

一类非递归结构的计算思想

刘岩

董占球

韩承德

(中国科学院计算所 北京 100080) (中国科学院研究生院 北京 100039) (中国科学院计算所)

摘 要 本文通过讨论一类非递归结构的计算思想,揭示了在传统图灵模型框架内研究人工智能的局限性。作者认为,突破图灵模型,建立真正意义上的智能模型是人工智能,乃至整个计算机科学得以进一步发展的关键,按自然法则计算可能是通向这一目标的极有希望的道路。

关键词 生物智能,人工智能,计算智能,非递归结构,按自然法则计算。

美国学者 J. C. Bezdek 于 1992 年在近似推理的国际杂志上首次提出了计算智能的概念,他认为:计算智能依靠生产者提供的数字资料,不依赖于知识,而人工智能依赖的是知识的精华。Bezdek 在 IEEE'94 的 WCCI 上的发言中,将智能分三个层次:生物智能(BI);人工智能(AI);计算智能(CI)。从复杂性来看, $BI > AI > CI$,从所处的地位来看,CI 是 AI 的基础,也是 BI 的基本组成部分。因此,寻找真正意义上的计算智能模型,是认识生物智能和实现人工智能的关键。

众所周知,著名的 Church-Turing 论题奠定了经典可计算性理论的基础,给出了传统“计算”和“可计算”的定义。该理论的核心是:

1)所有递归函数都可以用 Turing 机来计算。

2)Turing 可计算函数一定是递归函数。

3)Post 系统(Tag 系统,Markov 算法)作为计算模型与递归函数及 Turing 机都是等价的。

由此可见,“可计算”(或称“Turing 可计算”)并不是现实可计算(涉及到计算复杂性),更不等价于人类智能的计算能力。有限状态图灵机(DTM)可解的问题都是递归问题,而非线性,不确定,追求满意解的人类智能(或称生物智能)的能力却不仅限于递归问题。能否给出(以及如何给出)一类可处理非递归结构问题的方法及相关模型,是 CI, AI, 乃至整个计算机科学能否发展以及向何处发展的关键。我们认为,按自然法则计算很可能是通向最终答案的极有希望的道路。

G. C. Fox 在其“Physical Computation”一文中给出了按自然法则计算(Physical Computation)的概念,并给出了它的几大分支:模拟退火(Simulated Annealing, SA);人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN);确定性退火(Deterministic Annealing, DA);弹性网(Elastic Network, EN);遗传算法(Genetic Algorithm, GA)。

Fox 把按自然法则计算看成是一类不完备的随机搜索策略,在求解组合优化问题方面,具有卓越的性能^[1]。

我们研究了 Fox 关于按自然法则计算的概念,认为这是一类“按自然法则计算”的思想,它研究将大量的自然科学模型和方法用于其常规领域之外的其它学科领域,以解决问题的一类算法思想,其解题思路见图 1。

这一类思想的内涵是优化处理。董占球教授在文[2]提出:“如何使复杂系统尽快地走向有序是一个复杂系统的调控优化问题”,而“参数的正确调控将会加速有序化的进程”。这一观点与 G. C. Fox 的概念有殊途同归之感,我们在这一领域的工作将会继续。

1 按自然法则计算与传统方法的区别

在解决问题过程中,按自然法则计算的典型方法(例如 SA, GA 等)表现出与传统方法不同的特点,这集中体现它在解决问题时的三个不需要上:

(1)不需要对问题本身抽象出一个精确数学意义上的解析式的数学模型。

(2)在求解某一具体问题前,不需要给出求解该问题的确定的算法步骤。

(3)结果无需精确解,而是满意解或满意解集。

以下分别讨论之。

1.1 问题描述与问题评价

精确地抽象出问题的数学模型及其求解过程,常常是经典方法解决问题的难点所在,事实上,建模与求解对于获取精确结果而言是一对矛盾。而对于某一假定的解,给出评价其优劣的耗费函数(Cost Function)或该函数的模糊等价量(Fuzzy Parallel)往往是容易的。按自然法则计算在解决问题时,需要的恰恰是问题评价,而非问题描述。作为例子,以下给出 SA 在并行计算负载平衡静态分析中的应用。

