

观察者理论的动力学尝试

本文试图解释智能如何运作，使用的方法是动力学模型。它和人工智能、机器学习等算法模型不同，首先关注的不是“如何解决某个问题”、“能解决哪些问题”，而是“为何要解决问题”，“需要解决哪些问题”。

对于生命体来说，维持自己的存在形态是一切行为的基本。这被称作本能：当生命体感觉到威胁自身存在的刺激时，必然会主动驱使运动器官改变自身的处境。这是智能行动的原则之一，相当于所谓的目的因。

因此，生命体的一切行为，都倾向于避开本能所表达的危险刺激（也可以从另一方面理解，趋向于有利刺激）。演化过程所造就的本能感官，使得本能的激发能准确表达危险刺激的存在。

然而要预测危险，或者判断一个行为会不会导致危险的刺激，还需要对世界的其他信息更多的了解和处理，并且了解世界的状态和运行规律。在获得这些信息之后，可以更好的对本能刺激作出预测。

智能的另一个原则解决的是“世界是否有规律的，可以理解的”这个问题。解决的方式是普适概率的概念，即某规律受到采用的概率和表达该规律的最短字符串成正比。这表明智能倾向于以最简单的方式理解和行动。

在这两个原则下，可得出智能活动的基本方程，在简单的情形下，能够预言智能活动，并且可以用计算机模型模拟智能。

第一章：世界与本能

智能的存在，是为了维护智能生命体的完整形态。为了做到这一点，需要具有作用于世界的能力，并且可以从世界获取信息。以下开始对这个过程进行量化。

(1) 广义坐标与感觉

将整个世界的状态看作由**广义坐标** x_n 构成的 N 维相空间，相空间中的一个点代表世界的一个状态。描述整个世界的广义坐标系可以是任意选取的。这些坐标系相互等价，因为它们都包含所有可能影响到的观察者变量。不同的广义坐标系之间可以相互转换。

感官是了解世界的物理基础，它由**感觉单元**组成。

完全不可能以任何方式直接或间接的影响到感官的事物，不属于世界；任何能对感官产生影响的事物，都属于世界。

感觉单元将世界某方面的特征转化成数值，某一个时刻某个感觉单元（例如一个视杆细胞）的取值，也就是**感觉**，可以表示为广义坐标的函数：

$$F(x_1, x_2, x_3 \cdots x_N) \quad (1.1)$$

也即是说，感觉单元的激发程度可以由世界的状态经由某种算法得出。感觉可以进行线性或非线性的叠加。

凡是能被量化的都可以归为广义坐标，例如某一束光的强弱、方向、波长和偏振，某些原子的激发态，星球的引力场等等，也可以是经过感觉中枢简单处理过后的直线、长度等信息。

感觉单元的激发程度一般可以近似为某一些广义坐标的函数，例如温度感受器的激发程度近似是皮肤某一点的真实温度的函数。当然，如果严格的考察，整个世界的任何一个微小变化都可能和该激发量有关。

(2) 行动

为了能应对世界，保持个体的存在，生命体需要通过**行动**来改变世界。

某个**行动单元**（例如一块肌肉）激发的效果，是使得世界状态发生变化，这个变化是世界的原状态和行动单元激发强度的函数。如果广义坐标 x_n 会受到行动的影响，它对时间的变化量等于所有行动单元的作用之和：

$$\frac{dx_n}{dt} = \sum_{k=1}^K A_{k,n}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N, a_k) \quad (1.2)$$

a_k 表示行动单元 k 的激发强度（此式右方本应包含广义坐标的时间导数，但它也可以看作一个广义坐标，故先不考虑）。如果 x_n 不受行动影响，则 1.2 式右方 a_k 项为 0。

假设 $A_{k,n}$ 为线性函数，若 $K < N$ ，则行动单元必不能完全确定每个广义坐标的变化率，除非广义坐标之间存在约束。事实上，因为动作单元数量总是小于它能影响的广义坐标，故约束必定存在（见 2.3 节）。

