

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201303006
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1673-4785.201303006.html>

干扰素调节的多机器人协作搬运免疫网络算法

袁明新,叶兆莉,程帅,申燊
(江苏科技大学 机电与汽车工程学院,江苏 张家港 215600)

摘要:为了进一步发挥多机器人系统在协作搬运过程中的执行效率,提出了一种新的基于干扰素调节的免疫网络分配算法。将箱子和机器人分别看作抗原和抗体,首先定义了抗原和抗体之间以及抗体和抗体之间的亲和力;然后根据干扰素作用机制定义了干扰素调节因子;最后借鉴 Jerne 的独类型免疫网络假设,建立了多机器人协作搬运的新免疫分配模型。多环境测试结果表明:与其他免疫分配算法相比,新算法不仅能显著缩短搬运路径、降低机器人的能量损耗,还能减少参与协作的机器人数目,提高了系统的执行效率,充分体现了多机器人系统协作中任务分配的合理性,显示出较强的任务规划能力。

关键词:协作搬运;多机器人系统;免疫网络算法;干扰素;亲和力

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2014)01-0076-07

中文引用格式:袁明新,叶兆莉,程帅,等.干扰素调节的多机器人协作搬运免疫网络算法[J]. 智能系统学报, 2014, 9(1): 76-82.
英文引用格式:YUAN Mingxin, YE Zhaoli, CHENG Shuai, et al. Multi-robot cooperative handling based on immune network algorithm regulated by interferon[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014, 9(1): 76-82.

Multi-robot cooperative handling based on immune network algorithm regulated by interferon

YUAN Mingxin, YE Zhaoli, CHENG Shuai, SHEN Yi
(School of Mechatronics and Automotive Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China)

Abstract: In order to further improve the executing efficiency of multi-robot systems during cooperative handling, a new interferon regulation-based immune network algorithm is put forward. The affinities between the antibody and antigen as well as the antibodies are defined firstly by taking the boxes and robots as the antigen and antibody, respectively; secondly, the interferon adjustment factor according to the interferon mechanism is defined; thirdly, the new multi-robot task allocation model is established based on Jerne's idiotypic network hypothesis. Compared with the correlative immune allocation algorithms, the test results from multiple environments indicate that the proposed algorithm not only markedly shortens the handling path and reduces energy loss, but also reduces the amount of robots in cooperation, which shows the rationality of the tasking allocation and the stronger planning ability of the proposed allocation model.

Keywords: cooperative handling; multi-robot systems; immune network algorithm; interferon; affinity

多机器人系统能克服单机器人在信息获取、处理和控制等方面的局限性,提高了任务执行效率和系统灵活性。任务分配是多机器人协作搬运的首要问题,分配的合理性将直接关系到系统的运行效率。目前多机器人任务分配主要通过基于行为、市场机制和线性规划等方法来设计,典型代表有合

同网法、空闲链法和阈值法等^[1]。Dahl 等^[2]在空闲链的基础上建立了奖赏函数,有效调节了平均奖赏值,较好地实现了任务分配,但存在着计算量大、效率低的不足。Bradford 等^[3]重新构建了拍卖的投标矩阵,并将任务分组与协同效应相结合,显现出计算量小、用时少的优点,但系统能耗大、效率低等问题有待解决。为了进一步提高多机器人系统的协作效率,近年来群体智能分配方法得到了重视。Ellips 等^[4]利用粒子群算法解决了机器人运动分配问题,但是在解空间中不易搜索到最优粒子。Zhang 等^[5]

收稿日期:2013-03-03. 网络出版日期:2014-02-20.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61105071);江苏省高校青蓝工程优秀青年骨干教师资助项目(苏教师[2012]39号);江苏科技大学人才引进项目(35271004).
通信作者:袁明新. E-mail: mx yuan78@gmail.com.

