

免疫机器人的仿生计算与控制

龚 涛<sup>1,2</sup>,蔡自兴<sup>1</sup>,江中央<sup>1</sup>,夏 洁<sup>1</sup>,罗一丹<sup>1</sup>

(1. 中南大学 信息科学与工程学院,湖南 长沙 410083;2. 东华大学 信息科学与技术学院,上海 201620)

摘 要:传统的移动机器人研究一般假设环境是安全的,为了增强机器人在危险、变化的环境中适应无人作业的能力,提高机器人对外界干扰、攻击和破坏的抵抗力、容错力和免疫力,提出了危险环境的自体/异体建模方法和免疫机器人的仿生计算模型与控制方法. 模仿生物免疫系统,构建机器人的免疫计算模型和免疫控制结构,实现类似于生物免疫系统的自体/异体检测、辨别、学习和修复及鲁棒性、免疫性等功能. 免疫机器人技术用来检测、识别和预报危险、变化的环境,检测并修复机器人的正常状态,实现恶劣环境中机器人仿生控制,具有重要的理论创新意义、明显的技术创新价值和可观的应用前景.

关键词:免疫机器人;免疫计算;免疫控制;智能系统

中图分类号:TP24 文献标识码:A 文章编号:1673-4785(2007)05-0007-05

Bio-inspired computation and control of immune robots

GONG Tao<sup>1,2</sup>,CAI Zi-xing<sup>1</sup>,JIANG Zhong-yang<sup>1</sup>,XIA Jie<sup>1</sup>,LUO Yi-dan<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China ;2. College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract :**In traditional study of mobile robots it is assumed that the environment is secure and that the robots will neither be attacked , nor fall prey to earthquakes , traps or volcanoes. To enhance adaptability of unmanned robots working in dangerous environments , and increase their resistance , fault tolerance and immunity against outside disturbances , attack and damage , a bio-inspired computing model and control method was proposed to create an immune robot. This biological immune system was simulated , an immune computation model and immune control architecture for the robots was built , and self/ non-self detection , recognition , learning , repair , robustness , and immunity were designed into the biological immune system. These techniques for immune robots can be used to detect , recognize and predict dangerous and variational environments , detect the states of the robots and repair them when they are in abnormal states , and carry out bio-inspired control of robots in extreme environments. These are significant theories which should lead to innovative technology and useful applications.

**Keywords** immune robots; immune computation; immune control; intelligent systems

移动机器人研究一般假设未知环境是安全的,不会对移动机器人进行攻击,也不会出现火山、地震等危险的环境因素,但实际环境对于移动机器人来说经常是危险的,例如火星环境、海底环境、战场等. 如何采用新的计算与控制机制来处理危险环境,实现危险环境中移动机器人的导航与故障自修复是一个困难而富有挑战性的课题,传统的计算与控制模

型显然不适用于危险的环境. 为了解决此瓶颈问题,提出了免疫机器人的概念,将人工免疫系统技术应用到移动机器人上. 人工免疫系统是由免疫学理论和观察到的免疫功能、原理和模型启发而生成的适应性系统,是一种仿生技术,从 20 世纪 80 年代中期的免疫学研究发展而来<sup>[1]</sup>. 1990 年, Bersini 等首次使用免疫算法来求解适应性问题<sup>[2]</sup>. 1994 年, Forrest 等开始将免疫算法应用于计算机安全领域<sup>[3]</sup>. 1995 年, Cooke 和 Hunt 开始将免疫算法应用于机器学习领域<sup>[4]</sup>. 免疫算法是一种仿生计算算法. 自然

收稿日期:2007-03-30.  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60234030,60404021);国家基础研究发展计划重点资助项目(A1420060159).

