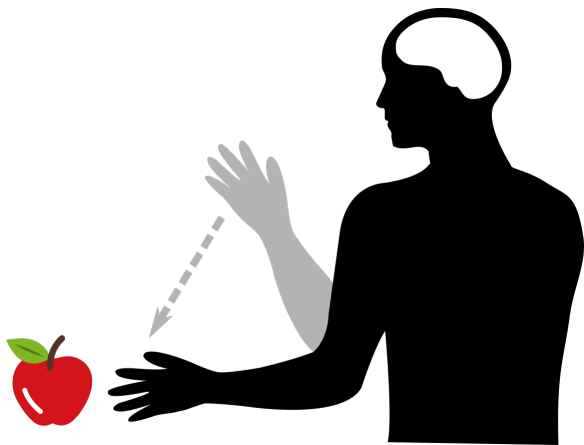


强化学习 (RL) 的「思维空间延拓」

在传统 强化学习里,「环境」只包含 physically observable 的外在环境。我提出将 RL 延续到**内在的**思维空间。

从传统 RL 的角度: 人伸手拿苹果, 苹果是**奖励**, 伸手是**动作**。这些都是可以在环境中**观察**到的:



(1)

强化学习的基础是 **Bellman equation**, 它可以看成是一条「**递归**」的方程:

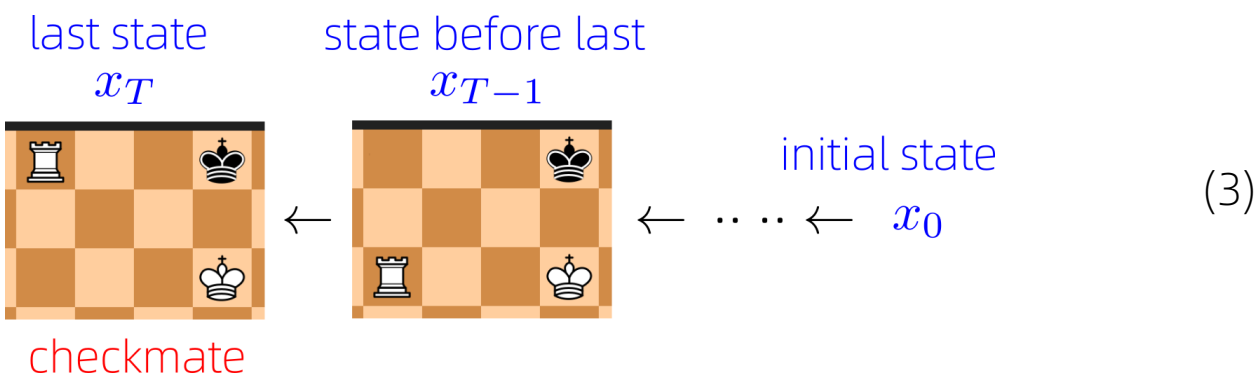
当前状态

$$V(x_0) = \max_a \{R + \gamma V(x_1)\}$$

下一状态

(2)

它将 **终点**状态的**价值**「反向传递¹」到 终点前一步的状态的价值, 就像下棋的情况, 可以一直追溯到第一步棋的价值:

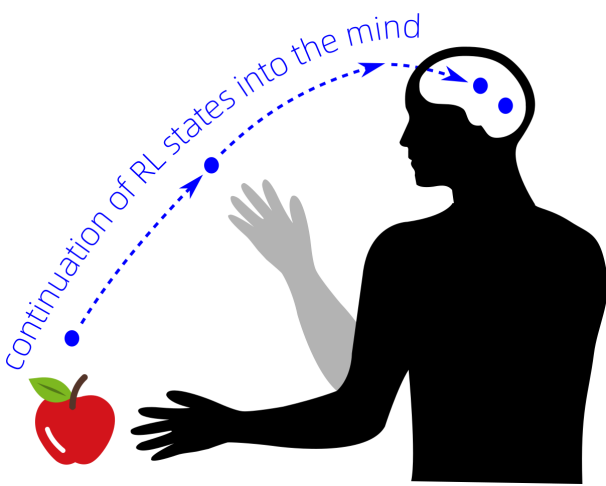


换句话说, 获得苹果的价值, 反向传递到「伸手取苹果」这动作的价值。So far so good. 而同样地, 我们可以继续反向传递到决定「伸手取苹果」之前的一连串**思维**:

我肚饿 → 我要找食物 → 我看见一只苹果 → 苹果是食物 →

(4)

换句话说, 将**内部**的思维状态「反转」, 看成跟**外部**的状态, 是同等的地位:



(5)

而这跟象棋的价值函数的反向传递是完全一样的。换句话说, 我们可以用强化学习的算法, 学习思维空间的内容, 提供了 AGI 严谨的基础。

将 外部和内部状态 **统一处理**的做法, 在哲学上也没有问题, 因为其实 brain states 也是物理状态, 只是肉眼看不到而已。大脑状态 即是 神经元群的激活状态, 它们之间的 transitions 是由神经**权重**决定的, 而这些权重又是由 **Hebbian learning** 学习的 (至少根据我们现时最好的理解)。

也有论文指出, RL 跟 working memory 的理论有点不协调: RL 里面的「状态」跟 working memory 并不等同。但根据这新的 思维空间 理论, 二者是重合的。

¹注意这不同于神经网络的 back-prop.

