

基于视觉机理的自然图像处理

李作进 著

西南交通大学出版社

·成 都·

图书在版编目 (C I P) 数据

基于视觉机理的自然图像处理 / 李作进著. —成都 :
西南交通大学出版社, 2016.4
ISBN 978-7-5643-4664-5

I. ①基... II. ①李... III. ①机器人视觉 - 图像处理 -
IV. ①TP242.6②TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 085683 号

基于视觉机理的自然图像处理

李作进 著

责任编辑 李 伟

特邀编辑 欧阳柳

封面设计 墨创文化

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

发行部电话 028-87600564 028-87600533

邮政编码 610031

网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印 刷 四川煤田地质制图印刷厂

成品尺寸 148 mm×210 mm

印 张 5.5

字 数 193 千

版 次 2016 年 4 月第 1 版

印 次 2016 年 4 月第 1 次

书 号 ISBN 978-7-5643-4664-5

定 价 28.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

序

众所周知，人类视觉具有非凡的环境感知能力，似乎毫不费力就可以对周围环境的典型目标进行识别。随着人类对自身视觉系统的深入了解，借助人眼视觉的信息处理机制来增强机器视觉的认知能力已是计算机视觉领域的热点研究内容之一。然而，如何模拟人眼视觉系统的典型功能或信息处理机制，使计算机拥有人类所具备的观察和理解世界的的能力，却是计算机视觉领域面临的一大挑战。

本书借鉴人眼视网膜、视皮层的信息处理机制以及视觉心理认知组织准则，构建具有人类某些视觉功能特性的计算模型或方法，以机器视觉感知的自然环境信息——自然图像^①为处理对象，实现

^① 自然图像是一个没有准确定义的概念，是科学家为了研究人对所观察的外部环境产生的一些视觉神经反应而提出的。从信息获取角度来看，

自然图像的显著性处理与自然环境的典型目标识别，为机器人自动导航提供视觉环境感知和信息选择性传输机制的可计算方法。

基于视觉认知的自然图像目标识别属于神经生理学、认知心理学、生物物理学、计算机信息学以及自动化等众多学科交叉形成的新兴研究课题。作为交叉领域里的一项基础性研究工作，本书在研究方法与思路上有所突破，主要可概括为以下 7 个方面：

① 系统、全面地总结了国内外神经科学家在视觉信息处理上取得的功能性实验成果，分析和讨论了视觉信息处理中的层次（初级、中级、高级）功能。在总结国内外相关工作的基础上，重点探讨了基于生物视觉特性的自然图像目标识别所涉及的关键技术与难点。

② 详细分析了人类视网膜感知外部环境的信息处理机制，提出了一种空间可变分辨率的自然图像处理方法。在人类的视觉感知过

自然图像就是人类视觉系统能观测到的信息或者机器所采集到的自然环境信息。因此，用计算机模拟或仿真自然环境下某些视觉功能时所处理的对象就是自然图像。

程中，视网膜成像的分辨率随着注视点空间位置的变化而不同。依据这一生物事实，本书模拟了人类视觉系统视网膜的感知机制。所提出的自然图像显著性处理方法在海量图像数据的远程传输以及基于图像的远程目标识别中具有较高的应用价值。

③ 受生物视觉初级视皮层 (V1) 环境感知机制的启发，提出了一种以 gabor 积分模块为核心的自然图像目标轮廓提取模型与方法，以复杂背景的自然图像为处理对象，验证了用该方法提取自然图像显著性轮廓特征的可行性与优越性。

④ 受视觉“what pathway”信息处理机制的启发，提出了一种基于感知不变性特征的自然场景目标识别模型与方法。该方法通过有效提取目标的感知不变性特征与可塑性学习实现自然场景的目标识别。实验结果表明，该方法能有效地分类识别出自然场景中建筑物、树、天空、道路、行人、汽车以及自行车等典型目标，并具有较强的鲁棒性和较高的识别率。

⑤ 受认知心理学有关研究的启发，分析了传统流形认知方法

(LLE) 在特征学习以及分类识别中的不足，对传统的 LLE 方法进行了一种有监督的扩展。该方法在基于自然图像的数字手写体识别实验中，具有较高的正确识别率。

⑥ 针对自然图像数据的非高斯分布特性，对一种自主心智发育认知方法进行了改进，即在传统的发育方法 (HDR) 上，提出一种基于独立成分特征空间的分级判别回归树 (ICS-HDR)。将改进后的方法用于人脸自然图像的身份识别和机器人导航时障碍物方向判断。实验结果表明，该方法在识别率和消耗时间上都具有一定的优越性。