免疫系统的信息处理能力对计算技术的研究有很多重要的启发<sup>[5-8]</sup>.近年来,一些研究者基于遗传算法提出了一些模仿生物机理的免疫算法<sup>[9]</sup>;还有一些学者研究了细胞组织控制系统与免疫机制的关系<sup>[10]</sup>.免疫算法已得到越来越多的应用,包括优化求解、杀毒、故障诊断、鲁棒控制、智能网络、容错、匹配、分类与决策等方面<sup>[11-12]</sup>.基于多种抗原类型输入的免疫学习控制给出免疫机器人学习控制的结构和方法等<sup>[13]</sup>.2003年,龚涛、蔡自兴在国际会议 RISSP2003 上提出了移动免疫机器人的模型,用免疫算法和人工免疫系统模型克服未知环境中的干扰信息和有害信息对该移动机器人的影响;移动免疫机器人的模型是建立在免疫算法基础上,而免疫算法是建立在进化算法的基础上<sup>[14]</sup>.因此,移动免疫机器人实质上是一种进化机器人<sup>[15]</sup>.免疫机器人模仿了人类等生物的自然免疫系统,构建了机器人的免疫计算模型和免疫控制结构,实现了类似于生物免疫系统的自体/异体检测、辨别、学习和修复及鲁棒性、免疫性等功能.目前主要将免疫算法用于机器人的路径规划等问题,对免疫机器人的仿生控制、仿生计算研究甚少<sup>[16-17]</sup>.因此,免疫机器人的仿生计算与控制研究是一个崭新的研究领域,也是一个富有科学意义和重要应用价值的研究课题.

## 1 免疫机器人计算与控制的提出

根据自然免疫系统对自体/异体的高精度检测能力、对未知异体的适应性识别能力和免疫响应的学习能力,可以将危险的、变化的、未知的环境建模为异体,而将安全的环境建模为自体,构建免疫机器人的自体/异体环境模型,用免疫算法高精度检测危险的、变化的环境,用免疫学习机制识别未知的环境和故障,并实现系统的自动修复,从而克服传统计算与控制模型对处理危险环境的不足<sup>[18]</sup>.这一新技术将能用于太空探索、危险环境无人作业、军事等重要应用领域.

1993年“进化机器人学”这一术语首先由 Cliff、Harvey 和 Husbands 提出,刘娟、蔡自兴等对进化机器人的发展历程进行了总结<sup>[15]</sup>.进化机器人学将进化机制融入联结机制或符号机制中,使机器人在与环境的交互中自组织地突现出理想的控制系统,其核心是进化论中的突现特点.

免疫机器人建立在人工免疫系统模型和免疫算法的基础上,免疫算法可建立在进化算法的基础上,但免疫机器人不局限于进化计算的框架内<sup>[19]</sup>.已提出免疫计算的3层测不准有限计算模型,将人工免疫系统分为固有免疫计算层、适应性免疫计算层和并行免疫计算层,免疫机器人的计算模型可以建立

在此3层模型基础之上.

免疫机器人的免疫控制由自然免疫系统启发而来,免疫控制是建立在生物免疫机制和反馈机制以及自然计算的广义映射模型和一些复杂性定理基础上<sup>[20-21]</sup>.免疫控制是一种仿生控制,是人工免疫系统、智能控制论、智能决策系统和生物信息学的交集(交叉学科),在免疫控制结构和计算模型等方面做了一些探索,并取得初步成果<sup>[22-23]</sup>.

免疫机器人的仿生计算与控制研究具有重要的理论意义和应用前景.

1) 能为危险、多变的环境中移动机器人应用提供仿生计算模型和免疫控制技术;

2) 免疫机器人模仿生物免疫系统的自体/异体检测、识别与学习机制和自修复机制,是对生物免疫机制的仿生计算与控制,对危险环境中移动机器人的导航控制有生物启发作用;

3) 免疫机器人技术是未知环境中仿生机器人探索、导航和控制的发展趋势之一,免疫机器人必将成为危险环境中移动仿生机器人的研究前沿;

4) 能扩展现有机器人的环境适应能力、智能度、仿生特征和安全性,对现有仿生机器人技术具有推动和改进作用.

总之,免疫机器人技术将免疫仿生技术应用到机器人中,能提高机器人检测、识别危险环境的预警力,增强适应环境变化的免疫力,确保恶劣环境中机器人控制的鲁棒性.

