

基于人工免疫的移动机器人 任务分配及路径规划技术

袁明新 申 燚 著

Technologies of Task Allocation and Path
Planning for Mobile Robots
Based on Artificial Immune



國防工業出版社

National Defense Industry Press

基于人工免疫的移动机器人 任务分配及路径规划技术

袁明新 申 燧 著

Technologies of Task Allocation and Path
Planning for Mobile Robots
Based on Artificial Immune

藏书

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

生物免疫系统是一种高度进化的、复杂的自适应系统,能够识别和抵御抗原性异物,维持机体环境的稳定。生物免疫系统中的优良信息处理机制为解决工程问题,尤其是机器人技术提供了新的契机。

本书是作者近年来在移动机器人领域开展人工免疫理论研究的总结,重点介绍了基于人工免疫的移动机器人任务分配及路径规划技术。本书共分为4个部分:第1部分主要讨论了生物免疫系统与人工免疫系统;第2部分主要讨论了面向移动机器人任务分配的人工免疫系统,介绍了3种免疫任务分配模型;第3部分主要讨论了面向移动机器人全局路径规划的人工免疫系统,介绍了3种全局免疫路径规划算法;第4部分主要讨论了面向移动机器人局部路径规划的人工免疫系统,介绍了两种局部免疫规划算法。

本书可以作为高等工科院校高年级学生和研究生相关课程的教材,也可以作为科研工作者和技术人员进行人工智能和机器人学研究的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于人工免疫的移动机器人任务分配及路径规划技术/
袁明新,申燮著. —北京:国防工业出版社,2015.8
ISBN 978-7-118-10316-8
I. ①基… II. ①袁… ②申… III. ①移动式机器人—
研究 IV. ①TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第191037号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 7¼ 字数 165 千字

2015年8月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 25.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

近年来,随着人工智能的发展,将计算机科学和免疫学相融合并应用于工程实践已经成为当前国际研究领域的一个热点。生物免疫系统的免疫记忆、免疫耐受和模式识别等为解决工程问题,尤其是机器人技术提供了新的契机。在过去 10 余年里,针对人工免疫系统的研究吸引了国内外广大学者的目光,并在各个应用领域取得了优异的成绩。

2006 年 9 月至 2010 年 3 月,作者在西安交通大学攻读博士学位,期间主要开展了智能空间内移动机器人导航关键技术研究,其中路径规划主要基于人工免疫系统来实现。2010 年 4 月在原来研究基础上,申请了国家青年自然科学基金,对多机器人任务分配及路径规划的免疫理论和方法继续开展研究,并取得了一系列研究成果。由于这些成果多以分散形式出现在各期刊和会议论文集上,且部分以英文的形式发表,不利于查阅和交流,现将部分成果汇集起来,以专著形式呈现给广大人工免疫系统和机器人学研究的读者们。

本书重点介绍了人工免疫理论在移动机器人系统中的应用。本书共分为 4 个部分:第 1 部分主要讨论了生物免疫系统中的基本概念、主要功能、免疫应答和基本免疫理论,以及人工免疫系统中的研究进展、典型算法、模型和应用研究;第 2 部分主要讨论了人工免疫系统在多机器人任务分配系统中的应用,介绍了爆发式进化的多机器人免疫任务分配、干扰素调节的多机器人免疫网络分配,以及胸腺肽调节机制的多机器人免疫网络任务分配;第 3 部分主要讨论了人工免疫系统在移动机器人全局路径规划中的应用,介绍了烟花爆炸式的免疫路径规划、融合阴性选择的多克隆路径规划和人工势场接种的免疫网络路径规划;第 4 部分主要讨论了人工免疫系统在移动机器人局部路径规划中的应用,介绍了基于独特型免疫网络的局部路径规划和具有免疫记忆机制的互联耦合免疫网络规划。

本书由袁明新、申焱负责编写并统编全稿,参与资料收集整理工作的还有叶兆莉、江亚峰、赵荣、华晓彬、李平正、张盼盼和陈晨等。在编写和出版过程中,本书得到了国家青年自然科学基金:动态环境中多机器人任务分配及规划的免疫理论及方法研究(编号 61105071)和江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师人才计划项目的资助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不足之处,敬请广大读者批评指正,对此表示诚挚感谢。