Unifying logic and RL

「思维空间」理论 可以 统一 **强化学习** 和 **逻辑 AI**；两者是在同一空间进行的。
逻辑是一种根据 “truth” 的学习算法，有以下比较：

	学习算法	推导算法	根据什么学习？
深度学习	学习权重	输入 → 输出 映射	与理想输出之间的 error
逻辑	学习逻辑 rules	逻辑推导	观察到的事实 (truth)
强化学习	更新价值函数	选择行动	奖励 (reward)

逻辑是没有感情的，在每个状态之下，可以进行很多不同方向的推导；逻辑本身不能决定选择哪个方向（因为都是真的）。逻辑推导的每一步 (step) 都是思维空间中 **状态** 的转移，而 RL 可以给状态 赋予特定的 **价值** (utility).

在「新古典」AI 时期，我们曾经尝试 给逻辑状态赋予 “importance” 或 “interestingness” 等测度，现在可以用 RL 理论将二者漂亮地统一起来。

更详细点说，RL 是根据以下的 Bellman 目标而学习的：

$$\max_{\pi} \mathop{\mathbb{E}}_{\substack{a_t \sim \pi(\cdot|s_t) \\ s_{t+1} \sim p(\cdot|s_t,a_t)}} \left[\sum_t \gamma^t R(s_t, a_t) \right] \tag{6}$$

它包含两个要学习的概率分布：策略 π 和 世界模型 p .

π 的学习是 RL 课本上大家熟悉的，而 p 的学习是较少讨论的 **model-based RL**. 如果选择用 逻辑 建立世界模型，那么 p 就是 逻辑推导的过程，亦即 $s_t, a_t \vdash s_{t+1}$. 注意要使用 probabilistic 逻辑，为了得出的结果是概率分布。

而 强化学习 又是怎样**学习** 逻辑内容？**动作** 就是由一个逻辑状态 转移到另一个逻辑状态，也可以看成是 由一些命题 **推导** 出 一个新的命题，那就是 逻辑 **rule**. 我们要在很多 动作（逻辑 rules）之中选取最好的 动作。换句话说，要在当前状态下可以执行的 rules 之中选取最好的一个或多个 rule(s). 例如：

我很肚饿 → 我要吃苹果 (7)

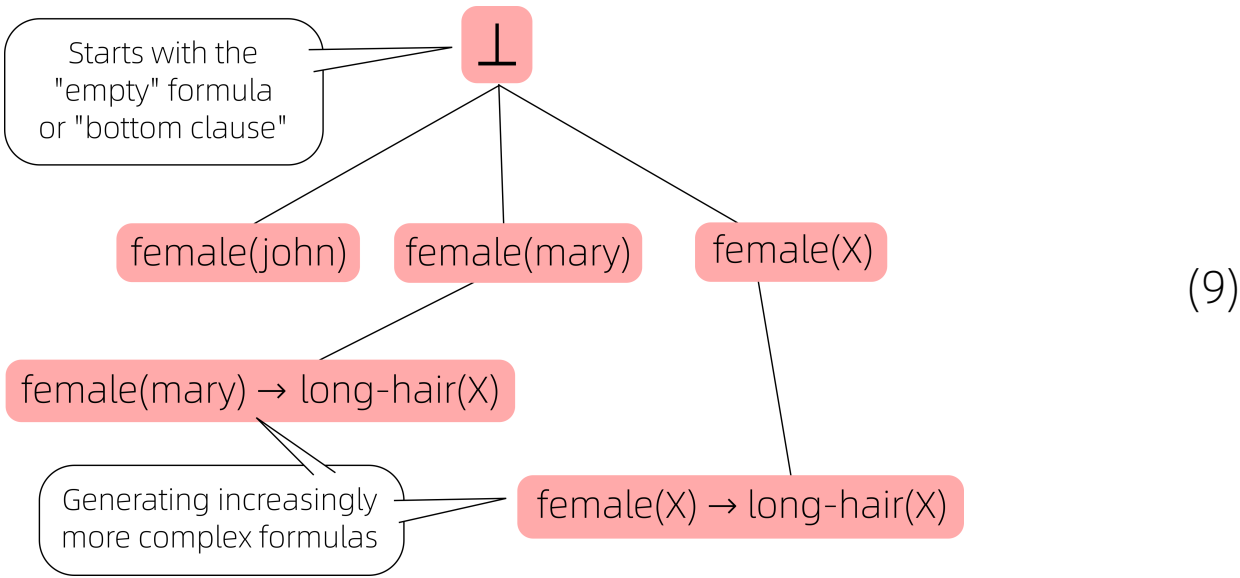
是一条正确的 rule；

肚饿 → 吃网球 (8)

