

隐性知识学习——以临床模拟为例

董军

中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123

摘要: 在计算机辅助心血管疾病诊断研究过程中, 已有方法大多忽视领域经验的全面建模, 针对此问题提出关注隐性知识的挖掘与学习策略。讨论了知识工程中隐性知识的重要性及其向显式知识转化的过程, 介绍了模拟医生专家思维过程的规则推理与机器学习相结合的技术路线, 分析了计算机辅助中医新方生成理念, 即机器通过模拟中医思维过程给出针对某种疾病的全新处方。希望本思想能为人工智能其他领域的应用建模提供参考。

关键词: 智能模拟; 隐性知识; 经验; 常识; 辅助诊断

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202149

Implicit knowledge learning: taking clinical simulation for example

DONG Jun

Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China

Abstract: In the course of computer-aided cardiovascular disease diagnosis, field experience modeling usually being ignored. Hereafter the strategy to focus on the discovery and study of implicit knowledge was presented. The importance of implicit knowledge in knowledge engineering and its transformation process to explicit knowledge was discussed. Technical roadmap simulating physicians' thinking by infusing rules inference and machine learning was introduced. And the computer-aided traditional Chinese medicine new prescription generating was analysed, that is, the machine gave a new prescription for a certain disease by simulating the thinking process of traditional Chinese medicine. It is hoped that this approach can provide a reference for the modeling of applications in other fields of artificial intelligence.

Key words: intelligence simulation, implicit knowledge, experience, common sense, computer-aided diagnosis

1 引言

人工智能经历了超过一个甲子的探索与徘徊, 与人生通常几十年的经历在时间尺度上相当, 但其研究积累和应用成就总体上尚处“童稚”阶段。当年的乐观预期未能变现, 导致直到如今问题依然棘手, 其原因可能有三。

第一, 估计不足。之所以不足, 一是因为未曾经历而难知深浅, 二是因为期待急切而过于乐观。

第二, 方法阙如。大脑如此复杂, 人们不得不承认对其研究是十分难攻克的堡垒。

第三, 工具稀少。思维过程和机器实现间、宏观表现到微观机制间的“桥梁”似乎还是一座“空中楼阁”。

人工智能的进步有待认知神经科学、建模手段和方法论的共同进步。西蒙(Simon)早年指出, 人工智能是一门经验科学。纵然“没有理论的行动, 是盲目的行动”, 就人工智能现状而言, 更重要的是“没有行动的理论, 是空洞的理论”。我国恰好具有广阔的应用空间与实践机会。值得重视的3点如下。

首先, 目前的成就是从“计算”出发的探索,

收稿日期: 2021-02-24; 修回日期: 2021-11-22

通信作者: 董军, jdong2010@sinano.ac.cn

而非思维过程映像。陈霖院士提出的关于视觉计算与拓扑结构和功能层次模型、认知和计算的关系富有启发意义。

其次，钱学森先生强调的思维模拟的瓶颈在于形象思维模拟等思维科学论述高屋建瓴、有待具体化、实例化，而领域经验是沟通形象思维与抽象思维的一个“抓手”。

最后，尽管逻辑主义缺乏形象思维能力、连接主义与实际脑内结构在规模和细节上有巨大差异、行为主义仅仅涉及简单的外部反应，但不能就此断言其不能发挥更大作用。

在超过 18 年的计算机辅助心血管疾病分析的研究过程中，在逐步满足临床需求的同时，笔者形成了包括医学经验中隐性知识的获取和表达、诊断过程中专家整体思维过程的刻画和建模等的基本框架，如图 1 所示。

这里关注：抽象思维与形象思维的平衡、规则推理与机器学习的互补、隐性知识向显式知识的转化。

在获得关于大脑思维过程的足够的实验结论之前，发挥各种方法的优势并使之融合、互补是可取的道路，而统一不同的途径和方法使之“一体化”，无论从实践探索的积累还是理论基础的奠定角度看，都为时尚早。

2 隐性知识

2.1 逻辑与经验

人的思维深受经验的影响。爱因斯坦在《爱因斯坦文集（第一卷）》^[1]中指出：纯粹的逻辑思维不能给我们提供任何关于经验世界的知识；一切关于实在的知识都从经验开始，终结于经验。经验往往尚