袁明新

2014年12月28日

于江苏科技大学

目 录

第 1 部分 生物免疫系统与人工免疫系统

第 1 章 生物免疫系统	1
1.1 引言	1
1.2 生物免疫学的基本概念	1
1.3 生物免疫系统的主要功能及免疫应答	3
1.3.1 免疫系统的主要功能	4
1.3.2 免疫应答	4
1.4 生物免疫学基本理论	5
1.4.1 克隆选择学说	5
1.4.2 独特型免疫网络学说	6
1.5 本章小结	7
第 2 章 人工免疫系统	8
2.1 引言	8
2.2 人工免疫系统的研究进展	8
2.3 人工免疫系统的典型算法和模型	9
2.3.1 免疫遗传算法	9
2.3.2 克隆选择算法	10
2.3.3 免疫网络动力学模型	12
2.4 人工免疫系统的应用研究	12
2.4.1 优化设计	12
2.4.2 系统控制	13
2.4.3 模式识别与图像处理	13
2.4.4 故障诊断	14
2.4.5 机器人技术	14

2.5	本章小结	15
-----	------	----

第2部分 面向移动机器人任务分配的人工免疫系统

第3章	基于爆发式进化的多机器人免疫任务分配	16
-----	--------------------	----

3.1	引言	16
3.2	组合拍卖式分配模型	16
3.3	爆发式免疫遗传算法	17
3.3.1	基本免疫遗传算法	17
3.3.2	爆发式免疫进化机制	19
3.3.3	爆发式免疫遗传算法	19
3.3.4	算法优化性能测试	20
3.4	免疫任务分配性能测试	22
3.4.1	编码形式	22
3.4.2	适应度函数	22
3.4.3	任务分配性能测试	23
3.5	本章小结	26

第4章	干扰素调节的多机器人免疫网络分配	27
-----	------------------	----

4.1	引言	27
4.2	免疫网络分配模型	27
4.3	干扰素调节的免疫网络分配算法	28
4.3.1	算法的基本定义	28
4.3.2	干扰素及其调节因子	29
4.3.3	抗体选择模型	29
4.3.4	分配算法流程	30
4.4	干扰素调节的多机器人协作搬运性能测试	30
4.4.1	测试参数设置	30
4.4.2	分配结果及分析	31
4.5	本章小结	36

第5章	胸腺肽调节机制的多机器人免疫网络任务分配	37
-----	----------------------	----

5.1	引言	37
5.2	胸腺肽及其免疫分配模型	37
5.3	胸腺肽调节的免疫网络分配算法	38

5.3.1	分配模型的基本定义	38
5.3.2	分配算法流程	39
5.4	胸腺肽调节的多机器人协作搬运性能测试	39
5.5	本章小结	44

第3部分 面向移动机器人全局路径规划的人工免疫系统

第6章	烟花爆炸式的免疫路径规划	45
6.1	引言	45
6.2	等间距规则空间划分模型	46
6.3	烟花爆炸式免疫算法	46
6.3.1	烟花爆炸机制	46
6.3.2	烟花爆炸免疫算法伪代码	46
6.3.3	算法的优化性能测试	48
6.4	烟花爆炸式免疫规划的主要算子	50
6.4.1	选择算子	51
6.4.2	交叉算子	51
6.4.3	变异算子	52
6.4.4	疫苗抽取与接种算子	53
6.4.5	烟花爆炸式进化	53
6.5	烟花爆炸式免疫规划性能测试	53
6.5.1	规划环境设置	53
6.5.2	规划结果及分析	54
6.6	多障碍物环境的多机器人协作搬运	56
6.6.1	协作搬运环境设置	56
6.6.2	协作搬运结果及分析	57
6.7	本章小结	58
第7章	融合阴性选择的多克隆选择算法及其路径规划	59
7.1	引言	59
7.2	多克隆选择算法及其算子	59
7.2.1	克隆复制	60
7.2.2	克隆交叉	60
7.2.3	克隆变异	61
7.2.4	克隆选择	61