(3) 本能感觉与中性感觉

有一类感觉单元经过演化的作用，和生命体的生存相关联。当出现危及生存的有害刺激时，这一类感觉单元激发，并强迫运动器官改变不利环境，直到不利状况消除。这一类感觉称为**本能感觉**，由**本能感觉单元**激发产生。

本能感觉类似于观察者理论所说的形式因和目的因，是生命体行动的根基。它需要躲避有害的刺激，保持固定的形态，而且需要获取生存所需的物质和能源。本能分为**正向本能**（食欲、性欲等）和**负向本能**（各种痛觉）。不利状况称作本能的**激活**，解除不利状况称作本能的**解决**。

对于负向本能来说，感受到刺激之后会采取行动，直至不利刺激消失（例如避开会烫手的火焰）；对于正向本能来说，当感受到需求之后会采取行动，直至需求满足（例如进食直到饥饿感消失）。

本能感官类似于控制论中的确定性机器（determinate machine），由它的先天物理结构赋予它分辨能力，这些特性是从演化中获得。如果本能感官不能良好表达自身的处境，则生存下来的可能性更小。如果一个生命体没有本能感觉单元存在，则无从了解如何维护自身的存在，例：先天缺失痛觉感受器的疾病，病人不能形成自我保护的行为，很少能活到成年。

本能仅能表达当下遇到的有害/有益刺激，但是中性刺激也是有用的，它所提供的环境的信息，可以用来预测有利/有害刺激的出现，也可以用来对动作方式的精准控制。因此作为观察者的主体需要**中性感觉**进行对整个世界的观察，以便更有效的解决本能，或者预先避开本能的激活。

中性感觉不会直接导致行动，但是可以作为本能反应的参照，对动作作出规制，也可以和本能完全无关（例如星空）。

如果仅有本能感官的存在，难以得到足够的信息对动作进行调制，并且难以适应复杂的环境。

最早的原核生物使用化学方式传递本能信息，例如环境中化学物质浓度的信息或者光信号的方向，通过化学机制驱动鞭毛等运动器官），在同一个细胞中包含了本能与中性信息的感知与处理，其机制由其物理结构决定。但是这只适用于单细胞生物。多细胞生物隔断了细胞之间定向的化学传递，因此必须使用特化的细胞——神经元进行信息传递。

然而对于神经元来说，外界刺激的信号的空间信息已经被转换成神经冲动，神经冲动本身对整个网络起全局作用，已经不再具有空间属性了。必须使用别的方法还原它的空间信息。

低等动物（如刺胞动物门等）的神经网络只有有限的几种运动模式，例如刺激-收缩的躲避模式，以及刺激-捕捉的捕食模式。因此它们的神经网络只能传导数个 bit 的信息。进化本身可以让它们作出最好的应对方案，但是对于更复杂的环境，这些信息是远远不够的。信息量的有限会使它们将完全不同的信息都判断为有害的/有利的。

第二章：本能场与约束

本能可以直接告诉观察者：你正处于危险中。但除此以外，观察者还需要预测危险，知道如何才能避开危险：在特定的情境下，做什么事情可能陷入危险，做什么事情可以脱离危险？（例如看见火焰，如果伸手会被烫到，躲开则可以避免）。需要本能、感官、动作三者的联动，才能得出“在 A 情形下作 x 行动，可以最大程度减小本能的激活”的信息。

(1) 本能场

本能场是将中性感觉和本能联系起来的方式。观察者通过自己的经历，尽可能准确的了解在世界的某个状态下激发本能的可能性。广义坐标空间上每一个点本能激发强度的数学期望，在坐标空间中构成的标量场称为本能场。本能场是观察者对世界的模拟。

本能场可以用感觉的线性叠加来模拟：

$$B(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = \sum_{k=1}^K b_k F_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2.1)$$