提出基于群集智能的自适应任务分配方法,通过自强化学习和蚁群算法完成觅食任务合作,但是计算量大、效率低。生物免疫的自组织、自适应性为解决工程问题,尤其是机器人系统提供了新思路。基于 Farmer 的免疫动力学模型,高云园等^[6-7]实现了箱子搬运的任务分配,但执行效率还有待进一步提高。吴皓等^[8]通过在模型中增加 T 细胞来控制抗体浓度,解决了未知环境的探测问题,但如何将局部探测转为全局探测还有待研究。为了解决全局环境中的任务分配,并进一步提高协作搬运效率,文中在 Jerne 独特型免疫网络基础上,通过定义干扰素调节因子等,实现分配网络的调节和优化,通过仿真来验证分配模型的有效性和优越性。

1 多机器人任务分配免疫网络模型

1.1 免疫网络模型

生物免疫系统是一种高度进化的自适应信息处理系统。免疫学说理论之一的 Jerne 独特型免疫网络假设认为:抗原入侵会打破系统原先的平衡性,不同种类的抗体和淋巴细胞之间通过相互通讯进行相互激励或抑制,从而克服抗原,最终维持系统稳定^[9]。图 1 为独特型免疫网络假设示意图。

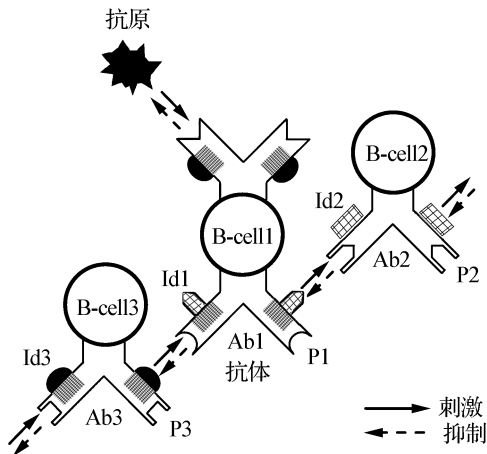


图 1 独特型免疫网络
Fig.1 Idiotypic immune network

根据该免疫网络假设, Farmer 等^[10-11]首次提出了计算抗体激励水平及浓度的动态方程,其表达式如下:

$$A_i(t) = A_i(t-1) + \left(\frac{\alpha}{N} \sum_{j=1}^N m_{ji} a_j(t-1) - \frac{\alpha}{N} \sum_{l=1}^N m_{il} a_l(t-1) + \beta g_i - k_i \right) a_i(t-1)$$

$$a_i(t) = \frac{1}{1 + \exp(0.5 - A_i(t))}$$

式中: $A_i(t)$ 为 t 时刻抗体 i 的激励水平; N 为抗体数; 等号右边括号中第 1 项为抗体 i, j 之间的吸引力, m_{ji} 为两者刺激系数; 第 2 项为抗体 i, k 之间的排斥力, m_{ik} 为两者抑制系数; 第 3 项 g_i 为抗原对抗体 i 的激励; 第 4 项 k_i 模拟抗体的自然消亡; α, β 分别为抗体 i 对其他抗体和抗原的作用系数; $a_i(t)$ 、 $a_j(t)$ 、 $a_k(t)$ 分别为 t 时刻抗体 i, j, k 的浓度, 采用扁平 S 形函数来表示, 目的是确保各抗体浓度值的稳定。

基于 Farmer 的免疫动力学模型, Ishiguro 提出了行为仲裁系统, 并在垃圾回收上得到了应用; Meshref 等^[12]解决了分布式自主机器人系统中的狗羊放牧问题。两者都较好地体现了人工免疫网络的柔韧性和鲁棒性。为了解决多机器人协作搬运问题, 文中以搬箱问题为研究对象, 在 Jerne 的独特型免疫网络假设基础上, 借鉴 Farmer 的动力学模型提出了一种新的任务分配模型。在该人工免疫模型中, 将机器人和箱子作为抗体和抗原, 机器人搬运箱子的过程看作抗体消灭抗原过程, 从而实现了多机器人的任务分配。

1.2 免疫分配模型的基本定义

为了便于描述分配模型中的定义, 给出如图 2 所示的机器人分配环境, 环境中分布着若干机器人 $R_i (i \in \{1, 2, \dots, m\})$ 和若干箱子 $B_l (l \in \{1, 2, \dots, n\})$, 任务分配的目的是机器人通过合作方式, 以最大性能和效率将箱子推到目标点 G 。