7.3	基于阴性选择的多克隆选择算法	61
7.3.1	阴性选择基本描述	61
7.3.2	匹配及其定义	61
7.3.3	克隆删除和克隆补给	62
7.3.4	算法流程	63
7.4	算法优化性能的测试与分析	63
7.5	基于 PSABNS 的路径规划	65
7.5.1	基于 MAKLINK 链接图的自由空间建模	65
7.5.2	编码方法	66
7.5.3	目标函数	67
7.5.4	规划仿真	67
7.6	本章小结	68
第8章	基于人工势场接种的免疫网络路径规划	70
8.1	引言	70
8.2	全局免疫网络规划模型	70
8.3	基于人工势场接种的免疫规划	72
8.3.1	基本定义	72
8.3.2	疫苗抽取与接种	73
8.3.3	算法流程	74
8.4	复杂环境中的免疫规划性能测试	76
8.5	主要算法参数的性能测试	79
8.5.1	命令清晰度启发因子 α 的选择	79
8.5.2	目标启发因子 β 的选择	80
8.5.3	命令清晰度衰减系数 γ 的选择	81
8.6	本章小结	81
第4部分 面向移动机器人局部路径规划的人工免疫系统		
第9章	基于独特型免疫网络的局部路径规划	82
9.1	引言	82
9.2	免疫网络规划模型	83
9.3	免疫网络规划算法	84
9.3.1	基本定义	84
9.3.2	抗体浓度计算	86

9.3.3 算法流程	86
9.4 仿真结果与分析	87
9.4.1 静态环境中的免疫规划与比较	87
9.4.2 动态环境中的免疫规划	88
9.5 本章小结	89
第10章 具有免疫记忆机制的互联耦合免疫网络规划	90
10.1 引言	90
10.2 互联耦合免疫网络规划模型	90
10.3 互联耦合免疫网络规划算法	92
10.3.1 抗体的定义	92
10.3.2 抗体浓度计算及抗体选择	94
10.3.3 算法流程	95
10.4 静态环境中的免疫规划性能测试	96
10.5 动态环境中的免疫规划性能测试	97
10.6 本章小结	99
参考文献	100

第 1 部分 生物免疫系统与 人工免疫系统

第 1 章 生物免疫系统

1.1 引言

人工免疫系统 (Artificial Immune System, AIS) 是受生物免疫系统 (Biological Immune System, BIS) 中的信息处理机制启发而发展起来的一种用于解决工程实际问题的计算和信息处理系统,是对自然界中生物免疫系统的部分功能模拟^[1]。因此,在人工免疫系统的设计和应用过程中不可避免地会引入生物免疫系统的一些专业术语以及生物功能。为了便于广大读者理解本书中相关人工免疫系统的原理,本章首先给出生物免疫系统中的一些基本概念、主要功能以及生物免疫学的基本理论等。

1.2 生物免疫学的基本概念

“免疫 (Immunity)”源自拉丁文“Immunis”,其原意为“免除税收”(Exception from charges),也包含着“免于疫患”之意。在自然界中,免疫是机体识别和排除抗原性异物的功能。免疫系统是机体防卫病原体入侵最有效的武器,即能够从人体自体细胞或自体分子和外因感染的微组织中检测并消除病毒等病原体本身,以及因感染而引起的机能不良、功能紊乱、功能障碍等症状^[1]。免疫学是在人类长期与传染疾病斗争过程中发展起来的,是研究机体自身防御、识别异物并对之发生应答的一门医学与生物学的基础学科^[2]。免疫学的发展经历了经验免疫学时期 (1876—1900)、科学免疫学时期 (1900—1977) 和现代免疫学时期 (1977 年至今)。