其中 K 表示感觉单元的数量， b_k 为感觉单元 k 在本能场中的权重。

例如，动物能学习将某人的气味（中性刺激）和得到食物（本能的解决）联系起来，在气味感觉的坐标空间中形成本能场。本能场的概念，类似于格式塔心理学中所谓的“心理场”（psychological field），是观测者内心对环境的模拟，需要不断进行学习修正，逼近真实本能的激发和解决。

(2) 本能场中的最速下降

生命体需要以最有效的方式解决本能。因此在广义坐标空间中，观察者趋向于让它在本能场里最快下降。越是有效激发本能场下降的动作单元，将会得到更强烈的激发。

动作单元 a_k 的激发值，与它让本能场下降的速度成正比，即：

$$a_k = -B_T C \frac{\partial (dB/dt)}{\partial a_k} \quad (2.2)$$

该式为观察者在本能场中的运动方程，其中 C 为激发常数，对整个观察者一致，是全局参数（见第六章）， B_T 为真实本能激发的强度（真实本能激发越强，则观察者趋于更快的行动以摆脱危险状况，虽然这样也会增加本能场的误差所导致的危险。这点将在以后证明）。该式保证了观察者能在环境中实现负反馈，保持自身的存在。

在 Δt 时间内，本能的预计变化量相当于本能场的全微分：

$$\frac{dB}{dt} = \sum_{n=1}^N \frac{\partial B}{\partial x_n} \frac{dx_n}{dt} \quad (2.3)$$

代入式 (1.2)，有：

$$\frac{dB}{dt} = \sum_{n=1}^N \frac{\partial B}{\partial x_n} \sum_{k=1}^K A_{k,n}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, a_k) \quad (2.4)$$

将其代入 (2.2) 组成方程组联立可解得每个动作单元 a_k 的激发值。

当 $N=K$ ，且 $A_{n,n} = a_n$ 的特殊情况下，即每个运动单元对应一个广义坐标的时间变化率时，(2.3) 式变为：

$$\frac{dB}{dt} = \sum_{n=1}^N \frac{\partial B}{\partial x_n} a_n \quad (2.4.1)$$

将其代入 (2.2)，有
$$a_n = -B_T C \frac{\partial B}{\partial x_n} \quad (2.4.2)$$

为运动方程的特解，即最速下降方式是沿本能场的梯度下降。

和一切最速下降法相同，本能场中的最速下降也可能遇到时间与空间局部最小的问题。它只能解决当前的本能。解决的办法是在时域中拓展本能场的概念（见第4章）。

例 2.1：假设某个世界可以用一个二维广义坐标空间描述，坐标原点处有利于观察者生存，并且这能被观察者的本能所反映（例如生活在一个二维面上的生物，在坐标原点附近汇集着该生物的食物），则理想本能场的场强应如图所示，而动作的广义力方向如箭头所示。