## 2 免疫机器人研究的重点与难点

### 2.1 免疫机器人研究的重点

免疫机器人研究主要包括以下几个重点:

1) 构建免疫机器人的自体/异体表示模型:将正常机器人组件和安全的环境因素表示为自体,将机器人故障和危险的环境因素表示为异体;

2) 对已知的安全环境进行建模,并随机生成危险的、变化的环境;

3) 用异体检测、识别与学习的免疫算法,设计对危险环境的检测、识别与学习算法;

4) 用免疫计算的异体检测、识别与学习算法,设计对故障的检测、识别与学习算法;

5) 用人工免疫系统的自动修复算法,设计免疫机器人的自动修复算法;

6) 根据智能控制和免疫控制的四元结构,构建免疫机器人的智能控制体系结构;

7) 设计机器人的免疫控制算法;

8) 用人工免疫系统的并行计算与控制模型,设计免疫机器人的并行计算与控制算法;

9) 用分布式人工免疫系统的鲁棒性归约模型,

研究免疫机器人控制系统的鲁棒性。

## 2.2 免疫机器人研究的难点及其解决方法

免疫计算技术与机器人结合的关键在于危险环境的建模与故障的诊断与修复,此项研究可能要解决下列根本问题:

- 1) 构建安全环境的自体模型,并在此基础上构建危险环境的异体模型,这是最根本问题;
- 2) 基于进化计算、神经网络、免疫学习、示例学习等学习机制,设计未知环境的学习算法;
- 3) 构建免疫机器人的仿生控制器。

可以按照以下思路解决上述技术难点:

- 1) 根据安全环境的空间特征和时间状态唯一确定其自体模型,构建安全环境的自体数据库,并根据自体的补集构建危险环境的异体模型;
- 2) 提取未知环境的特征信息,并在已知环境的特征空间中进行形式化。然后,基于进化计算、神经网络、免疫学习、示例学习等学习算法,求出与该未知环境最相似的已知环境的特征值;
- 3) 根据免疫控制的四元结构设计基于免疫控制的导航控制算法和故障诊断算法,对控制参数进行优化,增强控制器的鲁棒性。

## 3 免疫计算模型与免疫控制结构

免疫机器人建立在免疫计算的3层计算模型和免疫控制的四元结构理论基础上。免疫计算的3层是指负责自体/异体检测和已知异体识别的固有免疫计算层、负责未知异体学习识别和所有异体消除的适应性免疫计算层以及并行免疫计算层。免疫控制的四元结构指免疫控制是人工免疫系统、智能控制论、生物信息学和智能决策系统的交叉学科。

### 3.1 免疫机器人的免疫计算3层模型

免疫机器人需要面临复杂的危险环境,处理未知的环境因素和故障,必须具备对未知信息的学习能力、对异体的鉴别能力和对大量数据的计算能力。因而,免疫机器人的固有免疫计算层用来检测所有的危险环境和故障,并识别已知的危险环境和已知的故障;免疫机器人的适应性免疫计算层用来学习、识别和记忆未知的环境和未知的故障,消除所有的故障,并修复受损的机器人软件系统;免疫机器人的并行免疫计算层用来扩展计算负载能力,提高计算的效率。固有免疫计算层、适应性免疫计算层和并行免疫计算层构成了免疫机器人的免疫计算3层模型,如图1所示。

在图1中,固有免疫计算层是首要的计算层,固有免疫计算层所不能识别的未知异体由适应性免疫计算层学习、识别和记忆,固有免疫计算层和适应性免疫计算层所遇到的负载极限问题由并行免疫计算