随着现代生物学和医学的发展,免疫学理论也得到了迅猛发展,研究内容和研究方向也得到了进一步拓展,出现了如细胞免疫学、分子免疫学等新的分支和交叉学科。

生物免疫系统是机体执行免疫应答及免疫功能的重要系统,是一个由众多免疫器官、组织、分子和细胞构成的复杂系统^[3]。为了便于理解免疫系统的主要功能和作用机制,进而理解本书各章提出的人工免疫系统应用,这里首先给出生物免疫学中的一些基本概念^[4]。

染色体(Chromosome)是由脱氧核糖核酸、蛋白质和少量核糖核酸组成的线状或棒状物,是遗传物质即基因的载体。因为容易被碱性染料染成深色,所以叫做染色体。

基因(Gene)是遗传的基本单元,是产生一条多肽链或功能核糖核酸(Ribonucleic Acid, RNA)所必需的脱氧核糖核酸(Deoxyribonucleic Acid, DNA)片段。

抗原(Antigen, Ag)^[5]是指能够刺激机体产生免疫应答,并能与免疫应答产物抗体和致敏淋巴细胞在体内或体外结合,发生免疫效应的物质。抗原具有两种性质,它既能刺激机体免疫系统产生特异性免疫反应,形成抗体和致敏淋巴细胞,又能与之特异性结合出现免疫反应的物质。前一种性质称为免疫原性(Immunogenicity),后一种性质称为反应原性(Reactinogenicity)。

表位(Epitope)又称为抗原决定簇(Antigenic Determinant),是指抗原分子上的特异性化学基团,存在于抗原分子表面。它可决定刺激机体产生抗体或致敏淋巴细胞的特异性,并能与相应的抗体或致敏淋巴细胞发生特异性反应。

抗体(Antibody, Ab)是在抗原物质对机体刺激后所形成的,是一类具有与该抗原发生特异结合反应功能的球蛋白。目前将具有抗体活性或化学结构上与抗体相似的球蛋白称为免疫球蛋白(Immunoglobulin, Ig)。所有抗体都是免疫球蛋白,但是并非免疫球蛋白都是抗体。

对位(Paratope)也称为互补位或者侧位,是抗体上用来识别抗原决定簇的部分,也就是用来与抗原表位进行特异性结合的部位。

独特型(Idiotype)是指在同一个体内,不同抗体形成细胞克隆所产生的免疫球蛋白分子V区与其他抗体V区不同的抗原性,即每一种抗体所表现的与其他抗体不同的抗原特异性。

独特位(Idiotope)是指独特型的抗原决定簇,即抗体分子可变区上能被其他抗体或抗原识别并进行特异性结合的特殊部位。

图 1.1 描述了抗原抗体的相互作用关系^[6]。

T 细胞(T cell, T 淋巴细胞/T lymphocyte)是淋巴细胞的一种,指胸腺中分化成熟的淋巴细胞。

B 细胞(B cell, B 淋巴细胞/B lymphocyte)是体内主要的免疫细胞,是由骨髓中

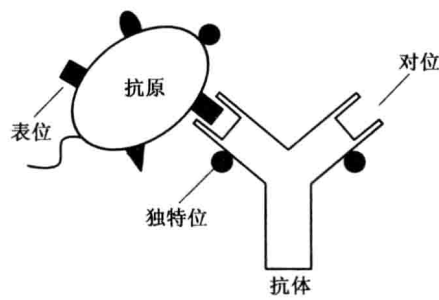


图 1.1 抗原抗体相互作用

的造血干细胞分化发育而来。在受到抗原刺激后,大部分 B 细胞会成为浆细胞(效应 B 细胞),再由浆细胞产生球蛋白抗体进行体液免疫。少部分 B 细胞成为记忆细胞,当机体受到同一抗原入侵时,记忆 B 细胞会大量增殖、分化为浆细胞,并产生抗体消灭抗原。

疫苗(Vaccine)是将病原微生物(如细菌、病毒、肿瘤细胞等)及其代谢物,经过人工减毒、灭活或利用基因工程等方法制成的可使机体产生特异性免疫的生物制剂,通过疫苗接种可以帮助被接受者获得免疫力。