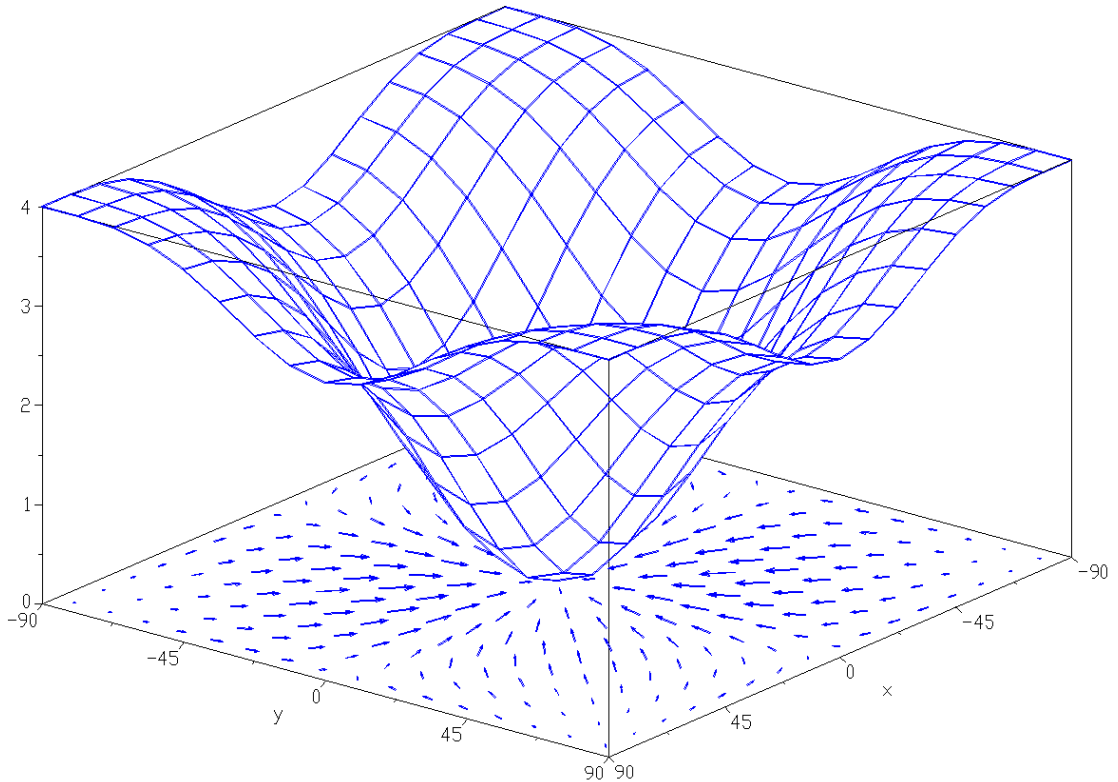


图2.1: 本能场的场强与梯度 (图自wikimedia)

沿本能场最速下降的物理实质可能如下: 本能场是由一些感觉中枢的神经元模拟本能形成, 这些神经元对世界的响应方式是函数 F_k , a_k 相当于该神经元联结的强度, 它们的组合可模拟本能。

行动取决于两种动力的均衡: 真实本能与本能场对未来的预期。如果预期本能高于真实本能, 则该行动受到抑制, 反之则激发。

未来预期是运动神经元与本能场共同作用的结果, 可由 2.2 式得出。具体的神经机制可能如图所示:

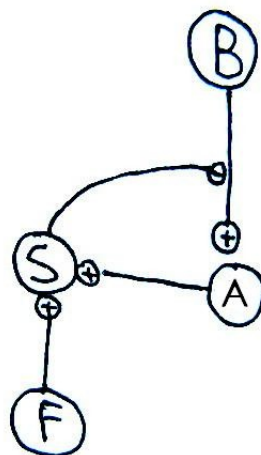


图2.2 本能场对动作规制的可能机理。 B为本能感官单元, F为中性感官单元, Q为

动作单元, S 为预测单元, 它的激发程度可反映 F 情况下作 Q 动作之后的本能情况。

(3) 约束

由于感官世界空间的维度数巨大, 描述本能场需要巨量的信息。(假设观察者的感受器有 10^8 个, 则相当于一个 10^8 维的相空间, 如要以 0.1 的精度描述这个相空间中的场, 则需要 10^{10^8} 个采样点的信息, 所需的时间超过宇宙年龄, 更何况这个场并非时间不变的。)

所幸, 感官所见的世界并非完全随机, 运动也并非完全自由, 因为世界的广义坐标之间存在**约束**, 也就是它们之间的联系。在感觉世界空间中, 约束描述了一个超曲面, 只有在超曲面上的点才是可能出现的情况。(如在例 2.1 的空间中, 存在一个 $x=y$ 的约束, 则本能场的描述就可以简化为一个二次曲线。)

