



机器直觉

翟鹏^{1†}, 张立华^{1,4,6*†}, 董志岩^{1,3,5†}, 万森², 郭雨晨², 甘中学^{1*}, 戴琼海^{2*}

1. 复旦大学智能机器人研究院, 上海 200433

2. 清华大学脑与认知科学研究院, 北京 100084

3. 季华实验室, 佛山 528200

4. 智能机器人教育部工程研究中心, 上海 200433

5. 上海智能机器人工程技术研究中心, 上海 200433

6. 吉林省人工智能与无人系统工程研究中心, 长春 130012

* 通信作者. E-mail: lihuazhang@fudan.edu.cn, ganzhongxue@fudan.edu.cn, daiqh@tsinghua.edu.cn

† 同等贡献

收稿日期: 2020-03-29; 接受日期: 2020-05-31; 网络出版日期: 2020-10-15

上海市科委项目 (批准号: 19511132000) 资助

摘要 当前以深度学习代表的人工智能技术所能解决的问题往往需要具有大量可以借鉴学习的训练集, 同时要求所获取的信息是完备的. 但在复杂时变的真实应用环境中, 采集到的数据往往包含大量噪声与不确定性, 且仅包含环境的局部信息, 导致了基于深度学习的人工智能应用的局限性. 而在同样环境下, 人类却往往可以依靠直觉做出较为迅速且适宜的判断, 这为我们发展新的人工智能理论解决上述问题提供了灵感. 本文系统地对人类直觉的概念、机理、类别等内容进行论述, 分析了不同学科已有相关研究进展及存在的不足. 在此基础上, 提出了机器直觉这一新的交叉学科研究方向, 并给出了实现机器直觉的基本准则, 以及通过让机器实现类似甚至超过人类的直觉能力、赋予机器洞察力与创造性的研究目标. 本文尝试设计了机器直觉的通用整体架构, 确定了全息感知、直觉认知、直觉决策和博弈行动几个主要功能模块的基本原理和内涵. 最后, 从脑科学、认知科学、人工智能等多学科交叉研究角度, 对机器直觉的应用与未来研究方向进行了展望, 为后续展开机器直觉的研究提供方向性指引.

关键词 人工智能, 直觉机理, 机器直觉, 直觉架构, 全息感知, 直觉认知

1 引言

自 20 世纪 50 年代人工智能的概念提出后, 不同类型的人工智能技术先后被提出, 呈现出百花齐放、百家争鸣的研究盛况. 基于对智能的不同角度的理解, 目前形成了联结主义、符号主义以及行

引用格式: 翟鹏, 张立华, 董志岩, 等. 机器直觉. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 1475–1500, doi: 10.1360/SSI-2020-0075

Zhai P, Zhang L H, Dong Z Y, et al. Machine intuition (in Chinese). Sci Sin Inform, 2020, 50: 1475–1500, doi: 10.1360/SSI-2020-0075

为主义等 3 大主要流派^[1]。联结主义的核心是神经网络, 于 20 世纪 50 年代中后期出现, 特别是 F. Rosenblatt 首次将神经网络的学习功能用于模式识别^[2]; 在六七十年代, 符号主义的逻辑表示发展迅速, 大批基于符号主义思想的专家系统先后问世; 行为主义最早在四五十年代以控制论思想出现, 其主要代表性理论是遗传算法和强化学习等^[3]。虽然在不同时期受限于软硬件条件, 3 大主义具有不同的主导地位, 但其在彼此竞争中又相互借鉴依存, 共同推进了人工智能的蓬勃发展。如今, 联结主义以深度学习之名复苏, 成为当前人工智能领域的主流, 已广泛应用于图像识别^[4]、语音识别^[5]、语义理解^[6]、社交网络分析^[7]等领域。

然而, 现有的基于人工神经网络的深度学习网络结构还远不及生物神经网络结构复杂, 仅是对生物神经系统的初级模拟^[8]。其功能大多局限于感知与理解层面, 在推理、决策等认知层面上的研究尚在撙节索涂, 大大限制了人工智能应用落地。传统人工智能技术所能解决的问题具有大量可以借鉴学习的训练集; 同时, 神经网络所能获取到的信息通常是完备的, 网络根据输入信息经过训练后给出一个简单的判决; 而且大多需要运行在高性能服务器上, 对计算资源和能耗的开销极大。对于智能机器人、无人系统等迫切需要智能化提升的领域, 进行神经网络训练时往往没有足够的数据, 且数据信息难以覆盖复杂多变的任务工况及外界环境。此外, 在复杂时变的外界环境中, 机器人所携带的传感器数量有限且所获取的感知数据往往存在大量噪声及不确定性, 并且难以准确、完备地获取外界及自身的状态, 造成机器人依据这种状态所做出的决策也常常具有偏差, 不能有效地完成任务甚至保证自身安全。同时, 由于能源及载荷重量所限, 机器人所携带的微处理器处理速度及精度较差, 无法有效运行大型神经网络。这些不利因素进一步制约了智能机器人的发展与应用, 因此迫切需要可以在复杂时变且充满不确定性的环境中, 利用有限计算资源, 实现高效决策并准确完成任务的方法和机制。

人类却可以在上述场景中做出迅速而适宜的判断或决策。例如, 经验丰富的飞行员在飞机遇险时面对低温、缺氧、烈风的恶劣环境, 迅速做出反应, 驾驶飞机安全迫降; 身经百战的警察可以依靠短短几十秒的监控视频迅速锁定嫌疑人; 训练有素的乒乓球运动员可以在零点几秒内判断乒乓球的落点、走向并作出反击^[9]。由此可见, 人类可以在仅接受少量信息后, 迅速做出决策, 甚至在复杂紧张、高强度的对抗中作出超越人类反应极限的判断与决策的能力。这种能力又往往是无意识的、或难以具体描述的, 在不同个体的表现上存在较大差异且往往出现于个体自身较为熟悉擅长的领域, 此种能力通常被称为直觉^[10]。直觉思维是指不受某种固定的逻辑规则约束而直接领悟事物本质的一种思维形式^[11]。它具有迅捷性、直接性、本能意识等特征, 作为一种心理现象贯穿于日常生活之中, 也贯穿于科学研究之中。很多科学家都认为它在科学研究等创造性思维活动的关键阶段往往起着极为重要的作用。正如爱因斯坦曾指出: “直觉的应用超越了智力的应用, 众所周知, 创新往往是直觉战胜逻辑的胜利。”^[12]德国化学家凯库勒 (Friedrich A. Kekule) 依据梦中蛇咬尾巴这一启示发现了苯环的结构就是一个典型实例, 并体现了“直觉不是对形象的感知, 而是思想的除蔽与觉悟, 是概念性劳动, 包括寓言式概念 (如凯库勒环)”^[13]。

汉语“直觉”出自鲁迅《花边文学·算账》: “但我直觉的感到, 这恐怕是折了本, 比用庚子赔款来养成几位有限的学者, 亏累得多了。”在我国古代的道家、儒家、佛家均已意识到直觉的存在并提出运用直觉思维认识世界。其中, 道家是最先提出并运用直觉思维认识世界的。道家认为“道”是宇宙的本体, 但“道”作为无形无名的绝对, 是不能用概念所认识的, 只能靠直观或体悟^[14]。Pondy^[15]指出, 进行战略决策时必须同时考虑理性过程与直觉过程。例如在高速环境中, 通过直觉可以在没有数据或先例的情况下做出决策^[16]。在这种环境下, 人类主要面临的挑战是收集信息的时间限制与不稳定环境本身需要大量数据之间的矛盾, 并且数据往往又是缺乏足够可靠性的。而直觉的方法可以与先前习得的经验结合, 并将在决策过程中发挥关键作用^[17]。在对抗激烈的运动中, 直觉同样发挥着不可替代的

作用. 对球类等运动的研究表明, 在竞争激烈、攻防转换迅速的比赛中, 运动员面临巨大压力下, 在对对手进行准确的预判时, 往往倾向于发挥直觉决策的能力^[18]. 虽然在运动中与企业管理中应用的直觉场景不同, 但这几类场景具有一定的相似性, 即决策条件与环境变化很快以至于决策者不能用常规的逻辑推理给出答案^[19], 而经验丰富的人类专家可以利用有限的信息在有限的时间里做出一个较为准确的决策. 这些实际案例都启发着我们, 需要探索这一能力产生的机理与实现的架构.

Agor^[20] 进一步指出较为适合直觉决策的 5 类场景: (1) 工作环境具有高度不确定性; (2) 工作任务案例较少甚至无前例可循; (3) 解空间有多解, 每个解均有较好的事实依据; (4) 环境感知信息有限; (5) 没有感知到环境信息. 可见, 人类的直觉能力的应用场景, 与在时变复杂环境中执行任务的智能机器所面对的场景高度吻合. 运用直觉进行决策, 将会是提升机器人智能感知与决策能力的一种有效手段. 目前具备部分类似人类直觉能力的专用人工智能系统已经初现端倪, 比如谷歌的 AlphaZero. 但其表现出的直觉能力即所谓的游戏棋感, 源自于深度强化学习进行大量对弈后获得的价值估计, 并非依据人类直觉机理实现. 因此, 虽然 AlphaZero 在围棋比赛上取得良好成绩, 但不具备普适性、通用性. 显然, 如果可以让机器实现通用的类似甚至超过人类的直觉能力, 将有助于 AI 更好地服务于机器人与人类社会, 并进一步向强人工智能的目标迈进.

本文从人类直觉的定义、类型、特征以及机理等方面切入, 分析人类直觉产生的过程. 在此基础上, 设计实现了通用直觉架构的基本准则, 并分析了现有从管理学、决策论、计算机等领域所提出的直觉实现架构的特点与不足. 接着, 我们提出一种受人类直觉启发的, 利用计算机模拟实现人类直觉并可在复杂时变环境中利用包含大量噪声甚至不完备的信息进行快速而适宜决策的机器直觉的实现架构. 最后, 对机器直觉未来发展方向和应用领域进行了展望. 本文的结构安排如下: 第 2 节综述人类直觉的定义、类型, 各学科对直觉机理的研究现状以及直觉在人工智能领域的进展; 第 3 节设计了通用直觉架构准则并论述了不同学科对直觉架构的探索; 第 4 节介绍本文所提出的机器直觉架构; 第 5 节探讨机器直觉的关键技术、发展方向与面临的挑战; 第 6 节对本文进行总结与展望.

2 直觉的定义、类型及研究现状

2.1 直觉的定义

直觉最初是一个哲学概念, 其英文名为 intuition, 来源于拉丁文 intueor 或 intueri, 意为凝视或者内观. “不是‘直接观看’, 而是‘往里看’‘内省’, 从内心深处寻找确定性的答案”^[13]. 随着人们对其使用和研究的不加深, 直觉也被赋予了不同的理解与含义. 在心理学、管理学、运动学、认知科学、脑科学等不同学科中, 均对其进行过深入的研究. 为了对直觉的机理、特征进行整体把握并对人工智能架构进行启发, 我们整理了不同学科对直觉的认识. 如表 1^[21~38] 所示.

学者们已从不同角度对直觉进行了深刻描述. 虽然对直觉的定义还未达成广泛一致的观点, 但我们可以从这些描述中找到共通的地方: 直觉是很少或不经逻辑的, 根据当前信息 (可能是不完整的, 局部的信息) 进行无意识推理且具有整体性、快速性的一种从感知直通决策的一种思维习惯.

2.2 直觉的类型

虽然我们从不同领域对直觉的描述中获得了一个直觉的基本定义, 但直觉产生的过程复杂, 类型也有很多种, 不同类型的直觉具有不同的特点, 适用的问题也不尽相同. 为了找到有助于启发人工智能领域的直觉类型, 需要对直觉的类别进行划分.