⑦ 受简单视觉细胞以及非经典感受野的联合启发，本部分将前述的神经信息计算方法用于视频图像的处理。结合视频动态行为分析的难点，本书提出的方法能较好地挖掘出视频信息中的动态行为能量特征，其反应现象与人类大脑特征具有一致性。实验结果表明，该方法通过计算视频帧的能量，能较好地辨识出视频中的动态行为，在基于视频的公共安防领域中有重要的应用价值。由于篇幅限制，

特将此部分通过论文形式附在书后，以供参阅。

李作进

2016年2月

目 录

1 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 国内外相关领域的研究现状	2
2 视觉感知与认知组织的生物学依据	18
2.1 引 言	18
2.2 人类视觉感知与认知机理的相关依据	19
2.3 人类视觉的启发原则	37
2.4 本章小结	38
3 基于高斯金字塔结构的视网膜感知计算方法	39
3.1 引 言	39
3.2 相关研究工作	41

3.3	算法过程与描述	44
3.4	算法的实验结果与应用研究	48
3.5	结论与讨论	55
3.6	本章小结	56
4	受 V1 功能特性启发的目标轮廓特征提取计算模型	57
4.1	引言	57
4.2	基于 gabor 核的积分变换	59
4.3	具有 V1 功能特性的目标轮廓提取模型与方法	62
4.4	复杂环境下自然图像的目标轮廓提取	66
4.5	结论与讨论	77
4.6	本章小结	78
5	受视觉“what”通路信息处理机制启发的目标识别计算模型	79
5.1	引言	79
5.2	视皮层信息处理机制与启发计算模型	81

5.3	算法验证与结果	87
5.4	结论与讨论	95
5.5	本章小结	96
6	一种有监督的流形认知目标识别方法	97
6.1	引言	97
6.2	流形的数学定义与图像流形认知启发	99
6.3	局部线性嵌入 (LLE) 算法的思想与主要步骤	101
6.4	有监督的 LLE 算法 (SLLE)	103
6.5	实验与结果	105
6.6	结论与讨论	109
6.7	本章小结	110
7	一种基于独立成分特征的自主发育认知目标识别方法	111
7.1	引言	111
7.2	自然图像的特征提取方法	113
7.3	基于独立成分特征的发育认知图像识别方法	114

7.4 算法验证与结果	120
7.5 结论与讨论	125
7.6 本章小结	126
参考文献	127
附 录	146
后 记	167

1 绪 论

1.1 引 言

随着计算机信息科学的深入发展,机器视觉与模式识别技术在工业、农业、通信、交通、医疗服务以及国防军事等领域得到了越来越广泛的应用。与此同时,强大的需求也给计算机视觉的发展提出了更高的要求。相比于人的视觉能力,目前的计算机视觉感知水平还无法完成一些人类视觉很容易实现的视觉任务。例如,计算机视觉系统无法指导过马路(即从街道上的大量视觉信息中识别出道路、车辆、行人、斑马线等基本交通信息并判断是否能够过马路),但是,一个未满3岁的小孩也能轻易完成这项视觉识别任务。因此,如何使计算机能够像人类那样通过视觉去观察和认知世界,并具有自动适应外部环

境的能力，是人工智能领域面临的一大挑战，也是计算机视觉与模式识别分支领域里一大具有普遍意义的热门研究课题。

20 世纪 80 年代以来，伴随着神经科学、计算神经科学、解剖学的发展，人类对自身大脑有了更加深刻的了解。在人类所感知的外部世界信息中，大约 80% 的部分来自视觉，这种客观事实使得科学家对视觉信息的各种处理机制进行了非常深入的研究，并取得了一系列的视觉信息处理理论成果。这些成果的取得，使得计算机视觉科研人员有条件从事模拟人类视觉功能的研究，也为改善目前的机器视觉识别性能提供了生物学上的依据。

自然场景是人类赖以生存的环境，也是人类感知世界的主要对象。自然场景的目标识别是人类理解外部世界的最根本、最简单任务，也是机器人实现自动导航的核心技术之一。由于自然环境在客观上的复杂性，自然图像的处理往往受到各种客观环境，如水、云、草等因素的干扰，传统的图像处理技术与目标识别方法已经很难满足机器人工业的需要。因此，如何将人类视觉中一些典型的信息处