观察者可以在经验中认识这些约束。

约束包括各种感觉之间的**感觉约束**, 通常以广义坐标空间的完整约束表现:

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{M_0}, t) = 0 \quad (2.5)$$

将式 (1.1) 代入, 用感觉来表示约束, 即

$$f_F(F_1, F_2, F_3, \dots, F_M, t) = 0 \quad (2.6)$$

以及动作与感觉之间关系的**动作约束** (例如, 眼球向左转的时候所见的物体就会向右 (在视网膜上是向左) 转)。动作约束通常可以用一个半完整约束表示:

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{M_0}, x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_{M_0}, t) = 0 \quad (2.7)$$

将式 (1.1) 与 (1.2) 代入, 用动作和感觉的函数表示动作约束, 即:

$$f_{FA}(F_1, F_2, F_3, \dots, F_M, A_1, A_2, A_3, \dots, A_N, t) = 0 \quad (2.8)$$

约束是观察者对事物的区分, 同样是格式塔理论中的“心理场”的一部分。总是同时出现的一些感觉信息, 会被当做相对恒定的物体来认识, 例如苹果的形象总是和香味一起出现等等。对世界规律的认识也属于约束, 如感觉到热的时候就不会感觉到冷等等。

动作和动作的广义坐标之间不存在可以直接认识的约束 (存疑)。

因此, 观察者的行为可归结为本能场超曲面上的最速下降方法。将观察者运动方程 (2.4, 2.2) 和约束方程的联立。可解得约束条件下 a_k 的值。

动作约束可能是由感觉单元对动作单元通向预测单元的信号调制。如图:

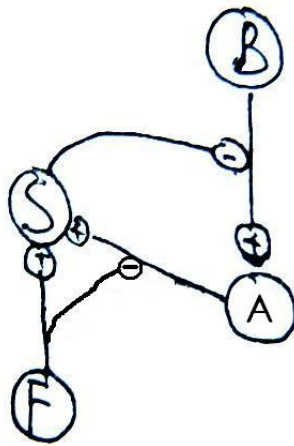


图2.3 感觉单元对动作单元信号的调制，使得预测单元能够准确得出动作对未来影响。

感觉约束可能是由一组神经元完成，它们能参与调制两个感觉单元对运动单元的影响（也有可能仅有一个联结来控制）：

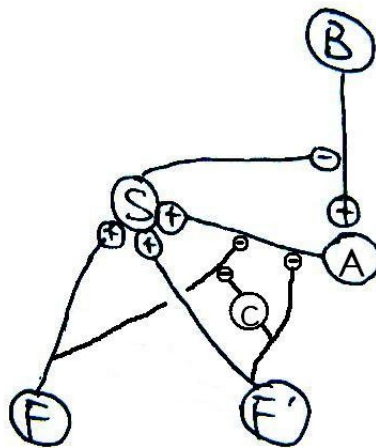


图2.4 感觉约束的调制

第三章：经验与学习

本能场和约束都是观察者对世界的认识。除了小部分先验认识以外，大部分认识需要从经验中学习获取。

(1) 本能场的拟合

本能场的学习，相当于本能场对真实本能的一个拟合过程。按照 (2.1) 式本能场的构成：

$$B(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = \sum_{k=1}^K b_k F_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

拟合得到最符合实际本能刺激状况的 b_k 值。可以用类似最小二乘法的方法来修正 b_k ：

$$B_T(t) - B(x_1, x_2, x_3 \cdots x_n, t) = U_k \frac{db_k}{dt} F_k(x_1, x_2, x_3 \cdots x_n) \quad (3.2)$$