表 1 直觉的定义

Table 1 The definitions of intuition

Scholar	Research field	Definition of intuition
Jung (1933) ^[21]	Psychology	A psychological function that can unconsciously and meaningfully transmit perception and explore the unknown and perceive the possibility that may not be easily found.
Westcott (1961) ^[22]	Psychology	Intuition is a kind of inferential thinking that can make judgment or prediction, and it can draw correct conclusion only using a small amount of information.
Vaughan (1979) ^[23]	Psychology	Intuition has four different levels of consciousness: physical, body feeling; emotional, intuition through sensation into consciousness; mental, an ability to get accurate conclusions in the absence of information; spiritual, a entirety understanding of reality that transcends rational cognition.
Dreyfus et al. (1986) ^[24]	Philosophy	Intuition treats the world in a fluid, holistic and situation-sensitive way.
Rowan (1986) ^[25]	Management	Intuition is knowledge acquired without rational thinking, with a feeling of “almost, but not very well knowing”.
Simon (1987) ^[26]	Management	Intuition solidifies analysis into habit.
Reber (1989) ^[27]	Psychology	Intuition may be the direct result of implicit, unconscious learning (without the participation of any introspective process).
Ren et al. (1989) ^[28]	Exercise science	Intuition is a kind of cognitive way for athletes to quickly recognize, judge and estimate any phenomena in the competition and the results of their development based on the limited information.
Bowers et al. (1990) ^[29]	Cognitive science	Intuition is a perception of coherence, which is not consciously expressed at first, but guides our thoughts to the direction of ‘hunch’ or hypothesis.
Vaughan (1990) ^[30]	Management	Intuition allows us to synthesize separate data and experience into a complete frame. It is a whole perception of reality, beyond the rational way of understanding.
Parikh (1994) ^[31]	Management	Intuition is a reaction extracted from years of experience and expertise, or a choice made from some options, but it cannot consciously explain how we get the answer.
Shirley et al. (1996) ^[32]	Psychology	Intuition is a sense of certainty when there is insufficient information, without the participation of rational thinking.
Pacini et al. (1999) ^[33]	Psychology	Intuition is controlled by experience system and closely related to emotion and non-verbal knowledge.
Sadler-Smith et al. (2004) ^[34]	Management	Intuition is the ability to acquire knowledge or understanding directly without the interference of rational thinking or logical reasoning.
Zhou et al. (2005) ^[35]	Psychology	Intuition is the ability to recognize or understand objects without logical and conscious reasoning. It is a thinking mode or ability opposite to logical analysis and conscious thinking.
Miller et al. (2005) ^[36]	Management	Intuition can be conceptualized in two different ways: holistic hunch and automation expertise.
Dane et al. (2007) ^[37]	Management	Intuition has the characteristics of unconsciousness and ensemble relevance, which has a faster processing speed than rational decision-making.
Kuo et al. (2007) ^[38]	Brain sciences	Intuition is fast, automatic, emotional and effortless.

2.2.1 直觉功能角度划分

从功能角度出发,可将直觉划分为3个类别,即问题解决式直觉、创造性直觉以及道德直觉^[39].

问题解决式直觉是自动再识别模式匹配的结果,与特定的知识领域有很高的相关性,特别重视训练与测试的作用;创造性直觉是对不同知识以新的方式进行组合所激发出来的直觉,其融合了不同专业领域的知识,但这种交叉往往没有逻辑推断,是一种无因果关系的结合;道德直觉是基于决策者自身所掌握的道德内容而对问题做出的具有某种情感性的决策与判断,其中文化是塑造道德内容的核心.与问题解决式直觉不同,道德直觉是对事件是非对错的判断,而没有充分考虑决策的有效性.

2.2.2 直觉用途角度划分

从用途角度出发,可以将直觉划分为操作类直觉、发现类直觉、评估类直觉、创造类直觉、预测类直觉以及启蒙类直觉^[40].

操作类直觉往往是人类无意识情况下对外界刺激做出的反应与行为;发现类直觉是在重复训练与练习后,在处理个人、社会或抽象概念时,根据当前可获取的全部知识(完备/不完备信息)进行决策的一种方式;评估类直觉是在同一问题的多个相似解之间进行选择,常伴随有确定、熟悉的感觉;创造类直觉是对已有知识的组合与联想,以产生新的知识、观点;预测类直觉是人类对事物、事件等对象的未来发展状况、态势的估计,其准确度依赖于经验的积累;启蒙类直觉为更深层次直觉,与方法论等层面的高级智慧相关,启蒙类直觉的提升会带动其他类型直觉.

2.2.3 直觉认知过程角度划分

从认知角度出发,可将直觉划分为联想直觉、匹配直觉、累积直觉以及构建直觉^[41].

其中联想与匹配直觉强调学习和检索的过程,联想直觉仅表现为对待事务的喜恶感,来自于人与周围环境互动过程中无意识记录的大量信息;匹配直觉为更高复杂程度上的关联过程,这类直觉可能依赖于复杂的学习和检索过程,包括在记忆中存储多个样本,将实际遇到情境或对象与样本或原型匹配.累积与构建直觉强调对信息的检索与整合过程,累积直觉将信息按照重要性加权反复检查并积累,若支持某个决策的信息量达到阈值,则选择该决策;构建直觉在累积信息的基础上,根据获取的信息与记忆中的相关信息构建网络.信息不仅与现有的情景相匹配,而且在新的一致解释中可能超越现有信息,也可能以新的方式创造性地组合元素.

2.2.4 直觉的层次划分

虽然学者们将直觉按照不同角度与标准进行了划分,但未能明确表述不同类型直觉之间的层次关系.本文依据认知科学中人类认知层级中低级到高级的划分^[42],将直觉划分为4个层级,即反应直觉、经验直觉、意识直觉以及文化直觉.

反应直觉,即人类生理层面的直觉,由基因对知识进行存储,并由固定的神经系统及其相关的感受器、肌肉等进行表达的直觉.是人类经过漫长的演化习得的,在全人类范围内具有普适性的直觉,如视听错觉、形重错觉等;经验直觉,是个体通过反复训练学习后,经过经验积累后实现的决策,包括专家式直觉以及整体启发式直觉.这类直觉由于个体自身经历、技能、关注点的不同而表现出巨大差异,同一个问题专家的直觉往往比普通人的直觉的准确率高出很多;意识直觉聚焦于个体当下的情绪感受,是个体在极其放松而又专注的状态下涌现的,在这种状态下,个体对外界及自身的感知达到最大,可以从事物之间细微的差异中找到灵感;文化直觉源自个体的成长、教育、经历,是融入其文化素养顺其

自然呈现出的选择, 而非个体的有意操控. 突破对自我的关注, 实现了“物我交融”的状态, 保证了最终选择结果自然涌现.

不同方式划分的直觉类型并不对立矛盾, 这些分类方法之间彼此有所包含与互补, 可以在直觉的层次划分下统一起来, 其关系如图 1 所示.

在某一具体应用中, 并非所有层次直觉都参与其中. 以智能机器人为例, 一方面, 在机器人实际应用场景中, 面对的复杂、高度不确定性环境及其自身有限算力的困境, 需要的则是反应和操作类型的直觉, 并不需要采用高层次直觉. 另一方面, 智能机器人技术可以像人一样富有个性、情绪化思考, 仍是极具挑战的研究.

因此, 机器直觉的研究将首先主要集中在位于经验直觉区的直觉类型. 例如, 在外界环境或目标未知以及信息不完备情况下进行感知的发现型直觉; 在系统运算速度无法满足外界环境变化或交互时的操作类直觉; 当同时获取到多个相似解或状态时进行决策的评估、创造类直觉; 或依据现有信息对环境、自身或目标进行预测的预测类直觉等. 如图 1 中红色虚线部分, 这部分将会是机器直觉的首要研究方向.

2.3 直觉的机理

国内外对直觉机理的研究进行了大量的研究工作, 但主要集中在管理学 [20, 26, 43]、心理学 [35, 44]、认知科学 [45, 46]、决策理论 [47, 48] 等方面. 对直觉机理的研究多是从现象学角度入手, 直觉决策的行为特征及其背后的神经机制研究还不太充分, 产生机理尚不明确且未达成共识. 尽管在脑科学领域对直觉机理的研究相对滞后, 但其他学科对直觉的研究可以对脑科学的研究起到有效的补充促进作用.

2.3.1 直觉的双系统理论

管理学以及认知科学中将人基本的信息处理方式分为两种系统 [49, 50]. 系统 1 处理信息的本质是依赖语境的, 进行联想、启发具有默契、快速和内隐的特点. 因此, 对于认知所需的资源没有过多要求. 相比之下, 系统 2 对信息的处理在本质上是语境独立的、基于推理且明确的. 因此, 与系统 1 相比, 它的处理过程较慢, 对认知资源的需求更大 [49]. 在不同的参考文献中, 系统 1 与系统 2 有着不同的称呼, 系统 1 通常称为无意识决策、非理性决策、直觉决策等. 系统 2 通常称为理性决策、逻辑决策等. 本文为了统一关键词以避免不必要的混淆, 将系统 1 涉及的决策称为直觉决策, 将系统 2 涉及的决策称为理性决策. 两者的关系如图 2 所示. 理性决策对感知到的数据结合经验知识进行认知、推理后得到决策结果, 而直觉决策则是感知直通决策, 其中少有意参与, 是一种快速的映射. 脑科学领域的研究也印证了人类基于双系统进行信息处理的过程的存在, Lieberman 等 [51] 利用功能磁共振成像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) 识别了两个处理系统. 即, 直觉的 (ReX-Exiver) 系统 (称为“X 系统”) 和分析 (RE) 系统 (称为“C 系统”). 发育上较老的“X 系统”需要使用基于并行处理的非反思意识, 并且是快速操作、缓慢学习和自发的. 相比之下, 发育上较年轻的“C 系统”需要使用基于串行处理的反思意识, 并且操作缓慢、学习迅速且有目的 [52]. 其中“X 系统”是由基底神经节、腹内侧前额叶皮质 (vmPc)、伏隔核、杏仁核和外侧颞叶皮质组成的神经结构网络. 脑科学的发现与管理学、认知科学等领域的预测一致. 可见, 不同学科之间的交叉可以起到相互促进作用. 因此, 尽管脑科学中对直觉机理的研究尚不明确, 我们仍可利用管理学、认知科学等领域对直觉机理的论述启发我们在人工智能中如何设计机器直觉.

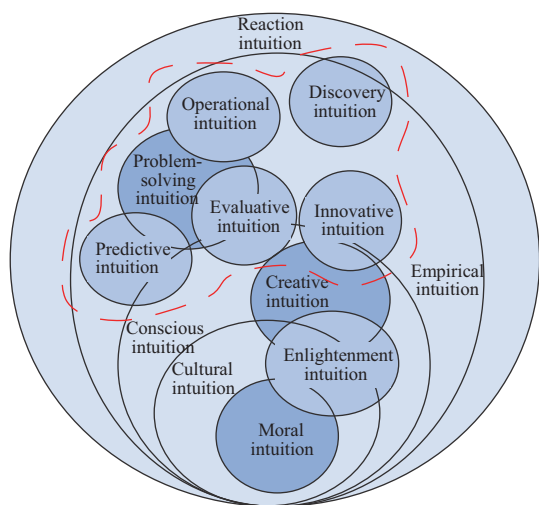


图 1 不同类别直觉之间的关系
Figure 1 The different types of intuition

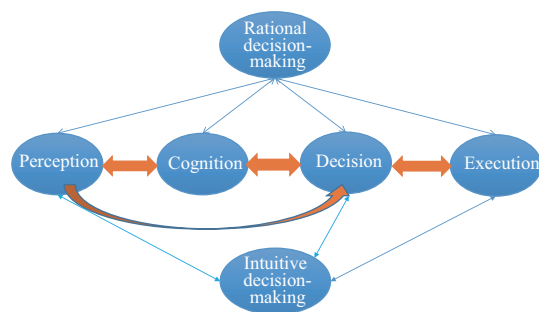


图 2 理性决策与直觉决策
Figure 2 Rational decision-making and intuitive decision-making

2.3.2 认知神经科学对直觉机理的研究

认知神经科学文献中通过对认知功能相关脑疾病的研究,寻找直觉功能的解剖学基础.内隐学习是经验、意识层直觉的认知基础,是指独立于学习的过程和产物而进行的学习.它通常发生于没有学习意图的情况下,并且在很大程度上没有意识到所学内容的本质^[53].Lieberman^[54]综合前人对基底神经节的研究发现,内隐学习与基底神经节的功能具有相似性.根据认知神经科学的研究,对于反复出现的情景,基底神经节不考虑预测与奖赏的关系,直接对重要事件的时间序列模式进行学习和预测.再次遇到先前序列的情况下,整个时间序列模式被激活,形成对外的响应.基底神经节所对应的时间序列模式与大脑意识无关,形成了特定的直觉模式.基底神经节中的尾状和壳状核是直觉和内隐学习的中心组成部分,是潜在的内隐学习的解剖学基础.

2.3.3 管理学对直觉机理的研究

在管理学文献中强调专家式直觉^[20,55],专家的直觉能力来源于他们识别显著环境线索的能力,并迅速将这些线索与常见的模式相匹配,以有效解决问题并作出决策^[10].这种识别线索的能力并非对所有场景适用.例如,在 Simon^[55]描述的实验中,国际象棋的专家和新手被要求复现一个实际象棋对局中的棋子位置.象棋专家以高达 94% 的准确率进行了复现,而新手的准确率仅为 24%.但当棋盘中的棋子位置随机排列而不遵循象棋规则时,专家和新手准确率均为 24%.因此,Simon 认为,专家对实际象棋场景准确复现的能力源自于其长期记忆中存储的大量模式以及模式之间的相关信息.Agor 等^[20]认为特定领域的直觉能力可以通过经验和学习获得并依赖于模式识别过程.巴纳德(Barnard,引自 Simon^[26])认为直觉的决策是以知识和经验为基础的,它们还包括大量的事实、模式、概念、技术、抽象,通常我们称之为形式知识或信仰,这些或多或少都是通过有意识的努力和思考而在我们的头脑中留下深刻印象的.