未上升到规范的理论层面，但是能够解决问题，可概括为人们在特定领域经过长时间实践训练和思考后所具备的识别、分析、判断、决策、分类等敏锐的、综合的能力。它涉及认识的拓展、认知的积累，前者是广度，后者是深度。由对人类在下棋、医疗诊断等领域的专业知识的分析可知，专家可以察觉到新手见不到的东西，对于某些人而言，在极为重要的一些领域需要 10 年或更多时间才能成为专家。在此过程中他（她）在领域内学会数万个模式，从而依靠一些以过去经验为基础的隐喻式的心理模型一眼看出这些模式，并从长时记忆中抽取与这些模式相关的信息，回忆出导致该模式的若干可能前提，进而形成下一步措施。这些经验内容难以被准确刻画，通过经典的逻辑计算来完整模拟困难重重，努力使之被机器“学习”是可行之路。

2.2 经验和常识

就疾病诊断而言，它是一个能动的学习、比对、分析、试验和综合的过程，它既是智能模拟的载体和依据，也是智能模拟的对象和参照。探索其中的信号感知途径、知识表达形式、数据学习过程和经验积累机制，是智能模拟面临的问题。

这里，常识与经验相辅相成。常识指人们在生活中获取的、普遍的、合理的、大量的、通常的知识。换句话说，常识将世界表象为一个熟稔的世界、一个任何人都可以而且都应该清楚认识的世界，在其中，每个人都可以或者应该可以凭借自己的智力来判断真理^[2]。无疑，机器有此常识，方能做出判断。但是总体来说，常识的观念一向是相当有常识性的：任何一个有常识的人都知道^[2]。此言有些拗口，其义在于：要具备常识本身也是常识，而有常

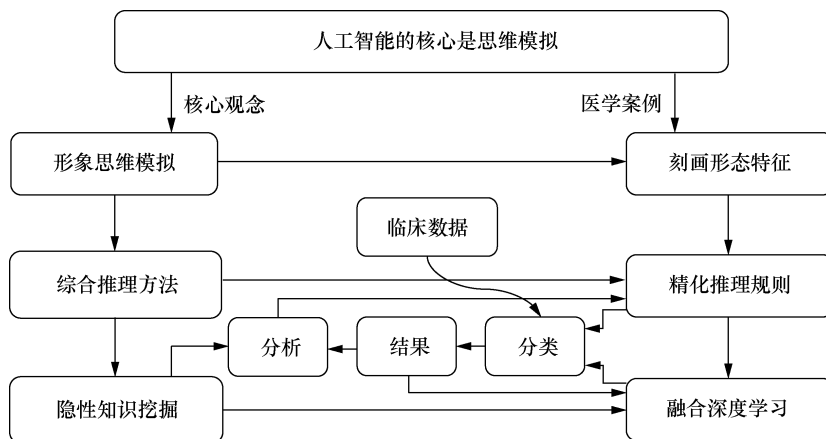


图1 隐性知识学习过程的基本框架

识者方能知此。此语似乎又是悖论，或者是转到逻辑里了。由此可见，逻辑是基础机制，是思维的基础，是人工智能的基础。

了解常识亦非易事。比如，我不开车，往往有人问原委。我说我是色盲，不能开车。对方通常会问，看不清红绿灯？我说能区分。对方会接着问，那为何不能开？我说体检要求高，我能区分红绿灯，可能是借助于亮度等，但反应较慢。笔者困惑的是，这些提问者多有驾驶证，因此经历过色觉检查——不是要受检者看红绿灯，而是看色盲检查本。色盲检查本上的图案我看不出。为何这样的常识（对于会开车者而言）会被直接忽略？

新型冠状病毒肺炎疫情暴发后，大家被要求在公共场合戴口罩，笔者第一次用的口罩是 N95 型的，但不知有一柔性条状材料是用于贴合鼻梁的。后来有一次用一次性口罩，那种材料看起来单薄，笔者未注意那个功能，才发现上下戴颠倒了。由此可知，常识似乎并不意味着自然而然就可具备。人的经验和常识可分别来自自身的实践或别人的传授。