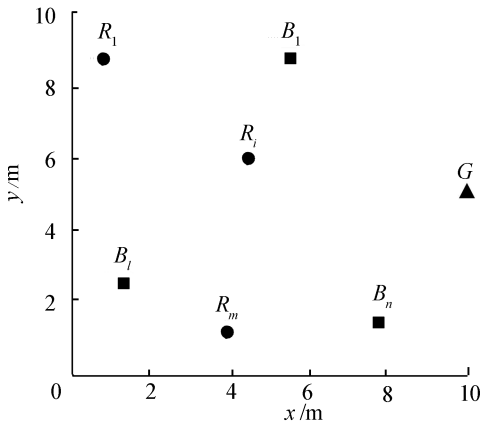


图 2 多机器人任务分配环境

Fig.2 Task allocation environment of multi-robot

1.2.1 抗体与抗原间亲合度

箱子在初始时刻及搬运过程中的机器人分配,

主要是根据两者之间的亲合度进行。设第 i 个机器人 R_i 与第 l 个箱子 B_l 之间激励为 g_i , 则将 g_i 定义为

$$g_i = \frac{f_i \times \mu}{(\lambda_1 d_{il} + \lambda_2 d_{lg})} \quad (1)$$

$$\mu = \begin{cases} 1 + \gamma, & \text{机器人与目标点在箱子异侧} \\ 1 - \gamma, & \text{机器人与目标点在箱子同侧} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_i 为机器人 R_i 的推力, d_{il} 是机器人 R_i 和箱子 B_l 之间距离, d_{lg} 是箱子 B_l 和目标点之间距离, λ_1 和 λ_2 为调整系数, u 为激励或抑制因子, r 为调整系数。当机器人位于箱子左边时, f_i 越大, d_{il} 和 d_{lg} 越小, g_i 越大。另外, 按照实验模型, 机器人在箱子左侧时 g_i 得到正激励, 反之为负激励。

1.2.2 抗体间亲合度

根据独特型免疫网络假设, 抗体间作用包括刺激和抑制。若机器人 R_i 无法独自搬运箱子 B_l , 则 R_i 产生抗体刺激其他机器人来协作搬运箱子; 若机器人 R_i 可独自搬运箱子 B_l , 则 R_i 产生的抗体对其他机器人起到免疫抑制作用。为体现多机器人搬运中的刺激和抑制, 定义如下亲合度系数 m :

$$m = \frac{f_i \times f_j \times \mu}{(\lambda_1 d_{ij} + \lambda_2 d_{lg})}$$

式中: f_i, f_j 分别为 R_i 和 R_j 的推力大小, d_{ij} 为机器人 R_i 和 R_j 之间的距离, d_{lg} 为机器人 R_j 和目标点之间的距离, u, λ_1, λ_2 的取值同上。

1.2.3 干扰素调节因子

干扰素是人和动物细胞受到适宜刺激时产生的一种微量的且具有高度生物学活性的糖蛋白, 由 Is-sacs 等于 1957 年利用鸡胚绒毛尿囊膜研究流感病毒干扰现象时发现。干扰素对体液免疫、细胞免疫均有免疫调节作用, 对巨噬细胞和自然杀伤细胞也有一定的免疫增强作用^[13]。临床医学表明: 干扰素对免疫的调控作用有助于抑制乙肝、丙肝病毒的复制。为了进一步提高基于免疫网络的任务分配效果, 将其引入并实现了免疫网络分配模型的调节。

干扰素调节因子 d_i 定义为

$$d_i = \frac{f_i \times \delta}{N'} \quad (3)$$

式中: d_i 为机器人 R_i 需注射的干扰素剂量, N' 为目前待搬运箱子的数目, $\delta = 10^{-3}$ 为调整系数。由式(3)可以看出, 当待搬运箱子数目减少时, 干扰素注射量逐步增加, 从而能自动调节机体的免疫水平。

1.3 任务分配的抗体选择模型

根据多机器人协作搬运中的任务分配要求及

Jerne 的独特型网络模型假设, 在 Farmer 的动力学模型基础上, 利用文中所定义的抗体与抗原间亲合度、抗体间亲合度以及干扰素调节因子构建了多机器人新任务分配模型:

$$A_i(t) = A_i(t-1) + \left(\frac{\alpha}{N} \sum_{j=1}^N m a_j(t-1) + \beta g_i + d_i - k_i \right) a_i(t-1) \quad (4)$$