2.3.4 心理学对直觉机理的研究

心理学及认知科学文献认为, 记忆尤其是存储在长期记忆中的信息对创造性问题起着重要的作用. 某些特定的线索可以激活记忆中的相关信息并引导思维指向某种假设, 获得相关问题的直觉^[29]. Lufityanto 等^[44]认为直觉可以通过实践得到改善, 他们的实验证明了大脑能够将不同的信息来源 (如情绪和运动方向) 组合起来, 即使在一个来源被意识抑制时, 也能帮助行为. Prietula 和 Simon^[56]将直觉视为专业知识或提炼经验的一种形式, 基于对特定工作或环境中不断出现的问题的深入了解, 以及通过处理这些问题所形成经验知识的积累. Dijkstra 等^[57]认为, 相对有经验但是对于客观事物只有有限知识的个体, 他们通过经验形成了自己的直觉, 但是缺乏具体的知识表述他们的直觉、缺乏解释清楚自己的偏好. 柏菊^[19]也强调经验对直觉的重要性, “如果没有先前经验的识别或再认, 在复杂空间里的思维便会像蜗牛爬行那般缓慢”.

2.3.5 决策论对直觉机理的研究

决策文献中, 有学者认为直觉是无意识且“自下而上”学习过程的最终产物, 是无意识内隐过程的显式表现^[29]. Klein^[58]的认知导向决策 (recognition primed decision, RPD) 模型认为, 直觉决策使用经验识别关键模式, 这些模式指示给定情况的可能动态, 以便进行快速评估备选方案和选择单一行动方案所需的“心理模拟”. 田志刚等^[47]认为理性决策与直觉决策是相互补充、取长补短的, 将两者结合可以做出“满意决策”并给出函数形式的表达式:

$$Ds = f(R, I), \quad (1)$$

其中 R 指理性决策, I 为直觉决策, Ds 为满意决策. 直觉决策模式 I 可以进一步表示为

$$I = \Psi(k, sa, e, m, t, V), \quad (2)$$

其中 t 为决策时间, 直觉的决策时间远小于理性决策的决策时间, k 为决策者的知识结构, sa 为决策者对决策情景的估计, e 指决策者的经验, m 为决策者的元认知能力, V 为决策者的价值观及情感标准.

此外, 人们并不是在所有情景下都会采用直觉. Burke 和 Miller^[59]指出, 直觉通常在不确定性较高及缺乏明显因果关系且要求迅速做出决策的情景中出现. Khatri 等^[43]分析了不确定性较高的环境的特点: (1) 收集数据、信息的时间有限; (2) 需要收集大量数据来处理情景的不确定性; (3) 数据或信息缺乏可靠性. 他们进一步证明了, 相对于稳定环境, 直觉决策更多地应用于不稳定环境中. Eisenhardt^[16]的研究也印证了快速变化的环境有利于进行直觉训练. Ripoll^[9]研究了乒乓球与攀岩这两个具有较大差异的运动项目, 其中乒乓球是一项对抗激烈、攻防转换迅速且有外部时间压力的运动, 而攀岩虽然外部物理环境不确定, 但运动员有充足的时间对外部环境进行认知. 他的研究表明, 攀岩选手的决策多为理性决策而乒乓球选手的决策多为直觉决策. 王斌^[60]进一步指出了决策过程的时间对于决策类型的重要性, 当决策时间不断缩短, 至某一临界点后, 专家决策可能发生质变, 即从理性决策转为直觉决策.

2.3.6 小结

综合不同学科对直觉机理的研究, 我们将其总结为: 直觉决策的来源受内部先决条件和外部激励两方面因素影响, 直觉决策的先决条件是大量相关领域的经验积累. 这些经验不只是简单的概念, 还包括抽象的模式、数据、情景、特征、策略、情感等, 这些经验使得决策者被训练成为相关领域的“专家”; 直觉的外部激励表现为不完备的、局部的以及不确定性的决策信息. 虽然大量的文献认为时间压

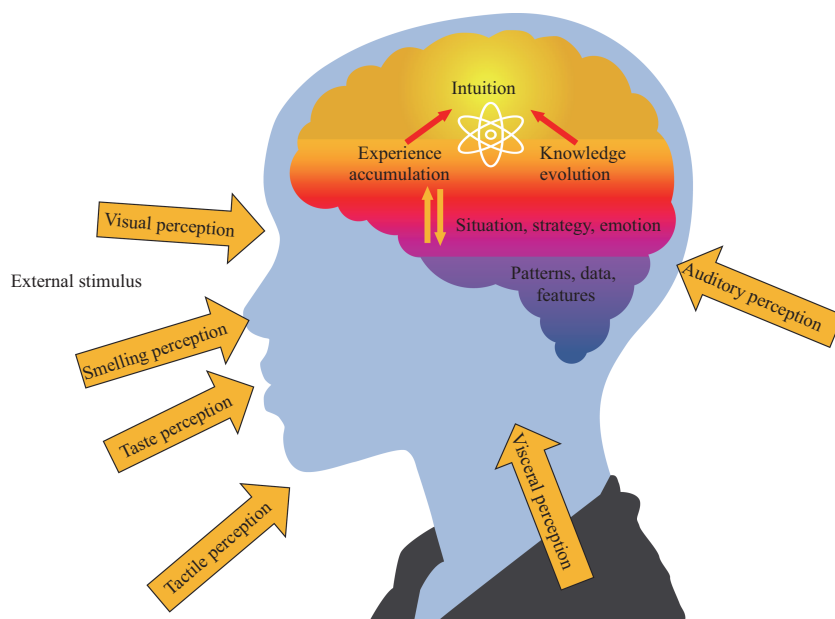


图 3 直觉的机理

Figure 3 The mechanism of intuition

力或决策时间是区分理性决策与直觉决策的重要因素,但决策时间之所以可以影响决策类型,有两方面原因.一方面,决策时间短使得大脑来不及进行逻辑思维,只能利用快速的经验映射.另一方面,由于人体本身感受器的响应频率低,短时间内可供人类收集的信息极其有限,甚至包含大量噪声(没看清、没听清、没感受、没嗅到等),即大脑可获得的有效决策信息不完备,不足以支持其进行逻辑判断.因此,经验直觉层的决策过程可以表述为,专家利用获取的有限决策信息与脑海中积累的大量经验进行映射组合并获得结果的过程.训练直觉的关键因素是:经验的积累以及不完备信息的刺激,这个过程本身也是积累经验,所以整个过程可以是在线学习、实时学习、终身学习的.

最后,需要注意的是,经验的积累是提升直觉的重要影响因素,但直觉思维并不等同于传统的经验思维,更不应该等同于基于经验思维的专家系统.经验思维仅仅是将当前获取的信息与原有经验进行匹配,而专家系统的好坏取决于能否对获取到的信息进行准确的匹配以及经验库的大小,它要求所处理的信息是经验库所包含的,或相差不大的.直觉处理信息并不是与经验库中的经验进行简单的映射,尤其是对于某些经验库中没有对应经验的新任务.直觉思维通过对已有知识的归纳、演绎和迁移实现知识进化,可弥补决策信息中的某些空白,同时扩展经验库并实现决策.直觉的机理如图 3 所示.

3 直觉架构的研究现状

鉴于直觉研究的重要性,不同领域的学者们根据直觉的特点分别从管理学^[61]、决策论^[47]、运动学^[28]、计算机^[62,63]等角度对直觉决策的架构模型进行了初步探索.其中,也有学者从数学角度对直觉进行建模^[64~68].但要构建通用直觉架构,应该从直觉的机理出发,充分考虑直觉的内部先决条件和外部激励两大方面的因素.这里,我们总结了直觉架构应该具有的准则如下.

- 准则 1: 直觉架构的直觉能力应该与其积累的经验知识有关,积累的经验越多,则直觉决策越准确.

- 准则 2: 直觉架构积累的经验模态并不单一, 而是多层次、多方面、多角度的, 同时包含有多种知识、策略和情景的经验知识.
- 准则 3: 直觉架构应与环境进行交互并反馈, 通过在具有高度不确定性的环境中运用提升直觉的能力.
- 准则 4: 直觉架构应能对直觉决策的环境中的有限信息进行全方面的、整体的感知, 包括各种动态、静态的时空信息.
- 准则 5: 直觉架构应具备对获取信息进行拓扑及相似映射的实现机制, 以弥补信息中的某些不足, 同时能锁定其中的核心信息.
- 准则 6: 直觉架构应具备将初级信息进行高级抽象并存储的能力, 这些抽象的特征进行存储时不是由固定的关系图连接起来的, 而是根据不同问题或场景动态连接抽象特征的.
- 准则 7: 直觉架构具备对已有知识进行交叉、变异、组合以获取新知识的能力. 适应外界高度不确定的环境同时, 为直觉的涌现提供丰富的经验基础, 为新的直觉能力提供衍生机制.
- 准则 8: 直觉架构中需要充分考虑情感记忆的作用, 利用情感记忆进行反馈, 对决策的效果进行衡量评估. 好的决策效果获得积极的情绪记忆而坏的决策效果获得消极的情绪记忆, 以进一步影响后续的决策.

这其中, 架构准则 1 和 2 为直觉能力的内部根源; 架构准则 3 为直觉能力的外部激励, 直觉能力同时受内外两方面因素影响; 架构准则 4 为利用直觉进行决策所需的必要的信息; 架构准则 5 和 6 为直觉决策中信息的处理过程, 需要注意的是, 这种处理是浅意识参与并以默会知识的形式进行存储; 架构准则 7 是直觉决策处理新任务或进行创新的关键, 是通向深层次直觉的桥梁; 架构准则 8 是对直觉决策的决策效果的反馈刺激, 是改进直觉能力的重要因素.

本文对目前已有直觉架构的探索按照研究领域进行分类, 其中管理学、决策论及运动学角度的直觉架构主要研究人类自身的直觉决策过程, 可将其划分为人文社科类直觉架构. 同时, 对计算机领域的直觉架构研究及对直觉的数学建模研究这两个领域单独分类. 通过分析, 我们可以得出结论, 这些已有直觉架构仅考虑了我们上文所提通用架构准则中的某几条, 因此只能在一定程度上实现直觉的功能, 难以实现真正意义上的通用直觉能力. 下面我们进行具体分析.

3.1 人文社科类直觉架构研究探索

3.1.1 基于管理学的直觉决策架构设想

Sayegh 等^[61]从管理学角度给出了管理者在危机事件下进行直觉决策的架构模型, 如图 4 所示. 管理者在处理危机事件时, 倾向于将对事件的感知信息与自身的默会知识及情感反应结合通过直觉进行决策. 对事件进行感知时, 会结合已有的显性知识及默会知识对获取的信息进行初步解释; 情感反馈是经验中成功或失败决策经验带来的刺激. 成功的决策经验结合积极的情感记忆给予正向情感刺激, 失败的决策经验结合消极的情感记忆给予负向情感刺激. 整个直觉决策架构中, 决策主体的显性知识、认知模式、决策效力以及情感知识受经验支配或影响, 经验可以通过教育和训练进行提升, 是架构的核心. 然而, 该架构无法体现直觉决策是对环境的全方面、整体感知, 以及决策过程中感知信息的抽象处理. 经验信息主要用于相似匹配, 无法利用已有知识进化产生新的知识, 因此无法满足通用直觉架构准则 4~7 的需求.

3.1.2 基于决策论的直觉决策架构设想

田志刚等^[47]从决策论的角度总结了直觉决策相对于理性决策的自身特点: (1) 理性决策的目标是最优方案而直觉决策的目标为满意方案; (2) 直觉决策在方案空间中搜寻到第一个满意方案后立即形成决策; (3) 直觉决策对方案空间中的每个方案逐一思考, 但没有在方案之间进行比较; (4) 直觉决策通过对方案的“推测”评估方案性能; (5) 直觉决策过程往往对决策问题进行整体把握, 而少有细节性的思考; (6) 直觉决策的决策速度更为迅速. 决策模型如图 5 所示.