人工智能试图将领域知识汇入算法以完成某种本来需要由领域专家完成的任务，但若尚无把握拥有特定目标任务所需的全面知识，结果令人失望就是正常的了。这里的知识包括书本上的专业知识、实践经验与常识，而常识涉及各种关联知识。

2.3 显式知识和隐性知识

经验有两方面的含义。宏观而言，人类知识源自经验以及在具备一定的认识和思考基础上的归纳、演绎；具体而言，每个人的经验都既包括他（她）学到的显式知识（如书本知识、课堂内容等），又包括他（她）积累的隐性知识，后者指以知识和经验概念内涵为基础，在特定领域（比如医生诊病）、经过长期实践（通常 8 年以上）、指导效果不一般（与多数从业者相比）、难以言表（不见于既有资料）的经验知识。

“隐性知识”这个重要概念形成的大致脉络如下。21 世纪初，笔者学习心理学中的内隐记忆知识；接着在心电图分类算法研究过程中，获悉波兰尼阐述的默会知识^[3]，结合自身对人工智能的认识，提出上述“隐性知识”概念^[4]，并刻画其重要意义^[5]。同时形成机器学习与规则推理融合、互补的技术路线^[4]，具体有串行与并行两种方式，前者如心电图分类中先用深层神经网络学习临床上难以识别的 P 波，然后再嵌入推理机的实践^[6]；后者见第 3 节关于脉象分类内容。

日常生活中，有人想学吹口哨，一时学不会，旁人也说不到位；某天学会了，并不意味着就能教人。对于显式知识，也有相似之处，比如，没有人能做到熟读小提琴手册后便可娴熟地演奏。20 世纪 80 年代，很多年轻人热衷于弹吉他，笔者从未接触

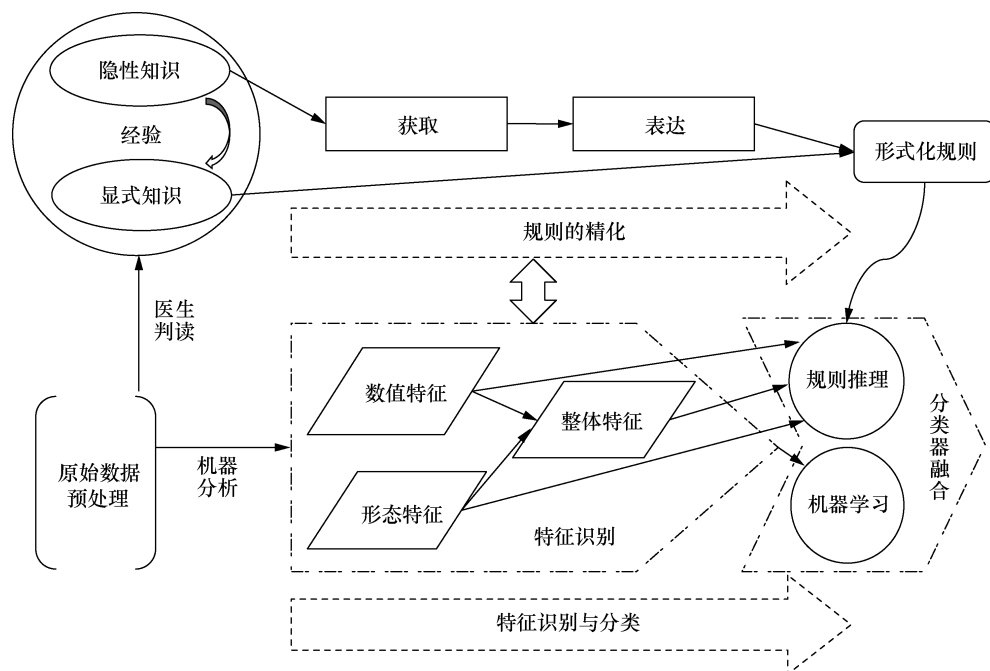


图2 隐性知识向显式知识的转化

过，以为一样的吉他、一样的乐谱，每人弹出来的曲子也该一样。学习者回答是不一样的。后来，笔者撰写拙稿时忽然想到，这是显式知识描述没那么具体细微，同时又需要隐性知识的例子。