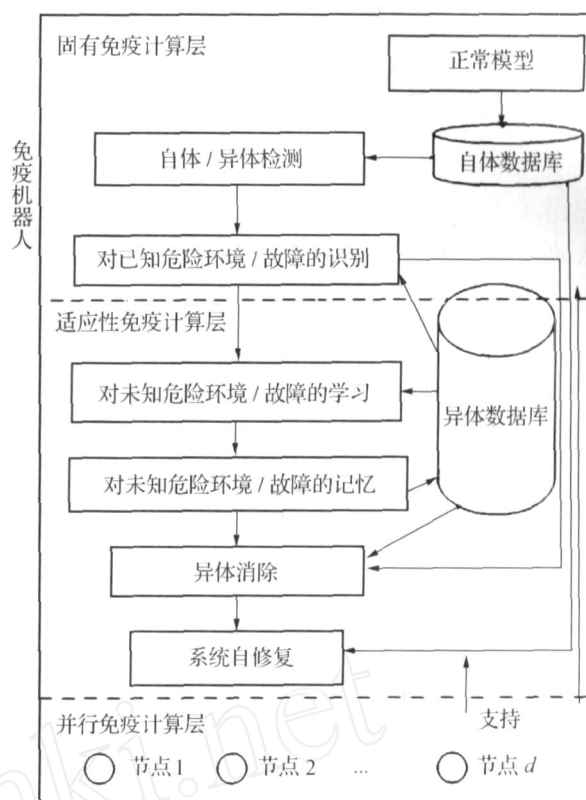


图1 免疫机器人的免疫计算3层模型

Fig 1 Immune computation tri-tier model of immune robot  
层解决,并行免疫计算层通过增加计算代价来提高免疫计算的效率和负载能力。免疫机器人的自体/异体检测建立在对自体数据库的查询基础上,自体数据库从机器人软件的正常模型映射而来。抗原用其时空属性形式化表示,自体也由机器人组件的时空属性表示,例如文件的绝对路径名为空间属性,文件的最后修改时间为时间属性。移动机器人中不符合自体定义的对象都看作异体。通过自体数据库、异体数据库和免疫算法对自体/异体进行处理。抗体表示为用来学习和识别未知异体的程序。对已知危险环境和已知故障的识别建立在对异体数据库的查询基础上,所有已知的危险环境信息和故障特征存储在异体数据库中。对未知危险环境和未知故障的学习和识别建立在神经网络、示例学习等学习机制的基础上。学习样本来自异体数据库中所有已知异体的特征信息,通过寻找与未知异体最相似的已知异体来对未知异体进行学习与识别。系统自修复建立在机器人软件的正常模型基础上,可以专门针对受损部分进行高精度、高效率地修复。并行免疫计算层是由 $d$ 个计算节点组成的并行计算机,采用多线程编程算法实现并行计算,能将单个节点上的计算负载平衡到多个节点上,为固有免疫计算层和适应性免疫计算层提供高性能计算的基础组织。

针对移动机器人控制软件系统可能出现文件破

损、丢失或非法入侵等软件故障的问题,使用基于正常模型和免疫计算的软件故障检测与修复的方法,在中南大学智能所自制的移动机器人 1 号(如图 2 所示)上进行了 20 次软件故障诊断实验.

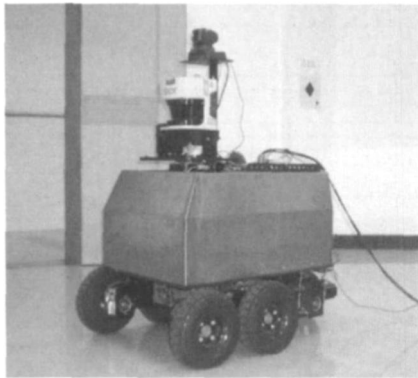


图 2 中南大学自制的移动机器人 1 号

Fig 2 Mobile robot No. 1 designed by Central South Univ.