理机制和目标识别功能赋予机器，是当前计算机视觉与模式识别领域的研究重点和迫切任务之一。本书正是基于这样的背景，以模拟人类视觉信息机制和功能为研究手段，以实现基于计算机视觉信息的自然环境下的典型目标识别为出发点，重点解决机器人在视觉信息传输机制以及感知过程中目标识别的关键性问题。

1.2 国内外相关领域的研究现状

1.2.1 计算神经科学与神经计算科学

计算神经科学是使用数学分析和计算机模拟的方法在不同水平上对神经系统进行模拟和研究^[1]。这种模拟和研究建立在神经物理学家对大脑的解剖基础之上，因此，计算神经科学属于脑科学的一个分支领域，其主要目标是阐明大脑进行处理的基本原理，揭示神经系统的状态所实现的表象本质，探索神经系统所完成的功能，也就是大脑的工作机理。计算神经科学研究的主要内容有：从神经元

的真实生物物理模型——它们的动态交互关系以及神经网络的学习，到大脑的组织 and 神经类型计算的量化理论等^[2]。1875 年，意大利解剖学家戈尔吉 (C. Golgi) 用染色体法最先识别出单个的神经细胞。1989 年，卡贾尔 (R. Cajal) 创立神经元学说，认为整个神经系统由结构上相对独立的神经细胞构成。在卡贾尔神经元学说的基础上，1906 年，谢灵顿 (C. S. Sherrington) 提出了神经元间突触的概念^[3]。20 世纪 50 年代，Hodgkin 和 Huxley 证明了神经元兴奋传导过程中存在着明显的电活动现象，并提出了膜离子通道 H-H 方程^[4]。此后，脑超微结构的研究、脑信号传导理论以及视觉生理学等分支相继受到了科学家的追捧。Kandel、Greengard、Carlsson 提出“学习与记忆的基础是神经元突触的可塑性”理论，并在 2000 年获得了诺贝尔奖。可见，计算神经科学的研究一直受到国际学者们的高度重视。

与计算神经科学研究不同的是，神经计算科学的主要目标是探索神经计算的数理基础，提出不同于当今计算科学的新的计算原理，

并将这些原理用于新的类似于人类神经处理方式的信息处理系统。

随着计算神经科学的进步，神经计算的研究也取得了很大进展。20世纪20年代，阿德廉 (C. D. Adrian) 提出神经动作电位。1943年，麦克鲁奇 (W. S. McCulloch) 和皮兹 (W. Pitts) 提出了有名的 M-P 神经网络模型^[5]。1949年，赫布 (D. O. Hebb) 提出了神经网络学习规则^[6]。到了20世纪50年代，罗森勃拉特 (F. Rosenblatt) 提出了感知机模型^[7]。霍普菲尔特 (J. J. Hopfield) 引入李雅普诺夫函数给出了网络稳定判据^[8]，该判据可用于联想记忆和优化计算。到了1990年，神经计算进入了研究热潮。新的神经计算模型层出不穷，人工神经网络系统的结构和算法也趋于多样性。在这个时期，神经计算与人工神经网络系统大量应用于实际系统，如工业系统^[9]、农业系统^[10,11]、生化系统^[12-14]、交通系统^[15-18]、经济系统^[19]、气象系统^[20-22]、环境生态系统^[23,24]、航空航天系统^[25]、模式识别与图像处理系统^[26-33]。在视觉神经方面，马尔 (David Marr) 对视觉信息加工问题进行深入研究后，于1982年提出了著名的视觉计算理论

(Computational Theory of Vision)^[34]。马尔的视觉计算理论把视觉过程看作一个信息处理过程，并把这一过程分为 3 个层次：计算理论、算法与数据结构和硬件实验。马尔的理论比较系统地揭示了用二维图像恢复三维物体形态的可能性和基本方法，具有划时代的意义，为计算机视觉成为一门学科奠定了重要的基础。但从生物心理学角度来看，马尔的视觉计算理论也存在不足之处，他将视觉处理过程分为相互独立的单向过程，而人的视觉过程具有典型的反馈机制。在国内，以中科院生物物理研究所汪云九研究员为主的研究团队，对神经感受器的时间特性数学描述进行了深入分析，并提出了广义视觉信息加工的一个数学模型，称为广义 Gabor 函数模型^[35]。除此之外，各国政府也非常重视神经计算的研究，如美国的 SDI 计划、英国的 ALVEY 计划、法国的 UNIKA 计划以及欧洲共同体的 ESPRIT 计划。美国国防部更是制定了一个斥资 4 亿美元 (约合 26.2 亿元人民币) 的神经计算机八年研究计划，并认为神经计算是实现机器智能的唯一途径，研制神经计算机是一项比研制原子弹更为重