通过启发和交互，隐性知识在专家脑海中可向显式知识转化，如图2所示。临床上，更多的经验关乎医生对病人病史的询问、对病人直观状况的观察等，此处尚不涉及。

图2上半部分是隐性知识的规则精化过程，是领域专家（医生）和知识工程师交互的结果，它有助于获得使规则推理机制更有效的推理规则，该过程还会对特征识别（图2下半部分）产生影响，比如哪些特征有待加入、哪些特征并无必要；而特征识别过程可使人们对规则的精化有更深刻的洞察（图2上下部分间的双向箭头）。图2下半部分是从原始数据预处理到特征识别与分类的基本过程，特别之处在于：在特征识别阶段，要关注形态特征及基于数值特征和形态特征两者的整体特征；在分类阶段，需要融合针对不同特征的分类器。

《道德经》有言“吾言甚易知，甚易行。天下莫能知，莫能行。”对思维模拟而言，更加困难之处在于需要获取（挖掘）经验中的隐性知识，并表达出来，使之形式化、可计算。障碍在于脑中想法不一定都能被表达出来。

杜威（Dewey）说过，医生在诊断一个病例时涉及的是个别的事情，依靠的是所具备的关于生理学等方面的一般原理。如果没有这些，他是不能进行工作的。不过他并不企图把这个病例归结为某一些生理学 and 病理学法则的确切例证。他是在利用这些一般性的陈述，帮助指导自己观察这个特殊的事例^[7]。这是对隐性知识发挥作用而又难以总结的一个说明。

经验经过归纳、演绎成为知识，包含显式知识与隐性知识，前者包含常识，后者包含可转变为显式知识的知识。图3是对图2左上部分的进一步刻画。

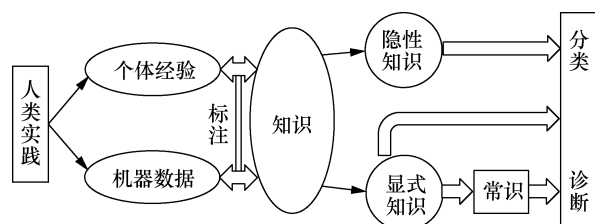


图3 经验与知识

如图3所示，在人类实践基础上个体经验之感性知识与机器运行产生大量数据，这些数据需要由有经验的专家标注其性质或归属；个体经验与机器数据都是经验，是知识的来源，对于推理、思考极为重要；知识支撑分类、变形等智能活动，只是不同的智能表现所需的知识种类不同，比如计算机辅助中医诊断系统更多依赖于隐性知识学习。在图3中，实线箭头表示划分为若干种类；空心箭头表示支撑关系，其中的实线框更加关键，自左至右是精化，自右而左是指导。

隐性知识的作用是在识别各种特征、明确它们之间的关系（时间和空间）、把握总体变化趋势、关联已有模式时显现出的。

3 计算机辅助中医新方生成

众所周知，医学的治疗对象涉及人体各部分，包括大脑。要把大脑作为治疗对象，就要解剖大脑、了解大脑，这有不同的层面、不同的阶段、不同的粒度，最终会直指大脑机制，即智能的本质。由于对象过于复杂，进展十分缓慢，人类要完全理解自己的大脑可能是做不到的。比喻归比喻，假如以此类推，人类要理解由神经系统支配的人体难免面临尴尬。这还需要具体分析其目标、本质与方法。

由于中医思维过程宏观、难以言表，其模拟更是有挑战性的人工智能话题。20世纪70年代末到80年代出现了数以百计的中医专家系统，热闹非凡。无论从计算机应用还是医院信息化角度看，当时的努力虽然有积极意义，但是因不符合临床要求、不满足临床需求，没多少年就烟消云散。有人说那是基于规则的局限性所致的，需要代之以数据库、知识库，知识获取、推理、解释模块，以及人机接口的系统。实际上，说法的改变并不意味着本质的差异。

