) = \begin{bmatrix} \hat{F}_1(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta_1) \\ \hat{F}_2(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta_2) \\ \vdots \\ \hat{F}_n(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Theta_1^T \xi(q, \dot{q}, \ddot{q}) \\ \Theta_2^T \xi(q, \dot{q}, \ddot{q}) \\ \vdots \\ \Theta_n^T \xi(q, \dot{q}, \ddot{q}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

模糊逼近误差为:

$$\omega = F(q, \dot{q}, \ddot{q}) - \hat{F}(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta^*) \quad (10)$$

将控制律式(8)代入式(7),得:

$$\dot{V}(t) = -s^T K_D s - s^T \omega + \sum_{i=1}^n (\tilde{\theta}_i^T \Gamma_i \dot{\tilde{\theta}}_i - s_i \tilde{\theta}_i^T \xi_i(q, \dot{q}, \ddot{q})) \quad (11)$$

其中,  $\tilde{\theta} = \Theta^* - \Theta$ ,  $\xi(q, \dot{q}, \ddot{q})$  为模糊系统。

自适应律为:

$$\dot{\tilde{\theta}}_i = -\Gamma_i^{-1} s_i \xi_i(q, \dot{q}, \ddot{q}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

则:

$$\dot{V}(t) = -s^T K_D s - s^T \omega \quad (13)$$

为了消除逼近误差造成的影响,保证系统稳定,在控制律中采用鲁棒项。设计鲁棒自适应律为<sup>[6]</sup>:

$$\tau = D(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\dot{q}_r + G(q) + \hat{F}(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta) - K_D s - W \text{sgn}(s) \quad (14)$$

其中,  $W = \text{diag}[\omega_{M1}, \dots, \omega_{Mn}]$ ,  $\omega_{Mi} \geq |\omega_i|, i = 1, 2, \dots, n$ 。

将控制律式(14)代入式(7),得:

$$\dot{V}(t) = -s^T K_D s \leq 0 \quad (15)$$

当机器人的关节个数为  $n$  个时,如果采用基于 MIMO 的模糊系统  $\hat{F}(q, \dot{q}, \ddot{q} | \Theta)$  来逼近  $F(q, \dot{q}, \ddot{q})$ ,则对每个关节来说,输入变量个数为 3 个。如果针对  $n$  个关节机器人力臂,对每个输入变量设计  $k$  个隶属函数,则规则总数为  $k^{3n}$ 。例如,机器人关节个数为 2,每个关节输入变量个数为 3,每个输入变量设计 5 个隶属函数,则规则总数为  $5^{3 \times 2} = 5^6 = 15625$ ,如此多的模糊规则会导致计算量过大。为了减少模糊规则的个数,应针对  $F(q, \dot{q}, \ddot{q}, t)$  的具体表达式分别进行设计<sup>[7]</sup>。

## 4 基于模糊信息已知的模糊补偿规则

假设  $D(q)$ 、 $C(q, \dot{q})$  和  $G(q)$  为已知,且所有

状态变量均可测得。

#### 4.1 基于摩擦的模糊补偿控制

只考虑针对摩擦进行模糊逼近的模糊补偿控制,由于摩擦力只与速度信号有关,则用于逼近摩擦的模糊系统可表示为  $\hat{F}(\dot{q} | \theta)$ ,可根据基于传统模糊补偿的控制器设计方法,即式(13)和式(14)来设计控制律。

鲁棒模糊自适应控制律为:

$$\tau = D(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\dot{q}_r + G(q) + \hat{F}(\dot{q} | \theta) - K_D s - W \operatorname{sgn}(s) \quad (16)$$

自适应律为:

$$\dot{\theta}_i = -\Gamma_i^{-1} s_i \xi(\dot{q}), i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

模糊系统为:

$$\hat{F}(\dot{q} | \theta) = \begin{bmatrix} \hat{F}_1(\dot{q}_1) \\ \hat{F}_2(\dot{q}_2) \\ \vdots \\ \hat{F}_n(\dot{q}_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1^T \xi^1(\dot{q}_1) \\ \theta_2^T \xi^2(\dot{q}_2) \\ \vdots \\ \theta_n^T \xi^n(\dot{q}_n) \end{bmatrix} \quad (18)$$

#### 4.2 基于外加干扰的模糊补偿控制

只考虑针对外加干扰进行模糊逼近的模糊补偿控制,由于外加干扰与位置和速度信号有关,则用于逼近外加干扰的模糊系统可表示为  $\hat{F}(q, \dot{q} | \Theta)$ ,可根据基于传统模糊补偿的控制器设计方法,即式(13)和式(14)来设计控制律<sup>[8]</sup>。