在该架构下, 经验同情景估计密切相关, 一个决策者在某一领域的经验越丰富, 则在该领域下的情景估计越准确. 决策方案被建模为一系列在大脑中存储的“IF ... THEN ...”形式的产生式规则. 直觉决策的过程可以表述为, 决策者将决策环境的输入与脑海中的相似情景进行匹配并判断产生式规则中的条件是否被激活. 一旦条件满足则匹配成功, 形成决策. 该架构是对一个经验丰富的专家进行直觉决策过程的模拟, 强调相似情景的估计与再认, 对环境中的获取的信息直接进行提炼. 然而, 直觉决策所面临的环境信息往往具有高度不确定性, 直接对环境信息进行抽象容易出现偏差, 导致决策失败. 此外, 决策空间中的决策方案为事先输入, 即无法通过环境交互改进策略, 也无法通过内部启发产生新策略, 适应能力差, 无法满足通用直觉架构准则 3, 4, 6, 7 的需求.

3.1.3 基于运动学的直觉架构设想

任未多等^[28]指出运动直觉是由运动员在运动时间中积累的大量经验在外界刺激下, 大脑对有关符号、元素、单元进行调节和组合, 使得相关神经通路短暂接通而产生的. 高水平运动员运动直觉的形成过程和心理机制, 如图 6 所示.

基于运动学的直觉架构核心为相似块, 任未多等认为, 运动员的经验信息在大脑中是以相似块的形式存储的. 这种存储形式不仅包含知识、策略等信息, 还包含着信息间的相互关系. 组合后的相似块在提取、比较、确认时可以快速而自动化地进行. 该架构较好地解释了外部刺激对直觉的影响, 但是在运用经验知识时采取简单的排列组合以及相似映射, 并没有对不同的知识更高级抽象和进化处理, 架构反馈也只是对其组合方式改进, 因此无法满足通用直觉架构准则 6~8 的需求.

3.2 计算机领域提出的直觉架构探索

3.2.1 初级感知者和记忆者架构设想

诺贝尔奖与图灵奖获得者 Simon 是第一批在计算机领域探讨直觉的先驱之一. 他给出了直觉的两个标志: (1) 在问题提出之后, 可以很快找到答案; (2) 回答者无法为自己的答案给出解答步骤. Simon^[55]指出初级感知者和记忆者架构 (elementary perceiver and memorizer, EPAM) 具有人类直觉的能力, 因为它具有与人类直觉相同的表现形式: 它的解答与提问发生在同一时间尺度上, 同时也同样无法解释如何获得答案. EPAM 架构如图 7 所示^[62].

EPAM 是用于模拟人类学习字词、句子时信息处理过程的计算机程序, 具有即时、短期 (short-term memory, STM) 和长期记忆 (long-term memory, LTM). LTM 由语义存储器、检索算法以及 EPAM 网络组成, 算法和知识在网络中用索引进行排列. STM 中的听觉和视觉模式与特定的感知联系在一起, 并产生预期的行为. 在即时记忆中, 动作激活的具体条件是从视觉和听觉感官数据中识别出来的. 这种架构主要模拟了人类的记忆能力, 其系统性能主要依靠知识匹配的准确性, 但不具备知识创新的能力. 这种机械式的记忆没有情感信息的参与, 处理外界信息时只是对其进行简单的记忆而没有抽象、拓扑等处理, 因此无法满足通用直觉架构准则 5~8 的需求.

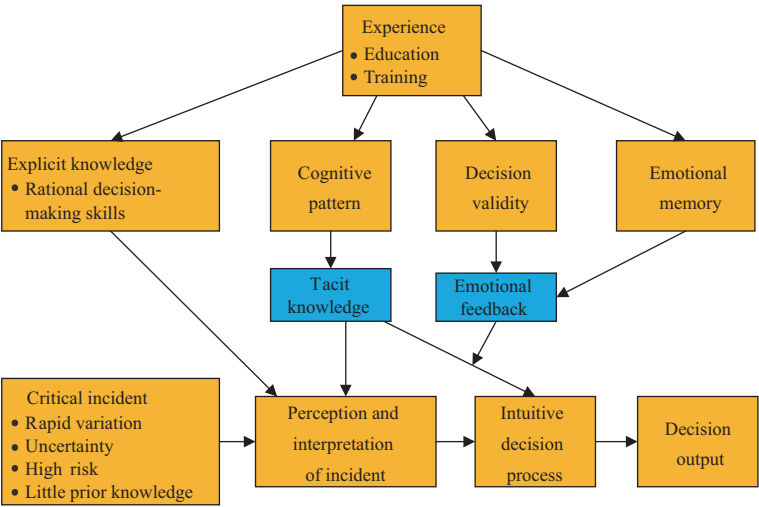


图 4 管理学角度下的直觉决策架构

Figure 4 Intuitive decision architecture from the perspective of management

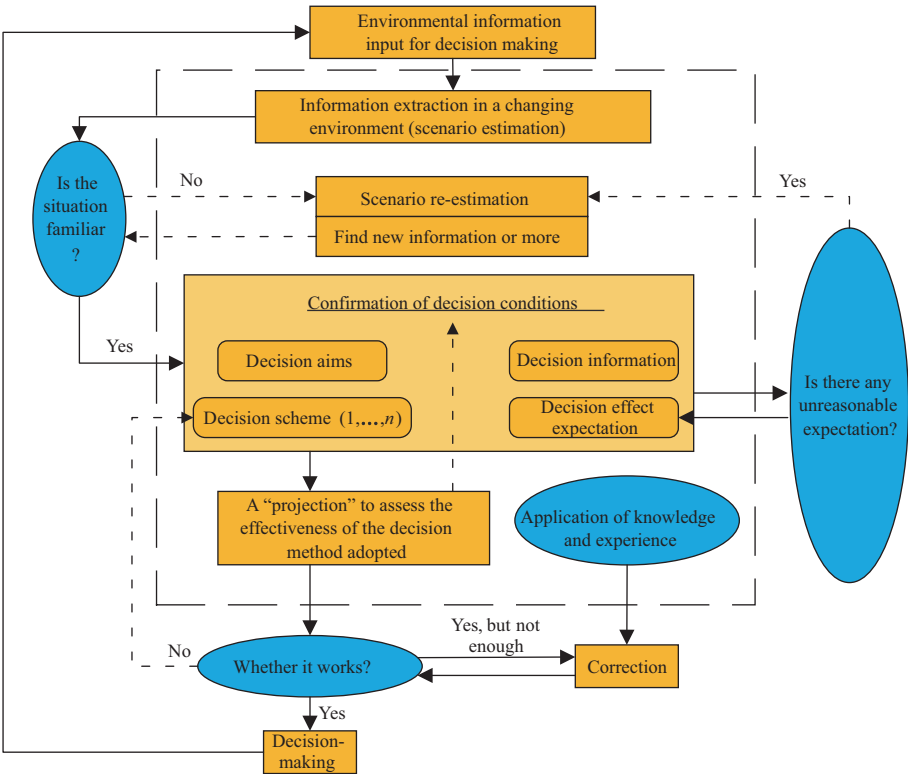


图 5 决策论角度下的直觉决策架构

Figure 5 Intuitive decision architecture from the perspective of decision theory

3.2.2 以直觉为中心的大数据分析综合架构设想

Mishra 从心理学及神经科学对直觉的研究中获取灵感, 指出适用于计算机的直觉特性. (1) 直觉和冲动的天性没有太大的区别. 因此, 为了使系统具有直觉的能力, 也应该允许系统出错. (2) 直觉来

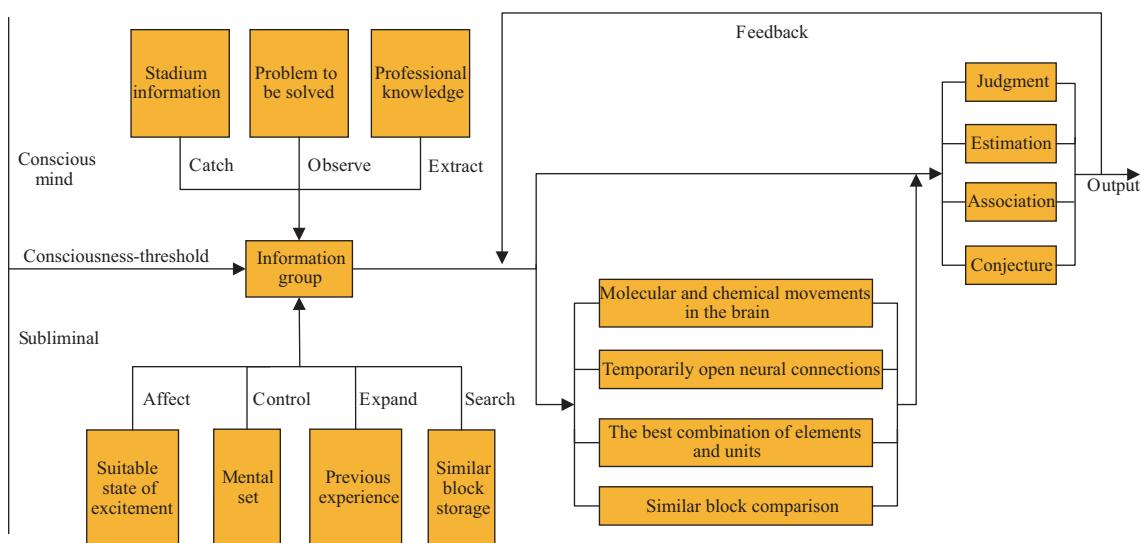


图 6 运动学角度下的直觉架构

Figure 6 Intuitive architecture from the perspective of kinematics

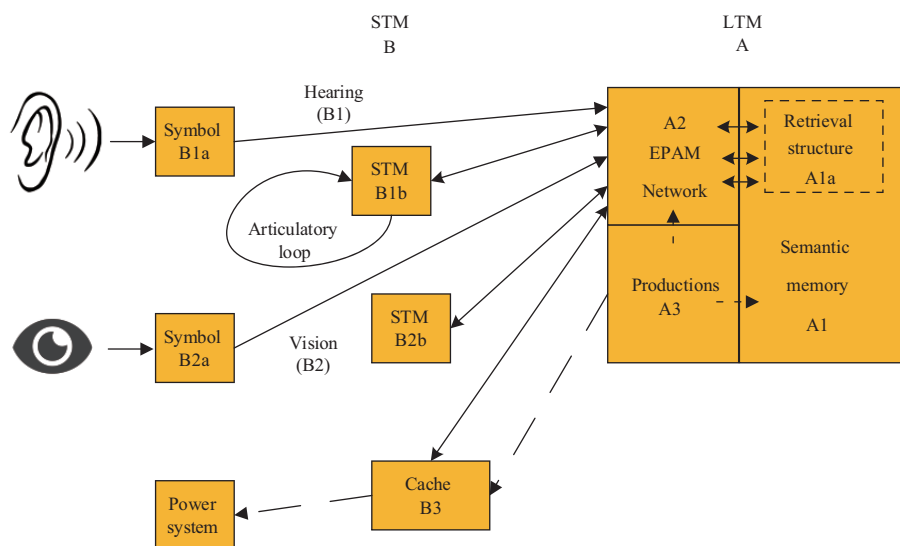


图 7 EPAM 架构

Figure 7 EPAM architecture

自领域特定的“经验”. 这些“经验”可以从各种来源中收集, 这意味着有时标签可能相互矛盾^[63]. 因此, 首先我们需要在保存数据时进行健全性检查, 并且数据应以有助于交叉引用的特殊格式保存. (3) 人类通过心理模拟获取直觉方案, 这种模拟可以看作是潜意识的思维实验. 据此提出的以直觉为中心的大数据分析综合架构 (ICABiDAS) 如图 8 所示.