中医诊病最后的结果即处方，基本上都是历代经验的总结。于是容易认为中医根据病情给出处方如同训练学生使之达到体育运动锻炼标准那样，对于相当一部分人而言没有问题。其实，根据望、闻、问、切四诊信息，在经验的基础上推理，得到病症，并根据其强度、相关性和病人特点给出医方，用机器实现这个过程，每一步的细化都面临困难。因此，机器给出的结果要么生搬硬套，要么过于笼统，与老中医开的处方无法比拟。当时似乎都有一个医生

(往往是模拟对象的弟子)在一旁辅助,如果“辅助”活多了,机器也就“没地位”了。这恐怕就是当年的中医专家系统没几年就销声匿迹的原因。

这种状况不难理解。就如同刚生了一个孩子就认定他是一个运动健将那样不着边际。孩子即便发育正常,也要若干年后才能成年,而且不出意外是一个普通人,经过培养、训练,才可能成为某一方面的专家。计算机辅助疾病诊断系统也宜先针对特定疾病。

细化是复杂的知识图谱。医生根据病人所述形成初步的、大范围的判断,然后做一些仪器检查。结合检查结果,得到症名,辨证分型,分期论治,四诊合参,得到处理意见或处方。若要开发人工智能系统,需要梳理、分清辨证过程各阶段的先后次序与逻辑关系,既有病例不仅要能用于机器学习,还应用来检验或测试推理系统。

在这个过程中有两类信息是比较直接的:掌握基本经验的医生的初步判断和仪器检查结果。可以先将这个过程描述出来,从而得到推理的粗略框架。这涉及不确定性,第一,医生心中有数但没有现成医案,这时候有待挖掘其思考方式,包括用药类型和用药剂量;第二,医生需要进行尝试的情况,比如可能是什么症、可能是什么处方与用量。有两个方面与领域经验非常相关:一是对应以往医案中的哪个处方;二是如何在这基础上调整处方(往往是增减一味药或调整某几味药的分量),而不一定是通过辨证等思维过程面向所有单方药材开出全新的处方^[8-9]。这种出新方的过程也可以说是实现了一种专家系统,因为要模拟中医思维过程得到某一处方,不同之处在于,传统的专家系统希望其能开出有经验的医生在之前的临床实践中开过的处方,而新方生成的目标是超越已有处方、得到针对某种疾病的、不同以往的全新的处方。

整个过程同时也是中医验证的一种途径。国务院办公厅印发的《关于加快中医药特色发展若干政策措施》强调充分利用数据科学等现代技术手段,建立中医药理论、人用经验、临床试验“三结合”的中药注册审评证据体系,积极探索建立中药真实世界研究证据体系。

由于首先针对的是一位名老中医的经验,有人可能会质疑:每个中医的诊断结果都不一样吧?其实这也是一个常识问题,先模拟一位然后集多位之长,

事情总是一步步做的。笔者曾请一位研究切脉^[10]的中医教授切脉,在其给笔者倒水时又请其学生切脉,意外的是两位教授的结论相去甚远,不过这不是人们否定中医切脉之术的理由。一位名人一次体检时发现肾脏肿瘤,然后去找超声前辈检查,被告知体检医生水平太差,那只是一般性的囊肿。他选择相信权威。但是后来体检时肾脏问题又被提及,后由那位前辈的学生、新的主任进行超声检查,结论是肿瘤、应马上做手术。过后又一次接受那位前辈检查,结论是癌症^[11]。这当然也不是否定西医的理由。无论中医还是西医的经验,都可能不易描述、未必准确、个案难辨。

人们希望更多的患者得到有经验的医生的诊断,而这类医生阙如,因而期待人工智能帮助诊病,但强调那是“计算机辅助分析”平台或环境^[12],即人机结合、协调功能、各有分工、优势互补,而非将“活”全部“交”给计算机,机器是助手,是减“负”者,是“团队”成员,非独当一面的“另类”医生。以逐步进入应用的心电图分析为例,笔者坚持其作用是筛查,疑难问题依然依赖于有经验的医生的诊断,不能主次倒置、任务含混,至少现阶段如此。