鲁棒模糊自适应控制律为:

$$\tau = D(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\dot{q}_r + G(q) + \hat{F}(q, \dot{q} | \Theta) - K_D s - W \operatorname{sgn}(s) \quad (19)$$

自适应律为:

$$\dot{\theta}_i = -\Gamma_i^{-1} s_i \xi(q, \dot{q}), i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

模糊系统为:

$$\hat{F}(q, \dot{q} | \theta) = \begin{bmatrix} \hat{F}_1(q, \dot{q} | \Theta_1) \\ \hat{F}_2(q, \dot{q} | \Theta_2) \\ \vdots \\ \hat{F}_n(q, \dot{q} | \Theta_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1^T \xi(q, \dot{q}) \\ \theta_2^T \xi(q, \dot{q}) \\ \vdots \\ \theta_n^T \xi(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \quad (21)$$

## 5 仿真实验及结果分析

针对双关节刚性机械手,其动力学方程为式(1),具体表达如下:

$$\begin{bmatrix} D_{11}(q_2) & D_{12}(q_2) \\ D_{21}(q_2) & D_{22}(q_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -C_{12}(q_2)\dot{q}_2 & -C_{12}(q_2)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ C_{12}(q_2)\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} g_1(q_1 + q_2)g \\ g_2(q_1 + q_2)g \end{bmatrix} + F(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中:

$$D_{11}(q_2) = (m_1 + m_2)r_1^2 + m_2r_2^2 + 2m_2r_1r_2\cos(q_2),$$

$$D_{12}(q_2) = D_{21}(q_2) = m_2r_2^2 + m_2r_1r_2\cos(q_2),$$

$$D_{22}(q_2) = m_2r_2^2,$$

$$C_{12}(q_2) = m_2r_1r_2\sin(q_2) \quad (23)$$

令  $y = [q_1, q_2]^T, \tau = [\tau_1, \tau_2]^T, x = [q_1, \dot{q}_1, q_2, \dot{q}_2]^T$ 。取系统参数  $r_1 = 1, r_2 = 0.8, m_1 = 1, m_2 = 1.5$ 。

控制目标是使双关节的输出  $q_1, q_2$  分别跟踪期望轨迹  $y_{d1} = 0.3\sin t$  和  $y_{d2} = 0.3\sin t$ 。

定义隶属函数为:

$$\mu A_i^l(x_i) = \exp\left(-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\pi/24}\right)^2\right) \quad (24)$$

其中,  $\bar{x}_i^l$  分别为  $-\pi/6, -\pi/12, 0, \pi/12, \pi/6, i = 1, 2, 3, 4, 5$ 。  $A_i$  分别为 NB、NS、ZO、PS、PB。

针对带有摩擦的情况,采用基于摩擦模糊补偿的机械手鲁棒自适应模糊控制,取控制器设计参数  $\lambda_1 = 10, \lambda_2 = 10, K_D = 20I, \Gamma_1 = \Gamma_2 = 0.0001$ ,取系统初始状态  $q_1(0) = q_2(0) = \dot{q}_1(0) = \dot{q}_2(0)$ 。

$$\text{取摩擦项 } F(\dot{q}) = \begin{bmatrix} 15\dot{q}_1 + 6\operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ 15\dot{q}_2 + 6\operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \end{bmatrix}, \text{取干}$$

扰项  $\tau_d = \begin{bmatrix} 0.05\sin(20t) \\ 0.1\sin(20t) \end{bmatrix}$ 。在鲁棒控制律中,取