架构主要分为 3 个阶段, 第 1 阶段是将传感器和/或数据库中的数据发送到系统, 并运行健全型检测以保证数据没有错误. 第 2 阶段是心理模拟阶段 (mental simulation). 这个阶段可以在后台, 定期 (对现有数据集的合成知识) 或按需 (对所提问题生成直觉的行动计划) 运行. 在此阶段提取的标签

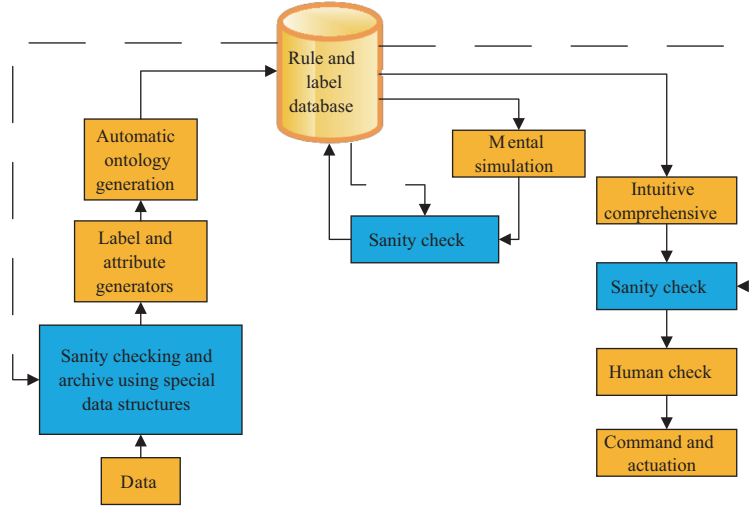


图 8 以直觉为中心的大数据分析综合架构

Figure 8 Intuition centred architecture for big data analysis and synthesis

和规则也会经过一个健全性检查模块, 以确保不会有任何极端违反直觉的内容存储到中央存储器中. 第 3 阶段是行动阶段, 用来综合新知识或行动计划, 并实现最终决策. 这是因为系统会犯错误, 如果系统是一个高成本的环境专家系统, 最好通过人工选择最终行动计划. 然而, 直觉的行动计划的提出需要经验丰富的人类专家进行纠正, 响应速度慢且成本较高. 另一方面, 此架构仅描述了直觉知识的存储, 没有体现外部环境对直觉的刺激作用, 专家是如何调用这些知识并进行决策或判断的, 同时如何通过训练提升直觉判断的准确性也无从体现, 不满足通用直觉架构准则 3, 5, 7, 8 的需求.

3.3 直觉的数学建模研究

3.3.1 基于映射匹配的序列直觉模型设想

Dundas 等^[64]认为过去的经验是形成实体或人的直觉的主要因素. 大脑只需简单地将其映射到过去的经验中, 结果在对答案稍作修改后发送回用户. 因此, 直觉的准确性取决于正确选择符合当前情景的经验、信心和对问题的重要性. 据此提出了一个简单的基于映射的序列模型, 利用经验集中的与问题集相似的元素进行映射实现类人直觉. 式 (3) 为直觉求解的数学模型:

$$f(x)_t = \text{Mapping Fn}(f(x)_t) + \text{Adjustment Factor}, \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \text{Mapping Fn}(f(x)_t) = & [P(\text{IP}/\text{NP}) \times \text{Importance}(\text{IP}) + \text{Priority}(\text{Exp.Setelement})] \\ & + [\text{Exp.Setelement value}] + P(\text{External Changes Factors}), \end{aligned} \quad (4)$$

$f(x)_t$ 为 t 时刻直觉的函数表现, IP 为基于直觉的过程, 它处理基于直觉模型的过程, NP 为理性过程, 这是处理大脑正常功能的过程. 它包括正常的计算和逻辑思维. 思维过程的实现可以采用神经网络 (neural networks, NN)、决策树、贝叶斯推理、隐马尔可夫模型 (hidden Markov model, HMM) 等算法; $P(\text{IP}/\text{NP})$ 为 NP 存在时 IP 发生的概率. 作者认为, 如果没有 NP 过程的存在或执行, IP 就不可能存在或发生. 注意, 对于一个直觉过程, 可能有多多个理性过程, $P(\text{IP}/\text{NP}) = P(\text{IP}/(\text{NP}_1 \times \text{NP}_2 \times$

$NP_3 \cdots \infty$); Priority(Exp.Setelement) 定义了作为解映射到问题集元素的实验集元素 (经验知识集) 的优先级; Importance(IP) 定义 IP 过程对给定问题元素集值的重要性; Exp(or Experiment).Setelement value 为最能定义过去经验的元素的值, 与当前呈现的问题集元素最接近; $P(\text{External Changes Factors})$ 为影响最终直觉过程的外部因素的变化. 作者进一步给出了对应的直觉架构, 如图 9 所示.

直觉模型 (图 9) 的步骤如下: (1) 从问题集中获取元素. (2) 根据映射从经验集中获取元素. (3) 获得直觉过程的重要性值、优先级别, 并得到直觉过程的概率值. (4) 以同样的方式将二次思维过程 (基于直觉或基于理性的过程) 转化为式 (3). 注意, 这些将是相似的过程. (5) 对所有考虑的过程应用调整系数, 计算出最后的答案. (6) 检查是否有任何外部影响改变数值, 然后在这些最终调整后向用户提供答案. 这可能包括人或机器实体的心理平衡、思维能力 (是否接受直觉) 等.

Dundas 等进一步利用 UCI 存储库¹⁾中的汽车评估及扑克游戏数据集对其直觉模型进行了验证. 实验结果表明, 与未经训练的 NN 以及 HMM 模型相比, 直觉模型具有更高的准确度. 然而, 随着训练的进行, NN 与 HMM 的准确率可以大幅提升, 而文中提出的模型没有改善. 这个结果是显然的, 因为该直觉模型存储了大量的经验作为先验知识对问题进行匹配映射, 但先验知识集与映射参数并未随着训练的迭代而改进. 因此, 与未经训练 NN, HMM 模型相比, 该直觉模型具有更高的准确度, 但随着训练的进行, NN 与 HMM 模型的参数不断调整, 性能得到提升. 而作者认为直觉是一种基于属性的映射函数, 不依赖于逻辑思维或学习, 即模型是静态的, 因此性能未能得到改善. 但是, 这与直觉出现于专家的现象不符合 (即直觉思维的准确度是可以通过训练提升的). 究其原因, 模型的经验集不能随着训练过程得到很好的抽象, 仅在广度上获得提升, 这与专家对知识的归纳精炼并转化为内隐知识的模式不符合. 另一方面, 该模型仅强调了经验对直觉的重要性而忽视了外界刺激对直觉的影响, 匹配模式单一, 难以适应复杂情景下的决策任务, 不满足通用直觉架构准则 1, 3, 7 的需求.

3.3.2 直觉模糊集

直觉模糊集逻辑是 Atanassov^[65,66] 对模糊逻辑的扩展, 其在语义表述及推理能力等方面优于传统模糊逻辑, 尤其适用于在态势感知中, 由于传感器种类与性能、外界环境等因素导致所获取到的信息不完备情况下的决策系统, 已在多属性决策、医疗图像处理、模式识别、态势感知与评估等领域得到广泛应用^[67~69]. 直觉模糊集定义如下.

设 X 是一个给定论域, 则 X 上的一个直觉模糊集 A 为

$$A = \{(x, \mu_A(x), \gamma_A(x)) \mid x \in X\}, \quad (5)$$

其中, 除了传统模糊集中定义的隶属度函数 $\mu_A(x)$, $\mu_A(x) \in [0, 1]$ 之外, 还引入了两个函数. $\gamma_A(x) \in [0, 1]$, $\gamma_A(x)$ 表示非隶属度函数; $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \gamma_A(x)$ 表示直觉指数, 即不确定函数. 三者关系如图 10 所示.

当 X 为连续空间时, 直觉模糊集 A 表示为

$$A = \int_x (\mu_A(x), \gamma_A(x)) / x, \quad x \in X. \quad (6)$$

当 X 为离散空间时, 直觉模糊集 A 表示为

$$A = \sum_{i=1}^n (\mu_A(x_i), \gamma_A(x_i)) / x_i, \quad x_i \in X. \quad (7)$$

直觉模糊集本质上是考虑了模糊集中的不确定度并将其称为直觉, 在这种架构下可将感知信息的误分类中由不知道所引起的不确定以一定量的概率分配值表示, 与人类的直觉机理相差较大.

1) <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets>.

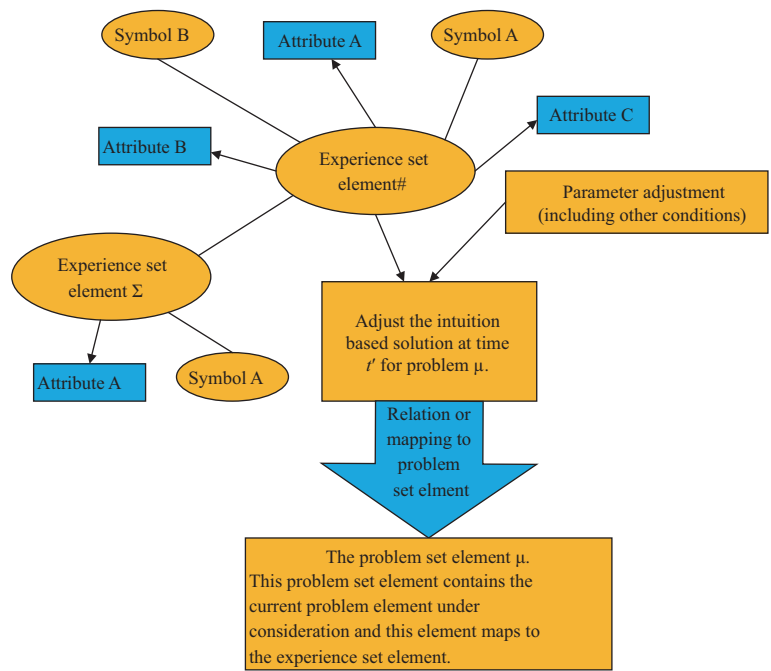


图 9 基于映射匹配的直觉架构
Figure 9 Intuition architecture based on mapping matching

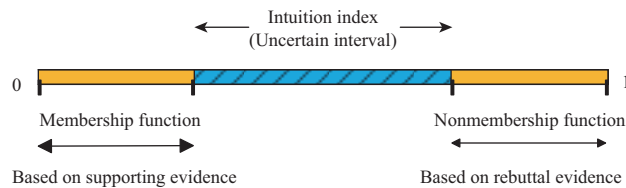


图 10 直觉模糊集元素中隶属度函数、非隶属度函数以及直觉指数之间的关系
Figure 10 Relationship among membership function, nonmembership function and intuition index in intuitionistic fuzzy sets

3.4 小结

总结各领域对直觉架构的研究现状,我们发现,人文社科领域以及计算机领域的研究者均考虑了经验知识对直觉决策的重要性,从一定程度上模拟了反应层与经验层直觉.人文社科领域研究人类自身的直觉决策过程,多有情感因素的参与,强调如何对存储的经验知识进行处理与运用,难以用计算机语言进行描述实现.计算机领域的直觉架构研究还处于初级阶段,研究重点为知识与经验的获取与存储,假设直觉的机理为简单的映射关系,忽略了外部环境对直觉的刺激作用,难以适用于不确定性高的情景模式.此外,这两个领域的研究者均未考虑直觉的由内而外的启发过程,即对已有经验进行交叉、变异、组合以获取新的经验知识,无法适用于深层次意识直觉与文化直觉架构.此外,对于直觉的数学模型还有待进一步研究,现有模型较为简单,无法作为直觉机理及架构的有力支撑.

4 通用机器视觉架构研究

第 3 节给出了实现通用视觉的架构准则并对当前现有架构进行了总结. 可知, 目前仍缺乏通用的、可实现的、从视觉机理出发的视觉架构. 本节将基于第 2 节对视觉机理的研究以及第 3 节提出的通用视觉架构准则, 从视觉的外部激励与内部先决条件入手, 论述如何设计视觉建模为机器并给出一个通用机器视觉架构.

首先给出定义. 机器视觉是一门研究如何利用计算机模拟或实现人类的视觉决策能力的人工智能领域的新的学科方向, 是一种探索迈向通用人工智能的新理论和新途径. 其内容涉及脑科学、认知科学、心理学、管理学、哲学、人工智能、计算机等多门学科的交叉, 旨在针对工作环境具有高度不确定性、工作任务案例较少甚至无前例可循、解空间有多解而每个解均有较好的事实支持、环境感知信息有限甚至没有感知到环境信息等复杂时变场景进行较为快速准确的预测、判断、决策. 进一步可以通过与环境以及内在经验、知识进行交互反馈获取新的知识或技能以不断改进自身的性能, 实现智能水平从浅层的经验视觉逐步进化达到深层次的意识视觉甚至文化视觉.

机器视觉的主要特点是: (1) 机器视觉以计算机为载体, 需要与环境进行快速的交互; (2) 机器视觉以数据为研究对象, 但所处理的数据往往缺乏可靠性或只能部分反应环境信息; (3) 机器视觉对数据的处理是全局的、总览的, 可以看部分而知整体, 看现象而知本质; (4) 机器视觉虽然利用数据或以往的经验进行决策, 但不局限于此, 而是可以对已有的数据、知识、经验进行联结变异以获取新的知识与经验. 这种经验并非由外在学习获得, 而是由内部进化涌现. 因此, 我们提出了一种机器视觉的实现架构, 如图 11 所示.