在多机器人任务分配过程中, 若机器人需等待协作, 则式(4)作为寻找协作机器人的依据。

1.4 多机器人协作搬运算法

考虑到多机器人系统的分布式体系结构和通讯的灵活性要求, 文中系统采用了黑板模式的通讯方式。系统中的每个机器人将其感知到的任务和自身信息写在“黑板”的共享区域内, 同时从“黑板”上读取相关信息。黑板上的共享信息包括机器人信息、已搬运箱子信息和目标点信息。机器人之间通过相互通讯和激励值来完成任务分配和搬运。算法具体过程描述如下:

- 1) 初始化抗原和抗体信息, 根据式(1)和(2)计算机机器人和箱子之间的激励;
- 2) 根据激励值选择合适的机器人去搬运箱子, 被选择机器人向相应箱子移动;
- 3) 判断该机器人能否推动箱子, 若能则转步骤5), 同时抑制其他空闲机器人来协作; 否则转步骤4) 去寻找其他协作机器人;
- 4) 根据式(4)计算等待搬运的箱子与空闲机器人的激励值, 选择合适的机器人前来协作搬运, 并转步骤3);
- 5) 通过机器人或者多机器人协作将箱子搬运至目标点;
- 6) 更新机器人和箱子的坐标等信息, 重新计算未搬运箱子和机器人两两间的激励值, 重复步骤2)~5), 直至所有箱子被搬运至目标点。

在步骤4)中, 当机器人都处于等待状态时, 称为“任务死锁”。对此, 文中采用 Parker 提出的“焦躁模型”^[14], 即当机器人等待队友协作过久, 则选择不再等待, 并通过减小其激励值来降低其再次被此任务选择的概率。

为了进一步清晰看出机器人的任务分配过程, 上述免疫网络分配算法可以用图3所示的流程图来描述。

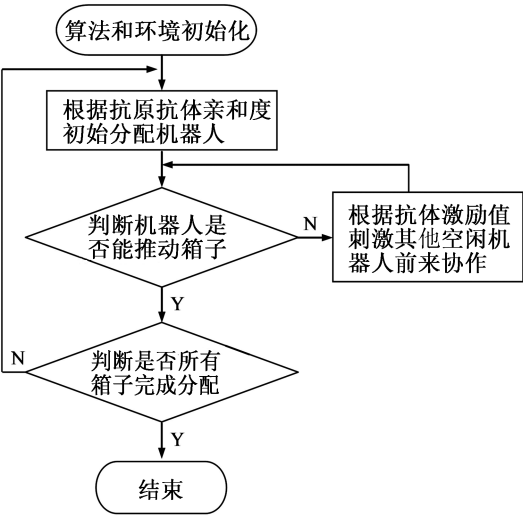


图 3 多机器人任务分配流程

Fig.3 Flow of multi-robot task allocation

2 实验结果与分析

2.1 实验描述

为了验证文中新免疫网络分配模型在多机器人协作搬运任务中的有效性,利用 MATLAB7.1,在 CPU 1.20 GHz、内存为 2GB 的计算机上进行了多环境任务分配测试,并将测试结果与文献[6,8]中免疫算法进行了比较。环境共 6 种,参数设置如表 1 所示。

表 1 多机器人任务分配环境参数设置

Table 1 Setting of environmental parameter for multi-robot task allocation

环境	N_B	M_B/kg	N_R	F_R/kg
环境 1	3	2、5、7	3	2、3、4
环境 2	3	2、5、7	4	2、3、4、5
环境 3	4	2、5、7、8	3	2、3、5
环境 4	4	2、5、7、8	4	2、3、4、5
环境 5	5	2、5、7、8、9	4	2、3、4、5
环境 6	5	2、5、7、8、9	6	2、3、4、5、6、7

表 2 3 种免疫算法在 6 种环境中的任务分配比较

Table 2 Comparisons of task allocation in six environments among three immune algorithms