再就脉象分类而言,当下的问题是数据缺、标注少、结论异,解决这些问题离不开有经验的中医的参与。因而采用迭代建模方式,先获得少量标注数据,训练初始分类模型;同时,根据各种中西医临床体征的推理机制(包括具体病例的结论,建立诊断知识库),此后新的脉象数据都先由初始分类器得到粗略结果,然后将其与诊断知识库结论比对,从而由分类结果决定新数据的属性(是否属于某种症状),最后添加到训练集中。如此不断丰富,直到分类器与推理机的结果一致且稳定。

4 人机结合

钱学森先生在20世纪80年代就倡导马希文先生所说的“人机结合”理念,不能什么事都指望机器去做。具体到“辅助”诊断,也必然涉及至少人和机器两者。下面就人们对待人(中医)和机器(人工智能)的态度进行基本的对比。

第一,接受或实践中医者,说不清诊病的机理,这并不是说每门学科的每位工作者都要知晓所有规律,但是总要有能给出解释或阐述;接受人工

智能者，不了解思维过程，似乎又没人计较这种情况。智能的本质与物质结构、生命起源、宇宙形成都是人类面临的基本问题，中医可能与智能本质、生命起源都有关联。

第二，否定中医者，无法否定中医实际的有效性；认为人工智能不能实现者，也无法忽视人工智能已有的成就。人们如何看待问题、看待世界？还是要依靠历史唯物主义和唯物辩证的基本观念，承认客观现实，承认现实世界的多样性，承认世界发展的递进性，用历史的、联系的、变化的、发展的、全面的眼光分析问题。

第三，考虑将人工智能技术用于中医者，可能多数并不了解中医长期实践掌握的经验是否可表示为计算机可执行的程序，此等事不落实，就难以说智能模拟。反之，中医难明人工智能之理，这不要紧，大家可以协作，这情景尤其需要知识工程师不断与中医专家沟通、交流，有些内容中医自身难以言表，则只能靠经验的迭代。

第四，按照常规，应该先将简单一点的医学诊断案例作为人工智能研究对象，以逐步深化。但实质上无所谓简单与否。此言之意在于，中医经验都要经历长时间摸索、积累，不是普及性读物中重复的甚至模棱两可的话语。换言之，较为完整的中医经验才值得模拟，这是笔者首先研究名中医特病系统的意义所在。

第五，中医本身说不太清楚，对它进行模拟，看起来有点不恰当。然而，深层神经网络解决了一些问题，只是人们尚不十分清楚其内部过程，客观事实是它能在一定程度上提升机器处理的性能。中医在这里与人工智能似乎“相通”了，人们可以先得到有效性，并逐步扩大案例，然后再回过头来探究背后机理、理论模型。

现实情况有时令人啼笑皆非。比如，有著名计算机教授企图通过分析人脸上的血色的变化（也是一种“望”）来测量血压，说者觉得新颖，笔者却觉得这无法实现。这两者是否有关暂且不论，即便有关，其间的关系也过于复杂，至少复杂到人们目前不知道到底如何，粗略地估计或许可以尝试，殊不知若干机构做了数十年在手腕处测血压的工作还不尽如人意，“脸测”是“艺高人胆大”了。此外，一位资深人士说中医的效果没法衡量，这是似是而非之语，“是”指目前为止还没有很好地去做；“非”指不研究衡量方法，当然没法“衡量”。假如

学理工科的都这么认为，那么没有理由要求不熟悉理工科基本知识的中医自己去统计分析。先要认识到中医效果应该可以衡量，才能去实践、积累数据并做客观分析。

5 结束语

放眼世界，人工智能近年之所以成了技术与社会生活的热点，首先与深层神经网络在图像识别、语音处理等领域的良好性能密切相关；其次，人工智能沉寂甚至“压抑”已久，也期待“翻身”；最后，在现代社会，每个时代都有科技热点，这次“轮到”人工智能了。

人们重视经验的智能模拟探索，不限于计算机辅助医疗诊断，根据实际书法创作过程刻画的书法创作形象思维模拟方法是另一个关于人工智能的具体实践^[5]。琴棋书画对智能的潜移默化的影响，人类对美、幽默的鉴赏的难以言说，都与长时间的经验积累相关，充分体现了思维的独特和微妙。研究人员的工作某种程度上也是人工智能自顶向下与自底向上思想的综合。