B_T 为 T 时刻的真实本能， U_k 为修正项。此式表示某时刻真实本能与本能场场强的差值与某个感觉单元的激发程度的相关度，决定该单元对本能场贡献权重的增减，最终达到最佳的拟合（当任意的感觉单元足够多，时间足够长时，感觉单元可以通过该过程达到该极限（最佳拟合，证明从略），然而事实上从变化的环境中找到不变很难，因为观察者只能感知局部的世界。因此观察者对环境认知的速度需要配合环境变化的速度，以达到最佳效率，详见第 3 节）

此过程的神经实质是： b_k 相当于是感觉神经元通往预测中枢的联结的强度，通过与真实本能的比较，将逐渐修正为最能准确表现本能场的取值。

(2) 约束的拟合

约束拟合的修正同样遵循广义概率原理。如果在一个约束左方上加上一个函数能比现有约束能更好的描述现实世界，则在约束中加入该函数项。如以下的感觉约束：

$$\frac{1}{U_k} f_k(f_0(F_1, F_2, F_3, \dots, F_M, t), F_{M+1} \dots F_{M+N}) < f_0(F_1, F_2, F_3, \dots, F_M, t) \quad (3.3)$$

成立，则约束 f_k 将代替 f_0 。由 U_k 的位置可知，复杂的约束更不容易得到认可。这类似认知的层级性。

同样，运动约束也能用类似的方法进行修正（从略）。

(3) 普适概率、模拟常数与修正常数

分析修正项 U_k 的组成。每个 F_k 所对应的 U_k 不相同。本能场中的简单函数更容易被认知，也就是说简单函数对应的 U_k 将比复杂的大，因此它包含有**普适概率**（Universal probability, p_u ）一项。使用越短字符串所能表示的 F_k ，它所对应的 U_k 越大。因此有：

$$U_k = (p_u(F_k) + L)R$$

L 为**模拟常数**，为理想字符串和实际联结之间转换所需要的常数，相当于通用图灵机到某个图灵机的模拟器，模拟常数越大，则较简单的规律容易被相信的程度会相对下降，较复杂的规律会相对增加。

R 为**修正常数**，对于所有的感觉单元都是相同的。修正常数决定了观察者相信一个命题的容易程度，修正常数越大的话越容易相信。

一个字符串的普适概率，定义为能够从一个随机序列中找到“能够产生该字符串的通用图灵机程序”的概率。简单的串比复杂的串出现的概率高。从中可以推导出奥卡姆剃刀原

则。这是一个把熵-概率-观察者联系在一起的概念。参见 *Elements of Information Theory*, T. M. Cover & J. A. Thomas, 1991, P160。

类似 $F_k = 5x_2$ 这样一个简单的感觉函数，它在本能场中的权重 a_k 应当比 $F_{k'} = 7x_3^2 + 4x_9^3 - 8x_{13}$ 这样的复杂的感受函数的权重得到更快的修正。同时，复杂的感受函数如果已经有了一定的权重，要减退起来也会更慢。这相当于观察者首先会尝试使用相对简单的模式（例如，火光可能伴随着不利的本能刺激）来描述本能场，随着学习的增加，才会使用越来越复杂的表达式（例如，某种情况下的火光可能伴随有利刺激）。

普适概率的神经实质，就是表达该概念所需的字节数，等于表现该描述所需要的神经元联结的数量。遇到一个“正确”的简单联结组合，比复杂的要大。

高模拟常数所适合的环境，是复杂规则比简单规则更有用的环境。例如高度文明化的人类社会，就比原始社会更适合高模拟常数。

修正常数则类似于生态学上的 R/K 选择。在变动的环境中，较大的修正常数能更有效的把握环境的规则；而在趋于稳定的环境中，较小的修正常数则更有利。

第四章：时间与工作记忆

在此前的讨论中，生命体的行为是将当下的本能刺激最小化。但是关心未来对于生命体的存在也是有利的。观察者同样需要避开可预见的未来的危险，同时为未来的利益作规划。

因此，观察者可以将此刻的中性感觉和未来的本能感觉联系起来。可以设想这样的感觉单元存在：它在受到当前的激发之后，还会持续激发一段时间；或者它对世界的响应比即时反应的单元要迟一段时间。这种感觉单元存在记忆，此刻的激发程度由过去整个时域的世界状况决定。