我们称之为通用机器视觉的实现架构, 架构可以分为两个主要部分, 上方绿色背景的机器视觉部分为进行视觉决策的主要流程及关键结构, 下方黄色背景的视觉本原 (principle of intuition) 部分为视觉能力的根本来源. 机器视觉进行视觉决策时会利用视觉本原中存储的模式、数据、记忆、特征等经验知识, 并将决策过程中产生的新的经验知识存储在视觉本原中. 机器视觉研究的核心内容主要有全息感知 (holographic perception)、视觉认知 (intuitive cognition)、视觉决策 (intuitive decision-making) 和博弈行动 (game action) 等 4 个方面.

4.1 全息感知

全息感知包含全息传感 (holographic sensing) 与全息信息拓扑 (holographic information topology) 机制, 利用视觉进行决策时首先要对外界环境进行感知与估计. 在机器视觉中, 外界环境信息以全息数据 (holographic data) 的形式获取. 所谓全息数据, 就是组成某一个物体的全部点的强度和相位或该点反映整体的所有模态的振幅、振频, 包括准确反映智能体在空间、时间上状态的各种动态、静态环境数据、智能体的本体数据、群体数据以及与决策相关的任务目标数据等. 全息传感即通过各种传感器获取全息数据的过程, 包括以下 3 方面.

- 时空信息传感: 需要定制化设计专用传感器, 满足对空间、时间等信息进行准确的获取的需求.
- 生物信息传感: 发展基于全息数据的智能生物感知技术, 包括视觉、听觉 (自然语言处理、语音识别)、力觉/触觉、嗅觉、味觉等生物感知能力, 在此基础上, 进一步发展基于全息数据的多模态智能感知信息融合技术.
- 心理信息传感: 需要对情感、行为包括语气语调、表情变化、肢体动作等进行准确地识别, 从而感知目标对象的心理状态和心理变化.

对全息数据的感知可以对感知模式 (perception model) 进行不断的积累, 进而促使感知能力的提

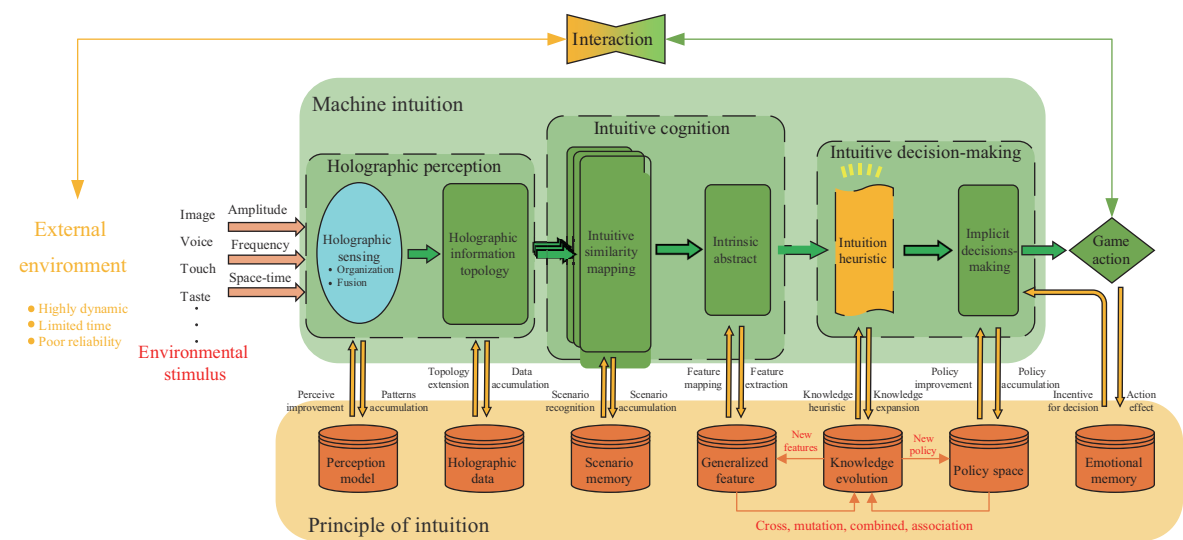


图 11 通用机器直觉架构
Figure 11 General machine intuition structure

升. 此外, 全息数据的多模态与时空特征, 决定了其特殊的提取模式. 因此, 需要按照时空维度以及局部与整体的关系进行高效数据组织, 采用分形技术等实现从局部特征对整体的有效搜索/检索. 全息信息拓扑的作用是实现这一数据结构化过程, 用于将获取的全息传感数据进行基于分形的全息编码, 实现传感数据的结构化组织形式. 全息数据的获取、存储与拓扑, 符合通用直觉架构准则 4 和 5 的要求.

4.2 直觉认知

直觉认知包含直觉相似映射 (intuitive similarity mapping) 与本征抽象 (intrinsic abstract) 机制, 其中直觉自相似映射用于将结构化后的全息数据与对应情景进行关联、联想, 将“未知的”、“局部的”输入信息转换为“熟悉的”、“全局的”情景, 实现“窥一斑而知全豹”式的信息提升. 相似映射是对多角度、多层次的情景的抽象化. 如输入信息为车轮, 映射情景可以为月亮、手环、橘子等, 实现对信息的“举一反三”, 随着情景记忆 (scenario memory) 不断扩充, 相似映射的准确度也会不断提升.

本征特征是对情景信息的高级抽象, 用于提取直觉思维中触发决策判断的事物的本质特征. 比如形状、模式、公式、常识等. 对于上文中的车轮、月亮、手环、橘子等情景信息, 本征抽象的特征为圆形. 这些本质特征的数据组织形式, 可以理解为人脑记忆中过去所形成的各类广义复合知识特征, 如知识、概念、模型等. 这些广义特征 (generalized feature) 可采用图网络的形式存储, 满足通用直觉架构准则 6 的需求.

4.3 直觉决策

如果一个策略总是比另一个策略更糟糕, 那么它就是“被支配的”. 策略空间中存储着一组策略且均为“非支配策略”. 也就是说, 在这组策略集中, 不存在一个策略在所有情景下均差于其他策略的情况.

直觉决策包含着隐式决策 (implicit decision-making) 与直觉启发 (intuition heuristic) 机制, 其中隐式决策将广义特征直接映射到策略空间 (policy space), 是一种快速的、少有理性推断的决策模式. 但这种决策模式中可以有情感记忆的参与, 一个策略的积极情感因素越多, 那么该策略越容易被作为

输出策略,反之亦然.机器直觉在决策过程中,也会寻找其他“非支配策略”并将其存储至策略空间,而策略空间中的策略数量的增加也会进一步加快策略映射的速度与准确性.

直觉启发机制对直觉本原中存储的广义特征以及策略进行交叉、变异、组合、联结以获取新的特征与策略.这些新特征和策略并非通过与外界环境进行交互习得,而是通过内部的知识进化(Knowledge evolution)自发地获得.这种机制使得机器直觉有了创新能力,是实现深层次直觉的重要组成部分,符合架构准则7的需求.

4.4 博弈行动

博弈行动子模块用于执行机器直觉输出的策略,但其接收的不仅有机器直觉输出的策略,还可能包含理性决策获得的策略.因此,该模块将理性决策与直觉决策获取的策略进行博弈选择,最终执行博弈胜出者的策略,与环境实现交互.执行策略后,还会根据环境状态对执行效果进行反馈评价并存储至情感记忆(emotional memory)中,好的效果获得积极的情感记忆,差的效果获得消极的情感记忆.情感记忆影响隐式决策过程中对策略的选取,进一步直觉决策的准确性,满足架构准则8的要求.

直觉本原中的感知模式、全息数据、情景记忆、广义特征、策略空间以及情感记忆共同构成了机器直觉的经验来源,具有多层次、多角度、多模态的特点.这些经验可以通过与环境交互以及内部直觉启发积累.而全息信息拓扑、直觉相似映射、本征抽象等模块,可以根据外界环境刺激而扩展、进化.随着经验的不断丰富以及内部结构的进化,直觉决策的准确性及适应性会越来越高,满足架构准则1~3的要求.

4.5 交互反馈

交互反馈是机器直觉获取经验并改善自身性能的重要环节.反馈回路将考虑机器直觉的决策输出,以改进其内部全息信息拓扑机制、直觉相似映射机制、本质抽象机制、直觉启发机制以及隐式决策等机制所建立映射关系的准确性.由于不同机制处理的信息类型不同,因此,反馈回路是多模态的,通过全息感知获取并对各个机制均产生影响.同时,机器直觉的反馈回路同时包含正反馈与负反馈,其中正反馈用于强化正确的映射关系,负反馈用于改进错误映射关系.正负反馈交替进行,促进各个机制不断建立准确的映射关系并刺激直觉本原中不同经验模态的积累.

4.6 直觉训练

在机器直觉的训练初期,直觉本原中存储的经验较少,难以利用局部的、不确定性较高的信息进行有效决策.因此,在这个阶段,需要获取环境中完备的、全息的信息,全息传感对这些信息感知后通过全息信息拓扑进行数据存储.直觉相似映射与本征抽象进一步将全息拓扑数据提炼、归纳,形成情景记忆与广义特征.隐式决策则利用完备的信息进行决策,环境会依据策略准确性反馈给系统执行效果,机器直觉据此纠正策略映射、本质抽象的准确性并存储新策略与新特征.在这一过程中,直觉本原通过环境交互快速存储大量准确的经验,此时机器学习的训练类似于人类从新手到专家的提升.

随着训练的进行以及直觉本原中经验的积累,交互时的全息信息逐步由局部的、不确定性高的环境信息所代替,以激发系统的直觉能力.此时,全息传感获取到的信息不再完备而准确,利用全息信息拓扑结构首先对局部信息进行拓扑扩展,补全信息中可能缺乏的元素.接着,直觉相似映射结构对拓扑后的信息进行情景再认,识别出可能相似的情景.本征抽象结构对这些相似的情景抽象出本质特征,最后隐式决策将本质特征映射至策略空间.同样的,根据环境对策略执行效果的反馈,机器直觉进一步纠正信息拓扑、本质抽象与隐式决策的准确性并将决策效果存储至情感记忆之中.若在直觉本原中

没有找到相似经验, 则会刺激直觉启发机制对已有的特征、情景、策略进行联结与进化, 以获取新的经验知识来适应外界环境. 在此阶段类似于人类专家的直觉训练, 新的经验来源于两方面, 一方面通过环境交互获得新的信息, 另一方面通过环境的反馈刺激内部直觉启发机制对已有经验进行重新组织.

4.7 机器直觉架构与人工智能 3 大主要学派之间的关系

机器直觉的架构融入了符号主义、联结主义以及行为主义这 3 大人工智能主要学派的重要思想. 其中, 机器直觉与符号主义的联系在于机器直觉在训练时同样模拟了大脑抽象思维的过程, 将训练获得的概念化知识表示, 抽象的数据、记忆、特征等经验实体符号存储于直觉本原中, 辅助直觉决策. 机器直觉与联结主义的联系在于直觉决策过程中, 利用神经网络对输入的全息传感数据进行抽象与理解, 并将直觉本原中存储的经验知识直接映射到策略空间, 进行决策. 机器直觉与行为主义的联系在于两方面, 一方面机器直觉重视环境刺激带来的影响, 通过引入情绪记忆, 建立感知与行动之间的反馈, 与环境进行交互. 另一方面, 在直觉启发过程中, 采用进化计算的思想, 利用遗传算子对已有知识进行交叉变异, 获得新的知识, 以不断适应新的环境. 综上所述, 在机器直觉的决策过程中, 处处体现着 3 大主义内涵: 利用行为主义相关思想与环境进行交互, 获取信息, 利用联结主义相关思想处理信息并执行决策, 最后利用符号主义相关思想对习得知识进行存储与利用. 因此, 机器直觉是这 3 大主义的有机结合, 是三者的统一.

4.8 小结

综上所述, 本文所提架构满足前述通用直觉架构准则的基本要求. 它既可通过全息传感与信息拓扑、直觉相似映射、本征抽象、隐式决策等结构实现基于经验的浅层次反应直觉及经验直觉, 也可以通过直觉启发机制实现由内而外的自我进化, 逐步达到深层次的意识直觉甚至文化直觉. 因此, 该架构是一种覆盖大多类型直觉机理特征的, 有望令机器实现类似甚至超过人类直觉能力的, 赋予机器洞察力与创造性智能的通用机器直觉实现架构.

5 机器直觉的应用领域及发展方向

5.1 机器直觉的应用领域

机器直觉对环境的快速反应及强大的适应能力, 决定了其具有广阔的应用前景. 这里本文仅列举几个可能的应用领域. 未来随着机器直觉研究的进一步发展, 将为越来越多的应用领域带来变革.