众所周知,负载均衡问题是经典的组合优化问题之一,而且已经被证明是 NP 难题,它在并行处理方面有非常广泛的应用背景。现将 N 个彼此有信息通讯的任务分配到 2^M 个处理单元上,设系统的总耗资为 $COST_{total}$, N 个任务的规模耗资为 $COST_{scale}$, N 个任务的通讯耗资为 $COST_{comm}$ 。则负载均衡问题归结为:在将 N 个任务分配到 2^M 个处理单元的所有分配方案所构成的分配方案解空间中,求使 $COST_{total}$ 值最小的方案。显然这是一个组合优化问题,在求解该问题时,我们不需要给出待解问题的精确解析式数学模型和解题过程的严格步骤,只需给出如下三个评价函数,即可利用 SA 求解。

$$COST_{total} = COST_{scale} + COST_{comm}$$

$$COST_{scale} = (1/N) \sum_{m,m'} w(m)w(m') \prod_{k=0}^{d-1} |1 + S_k(m)S_k(m')|$$

$$COST_{comm} = (1/M) \sum_{m,m'} C(m,m') \sum_{k=0}^{d-1} |1 + S_k(m)S_k(m')|$$

1.2 确定算法与自适应求解

建立在图灵模型基础上的现代冯·诺依曼体系结构计算机严格规定了解决问题的精确方法和先后次序,仅能具备属于人类智能中的数值计算和信息处理能力(而这种能力尚需事先由人赋予),却无法具有本质意义上的学习、思维和自适应的能力。按自然法则计算的各方法(如 SA, GA 和 ANN 等)则具有学习和自适应求解的能力,在求解过程中表现为“在搜索中学习(learn while searching)”和“持续探索(sustained exploration)”。它们通过学习、进化和自适应的随机搜索序列,对解空间进行不完备的优化搜索。SA 和 GA 的自适应能力体现在,搜索越来越向着平均评价价值高的区域进行,且在条件满足时可以概率 1 找到全局最优解。ANN 的自适应能力则体现在网络经过学习(有导师学习或无导师学习)具有了表示、储存、识别和利用某种知识的能力,这种能力以网络记忆为前奏。下面给出此类算法在解决负载均衡问题中的一个用例。

利用刘岩^[3]提出的单调升温的模拟退火算法(MTRSA),可很容易地解决前面提到的负载均衡问题,具体算法如下:

```

PROCEDURE MTRSA
begin
  INITIALIZE;
  m=0;
  trscale=0;
  finalconfig=config(0);
  read(expected-value);
  repeat
    repeat
      PERTURB(config(j)=config(i)
      ,δCOSTtotal(i,j));
    if(δCOSTtotal(i,j)≤0)then
      begin
        ACCEPT;
        if(COST of config(i)less than that of finalconfig)

```

```

then
  UPDATA(finalconfig);
end;
else
  if( $e^{(-\delta\text{cost}(i,j)/\text{trscale})} > \text{random}(0,1)$ )then
    ACCEPT;
  if ACCEPT then UPDATA(configuration j);
  until equilibrium is approached sufficiently closely;
  if ((LME()=YES). AND. (TRTE()=YES))then
    begin
      trscale=TRSE();
      TRP(trscale);
    end;
  else
    begin
       $T_{m+1}=f(T_m)$ ;
      m=m+1;
    end;
  until stop criterion=true(system is 'frozen');
end.

```

以上算法解决问题的机制与传统的解题方法有明显不同,它并未给出问题求解过程的确定步骤,问题空间搜索过程是收敛于最优解的随机自适应过程。

1.3 精确解与满意解

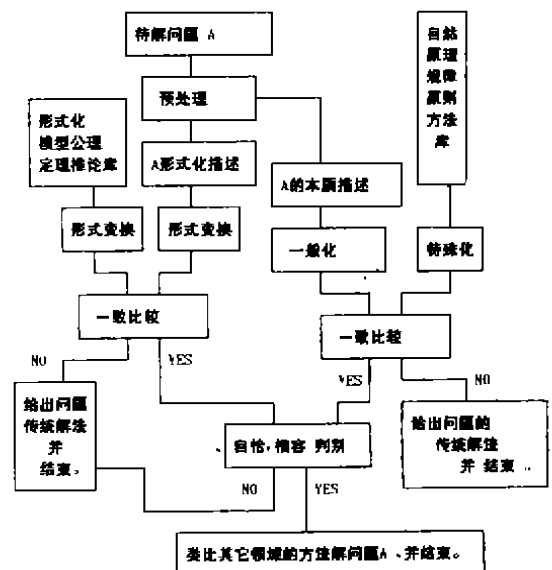


图 1

如前所述,图灵计算机建立在递归函数论的基础上,后者要求将问题归约成显然可解的本元问题,再将本元问题的解回溯集成为问题的解。以上过程都是精确过程,所得的解亦为精确解。但在自然智能中,人(或其他智能生物)往往更关心解决问题本身,他们通常不关心(也不必关心)自己所得的解是否最优。这就是人类智能的“满意性”,亦即对解的要求以“现实满意性”为标准。此特性是自然智能区别于当前的计算智能乃至人工智能的另一根本特点。为给图灵命题:“机器能思维吗?”一个肯定的,满意的解