大的工程^[36]。

虽然计算神经科学与神经计算科学属于不同的研究范畴，但是其研究结果会相互影响。计算神经科学的数学模拟和计算仿真应该贴近于神经生物学的实验事实，其模拟本身并非是解决问题的终结，也不是为了“克隆”某个神经系统，而是模拟结果会反过来作用于研究者的思想，触发悟性，达到对生物神经正确认知的目的。另一方面，神经计算的启发得益于神经科学家的实验数据，为计算机提供类脑功能的计算方法，从而为计算机信息科学的发展提供一定的理论基础。

本书第 3~5 章提出的几种神经结构与功能计算模型或方法都属于神经计算学科研究内容。

1.2.2 心理学与认知科学

心理学是研究心理现象的科学。人的任何活动都有一定的心理现象作支撑。人类对自身心理过程的研究将是人类自我认知的重要

组成部分，但是，由于人（研究对象）本身的复杂性，从心理活动中发现规律是很困难的。这是因为，所研究的人类机体总是处于一定环境之中，而且人对环境的适应性又很强，人的行为既取决于机体本身的发育完善，同时又是适应环境的结果。因此，心理学的研究不能独立于生物物理学、解剖学以及认知发育等学科之外。

经过几十年的发展，心理学的研究形成了 3 个派别：新行为主义、格式塔心理学派和信息加工学派。新行为主义心理学是由美国华生（J. B. Watson）于 1903 年提出的，它强调客观的实验方法，要求对实验严格加以控制，因此，它的研究方法主要是操作主义，也就是其结果能被别人重复。格式塔心理学是 20 世纪 30 年代一个德国实验室提出的，它强调动力学和整体分析的思想。作为拓扑知觉理论的主流学派，它为计算机模拟视知觉、图像处理等提供了新思路。最近，中科院生物物理研究所陈霖院士提出的实验方案获得认知世界的认可，论证了拓扑知觉理论更符合生物视觉规律^[37]。随后，生物学和神经心理学的研究成果也证明了大范围性质的知觉常

常优于局部性质^[38]。信息加工认知心理学是用信息加工过程来解释人的复杂行为，它集中于认知过程的研究，与其他的认知理论有着非常密切的关系，或者可以认为信息加工心理学吸收了行为主义和格式塔心理学的有益成果。信息加工认知心理学作为一种新的研究方向是近 30 余年的事情：1967 年，美国心理学家奈塞所编著的《认知心理学》一书的问世，标志着信息加工认知心理学正式作为一个学派而立足于西方心理学界，成为当代西方心理学的两大主流（另一个是人本主义心理学）之一^[39]。信息加工认知心理学的兴起，既有心理学的内部原因，也有相邻学科影响和促进的外部原因。特别是认知科学的研究成果，在一定程度上促进了信息加工心理学的发展。

认知科学是探索人类的智力如何有物质产生和人脑信息处理的过程。因此，可以认为，认知科学是研究人类的认知和智力的本质及规律的前沿科学。1979 年，美国的认知科学学会成立，标志着认知科学正式成为美国科研领域的一个重要分支。随后，认知科学研究也成为“国际人类前沿科学计划”的焦点研究方向之一。特别是，

“知觉和认知”“运动和行为”“记忆和学习”“语言和思维”被列入人类前沿科学的 12 个焦点问题。近年来，认知科学的发展得到了世界各国政府的高度重视和大规模支持。美国和欧盟分别推出“脑的十年计划”。美国海军也投入巨资来支持“认知科学基础规划”。日本则推出了雄心勃勃的“脑科学时代”计划，其总预算高达 200 亿美元（约合 1 310 亿元人民币）。这些计划的研究主要集中在以下 5 个方面：① 确定人类的认知构造；② 提供知识和技能的准确认知结构特性；③ 发展复杂学习的理论，解释获得知识结构和复杂认知处理的过程；④ 提供教导性理论以刻画如何帮助和优化学习过程；⑤ 利用人类行为的计算模型，提供建立有效的人-机系统交互作用的认知工程的科学基础。