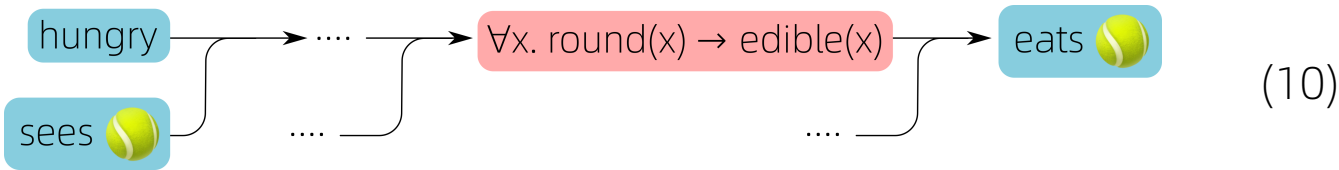
就比较差了。

而 强化学习 的好处是：理论上，它可以在无限的思维空间里 学到非常**抽象**的 rules，情形就像它在复杂的游戏**迷宫**里，学到破解的方法。

在经典 AI 里已有研究过 逻辑 rules 的 combinatorial 搜寻，例如有这种形式的**搜寻树**：



思维空间的一个特性是：理论上，任何思想都有可能推导出任何思想。换句话说，任何两点之间都有可能存在一条路径（= 逻辑 rule = 动作）。例如，如果一个肚饿的人，看见一只网球，那么「圆型的就可以吃」这条 rule 就似乎可以立即解决他的肚饿，直到他真的尝试吃它：

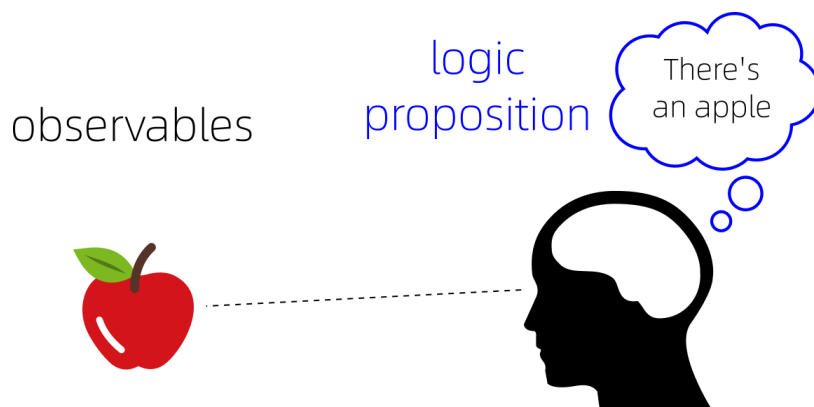


他得到的负值奖励 会反向传播至 整个**推导链**。经过很多次 迭代，系统最终会发现出错的 rule. 简言之，一个初始的逻辑系统可以是任意地「疯狂」的。事实上，一些天才正是因为有点疯，才发现了其他人想不到的事物。这是逻辑学习系统必然有的特性，并不只限于我提出的架构。

The mind as a “model” of the world

在传统强化学习里有所谓 **model-based** 方法, 而我们在大脑里面的 **mental model** of the world 其实是同一个概念, 但由于「混合状态」的原因而被「压平」了。

根据经典逻辑哲学, 一个 (脑中的) **逻辑命题**, 对应于现实世界中 某个 **状态**:



(11)

然而, 在「混合状态」或 flattened view 观点下, 外部世界和思维状态都存在于同一个状态空间, 而思维状态是外部世界的 model 或 “theory”:³

$$\begin{array}{c} \text{flattened state-space} \\ \boxed{\begin{array}{c} \text{(observed states of)} \\ \text{external world} \end{array}} \Rightarrow_{\text{model}} \text{internal mind} \Rightarrow \text{meta-logic?} \end{array} \quad (12)$$

那么, 混合状态空间本身又有没有 theory 呢? 那可能是某种 **元逻辑**。元逻辑是一种归纳偏置, 或许会在加速学习上有重要作用。

Picture credits:

Human figure from www.onlinewebfonts.com licensed by CC BY 3.0

Thought bubble created by Catherine Please from the Noun Project

³符号 $T \models M$ 的意思是: M is a **model** of T ; T is a **theory** of M . 这是逻辑**模型论**的术语, 有严谨的定义。