$W = \operatorname{diag}[2, 2]$ ,仿真结果如图1~图3所示。

图1所示为存在摩擦的情况下,未采用模糊补偿的关节位置跟踪控制,跟踪轨迹抖动较严重,跟踪效果较差。

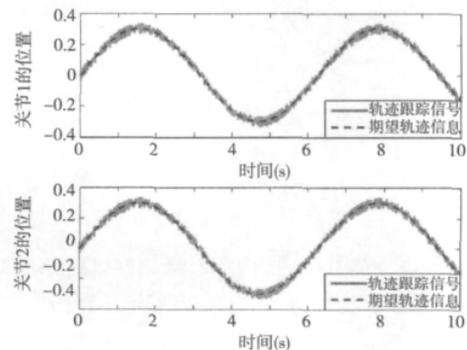


图1 未加补偿控制的关节位置跟踪

图2所示为基于摩擦模糊补偿的鲁棒自适应模糊控制,跟踪效果很好,跟踪轨迹与期望轨迹几乎完全重合。

图3所示为关节摩擦力及对其施加的补偿控制量,该补偿控制能很好地减小摩擦力的影响。

针对带有外加干扰的情况,采用基于模糊补偿

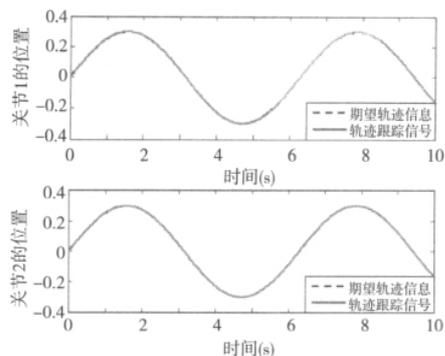


图2 带有补偿控制的关节位置跟踪

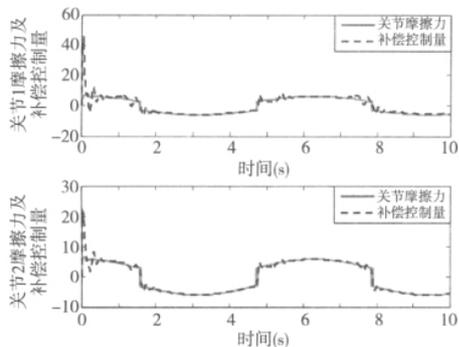


图3 关节摩擦及鲁棒自适应模糊控制量

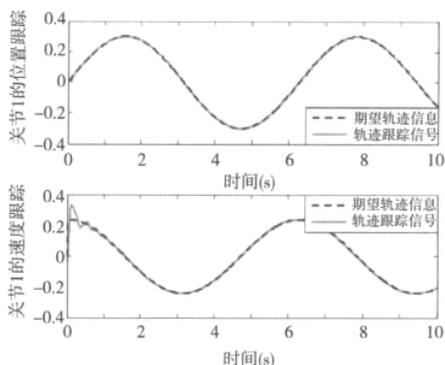


图5 带有补偿控制的关节位置跟踪和速度跟踪

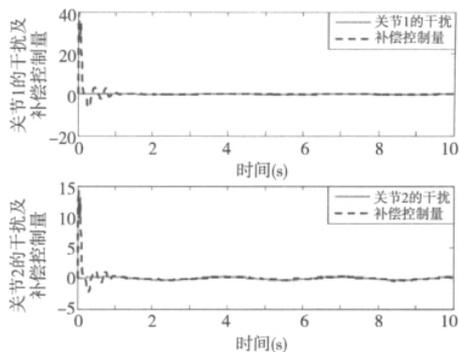


图6 关节干扰及鲁棒自适应模糊控制量

的鲁棒自适应模糊控制,仿真结果如图4~图6所示。

图4所示为存在外加干扰时,未采用模糊补偿的关节位置跟踪控制和速度跟踪控制,跟踪轨迹抖动较严重,跟踪效果较差。

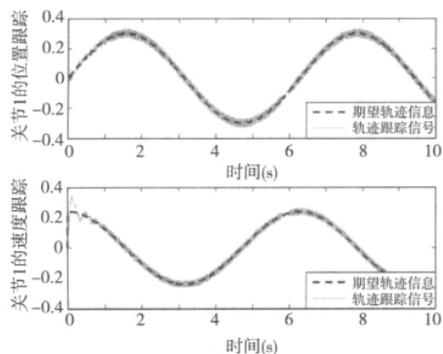


图4 未加补偿控制的关节位置跟踪和速度跟踪

图5所示为基于干扰模糊补偿的鲁棒自适应模糊控制,跟踪效果很好,位置跟踪轨迹与期望轨迹几乎完全重合,速度跟踪在开始时稍有误差,随后跟踪效果良好。

图6所示为系统的外加干扰及对其施加的补偿控制量,该补偿控制能很好地减小外加干扰对系统的影响。

文献[4]把实际系统看成是由线性和非线性两部分所组成,对线性部分采用基于精确数学模型的

控制方法,而对非线性部分主要采用以模糊自适应补偿为主的控制方式。为了提高模糊自适应机构的补偿效果,采用了规则可调整的模糊控制器,但相对于本文所采用的方法而言,其控制精度稍低。同时,对比仿真结果可知,本文所采用的控制方法比文献[7]中控制方法的鲁棒性强。