5.1.1 机器人控制领域的应用

智能机器人由于所需应对的环境复杂度越来越高, 任务实时性及困难度越来越大, 且可供学习的案例、样本数量较少, 对机器人的态势感知、实时控制、学习能力均提出了很高要求. 传统的控制、决策模块难以有效地应对这些任务与挑战^[70]. 另一方面, 现代控制器的控制效果还与计算机的处理速率高度相关, 而对于野外执行任务的机器人, 受其大小、重量、携带功率 (SWaP) 的影响, 其处理器性能也有所限制. 一旦任务复杂度超过处理器处理速度的极限, 则机器人会处于失控状态^[71]. 机器直觉适用于不确定性较高的复杂环境中, 利用内部经验映射机制, 可以降低对外部信息的感知频率同时提升决策速率. 将机器直觉与机器人技术结合, 有助于提升机器人在复杂环境下的适应能力, 进一步提升机器人的智能化水平.

5.1.2 智慧医疗领域的应用

当前,人工智能技术已广泛应用于医疗领域,为临床辅助诊断及治疗方案带来了新的变革,推动着现代医疗向智能、准确、高效方向发展^[72].然而,现代基于深度学习的智慧医疗诊断系统需要大量病例数据进行训练,而病例数据往往分布式地存储在各个医院,难以获取足够多的训练数据.另一方面,AI进行辅助诊断时,往往需要患者输入足够多且准确的信息才可以有效诊断,限制了智慧医疗的应用^[73].机器直觉可以结合书籍中包含的知识进行拓扑并结合病例进行训练,有效降低对病例数据量的需求.同时,机器直觉的注意力机制可以对患者输入的病例信息结合自身经验知识进行预测补全,提升诊断的准确性.

5.1.3 国防军事领域的应用

未来作战环境越来越复杂,大规模战争涉及海、路、空、太空多方位作战,作战单位从驱逐舰、航母、战车、坦克到轰炸机、歼击机以及各类导弹、卫星等多种多样.这种多批次、多方向、多层次的攻防模式下,地面指挥人员很难人为做出准确的、全局的合理决策^[67,68].机器直觉技术可以通过对动态情景的有限观测结合经验映射机制对态势进行准确判断,同时注意力机制可以更为有效地识别敌方的进攻意图,为打赢现代信息化战争提供坚实理论基础后盾.

5.2 机器直觉的未来研究方向

作为新兴的交叉学科方向,机器直觉将会吸引不同领域的研究者开展多学科交叉研究.这里抛砖引玉,列举一些我们认为相对重要的研究方向.

5.2.1 人类直觉的脑与认知科学机理研究

人脑是一个通用的智能系统,可同时处理视觉、听觉、动觉等不同感觉器官获取的信息,并进行推理、决策.即使所处的环境具有高度不确定性,获取的信息包含噪声,也可将不同的信息来源(如关于情绪的图片和小车运动方向)以及自身经验组合起来进行推断^[44].因此,研究人脑的信息处理过程,借鉴其原理是实现机器直觉架构创新的重要源泉.脑科学与神经科学、认知科学的进展使得从不同尺度下观测大脑处理认知任务时的活动状况成为可能^[74].将管理学、认知科学、脑科学、决策论等多学科进行交叉,进一步探索直觉机理,是实现更深层次的意识层、文化层直觉的必由之路.通过机器直觉架构的研究,也可加深各个学科对直觉的理解,促进各学科共同发展.

5.2.2 机器直觉的实现机制探索

虽然本文提出了机器直觉的定义、特点及架构,但是如何通过架构实现具体的机器直觉还有待进一步研究.在全息感知中,利用全息感知的方法可以获得不同类别、不同角度的数据,需要对这些数据进行高效的利用以发挥全息数据的优势,因此,需要研究相应的数据融合技术;在直觉认知中,要求直觉相似映射机制将局部信息恢复为完备信息,同时本征抽象机制可以准确地对信息进行抽象,因此,需要研究全息信息相应的数据补全与抽象技术;在直觉决策中,要求隐式决策机制具有在策略空间中寻找非支配解,并根据当前的交互环境选择最适合的策略的能力,因此,需要研究相应的多策略搜索及策略映射技术;最后,直觉本原中涉及感知模式、全息数据、情景记忆、广义特征、策略、情感等多种模态的经验形式,如何将这不同属性、形态的经验进行存储、组织以及进化也是待解决的问题.

5.2.3 机器直觉的计算模型与硬件系统

通用机器直觉架构包含全息信息拓扑、直觉相似映射、本征抽象、直觉启发以及隐式决策等机制。基于传统芯片架构的硬件系统难以适应机器直觉的新的计算范式与数据存储处理过程。因此, 需要研究面向机器直觉的计算模型与硬件系统。在计算模型方面, 研究新的机器直觉计算范式, 探索可指令化的共性操作问题, 配置此类操作协处理器实现与指令实现机制; 面向机器直觉及硬件开发标准映射流程, 设计全息传感数据的采集与全息拓扑结构化处理模型; 攻关高集成度多模态可重构的片上高能融合计算模型和基于分形的拓扑存储器等方向。在硬件系统方面, 片上可重复再现持续的直觉学习算法的加速引擎硬件设计方案; 可重构的高性能计算架构与片上网络的构建方法, 形成高效、低功耗混合计算/存内设计方法等的机器直觉硬件系统等方向, 赋予未来智能系统对复杂场景的实时智能感知与直觉预测能力的计算模型与硬件系统, 实现机器直觉的自主智能决策能力的硬件系统。

5.2.4 机器直觉的标准化试验仪器、验证平台与测试准则

为启发机器直觉, 需要获取人类直觉样本数据, 虽然人类专家经常利用直觉进行决策判断^[20, 45, 46], 但由于应用直觉的场景较为复杂且直觉本身具有快速性、或然性, 直觉的试验与数据采集并非易事。因此, 针对特定的直觉类型与应用领域开发相应的标准化试验仪器, 保证直觉样本的准确性与可复现性。一种可行的方法是利用虚拟现实技术构造逼真的直觉场景, 同时利用脑电传感器采集人脑信号, 从中筛选出准确的人类直觉样本。

据第 4 节描述可知, 机器直觉需要应用在 (1) 工作环境具有高度不确定性, (2) 工作任务案例较少甚至无前例可循, (3) 解空间有多解, 每个解均有较好的事实支持, (4) 环境感知信息有限, (5) 没有感知到环境信息等 5 类场景中, 而这些场景本身具有复杂性、或然性、偶发性的特点。因此, 需要构建专用的机器直觉验证平台。系统的评价和比较不仅能加深我们对现有算法优势的理解, 而且能揭示其局限性, 为今后的研究提供指导。然而, 目前还缺乏一套标准化的、具有挑战性的机器直觉评估准则以对各类机器直觉的直觉能力量化评估。心理学领域的研究者设计了一系列评估人类直觉能力的度量测试^[10]。具有代表性的有 Westcott 等^[75] 的 Westcott 直觉能力测试、Bowers 等^[29] 的累积线索任务 (accumulated clues task, ACT) 与滑铁卢格式塔趋合任务。利用评估人类直觉的度量测试虽然无法直接对机器直觉进行评估, 但这类度量标准为我们提供了一个有意义的参考。

6 总结与展望

人类在高速且不确定性强的环境中依靠直觉所表现出的非凡能力有望对人工智能技术带来新的变革。本文对人类直觉的内涵、定义及类型进行了详细的论述, 将直觉的层次划分为 4 个层面, 分别为反应直觉、经验直觉、意识直觉以及文化直觉。结合人工智能面临的挑战, 将关注点聚焦于经验直觉层面, 通过分析管理学、认知科学、决策论等学科领域现阶段在直觉方面的研究成果, 总结出直觉的机理受内部经验积累及外部环境刺激两方面因素影响。然后论述了现有直觉决策架构, 给出了通用机器直觉架构的 8 个基本准则, 指出直觉决策架构的研究还处于初级阶段。接着给出了机器直觉的定义、特点以及架构, 详细分析了各模块的原理与功能。在此基础上, 未来将研究范围进一步扩大到意识层直觉乃至文化层直觉, 并把基于机器直觉的人工智能与基于理性认知的人工智能相结合, 研究新的基于拓扑特征值、反映基于概念、模型与知识的推理、直觉、进化的新的学习算法与机制, 最终实现适应任务多元化、泛化迁移能力强、可适应复杂多变现实环境问题的通用学习机制。

人类直觉启发的机器直觉机制研究, 将突破现有的基于五感的多模态感知及其基础上的认知智能

研究. 通过实现直觉这一第六感, 赋予机器五觉 + 直觉的完整的、有创造性的快速预测、判断、决策、规划能力, 以期在真实复杂动态时变场景, 自然灾害、公共卫生等突发事件预判以及创造性科学研究等领域发挥重要作用. 可以预见, 随着机器直觉理论与方法的不断深入, 人工智能将有望突破现阶段理论及应用瓶颈, 朝着通用人工智能的目标更进一步.

参考文献

- 1 Buchanan B G. A (very) brief history of artificial intelligence. *AI Mag*, 2005, 26: 53
- 2 Jiao L C, Yang S Y, Liu F, et al. Seventy years beyond neural networks: retrospect and prospect. *Chin J Comput*, 2016, 39: 1697–1716 [焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 等. 神经网络七十年: 回顾与展望. *计算机学报*, 2016, 39: 1697–1716]
- 3 Sutton R S, Barto A G. *Introduction to Reinforcement Learning*. Cambridge: MIT Press, 1998. 13–20
- 4 Farabet C, Couprie C, Najman L, et al. Learning hierarchical features for scene labeling. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2013, 35: 1915–1929
- 5 Mohamed A, Dahl G, Hinton G. Deep belief networks for phone recognition. In: *Proceedings of NIPS Workshop on Deep Learning for Speech Recognition and Related Applications*, 2009. 1: 39–47
- 6 Li G, Yu Y. Visual saliency based on multiscale deep features. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015. 5455–5463
- 7 Liu F, Liu B, Sun C, et al. *Deep Learning Approaches for Link Prediction in Social Network Services*. Berlin: Springer, 2013. 425–432
- 8 Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview. *Neural Netw*, 2015, 61: 85–117
- 9 Ripoll H. The understanding-acting process in sport: the relationship between the semantic and the sensorimotor visual function. *Int J Sport Psychol*, 1991, 22: 221–243
- 10 Hodgkinson G P, Langan-Fox J, Sadler-Smith E. Intuition: a fundamental bridging construct in the behavioural sciences. *British J Psychol*, 2008, 99: 1–27
- 11 Zhang X L. A review of intuition research. *Philosophical Trends*, 1986, 2: 15–18 [张晓玲. 直觉研究综述. *国内哲学动态*, 1986, 2: 15–18]
- 12 Holton G, Elkana Y. *Albert Einstein, Historical and Cultural Perspectives: The Centennial Symposium in Jerusalem*. Princeton: Princeton University Press, 1984. 97
- 13 Li H T. *The intuition dialectics*. Dissertation for Ph.D. Degree. Jilin: Jilin University, 2015 [李海涛. 直觉辩证法. 博士学位论文. 吉林: 吉林大学, 2015]
- 14 Ma T. Intuitive thinking in ancient Chinese philosophy. *Thinking Wisdom*, 1995, 3: 14–15 [马涛. 中国古代哲学中的直觉思维. *思维与智慧*, 1995, 3: 14–15]
- 15 Pondy L R. Union of Rationality and Intuition in Management Action. *The Executive Mind*. San Francisco: Jossey-Bass, 1983. 169–191
- 16 Eisenhardt K M. Making fast strategic decisions in high-velocity environments. *Academy Manag J*, 1989, 32: 543–576
- 17 Quinn J B. Strategies for change: logical incrementalism. *Academy Manag Rev*, 1981, 7: 324–325
- 18 Wang B. Difference between cognitive decision-making and intuitive decision-making of male handball players in simulation situation. *Sport Sci*, 2004, 6: 47–50 [王斌. 男子手球运动员模拟运动情境中认知决策与直觉决策的差异. *体育科学*, 2004, 6: 47–50]
- 19 Bai J. The retrospect and prospect of intuitive decision-making research. *China Soft Sci*, 2008, 5: 140–147 [柏菊. 直觉决策研究综述与展望. *中国软科学*, 2008, 5: 140–147]
- 20 Agor W H. How top executives use their intuition to make important decisions. *IEEE Eng Manag Rev*, 1986, 29: 49–53
- 21 Jung C G. *Modern Man in Search of a Soul*. London: Kegan Paul, Trench, Trubner, 1933. 567–568
- 22 Westcott M R. On the measurement of intuitive leaps. *Psychol Rep*, 1961, 9: 267–274
- 23 Vaughan F E. *Awakening Intuition*. Garden City: Anchor Press/Doubleday, 1979. 27–28
- 24 Dreyfus H, Dreyfus S, Athanasiou T. *Mind Over Machine: the Power of Human Intuition and Expertise in the Era of the Computer*. Oxford: Basil Blackwell Ltd, 1986. 56
- 25 Rowan R. *The Intuitive Manager*. Boston: Little Brown, 1986. 96