(1) 跨时间本能场

此刻的动作（原因）会对将来（结果）会造成影响；换句话说，此刻的状况（结果）会受到过去动作（原因）的影响。如果当前的动作可能导致未来的本能激发，观察者应该避免此动作。

例如，在迷宫实验中，动物踏入有食物的迷宫右支的动作并不能直接解决食欲的本能，但是可以导致未来的本能解决，因此这个动作可以联系到未来的本能。

因此，此刻动作的调制，需要考虑两个分量：当前本能激发状况和它可能影响的未来本能激发状况（的数学期望）。

于是 (2.2) 式可扩充为类似于将本能场在时间里作傅里叶变换：

$$a_k = -B_T(t_0)C \frac{\partial (dB(t_0)/dt)}{\partial a_k} + \sum_{m=1}^M B(t_0+t_m)C \frac{\partial (dB(t_0+t_m)/dt)}{\partial a_k}$$

其中 $B(t_m)$ 是 t_m 时刻本能激发强度的数学期望。

(2) 跨时间本能场及其修正

未来的本能同样可以由此刻的广义坐标构成本能场表示：

$$B(x_1, x_2, x_3 \dots x_n, t_0 + t) = \sum_{k=1}^K b_{k,t} F_k(x_1, x_2, x_3 \dots x_n, t_0)$$

而该本能场的修正可以由 (3.2) 式得出：

$$B_T(t_0 + t) - B(x_1, x_2, x_3 \dots x_n, t_0 + t) = U_k \frac{db_k}{dt} F_k(x_1, x_2, x_3 \dots x_n, t_0)$$

而 U_k 项中还应加入一个与时间（本能场所预言的未来）相关的函数，当 $t \rightarrow \infty$ 时，该项为 0。这个函数所表示的就是工作记忆。

(3) 跨时间约束及其修正

—————以下，仅有提纲

约束副作用是：后悔、对未来的担忧

第五章：陈述性记忆、自我意识与睡梦

本能场的误差补偿依靠缓慢的修正。

(1) 误差感觉

将本能场与真实本能的误差作为一种感觉来处理。这种感觉就是对自身认知的认知。

$$S(t) = B_T - B$$

并将其加入本能场中。它的激发度会很高，但是随着本能的修正，它会逐渐弱化。

陈述性记忆是一种迭代过程。

由此产生即时反应与陈述性记忆，是对自身认知的描述。

睡梦的必须性。误差认知的悖谬：误差的自我调节与误差认知的方向是相反的，故需要将认知顺序颠倒来修补这个误差。

因此需要睡梦过程对其进行压缩。具体做法是让悖谬的约束化简。哥德尔极限的定义。

跨时间的他者的形成。动作-感官与主观的同步化。虚本能、虚约束和虚动作。自我概念的形成。身外视角的形成。

动作的感官+客观=动作 对其他个体的同感，个体的方式感知世界。

从而使得描述同族的个体或者异时间的自己更加简易，甚至成为描述世界其它物体的更简易方法。

第六章：全局参数：情绪、性格与自由

激发常数、模拟常数和修正常数，在同一时间的同一观察者中必须相同（证明）。但是它们也可以调节。为了让经验信息获得最快，可以在特定时候通过全局变化，改变熵平衡曲线的斜率。这就是情绪作用。调节能力则是性格的描述。

交感神经让曲线变陡，副交感神经让曲线变缓。

自由造成本能场的梯度变化。

表情、哭和笑的时候必然伴随的动作

同感与文字，主体、客体和自由意志的吸引子定义。

第七章：符号体系与群体

语言 哥德尔熵，在符号体系中到达哥德尔描述所需要的信息量 与 符号体系的表达力。