## 6 结束语

针对传统的PID控制和模糊控制很难对多关节机械手系统实现快速高精度的跟踪控制等问题,本文在模糊信息已知并且所有状态变量均可测得的情况下,设计了一种基于模糊补偿的鲁棒自适应模糊控制律。同时,为了减少模糊逼近的计算量,提高运算效率,采用了对不同的扰动补偿项加以区分、分别逼近的方法。仿真实验结果表明,这种改进的带模糊补偿的鲁棒自适应模糊控制可以很好地抑制摩擦、扰动等非线性因素的影响。因此,该方法具有重要的理论意义和工程实际应用价值。

### 参考文献:

[1] 王良勇,柴天佑. 带有神经网络补偿的机械手PD控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12):110-115.  
 [2] Hsu Chun-Fei, Cheng Kuo-Hsiang. Robust Wavelet-Based Adaptive Neural Controller Design with a Fuzzy Compensator

- [J]. Neurocomputing, 2009, 73(7):423-431.
- [3] 申铁龙. 机器人鲁棒控制基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
- [4] 李军伟, 赵克定. 一种基于模糊补偿的自适应控制在液压转台中的应用[J]. 航空学报, 2003, 24(1):72-74.
- [5] Li Zhijun, Li Jianxun. Adaptive Robust Coordinated Control of Multiple Mobile Manipulators Interacting with Rigid Environments[J]. Automatica, 2010, 46(8):2028-2034.
- [6] Lia Z, Gea S S, Adams M. Robust Adaptive Control of Uncertain Force/Motion Constrained Nonholonomic Mobile Manipulators[J]. Automatica, 2008, 44(7):776-784.
- [7] 王永富, 柴天佑. 机器人关节摩擦的自适应模糊补偿建模与控制[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(2):186-190.
- [8] Huang Shiuh-Jer, Chen Hung-Yi. Adaptive Sliding Controller with Self-tuning Fuzzy Compensation for Vehicle Suspension Control[J]. Mechatronics, 2006, 16(6):607-622.



董立红(1968-),女,河北丰南人,博士,副教授,研究方向为数据挖掘、数据处理技术及煤矿安全监测监控技术。  
E-mail: Dong-er@vip.163.com

**DONG Li-hong**, born in 1968, PhD, associate professor, her research interests include data mining, data processing techniques, and coal mine safety monitoring and control technology.

## 《计算机工程与科学》征文通知

《计算机工程与科学》是由国防科技大学计算机学院主办的中国计算机学会会刊,是国内外公开发行的计算机类综合性学术刊物,现为月刊。本刊欢迎关于计算机科学理论、计算机组织与系统结构、计算机软件、计算机应用、计算机器件设备与工艺等学科领域方面的来稿。学术论文、技术报告、综述评论、发展动态等形式不限。

来稿论文必须未发表、未投到其他会议或期刊。

来稿要求和注意事项:

(1) 主题明确、文字精练、语句通顺、数据可靠。

(2) 标题、作者单位、摘要、关键词采用中英文间隔行文;请注明是否基金资助项目论文(注明项目名称和编号),并注明文章中图法分类号。务必附上所有作者中英文简历(姓名、性别、出生年月、籍贯、学位、职称、研究方向)、1寸证件照片(军人请用便服照)、中英文通信地址、联系电话和 Email。

(3) 作者在投稿时须注明是否是 CCF 会员(高级会员、普通会员、学生会员),若是会员,请注明会员号。第一作者是 CCF 会员的,将享受 8.5 折的版面费优惠。

(4) 来稿请用 WORD 软件编辑,格式为 A4, 40 行×40 列,通栏排版,正文为 5 号宋体,论文长度不得低于 5 个标准版面,并请自留底稿。

(5) 来稿中图形绘制要求工整、清晰、紧凑,尺寸要适当,图中文字用 6 号宋体,线为 0.5 磅。

(6) 每篇论文格式要求:1 引言;……;最后是结束语。引言和结束语中尽量不用图和表。附录应放参考文献之后。参考文献限已公开发表的。

(7) 来稿文责自负,要遵守职业道德,如摘引他人作品,务请在参考文献中予以著录。署名的作者应为参与创作,对内容负责的人。文章发表后,如不同意其他报、刊、数据库等转载、摘编其作品,请在来稿时声明。

(9) 本刊对来稿按 100 元/篇的标准收取稿件审理费。对已决定刊用的稿件按 200 元/页的标准收取版面费。稿件刊登后,按国家有关规定酌致稿酬(含与本刊签约的其他出版物转摘的稿酬),同时赠送当期样刊两本。

联系地址:410073 湖南省长沙市国防科技大学《计算机工程与科学》编辑部

联系电话:0731-84576405

电子邮件:jsjgcykx@163.net

投稿主页:http://www.joces.org.cn

联系人:胡慧俐 敬 昱