环境	机器人行驶的总步数			机器人推力的损耗值 /kg			参与协作的机器人总数目		
	文献[6] 算法	文献[8] 算法	文中算法	文献[6] 算法	文献[8] 算法	文中算法	文献[6] 算法	文献[8] 算法	文中算法
环境 1	136	132	132	2	2	2	5	5	5
环境 2	162	148	144	7	5	4	5	5	4
环境 3	235	255	224	6	8	6	7	8	7
环境 4	243	233	208	6	6	6	7	7	7
环境 5	298	285	258	6	6	5	10	10	9
环境 6	272	264	234	12	17	9	9	8	8

表中, N_B 为箱子数目, M_B 为箱子重量, N_R 为机器人数目, F_R 为机器人推力值。文中算法参数为 $\alpha=0.5$, $\beta=0.1$, $k=0.002$, $A_i(0)=a_i(0)=0.5$, $\lambda_1=0.8$, $\lambda_2=0.2$ 。

2.2 分配结果及分析

表 2 为 3 种免疫算法在 6 种环境中的不同分配效果。由表 2 不难看出,文中算法在 6 种环境中的分配是最优的。首先在机器人行驶总步数上,由于文中免疫网络加入了干扰素调节因子,使得其规划路径短于其他算法;其次在能量损耗上,新方法通过降低能力强的机器人重复参与搬运的可能性,减少了损耗值;最后协作机器人数量也得到了控制。因此基于干扰素调节机制的免疫网络模型,不仅能兼顾机器人行驶总路程和机器人推力损耗,还能提高多机器人系统的执行效率,实现了分配方案的优化。

为了看出基于免疫网络模型的多机器人协作搬运情况,以相对较复杂的环境 6 为例来进行说明,结果如图 4 所示。图中,“●”、“■”分别表示机器人和箱子的初始位置;“□”为箱子的搬运轨迹;“▲”为目标点;R1/2 表示 1 号机器人,且推力值为 2 kg;B1/2 表示 1 号箱子,且重量为 2 kg;1 号箱子左侧的⑥表示 1 号箱子由 6 号机器人搬运。由图 4 可以清晰地看出不同算法对应的机器人和箱子的分配情况。以图 4(c)为例,箱子 1 和 2 分别由 1 号和 6 号机器人单独搬完,箱子 3 由 4 号和 5 号机器人协作搬完,箱子 4 由 3 号和 6 号机器人协作搬完,箱子 5 由 2 号和 5 号机器人协作搬完。

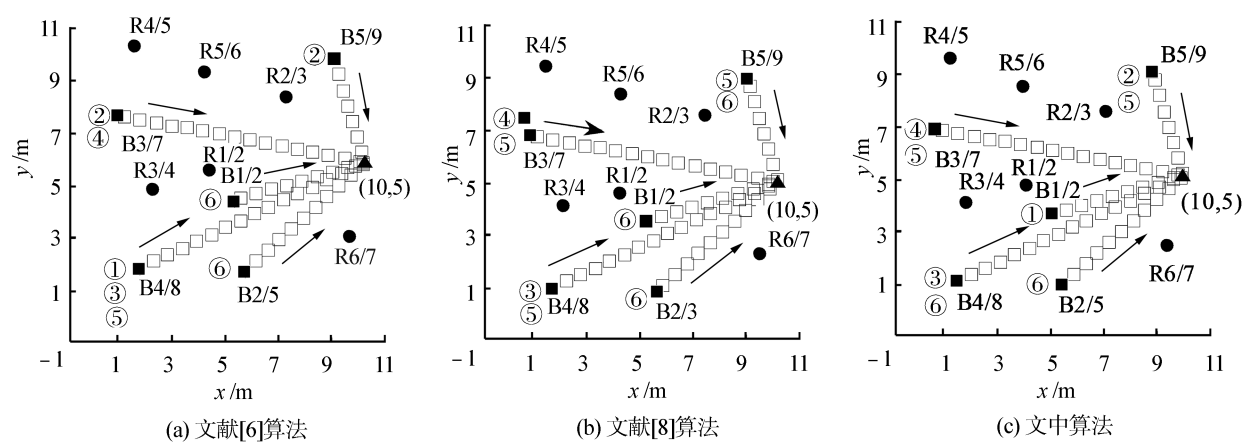


图 4 3 种算法在环境 6 中的多机器人协作搬运比较

Fig.4 Comparisons of multi-robot cooperation handling of three algorithms in environment 6