未知环境中移动机器人软件故障诊断的算法设计建立在基于正常模型和神经网络的免疫算法设计基础上,包括移动机器人软件系统的正常模型构建算法设计,基于正常模型的自体/软件故障检测算法设计,软件故障识别算法设计,软件故障消除算法设计以及移动机器人软件系统的自修复算法设计. 1) 软件故障诊断程序根据正常模型所表示的自体信息检测异体和丢失的文件;2) 识别异体,判定异体是受损的文件还是入侵的文件;3) 消除这些异体;4) 对受损的系统进行启发式的自修复,对受损文件的修复建立在异体消除信息的基础上,对丢失文件的修复建立在正常模型的基础上. 实验结果表明,移动机器人的免疫计算模型能实现对正常组件和软件故障的 100 % 检测,并且对未知软件故障的识别率可以达到 93 %,在硬件系统和操作系统正常的情况下能自动修复移动机器人的软件故障,恢复受损机器人的正常运转. 因此,其软件故障检测率和自修复能力明显比传统异常检测方法和修复方法好.

3. 2 免疫机器人的免疫控制四元结构

免疫机器人的控制理论是免疫控制,免疫控制的结构理论建立在智能控制的四元结构基础上. 据此,免疫控制是交叉学科技术,是人工免疫系统、智能控制论、智能决策系统和生物信息学的交集.

假设免疫控制表示为集合 IMC,人工免疫系统表示为集合 AIS. 因此,免疫控制表示为人工免疫系统(AIS)、智能控制论( ICT)、智能决策系统( IDS)和生物信息学( BIN) 的交集,如图 3 所示. 在图 3 中,人工免疫系统是人工智能( AI) 的子集,智能控制论是控制论( CT) 的子集,智能决策系统是系统论( OS) 的子集,生物信息学是信息论( IT) 的子集,所

以免疫控制是智能控制( IC) 的子集.

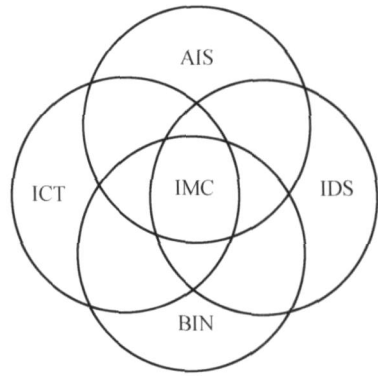


图 3 免疫控制的四元结构

Fig. 3 Four-element structure of immune control

4 结束语

免疫机器人的仿生计算与控制是一个崭新而富有挑战性的研究课题,其重点在于构建免疫机器人的免疫计算模型和免疫控制结构,设计优良的免疫算法和免疫控制器,并应用于机器人太空探索、危险环境无人作业等实际环境中.

由于我国正积极开展月球探索、深海勘探、无人驾驶机器人军事应用等项目,免疫机器人的仿生计算与控制研究在许多重要应用领域具有相当大的应用价值和意义,其潜在用户都是国家重要部门,市场前景广阔. 该技术研究成果的潜在用户是国家重要部门、重要领域的高科技单位,包括海底勘探、月球探索、危险恶劣环境作业、抗灾难、军事等领域应用. 其相关技术能提高移动机器人在上述应用领域的无人作业能力、故障检测与诊断能力、免疫能力以及自修复能力,从而提高移动机器人的适用范围和耐用性,节省成本,减少风险,创造巨大经济效益,发挥重要的社会作用.

参考文献:

[1] 龚涛. 多维教育免疫艾真体的研究[D]. 长沙:中南大学, 2003.  
GONG Tao. Research on multi-dimension education immune Agent [D]. Changsha: Central South University, 2003.  
[2] BERSINI H, VARELA F. Hints for adaptive problem solving gleaned from immune network [J]. Lecture Notes in Computer Science. 1991, 496: 343 - 354.  
[3] FORREST S, PERELSON A S, ALLEN L, et al. Self-nonsel self discrimination in a computer[A]. In Proc of IEEE Symposium on Research in Security and Privacy [C]. [S. l. ], 1994.  
[4] COOKE D E, HUNT J E. Recognizing promoter se-