- 26 Simon H A. Making management decisions: the role of intuition and emotion. *Academy Manag Perspect*, 1987, 1: 57–64
- 27 Reber A S. Implicit learning and tacit knowledge. *J Exp Psychology-General*, 1989, 118: 219–235
- 28 Ren W D, Xing Y X. Motor intuition and its characteristics. *Sport Sci*, 1989, 4: 68–72 [任未多, 邢玉香. 运动直觉及其特征. *体育科学*, 1989, 4: 68–72]
- 29 Bowers K S, Regehr G, Balthazard C, et al. Intuition in the context of discovery. *Cognitive Psychol*, 1990, 22: 72–110
- 30 Vaughan F E. Varieties of intuitive experience. In: *Intuition in Organizations*. Newbury Park: Sage Publications, 1990. 40–61
- 31 Parikh J. *Intuition: The New Frontier of Management*. Oxford: Blackwell Business, 1994. 32–55
- 32 Shirley D A, Langan-Fox J. Intuition: a review of the literature. *Psychol Rep*, 1996, 79: 563–584
- 33 Pacini R, Epstein S. The relation of rational and experiential information processing styles to personality, basic beliefs, and the ratio-bias phenomenon. *J Personality Social Psychol*, 1999, 76: 972–987
- 34 Sadler-Smith E, Shefy E. The intuitive executive: understanding and applying ‘gut feel’ in decision-making. *AMP*, 2004, 18: 76–91
- 35 Zhou Z J, Zhao X C, Liu C. A review of research on intuition. *Adv Psychol Sci*, 2005, 13: 745–751 [周治金, 赵晓川, 刘昌. 直觉研究述评. *心理科学进展*, 2005, 13: 745–751]
- 36 Miller C C, Ireland R D. Intuition in strategic decision making: friend or foe in the fast-paced 21st century? *Academy Manag Perspect*, 2005, 19: 19–30
- 37 Dane E, Pratt M G. Exploring intuition and its role in managerial decision making. *Academy Manag Perspect*, 2007, 32: 33–54
- 38 Kuo W J, Sjostrom T, Chen Y P, et al. Intuition and deliberation: two systems for strategizing in the brain. *Science*, 2009, 324: 519–522
- 39 Dane E, Pratt M G. Conceptualizing and measuring intuition: a review of recent trends. *Int Rev Indust Organ Psychol*, 2009, 24: 1–40
- 40 Xu S. Intuitive decision making: organization-level, dynamic evolution and development path analysis. Dissertation for Master's Degree. Dalian: Dongbei University of Finance and Economics, 2017 [许朔. 直觉决策: 组织层次、动态演化与开发路径分析. 硕士学位论文. 大连: 东北财经大学, 2017]
- 41 Glockner A, Witteman C. Beyond dual-process models: a categorization of processes underlying intuitive judgment and decision making. *Thinking Reasoning—Think Reason*, 2010, 16: 1–25
- 42 Cai S S. On the five levels of human cognition. *Academics*, 2015, 12: 5–20 [蔡曙山. 论人类认知的五个层级. *学术界*, 2015, 12: 5–20]
- 43 Khatri N, Ng H A. The role of intuition in strategic decision making. *Human Relations*, 2000, 53: 57–86
- 44 Lufityanto G, Donkin C, Pearson J. Measuring intuition. *Psychol Sci*, 2016, 27: 622–634
- 45 Sternberg R J. Cognitive conceptions of expertise. In: *Expertise in Context: Human and Machine*. Cambridge: The MIT Press, 1997. 149–162
- 46 Allinson C W, Hayes J. The cognitive style index: a measure of intuition-analysis for organizational research. *J Manage Studies*, 1996, 33: 119–135
- 47 Tian Z G, Lu X H, Song Y Z. An initial study of intuitive decision making. In: *Decision Science: Theory and Method — Proceedings of the 4th Annual Meeting of Decision Science Committee of China Society of Systems Engineering*, 2001. 245–251 [田志刚, 卢兴华, 宋一中. 关于直觉决策几个问题的研究. 见: *决策科学理论与方法 —— 中国系统工程学会决策科学专业委员会第四届学术年会论文集*, 2001. 245–251]
- 48 de Monsabert S, Snyder F, Shultzaberger L. Comparative evaluation of analytical and intuitive decision making. *J Manage Eng*, 2003, 19: 42–51
- 49 Schroyens W, Schaeken W, Handley S. In search of counter-examples: deductive rationality in human reasoning. *Quarterly J Exp Psychol Sect A*, 2003, 56: 1129–1145
- 50 Sun R, Slusarz P, Terry C. The interaction of the explicit and the implicit in skill learning: a dual-process approach. *Psychol Rev*, 2005, 112: 159–192
- 51 Lieberman M D, Jarcho J M, Satpute A B. Evidence-based and intuition-based self-knowledge: an fMRI study. *J Personality Social Psychol*, 2004, 87: 421–435
- 52 Lieberman M D. Social cognitive neuroscience: a review of core processes. *Annu Rev Psychol*, 2007, 58: 259–289

- 53 Kihlstrom J F. Implicit learning and tacit knowledge: an essay on the cognitive unconscious. *Science*, 1994, 264: 1013–1014
- 54 Lieberman M D. Intuition: a social cognitive neuroscience approach. *Psychol Bull*, 2000, 126: 109–137
- 55 Simon H A. Explaining the ineffable: AI on the topics of intuition, insight and inspiration. In: *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1995. 939–948
- 56 Prietula M J, Simon H A. The experts in your midst. *Harvard Business Rev*, 1989, 67: 120–124
- 57 Dijkstra K A, van der Pligt J, van Kleef G A, et al. Deliberation versus intuition: global versus local processing in judgment and choice. *J Exp Social Psychol*, 2012, 48: 1156–1161
- 58 Klein G. *Sources of power: how people make decisions*. Cambridge: MIT Press, 1998. 13: 978–980
- 59 Burke L A, Miller M K. Taking the mystery out of intuitive decision making. *Academy Manag Perspect*, 1999, 13: 91–99
- 60 Wang B. The experiment on intuitive decision-making in handball situation and the primary theory construction on sport institution. Dissertation for Ph.D. Degree. Beijing: Beijing Sport University, 2002 [王斌. 手球运动情境中直觉决策的实验研究与运动直觉理论的初步建构. 博士学位论文. 北京: 北京体育大学, 2002]
- 61 Sayegh L, Anthony W P, Perrewé P L. Managerial decision-making under crisis: the role of emotion in an intuitive decision process. *Human Resource Manage Rev*, 2004, 14: 179–199
- 62 Richman H B, Staszewski J J, Simon H A. Simulation of expert memory using EPAM IV. *Psychol Rev*, 1995, 102: 305–330
- 63 Mishra A K. ICABiDAS: intuition centred architecture for big data analysis and synthesis. *Procedia Comput Sci*, 2018, 123: 290–294
- 64 Dundas J, Chik D. Implementing human-like intuition mechanism in artificial intelligence. 2011. ArXiv: 1106.5917
- 65 Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets Syst*, 1986, 20: 87–96
- 66 Atanassov K T. More on intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets Syst*, 1989, 33: 37–45
- 67 Lei Y J, Wang B S, Wang Y. Techniques for threat assessment based on intuitionistic fuzzy reasoning. *J Electron Inform Technol*, 2007, 9: 49–53 [雷英杰, 王宝树, 王毅. 基于直觉模糊推理的威胁评估方法. 电子与信息学报, 2007, 9: 49–53]
- 68 Li S H, Ding Y, Gao Z L. UAV air combat maneuvering decision based on intuitionistic fuzzy game theory. *Syst Eng Electron*, 2019, 41: 132–139 [李世豪, 丁勇, 高振龙. 基于直觉模糊博弈的无人机空战机动决策. 系统工程与电子技术, 2019, 41: 132–139]
- 69 Li D F. Multiattribute decision making models and methods using intuitionistic fuzzy sets. *J Comput Syst Sci*, 2005, 70: 73–85
- 70 Duan Y, Chen X, Houthoof R, et al. Benchmarking deep reinforcement learning for continuous control. In: *Proceedings of International Conference on Machine Learning*, 2016. 1329–1338
- 71 Elbanhawi M, Mohamed A, Clothier R, et al. Enabling technologies for autonomous MAV operations. *Prog Aerospace Sci*, 2017, 91: 27–52
- 72 Nie J F. Application and opportunity of artificial intelligence in biomedical field. *Softw Integr Circ*, 2017, 4: 38–41 [聂金福. 人工智能在生物医疗领域的应用和机遇. 软件和集成电路, 2017, 4: 38–41]
- 73 Chen M, Lv X J, Zhang L, et al. The opportunities and challenges of artificial intelligence for medical assistance. *Chin Med*, 2018, 13: 16–18 [陈梅, 吕晓娟, 张麟, 等. 人工智能助力医疗的机遇与挑战. 中国数字医学, 2018, 13: 16–18]
- 74 Zeng Y, Liu C L, Tan T N. Retrospect and outlook of brain-inspired intelligence research. *Chin J Comput*, 2016, 39: 214–224 [曾毅, 刘成林, 谭铁牛. 类脑智能研究的回顾与展望. 计算机学报, 2016, 39: 214–224]
- 75 Westcott M R. *Toward a Contemporary Psychology of Intuition: a Historical, Theoretical, and Empirical Inquiry*. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1968. 135–178

Machine intuition

Peng ZHAI^{1†}, Lihua ZHANG^{1,4,6*†}, Zhiyan DONG^{1,3,5†}, Sen WAN², Yuchen GUO²,
Zhongxue GAN^{1*} & Qionghai DAI^{2*}

1. *The Institute of AI and Robotics, Fudan University, Shanghai 200433, China;*

2. *Institute for Brain and Cognitive Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

3. *Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, China;*

4. *Engineering Research Center of AI and Robotics, Ministry of Education, Shanghai 200433, China;*

5. *Shanghai Engineering Research Center of AI and Robotics, Shanghai 200433, China;*

6. *Engineering Research Center of AI and Unmanned Vehicle Systems of Jilin Province, Changchun 130012, China*

* Corresponding author. E-mail: lihuazhang@fudan.edu.cn, ganzhongxue@fudan.edu.cn, daiqh@tsinghua.edu.cn

† Equal contribution

Abstract Currently, the problems that can be solved using deep learning-based artificial intelligence technology often require a large training data set for learning, and simultaneously, the information contained in the data set should be complete. However, in a real time-varying complex application environment, the collected data often contain significant noise, uncertainty, and only partial information of the environment, which limits the prospects of artificial intelligence applications based on deep learning. However, in a similar environment, humans can often make rapid and appropriate decisions based on intuition, providing inspiration to develop new artificial intelligence theories to solve the above problems. This article systematically discusses the concepts, mechanisms, categories, and other aspects of human intuition and analyzes the progress and shortcomings of existing research from different disciplines. Based on this analysis, machine intuition, a new cross-disciplinary research direction, is proposed, along with its basic criteria. The objective of machine intuition research is to facilitate machines with insight and creativity abilities to ultimately achieve intuitive intelligence similar or even superior to human instincts. Moreover, this paper attempts to design the general overall architecture of machine intuition and determines the basic principles and connotations of several main functional modules, such as holographic perception, intuitive cognition, intuitive decision-making, and game action. Lastly, from the viewpoint of cross-disciplinary research in brain science, cognitive science, and artificial intelligence, among others, the potential applications of machine intuition and future research directions are prospected, thus providing directional guidance for subsequent research on machine intuition.

Keywords artificial intelligence, mechanism of intuition, machine intuition, structure of intuition, holographic perception, intuitive cognition



Peng ZHAI received his B.S. and M.S. degrees from Hainan University and Ocean University of China in 2015 and 2018, respectively. Currently, he is a Ph.D. student at the Institute of AI and Robotics, Fudan University. His research interests include artificial intelligence and reinforcement learning.



Lihua ZHANG received his Ph.D. degree in control theory and engineering from Tsinghua University in 2000. At present, he is a professor at the Institute of AI and Robotics, Fudan University. His research interests include artificial intelligence, computer vision, and intelligence computation.



Zhongxue GAN received his Ph.D. degree in mechanical engineering from University of Connecticut. At present, he is a professor at the Institute of AI and Robotics, Fudan University. His research interests include swarm intelligence and intelligent robot.



Qionghai DAI received his Ph.D. degree in automatic control from Northeast University in 1996. He is a member of Chinese Academy of Engineering. At present, he is a professor at Department of Automation, Tsinghua University. His research interests involve artificial intelligence, brain and cognitive sciences, computer vision, and computational photography.