图 5 给出了文中算法在环境 6 中的机器人搬运路径,由该路径可以进一步清晰看出机器人的协作过程。以图 5(e)为例,Robot5 先被 Box5 选择,并与

已经等候在 Box5 处的 Robot2 协作将箱子搬运至目标处;完成任务后,Robot5 又被 Box3 选择,同时与守候在此处的 Robot4 协作将 Box3 搬运至目标处。

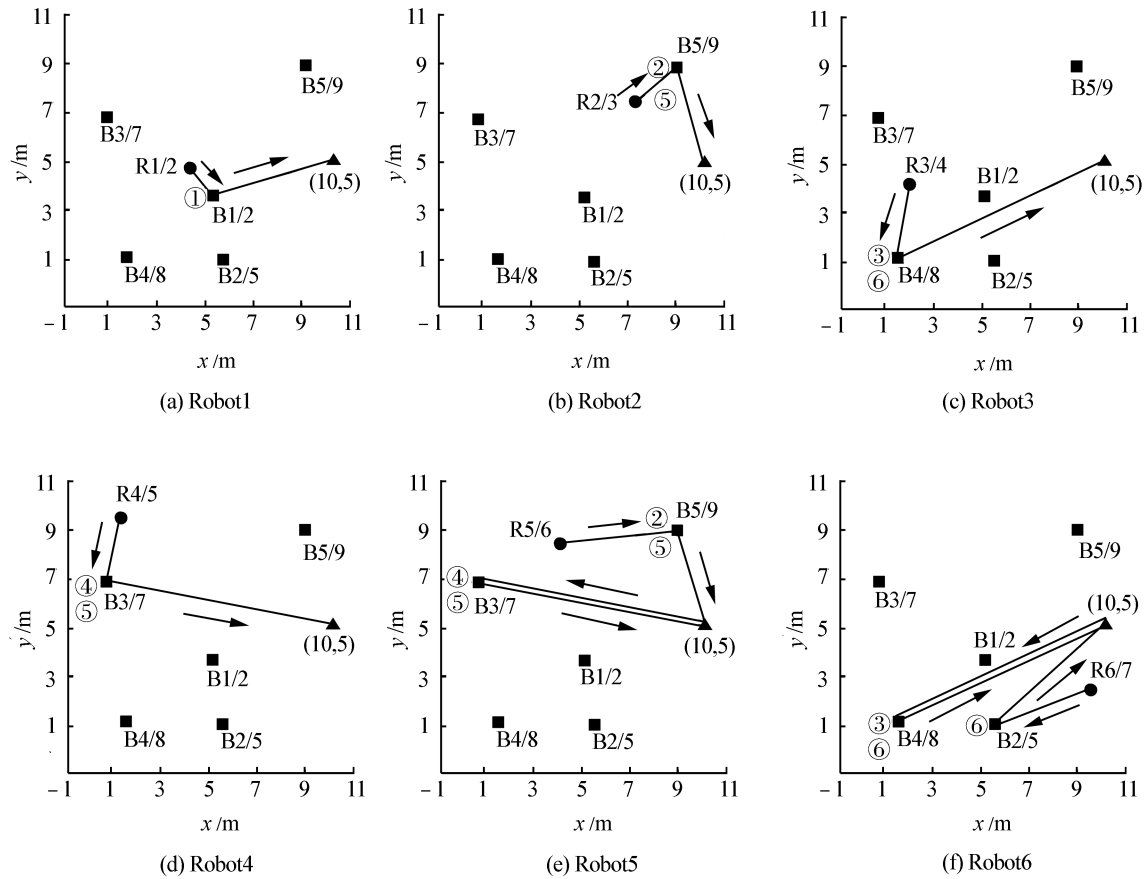


图 5 文中算法在环境 6 中的机器人搬运路径

Fig.5 Robot handling path of proposed algorithm in environment 6

图 6 给出了文中算法在环境 6 中的机器人浓度选择,1~6 号机器人浓度通过不同纹理的柱高来表

示,分配系统根据浓度来实现箱子的机器人分配。对应某个箱子,若某机器人的柱高为 0,则表示该机

机器人已被选择执行其他任务;若某次选择时,所有机器人柱高均为 0,则表示该箱子已被搬运至目标处,任务已完成。以图 6(c)来说明:对应箱子 Box3,系统第 1 次选择 Robot4 去搬运,Robot4 不能独自搬运 Box3,需等待协作;系统第 2 次选择时,Robot3、Robot4、Robot6 号机器人柱高为 0,则表示在第 1 次分配时它们已经被成功分配任务,从而在空闲的 Robot1、Robot2、Robot5 三者中选择浓度最大的 Robot5,于是 Robot4 和 Robot5 协作来搬运 Box3;第 3 次选择时可以看出所有机器人柱高为 0,表明搬运 Box3 的任务已经完成。图 6 更为清晰地给出了文中算法在进行多机器人任务分配时,免疫系统模型中的浓度变化情况。浓度的变化体现出抗原抗体之间的激励和抑制结果,而分配结果表明了文中免疫网络模型的有效性和优越性。

3 结束语

为了解决多机器人系统协作问题,文中基于 Jerne 的独特点免疫网络假设和 Farmer 的动力学模型,根据干扰素作用机制,设计了一种新的基于干扰素调节的免疫网络分配模型。6 种环境测试结果表明,利用干扰素调节可以显著减少机器人搬运路程;通过降低能力强的机器人重复参与次数,可以同时减少能量损耗和协作等待机器人数目。与已有的 2 种免疫网络分配算法相比,文中算法在多机器人的协作效率和完成质量方面都有明显提高,显示出该算法的有效性。与单机机器人相比,多机器人系统的内在并行性和叠加性,使得其具有更高的任务执行效率和功能,而文中免疫分配模型将有助于进一步发挥多机器人系统的功效,因此该成果具有理论和实用价值。课题下一步将把重点放在如何根据机器人和任务信息,进一步提高机器人之间的协作以及免疫分配模型的实际应用上,在完善免疫网络分配算法的同时,发挥算法的实际应用价值。

参考文献:

[1]董杨斌,蒋静坪,何衍.基于适应度的多机器人任务分配策略[J].浙江大学学报:工学版,2007,41(2):272-277.
DONG Yangbin, JIANG Jingping, HE Yan. Fitness-based task allocation strategy for multi robot system[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(2): 272-277.

[2]DAHL T S, MATARIC M, SUKHATME G S. Multi-robot task allocation through vacancy chain scheduling[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2009, 57(6): 674-687.

[3]BRADFORD H, MAURICE P. Sequential single-cluster auctions for robot task allocation[J]. Advances in Artificial Intelligence, 2011, 7106: 412-421.

[4]ELLIPS M, DAVOUD S. Multi-objective robot motion planning using a particle swarm optimization model[J]. Journal of Zhejiang University: Science, 2010, 11(8): 607-619.

[5]ZHANG D, XIE G, YU J, et al. Adaptive task assignment for multiple mobile robots via swarm intelligence approach [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2007, 55(7): 572-588.

[6]高云园,韦巍.未知环境中基于免疫网络的多机器人自主协作[J].浙江大学学报:工学版,2006,40(5):733-737.
GAO Yunyuan, WEI Wei. Multi-robot self-determination co-operation based on immune network in an unknown environment[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(5): 733-737.

[7]GAO Yunyuan, WEI Wei. Multi-robot autonomous cooperation integrated with immune based dynamic task allocation