1.2.3 自然智能与人工智能

自然智能是特指类似于人类的智能总称。人类的科学事业正面临着四大问题的挑战，分别是物质的本质、宇宙的起源、生命的本

质和智力的产生^[1]。自然智能反映了人类智力支撑其行为或思维的能力，因此，智能科学所研究的主要内容就是前面四个问题中的最后一个，也可能是最困难、最重要的问题——智力是如何产生的以及智力能做什么？2004年，霍金斯(J. Hawkins)发表《论智能》(*On Intelligence*)一书^[40]，他从区分智能和智能行为相互关联之处入手，对著名的图灵测试进行了解释。在这本书里面，霍金斯详细分析了许多有关智能的实验案例，但都没有对智能给出一个准确的定义。只是从大量的实验中发现，智能是行为主体、指令以及环境结合的共同反映。但可以肯定的是，自然智能研究的根本目的是全面认知人类神秘的大脑，是由脑科学、认知科学、人工智能等学科构成的交叉学科。

人工智能(Artificial Intelligence)的起源可以追溯到丘奇(Church)、图灵(Turing)和其他一些学者关于计算本质的思想萌芽。早在20世纪30年代，他们就开始探索形式推理概念与即将发明的计算机之间的联系，并建立起了关于计算和符号处理的理论。

被称为“人工智能之父”的图灵，不仅创造了一个简单的非数字计算模型，而且直接证明了计算机可能以某种被认为是智能的方式进行工作，这就是人工智能思想的萌芽。而人工智能作为一门学科出现的突出标志是 1956 年夏，当时美国年轻的数学家麦卡锡（John McCarthy）在美国达特莫斯（Dartmouth）大学举办的一次学术会议，提出了人工智能（Artificial Intelligence，AI）这一概念，并将其定义为“使一部机器的反应方式就像是一个人在行为时所依据的智能”。经过几十年的发展，人工智能领域涌现出许多热门的研究方向，如知识表示、自动推理与搜索方法、机器学习和知识获取、知识处理、自然语言理解、机器视觉、智能机器人等；并在博弈、自动推理与证明、专家系统、自然语言理解与语意建模、人类行为建模、机器人与智能控制、模式识别、智能调度、数据挖掘等诸多领域取得了广泛的应用。目前，人工智能的研究方法主要分为符号主义（Symbolicism）、联结主义（Connectionism）和行为主义（Behaviorism）三大学派。

1. 符号主义

符号主义 (Symbolocism) 也称为逻辑主义 (Logicism)、心理学派 (Psychologism) 或计算机学派 (Computerism)。该学派认为人工智能来源于数理逻辑，而数理逻辑又在 19 世纪获得了迅速发展，到了 20 世纪 30 年代开始用于描述智能行为。事实上，“Artificial Intelligence”一词最初也是由符号主义学派的研究者提出来的。符号主义学派的学者认为智能行为的基本原理主要为物理符号系统假设和有限合理性原理。Newell 和 Simon 曾对这种研究方法的基本假设做过非常全面的总结^[41-43]。从 20 世纪 70 年代末到 80 年代，符号主义的研究方法得到了普遍的认可。经过几十年的发展，符号主义学派为人工智能学科建立了以世界符号表达和状态空间搜索为主要研究内容的一套比较完整的系统，先后提出了启发式算法、专家系统、知识工程理论等人工智能领域的重要成果。计算机诞生以后，符号主义学者又在计算机上实现了逻辑演绎系统，其代表性成果为启发式程序 LT (逻辑理论家)，人们使用它证明了 38 条数学定理，

从而表明了人类可利用计算机模拟人类的智能活动。

符号主义的基本信念是：知识是信息的一种形式，是构成智能的基础，人工智能的核心问题就是知识表示、知识推理和知识运用。知识可用符号表示，也可用符号进行推理。符号主义就是在这种假设之下，建立起基于知识的人类智能和机器智能的核心理论体系。

符号主义曾长期一枝独秀，经历了从启发式算法到专家系统，再到知识工程理论与技术的发展道路，为人工智能做出了重要贡献。但是随着人工智能的研究深入，越来越多的人开始质疑符号主义中基于数学的语意表达方法，认为这种方法过于理性化，即用一个完全清晰和确定的世界取代了具有模糊性、不确定性和主体灵活性演化的真实世界。除此之外，要用基于符号主义的专家系统等智能系统对世界进行完整的体系构建，表现出了计算量消耗巨大、缺乏学习能力等缺点。目前，越来越多的研究者考虑寻找其他的人工智能方法。尽管如此，符号主义仍然是人工智能学科中最重要的研究方法之一。