答,要求新的计算模型必须是追求满意解的模型,按自然法则计算的各算法,由于是具有随机性的不完备算法,故从某种意义上来说,更适合于求满意解。

2 按自然法则计算解决问题的条件

按自然法则计算在解决问题时,通常需要下述条件。

条件一 按自然法则计算所处理的问题必须是优化问题。

事实上,大多数自然问题都可归结为组合优化问题^[1]。以下我们给出将任一问题转化为优化问题的方法:

待解问题: $PROBLEM$

问题目标: $TARGET_{optimal}$

当前方案: $SOLUTION_{current}$

自然问题: 求 $PROBLEM$ 的解 $SOLUTION_{optimal}$

转化过程: 构造耗费函数 Q_{cost} , 并使 $Q_{cost}(\| \Delta(TARGET_{optimal} - SOLUTION_{current}) \|)$ 的值与问题目标和当前方案之间的差距(或距离)成正相关。

转化结果: 对于待解问题 $PROBLEM$, 在对应的方案空间中, 求使函数 $Q_{cost}(\| \Delta(TARGET_{optimal} - SOLUTION_{current}) \|)$ 值最小的方案 $SOLUTION_{current}$, 并令最终方案 $SOLUTION_{optimal}$ 满足下式: $SOLUTION_{optimal} = SOLUTION_{current}$

显然,通过上述方法,可将任意问题转化成一个标准的组合优化问题。

条件二 按自然法则计算在优化过程中必须要有可供调控的参数。

例如,对于 SA 和 DA, 温度就是一个调控参数,该参数用于控制搜索序列对解空间的搜索范围。对于 GA 和 ANN, 也存在着相应的调控参数^[4,5]。

条件三 必须找出优化目标函数,以及优化过程与受调控参数之间的内在联系,并设计出优化判据。

对于 SA, 根据退火原则, 搜索开始时温度应该足够高, 此时对应的搜索范围应该涵盖整个解空间; 随搜索过程的进行, 温度逐渐变小, 搜索范围逐渐变窄(称 scrutinizing 过程), 并集中对评价价值较高的子区(称 promising region)进行搜索。整个搜索过程是在对温度的不断调控中完成的^[6-7,9]。在用按自然法则计算的方法解决问题时, 优化判据至关重要。此类方法在解决问题时, 可以不需要关于问题如何解的自发信息, 但必须知道何为优, 即必须知道优化判据。例如, 1.1 节中的三个耗费函数, 在利用 MTRSA 解决问题时是必不可少的。

3 按自然法则计算的特点

由前面分析可知, 按自然法则计算的有关算法具有以下两个特性: A) 此类算法求解的问题不必是部分递归的, 因此不受递归结构的约束。B) 此类算法从根本上回避了对现实问题描述上的困难。常规的解题方法, 在求解某一具体问题前, 要给出确定的算法步骤, 该步骤本质上是一个归约过程, 它将问题归约成可解的本元问题, 并回溯集成出问题的解。而按自然法则计算不必进行上述归约过程, 因此可以解决非递归问题(这是图灵意义下的算法作不到的)。

另外, 此类算法不必精确描述现实问题, 这正是我们所需要的。事实上, 对现实精确建模存在着本质困难, 我们当前面临的困境是, 无法求解的问题中, 大部分是无法描述的。这主要是由于: (1) 人类思维的不确定性(顿悟、联想、潜意识等); (2) 现实问题的复杂性; (3) 人对事物的测不准性与认识过程的不完备性。

由于按自然法则计算和自然智能都追求满意解, 且在解决问题时无需对问题进行机械地定量化处理(相应地, 在人类智能中存在着许多本能和经验过程), 因此不必建立问题本身的精确模型。

4 按自然法则计算的突破

长期以来, 困扰着问题求解的两大根本矛盾是: (1) 建模与求解之间的矛盾; (2) 在离散集合上解连续问题的矛盾。由于存在 A)、B) 二特性, 本文论及的这类算法思想彻底解决了问题求解中的两大根本矛盾。首先, 对于矛盾(1), 此类算法不需对问题及其求解过程精确建模, 就能解决问题, 因此克服了建模与求解的矛盾。其次, 对于矛盾(2), 数字计算机以离散量描述和处理信息模型, 而传统方法又必须建立问题的精确模型, 面对大量连续问题, 只能近似建模, 造成结果的误差, 甚至解的变异。对于某些无法精确建模的问题, 传统方法无法解决。而本文所论及的这类算法思想由于不需要对问题及其求解过程精确建模, 进而杜绝了产生矛盾的根源。

5 按自然法则计算的两个关键属性

关于按自然法则计算, 需要着重强调以下两个关键属性:

(1) 按自然法则计算的各类算法都是随机的, 不完备的。

(2) 按自然法则计算原则上可以、用较大的时间开销(即有很少、些没有)后, 在信息的情况下解决任何组合优化问题。

我们认为,上述两属性恰恰反映了按自然法则计算与人类智能有着惊人的共性。首先,我们认为人类的认识存在着不完备性,在理论物理和数理逻辑领域的两大发现:普朗克的“测不准原理”和哥德尔的“不完全性定理”雄辩地说明了这一点。现有的图灵计算机与人类智能的根本区别之一就是,完备的局部递归回溯机制只能模拟人类认识的这一不完备性,但却永远无法真正实现它。而按自然法则计算所表现出的不完备性却是本征的,非模拟的。其次,上述第二个属性恰恰符合学习过程。人类的学习过程是一个极漫长的过程(无论是个人的成长,还是种群智力的进化)。传统的图灵机局部递归算法,在确定的算法指导下解决确定的问题,从本质意义上来讲,在此过程中知识是不会增加的,进而不会有本质意义上的学习。而按自然法则计算利用极少的(或根本不用)启发式信息,就能解决传统方法需要大量启发式信息才能解决的问题,这本身就蕴含着对未知信息的学习过程。

6 结论

我们透过当前对计算智能和进化计算的研究热潮,试图探索传统人工智能研究的本质缺陷,并试图为真正意义上的人工智能找出一条道路来。考虑到当前科技水平及人们对“智能”认识的局限性,我们并不奢望“按自然法则计算”本身就会突破“现有的图灵计算模型,建立智能计算模型”以及“建立计算及计算机科学”领域的“大统一理论”(如果该理论存在的话)。但我们通过事实和经验认为,这必将是一条极有希望的道路,其理论意义和应用价值均不可限量。

我们认为,文中讨论的一类算法是处理目前近代数学和计算机科学无法处理的一类问题的重要手段,按自然法则计算是通向具有真正自然智能特性(即,非线性,不确定,不完备性,追求满意解等)的有别于图灵模型的一个极有希望的道路。尽管它本身也许离此还差的很远,但是仅从在正确认识“计算及计算机科学”领域现有的规律,发现新规律以及指导应用等方面的作用出发进行讨论,“按自然法则计算”就至少具有以下三方面的意义。

(1)研究“按自然法则计算”有助于从新的角度对“人工神经网络”,“模拟退火”,“确定性退火”,“遗传算法”等进行更全面的认识。从这一角度看问题,就会认清 ANN 的局限性和阶段性,不会把 ANN 当成是解决人工智能的终极途径,或走向另一个极端,

抹杀 ANN 在“学习”与“识别”中的作用;就会正确认识 SA“完美的理想定理”与“极不完善的应用理论”之间的关系,不会认为对于 SA 已无事可做;就会正确认识 DA 与 GA 在解决低维和高维问题时各自的优缺点。

(2)以“按自然法则计算”的方式进行思维,能将我们的思路自动地引向对事物本质规律的探索,会使我们自觉地建立不同领域规律之间的联系,启发我们开发出新的模型和算法。

(3)认识到“按自然法则计算”的意义,可以更有效地寻求适合于 SA, DA, GA, ANN 的应用领域,开发出更多的有应用价值的系统。

最后需要着重指出的是,按自然法则计算的各分支(SA, GA 等)尽管具有人类智能的某些本征的特性,但因当前只能在 DTM 上实现,仍然受 Turing 框架的束缚,具有浓重的“模拟”色彩。如前所述,按自然法则计算的更主要的意义在于它的研究方法论本身,它是道路而不是结果。

参 考 文 献

- [1] G. C. Fox, Physical Computation, Concurrency, Practice and Experience, 3(6), 1991
- [2] 董占球等,复杂系统优化的计算机方法,数学物理学报,1993年, No 2
- [3] Yan liu et al., The Background of Simulated Annealing and Monotonic Temperature Rising SA, Pacific-Asian Conf. on Expert Systems, PACES'95, China, 1995
- [4] The Theory of Neural Network System, by Licheng Jiao, by electric technology publishing company (1990)
- [5] David H. Ackley, Stochastic Iterated Genetic Hillclimbing, 1987 Carnegie Mellon CMU-CS-87-107
- [6] Simulated Annealing Theory and Applications, by P. J. M. Van Laarhoven and E. H. L. Aarts 1987, by D. Reidel Publishing Company, Holland
- [7] S. Kirkpatrick et al., Optimization by Simulated Annealing, 1983, Vol 220, Science
- [8] Cerny, V., Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: An Efficient Simulation Algorithm, J. Opt. Theory Appl. 45 (1985)