亲和度(Affinity)是指抗原与抗体之间的结合能力大小。抗体亲和度越高,其消灭抗体的能力越强;反之能力越弱。

克隆(Clone)是指由同一祖先通过无性繁殖而形成的一群具有完全相同遗传组成的细胞或个体。

1.3 生物免疫系统的主要功能及免疫应答

免疫系统是生物机体保护其自身的一种防御性结构,主要由免疫器官、免疫细胞和免疫分子组成,如表 1.1 所列。生物免疫系统的基本功能是识别“自我”和“非自我”,并发生免疫应答,将“非自我”排除,从而维持机体平衡,保证生物体自身的生存和发展。按照免疫系统对不同抗原物质所发挥的不同作用,生物免疫系统具有免疫防御、免疫监视、免疫耐受和免疫调节的功能。

表 1.1 免疫系统组成

免疫器官		免疫细胞		免疫分子	
中枢	周围	淋巴细胞	吞噬细胞	膜型分子	分泌型分子
胸腺、骨髓等	脾、淋巴结、扁桃体等	T 细胞、B 细胞等	巨噬细胞等	TCR (T 细胞受体)、BCR (B 细胞受体)、黏附分子、细胞因子受体等	免疫球蛋白、补体、细胞因子等

1.3.1 免疫系统的主要功能

(1) 免疫防御(Immunologic Defence)是指机体在正常情况下,能对外来抗原性异物(如微生物或毒素)的感染进行有效抵御和消除。当这种抗感染免疫反应强烈时,可能会导致超敏反应;反之,过低时,可能会引起持续感染或免疫耐受。

(2) 免疫监视(Immunologic Surveillance)是指机体可通过免疫功能防止或消灭机体在新陈代谢过程中出现的异化或癌变细胞及有毒产物。若丧失免疫监视,机体会发生癌变细胞发生和发展,产生肿瘤,或出现病毒的持续感染。

(3) 免疫耐受(Immunologic Tolerance)是指机体对抗原刺激不能执行正免疫应答,具有抗原特异性,即抗原不能激活 T 细胞与 B 细胞产生特异性免疫效应细胞及特异性抗体。

(4) 免疫调节(Immunologic Regulation)是指在免疫应答过程中,免疫系统内部各种免疫细胞和免疫分子通过相互协调、相互制约,而使机体对抗原刺激产生最适当的反应,维持机体的生理平衡。

1.3.2 免疫应答

免疫应答(Immune Response)是机体免疫系统执行其防卫功能的生物学过程,即机体免疫系统受抗原性物质刺激后,淋巴细胞特异性识别抗原分子,发生相应的活化、增殖、分化,进而产生免疫效应的一系列复杂生物学反应过程,并最终将抗原性异物排除的过程。

根据应答特性,免疫应答可以分为两种类型:一种是当机体遇到病原体后,首先立刻起防御作用的固有免疫应答,又称为非特异性免疫应答,是人体防御病原体入侵的第一道防线,具有非特异性、可以遗传、不产生记忆性的特点;另一种是具备特异性识别抗原功能的免疫细胞进行特异性免疫的适应性免疫应答,又称为特异性免疫应答,具有后天获得、不能遗传和有特异性的特点。

适应性免疫应答又分为两种类型:初次免疫应答及再次免疫应答。

(1) 初次免疫应答(Initial Response)是指病原体第一次侵入机体被宿主 B 细胞识别时,B 细胞分化形成浆细胞进而使得免疫系统对感染产生大量抗体,帮助清除体内病原体。初次应答有一定的潜伏期,当机体初次接触病原体时,短期内很难从体内查到抗体或抗体数很少。初次应答最早产生的抗体为免疫球蛋白 M(Immunoglobulin M, IgM),该抗体在几天内可以达到高峰,随即开始下降,接着才产生免疫球蛋白 G(Immunoglobulin G, IgG)。初次应答产生的抗体总量较少,维持时间也较短。

(2) 再次免疫应答是指同一病原体再次入侵机体,记忆性淋巴细胞能更快、更

强、特异地产生应答过程,也称为免疫记忆。再次免疫应答的潜伏期明显缩短,抗体浓度增加快、含量高且维持时间长,再次应答时机体产生的抗体大部分为 IgG,而 IgM 相对较少。