2. 联结主义

联结主义 (Connectionism) 也称仿生学派 (Bionicsism) 或生理学派 (Physiologism), 是基于生物进化论的 AI 学派, 其主要理论基础为神经网络及神经网络间的连接机制与学习算法。联结主义学派认为 AI 源于仿生学, 特别是对人脑模型的研究, 认为人的思维基元是神经元, 而不是符号处理过程。人脑不同于计算机, 并提出联结主义的大脑工作模式, 用于否定基于符号操作的计算机工作模式。

联结主义经过几十年的发展, 取得了一系列的研究成果。最早为 McCulloch 和 Pitts 提出的基于神经网络的脑模型, 也就是 MP 模型^[44]。后来在 20 世纪六七十年代, 联结主义尤其是以感知器为代表的脑模型研究曾出现过热潮。然而由于当时生物技术和脑科学研究技术水平的限制, 在 20 世纪 70 年代末至 80 年代初, 联结主义又一度陷入低潮。直到 1982 年, Hopfield 教授提出了利用硬件模拟的神经网络后^[45], 联结主义才开始快速发展起来。

虽然联结主义的研究方法在近年来的人工智能领域研究中受到了大量学者的关注，但其研究成果在工程应用中却不尽如人意。例如，大多数神经网络在工程应用中都表现出计算代价太大、网络层次数确定没有理论指导等。究竟大脑计算模式是否以联结关系为主，至今也没有准确的答案，这是因为，联结主义提出的神经网络计算模型，一方面是大脑结构的反应，但另一方面却与脑有着高速的计算能力相矛盾。因此，到目前为止，科学家还不能很好地模拟人脑是有着这方面的深层次原因，包括人脑与计算机在信息处理与结构上的天然不同、脑科学家对高级皮层认知能力了解不够深入以及一些哲学等方面的问题。但仍然有大批学者认为，联结主义才是人工智能的真正出路。

本书第 4、5 章部分的计算方法都用到了联结主义思想。

3. 行为主义

行为主义 (Actionism) 也称为进化主义 (Evolutionism) 或控

制论学派 (Cybematicism), 其原理为控制论及“感知-动作”型控制系统。行为主义提出了智能行为的“感知-动作”模式, 其主要观点包括: ① 智能取决于感知和行为; ② 人工智能可以像人类智能一样逐步进化 (所以也称为进化主义); ③ 智能行为只能通过现实世界与周围环境交互作用而表现出来。因此, 行为主义是控制论向 AI 领域的渗透, 它的理论基础就是控制论。控制论思想早在 20 世纪四五十年代就成为时代思潮的重要部分, 对早期人工智能工作者有着重要的影响。维纳和麦克洛等人提出的控制论和自组织系统以及钱学森等人提出的工程控制论和生物控制论都属于这方面的代表性研究成果。早期工作的重点集中在模拟人在控制过程中的智能行为和作用, 如对自寻优、自适应、自校正、自组织和自学习等控制论系统的研究。到了 20 世纪六七十年代, 控制论开始与人工智能结合。直到 20 世纪 80 年代, 行为主义才以人工智能新学派的面孔出现, 其代表人物主要有美国 AI 专家布鲁克斯 (Brooks)。在 1991 年 8 月悉尼召开的第 12 届人工智能国际会议 (IJCAI) 上, 布鲁克

斯作为大会“计算机与思维”奖的得主，通过讨论计算机、控制论、机器人等问题的发展情况，并以他在 MIT 多年进行人造动物机器的研究与实践以及他提出的“假设计算机体系结构”研究为基础，发表了一篇题为“Intelligence Without Reason”的论文^[46]。在该文中，布鲁克斯将基于行为的设计方法概括为对环境的感知 (Situatedness)、自身的具体化 (Embodiment)、智能 (Intelligence) 与系统的表现 (Emergence) 4 个基本过程。显然，布鲁克斯的行为主义学派否定智能行为来源于逻辑推理及其启发式的思想，认为对 AI 的研究不应该把精力放在知识表示和编制推理规则上，而是重点研究在复杂环境下对行为的控制。由此可见，以布鲁克斯为代表人物的行为主义学派对传统的符号主义思想提出了批评和挑战。行为主义在动态避障与导航^[47]、主动视觉^[48]、基于视觉的目标操作^[49]等方面都有着广泛的应用。这种方法与生物中的条件反射现象类似，可以大大降低系统建模的工作量以及实时操作的速度。在简单的导航任务中，这种方法的实现并不困难，但对于复杂的模式识别和分类任务则在