回到与医学较早相关的人工智能领域（即专家系统），有人指出专家系统的提出是错误的，有人认为失败了，有人觉得过时了。专家系统面临的问题和质疑有其不同层面的原因：第一，思想上，那是与人工智能当初的盲目乐观关联的；第二，宏观上，从“智能模拟的核心是思维模拟”角度出发，现在的很多系统依然还是想模拟专家经验，只是方法和视角都拓展了；第三，技术上，构建经典专家系统的困难很大程度上是缺乏有效手段，比如模式识别，前提是特征选择、特征提取、特征识别等，背后是认知神经科学的机理，尤其是形态特征的识别过程。如果能澄清一下概念，专家系统依然可行：

- 专家系统自被提出至今成功者少，这并不意味着一定要有新名词，而在于探究症结所在；
- 计算机辅助分析也许是一个更恰当的表述，然而根本问题依然无法绕过；
- 人机协同当是人工智能的基本形态，难以言表的经验（即隐性知识）是核心所在。

经典的专家系统观念想要不被“抛弃”，依赖于实现能“解放”专家的人工智能系统。人工智能也许会遇到类似的尴尬，但若能解决人类面临的问题就不会处于被动状态。

参考文献:

- [1] 阿尔伯特·爱因斯坦. 爱因斯坦文集(第一卷)[M]. 北京: 商务印书馆, 1976: 445.
EINSTEIN A. The collected works of Einstein (volume I)[M]. Beijing: The Commercial Press, 2009: 445.
- [2] 克利福德·格尔茨. 地方知识——阐释人类学论文集[M]. 杨德睿, 译. 北京: 商务印书馆, 2014: 123, 145.
GEERTZ C. Local knowledge: further essays in interpretive anthropology[M]. Translated by YANG D R. Beijing: The Commercial Press, 2014: 123, 145.
- [3] 迈克尔·波兰尼. 个人知识[M]. 许泽民, 译. 贵阳: 贵州人民出版社, 2000: 152.
POLANYI M. Personal knowledge[M]. Translated by XU Z M. Guiyang: Guizhou People's Publishing House Co., Ltd., 2000: 152.
- [4] DONG J, ZHANG J W, ZHU H H, et al. A remote diagnosis service platform for wearable ECG monitors[J]. IEEE Intelligent Systems, 2012, 27(6): 36-43.
- [5] 董军. “心迹”的计算——隐性知识的人工智能途径[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2017.
DONG J. Computation of heart & mind trace: artificial intelligence approach on implicit knowledge[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and technical Press, 2017.
- [6] ZHOU F Y, JIN L P, DONG J. Premature ventricular contraction detection combining deep neural networks and rules inference[J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2017, 79: 42-51.
- [7] 约翰·杜威. 确定性的寻求: 关于知行关系的研究[M]. 傅统先, 译. 上海: 上海人民出版社, 2005: 160.
DEWEY J. The quest for certainty: a study of the relation of knowledge and action[M]. Translated by FU T X. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2005: 160.
- [8] 董军. 面向工程的中医现代化探索: 以新方生成为例[J]. 科学, 2021, 73(3): 33-35.
DONG J. Engineering-oriented study on modernization of traditional Chinese medicine—taking innovative prescription as an example[J]. Science, 2021, 73(3): 33-35.
- [9] 董军. 辩证中医[J]. 科学, 2020, 72(4): 39-42.
DONG J. Traditional Chinese medicine and challenge of the times[J]. Science, 2020, 72(4): 39-42.
- [10] 董军. 中医切脉模拟之困境[J]. 科学, 2017, 69(4): 34-36.
DONG J. The predicament on simulation of Chinese traditional pulse-taking[J]. Science, 2017, 69(4): 34-36.
- [11] 叶永烈. 华丽转身[M]. 成都: 天地出版社, 2017: 590.
YE Y L. Turing around gorgeously[M]. Chengdu: Tiandi Press, 2017: 590.
- [12] JIN L P, DONG J. Intelligent health vessel ABC-DE: an electrocardiogram cloud computing service[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2020, 8(3): 861-874.

[作者简介]



董军(1964—), 男, 博士, 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所研究员、博士生导师, 主要研究方向为人工智能及其在医疗健康、传统文化中的应用。