免疫应答过程如图 1.2 所示。

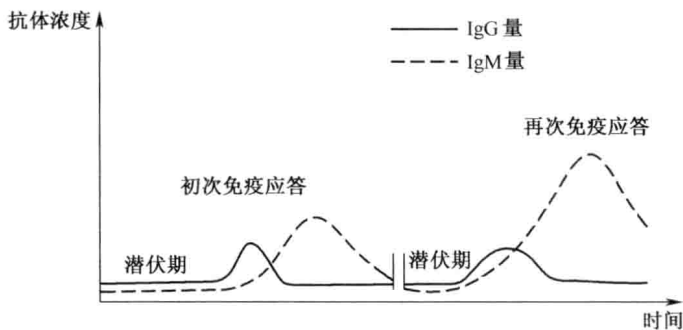


图 1.2 免疫应答过程

免疫应答的过程分为 3 个阶段。

(1) 识别阶段:指抗原递呈细胞对抗原性异物的摄取、加工和递呈以及抗原特异性淋巴细胞(T、B 淋巴细胞)对递呈抗原识别后的启动活化,又称为抗原识别阶段。

(2) 活化增殖阶段:指识别抗原后的特异性淋巴细胞在细胞因子的作用下发生活化、增殖、分化为致敏淋巴细胞和浆细胞的阶段,也称为增生分化阶段。

(3) 效应阶段:指浆细胞分泌的抗体产生体液免疫效应和致敏淋巴细胞释放效应性淋巴因子,或直接发挥特异性细胞杀伤作用,产生细胞免疫效应的过程。

1.4 生物免疫学基本理论

为了解释生物免疫系统中的许多特性,国内外很多学者提出了许多著名的免疫系统理论和模型,其中包括侧链理论、阴性选择、克隆选择学说、独特型免疫网络学说等。鉴于本书中的人工免疫系统理论主要是建立在克隆选择学说和独特型免疫网络学说基础上,因此下面主要针对这两种生物免疫学理论进行介绍。

1.4.1 克隆选择学说

为了解释抗体形成机理,20 世纪初 Ehrlich 提出了侧链学说,20 世纪 30 年代 Haurowitz 等人提出了直接模板学说,20 世纪 40 年代末期 Burnet 提出了间接模板学说。由于模板学说不能解释生物免疫系统中的很多事实,在 20 世纪 50 年代之后就不再有影响了。到了 1955 年,Jerne 提出了自然选择学说,他认为动物体内存

在着大量的“自然抗体”，入侵抗原可与“自然抗体”形成复合物并被机体内吞噬细胞吞噬，从而消灭抗原。此外，该吞噬细胞可被诱导从而分裂和增殖大量抗体。在该学说影响下，Burnet 放弃了间接模板学说，并于 1957 年发表了著名的克隆选择学说。

克隆选择的原理可以用图 1.3 来表示^[7]。在胚胎期，机体在增殖中由于遗传和免疫细胞的基因突变，形成了免疫细胞的多样性。参与免疫应答的淋巴细胞表面都有且只有一种抗原特异性受体。当一种抗原体侵入机体后，在无数种的淋巴细胞群体中，只有带有与这种抗原互补的受体的淋巴细胞才能和抗原相结合，从而导致该淋巴细胞的活化并被大量克隆增殖，其中一部分细胞被分化为浆细胞（效应 B 细胞）。浆细胞寿命短，虽不能增殖，但是产生抗体的能力强，能在短时间内产生大量抗体去消灭抗原。另一部分细胞转化为记忆细胞。与浆细胞不同，记忆细胞寿命长，对抗原敏感，能记住入侵抗原。当有相同的抗原再次入侵时，记忆细胞能迅速作出响应，产生新的效应细胞和记忆细胞。由图 1.3 可以看出，克隆选择过程对应着免疫应答的 3 个阶段，即识别阶段、活化增殖阶段和效应阶段。