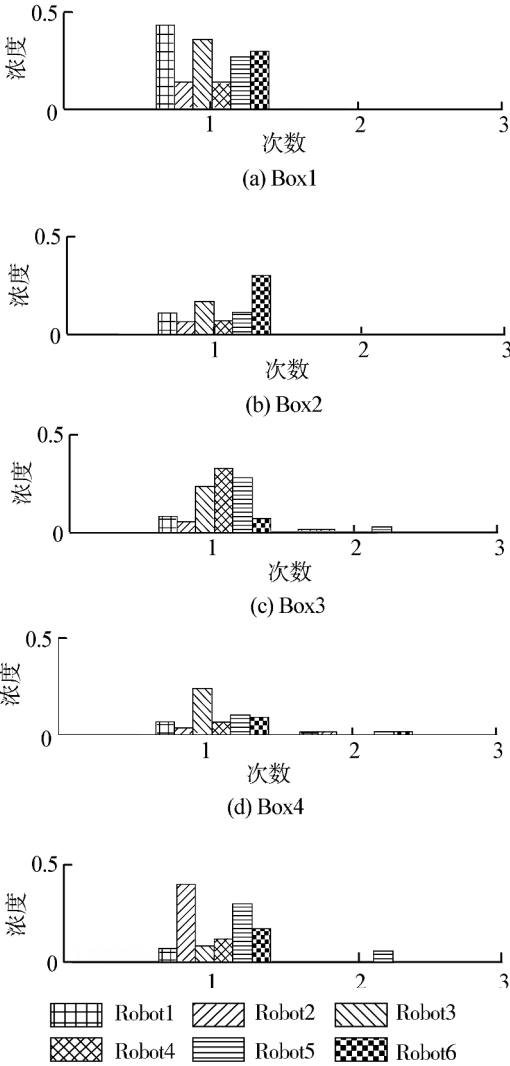


图 6 文中算法在环境 6 中的机器人浓度选择
Fig.6 Concentration selection of proposed algorithm in environment 6

[C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. Ji'nan, China, 2006: 586-591.

[8] 吴皓, 田国会, 黄彬. 未知环境探测的多机器人协作策略研究[J]. 山东大学学报: 工学版, 2008, 38(4): 27-31.
WU Hao, TIAN Guohui, HUANG Bin. Research on the collaboration strategy of multi robot for exploring unknown environment[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2008, 38(4): 27-31.

[9] YUAN Mingxin, WANG Sunan, WU Anyang. Hybrid ant colony and immune network algorithm based on improved APF for optimal motion planning[J]. Robotica, 2010, 28(6): 833-846.

[10] FARMER J, PACKARD N, PERELSON A. The immune system, adaptation, and machine learning[J]. Physica D, 1986, 2(3): 187-204.

[11] ISHIGURO A, WATANABE Y, KONDO T, et al. A robot with a decentralized consensus-making mechanism based on the immune system[C]//Proceedings of the International Symposium on Autonomous Decentralized Systems. Berlin, Germany, 1997: 231-237.

[12] YUAN Mingxin, WANG Sunan, WU Anyang, et al. A novel immune network strategy for robot path planning in complicated environments[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2010, 60(1): 111-131.

[13] 刘颖, 侯利华, 陈薇. 干扰素的信号传导和抗病毒效应机制[J]. 生物技术通讯, 2012, 23(1): 123-126.
LIU Ying, HOU Lihua, CHEN Wei. Signal transduction and mechanisms of antiviral effect of interferon[J]. Letters in Biotechnology, 2012, 23(1): 123-126.

[14] LI Guanghui, TAMURA Y, ASAMA H. Dynamical task allocation and reallocation based on body expansion behavior for multi-robot coordination[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Mechatronics and Automation. Beijing, China, 2011: 537-542.

作者简介:



袁明新,男,1978 年生,讲师,博士,主要研究方向为仿生智能、机器人视觉导航控制与多机器人任务分配等。主持及参与国家自然科学基金、江苏省自然科学基金等项目多项,发表学术论文 10 余篇。



叶兆莉,女,1987 年生,硕士研究生,主要研究方向为仿生智能、移动机器人路径规划等。



程帅,男,1988 年生,硕士研究生,主要研究方向为仿生智能、移动机器人的视觉导航控制等。

2014 欧洲计算机视觉会议

European Conference on Computer Vision

The European Conference on Computer Vision is one of the top conferences for researchers in this field and is held biennially in alternation with the International Conference on Computer Vision. It was first held in 1990 in Antibes (France) with subsequent conferences in Santa Margherita Ligure (Italy) in 1992, Stockholm (Sweden) in 1994, Cambridge (UK) in 1996, Freiburg (Germany) in 1998, Dublin (Ireland) in 2000, Copenhagen (Denmark) in 2002, Prague (Czech Republic) in 2004, Graz (Austria) in 2006, Marseille (France) in 2008, and Heraklion (Greece) in 2010 and 2012 in Florence (Italy). To our great delight, the 13th conference is held in Zürich, Switzerland. ECCV has an established tradition of very high scientific quality and an overall duration of one week.

Website: <http://eccv2014.org/>