- quences using an artificial immune system[A]. In Proc Intelligent Systems in Molecular Biology [C]. Cambridge, UK, 1995.
- [5] DASGUPTA D. Artificial immune system and their applications[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1998.
- [6] De CASTRO L N, TIMMIS J. Artificial immune systems: a new computational intelligence approach [M]. London: Springer-Verlag, 2002.
- [7] BAL THROP J, FORREST S, NEWMAN M E J, et al. Technological networks and the spread of computer viruses [J]. Science, 2004, 304(5670): 527 - 529.
- [8] GONG T, CAI Z X. An immune Agent for web-based AI course [J]. International Journal on E-Learning, 2006, 5(4): 493 - 506.
- [9] JIAO L C, WANG L. Novel genetic algorithm based on immunity [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems & Humans, 2000, 30(5): 552 - 561.
- [10] DING Y S, REN L H. Fuzzy self-tuning immune feedback controller for tissue hyperthermia [A]. In Proceedings of IEEE Int Conf on Fuzzy Systems [C]. San Antonio, USA, 2000.
- [11] HA D, SHIN D, KOH D H, et al. Cost effective embedded DRAM integration for high-density memory and high performance logic using 0.15 μm technology node and beyond [J]. IEEE Trans on Electron Devices, 2000, 47(7): 1499 - 1506.
- [12] 蔡自兴, 龚涛. 免疫算法研究的进展[J]. 控制与决策, 2004, 19(8): 841 - 846.
- CAI Zixing, GONG Tao. Advance in research on immune algorithms [J]. Control and Decision, 2004, 19(8): 841 - 846.
- [13] GONG T, CAI Z X. Mobile immune-robot model [A]. In Proceedings of IEEE Int Conf on Robotics, Intelligent Systems and Signal Proceeding [C]. Changsha, China, 2003.
- [14] 陈建安. 免疫系统: 模型、算法、网络及应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2000.
- CHEN J A. Immune system: model, algorithm, network and application research [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2000.
- [15] 刘娟, 蔡自兴, 涂春鸣. 进化机器人学研究进展[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 493 - 499.
- LIU Juan, CAI Zixing, TU Chunming. Survey on evolutionary robotics [J]. Control Theory and Applications, 2002, 19(4): 493 - 499.
- [16] GAO S, ZHAO J, CAI H. Immune genetic algorithm for the path planning of tightly coordinated two-robot manipulators [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(4): 481 - 485.
- [17] ISHIGURO A, KUBOSHIKI S, ICHIKAWA S, et al. Gait control of hexapod walking robots using mutual coupled immune networks [J]. Advanced Robotics, 1996, 10(2): 179 - 195.
- [18] CAI Z X, DUAN Z H, CAI J F, et al. A multiple particle filters method for fault diagnosis of mobile robot dead-reckoning system [A]. In Proceedings of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Edmonton, Canada, 2005.
- [19] CAI Z X, WANG Y. A multiobjective optimization based evolutionary algorithm for constrained optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(6): 658 - 675.
- [20] GONG T, CAI J F, CAI Z X. A coding and control mechanism of natural computation [A]. Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Intelligent Control [C]. Houston, USA, 2003.
- [21] GONG T, CAI Z X. Natural computation of immune e-learning system [A]. Proceedings of 3rd International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Autonomous Systems [C]. Singapore, 2005.
- [22] CAI Z X. Intelligent control: principles, techniques and applications [M]. Singapore: World Scientific Publishers, 1997.
- [23] CAI Z X, GONG T. Natural computation architecture of immune control based on normal model [A]. Proceedings of 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC) [C]. Munich, Germany, 2006.

#### 作者简介:



龚涛,男,1978年生,博士,讲师, Sigma Xi 正式会员,主要研究方向为免疫计算、免疫机器人、人工智能、免疫控制,已发表论文 35 篇以上,出版著作 10 余部。

E-mail: taogongchina@gmail.com.



蔡自兴,男,1938年生,教授,博士生导师,IEEE 高级会员,纽约科学院院士,联合国专家,主要研究方向为人工智能、智能控制和智能机器人,先后获得全国优秀教材一等奖、首届国家级高校教学名师奖、宝钢全国优秀教师特等奖、国家教育部科技进步一等奖等奖励,已发表论文近 400 篇,出版专著 20 余部。



江中央,男,1982年生,硕士研究生,主要研究方向为免疫控制、智能控制和嵌入式系统。