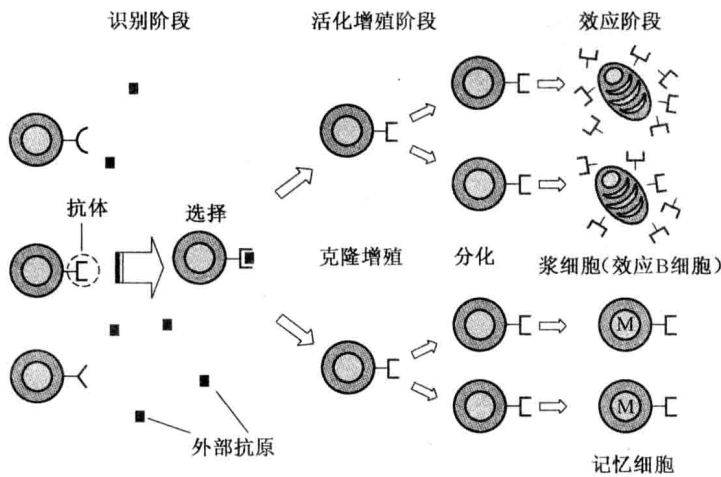


图 1.3 克隆选择原理

1975 年，阿根廷的著名免疫学者米尔斯坦将致敏淋巴细胞与骨髓瘤细胞融合，并将融合细胞做单克隆培养，从而获得只产生一种抗体的单克隆抗体细胞株，这种单克隆抗体为克隆选择学说提供了有力证据。

1.4.2 独特型免疫网络学说^[8,9]

1974 年，现代免疫学之父，丹麦著名的免疫学家 Niels K. Jerne 根据对抗体独特型分子的认识，在 Burnet 的“克隆选择学说”基础上提出了著名的免疫网络学说，后来 R. Richtes、R. Hoffmann 等人又作了补充。该学说认为免疫系统中各个细

胞克隆并不是处于一种独立状态,而是通过自我识别、相互刺激和相互抑制而构成一种动平衡的网络状态。构成相互刺激和相互抑制的物质基础是独特型和抗独特型^[10]。

独特型免疫网络可以用图 1.4 来示意性描述。由图可以看出,当抗原进入机体后,经抗原提呈发生克隆扩增,大量分泌抗体 Ab1,抗体 Ab1 的独特位 Id1 通过 Ab2 的对位 P2 刺激 B 细胞 2,而从抗体 Ab2 的角度来看,抗体 Ab1 的 Id1 相当于抗原,因此与抗体 Ab1 相关的 B 细胞将受到 Ab2 抑制,而 Ab3 的 Id3 相对于 Ab1 而言又是抗原,Ab1 又将受到 Ab3 刺激。Jerne 的独特型网络学说强调了免疫系统是各个细胞克隆之间相互联系、相互制约所构成的对立统一整体,这是免疫学中的一个重大突破,它对于免疫学理论研究以及在生物—医学和工程领域中的实际应用都具有重要意义^[11]。

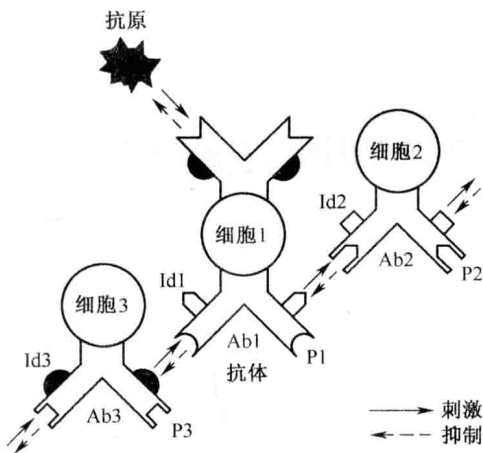


图 1.4 Jerne 的独特型网络

1.5 本章小结

为了便于读者更好地理解 and 掌握本书中关于机器人任务分配和路径规划的人工免疫系统理论,本章对生物免疫系统的一些基本概念、工作机理和免疫理论进行了简单的介绍,其中重点介绍了克隆选择学说和独特型免疫网络学说。