机器能数数吗？

苑明理

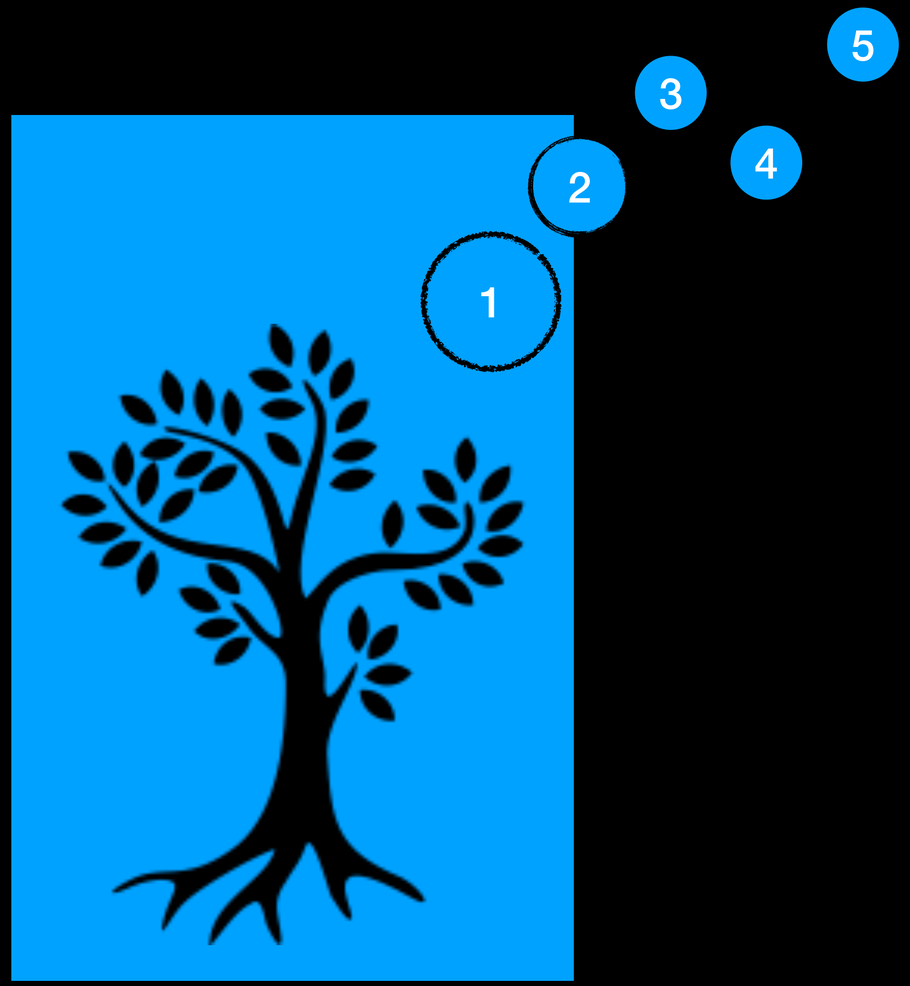
集智年会分享

2021 年 01 月

目录

第一节

数的演化史



- 生物学的例子
- 认知科学里的数感
- 考古学里的例子
- 复杂性的恰当估计

本节致谢
夏海宁（洛伦兹蝶）老师提供的翻译方案
王东老师的有趣讨论

捕蝇草

捕蝇草是一种食虫植物。它的捕捉机构由叶子的末端部分形成，通过其内表面的微小毛发触发。当昆虫爬行在页面时接触到一根触毛时，捕虫器就会准备关闭，只有在第一次接触后 20 秒内发生第二次接触时，捕鼠器才会关闭。在五次刺激之后捕蝇草才会开始消化过程。

Curr Biol. 2016 Feb 8; 26(3): 286–295.
doi: 10.1016/j.cub.2015.11.057

PMCID: PMC4751343
PMID: 26804557

The Venus Flytrap *Dionaea muscipula* Counts Prey-Induced Action Potentials to Induce Sodium Uptake

Jennifer Böhm,[1,6] Birke Scherzer,[1,6] Elzbieta Krol,[1] Ines Kreuzer,[1] Katharina von Meyer,[1] Christian Lorey,[1,2] Thomas D. Mueller,[3] Lana Shabala,[4] Isabel Monte,[5] Roberto Solano,[5] Khaled A.S. Al-Rasheid,[1,2] Heinz Rennenberg,[1] Sergey Shabala,[3] Erwin Neher,[1,7,*] and Rainer Hedrich[1,*,*]

[1]Institute for Molecular Plant Physiology and Biophysics, Julius-von-Sachs Platz 2, 97082 Würzburg, Germany
[2]Naturwissenschaftliches Labor für Schüler, Friedrich-Koenig-Gymnasium, 97082 Würzburg, Germany
[3]School of Land and Food, University of Tasmania, Hobart, TAS 7001, Australia
[4]Plant Molecular Genetics Department, National Centre for Biotechnology (CNB), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Campus University Autónoma, 28049 Madrid, Spain
[5]Zoology Department, College of Science, King Saud University, P.O. Box 2455, Riyadh 11451, Saudi Arabia
[6]Institute of Forest Sciences, University of Freiburg, Georges-Koehler-Allee 53/54, 79085 Freiburg, Germany
[7]Department for Membrane Biophysics, Max Planck Institute for Biophysical Chemistry, 37077 Goettingen, Germany
Erwin Neher: erwin@gwdg.de; Rainer Hedrich: hedrich@botanik.uni-wuerzburg.de
*Corresponding author erwin@gwdg.de
**Corresponding author hedrich@botanik.uni-wuerzburg.de
[6]Co-first author

Received 2015 Jun 12; Revised 2015 Oct 23; Accepted 2015 Nov 26.

Summary

Carnivorous plants, such as the Venus flytrap (*Dionaea muscipula*), depend on an animal diet when grown in nutrient-poor soils. When an insect visits the trap and tilts the mechanosensors on the inner surface, action potentials (APs) are fired. After a moving object elicits two APs, the trap snaps shut, encaging the victim. Panicking preys repeatedly touch the trigger hairs over the subsequent hours, leading to a hermetically closed trap, which via the gland-based endocrine system is flooded by a prey-decomposing acidic enzyme cocktail. Here, we asked the question as to how many times trigger hairs have to be stimulated (e.g., how many APs are required) for the flytrap to recognize an encaged object as potential food, thus making it worthwhile activating the glands. By applying a series of trigger-hair stimulations, we found that the touch hormone jasmonic acid (JA) signaling pathway is activated after the second stimulus, while more than three APs are required to trigger an expression of genes encoding prey-degrading hydrolases, and that this expression is proportional to the number of mechanical stimulations. A decomposing animal contains a sodium load, and we have found that these sodium ions enter the capture organ via glands. We identified a flytrap sodium channel DmHKT1 as responsible for this sodium acquisition, with the number of transcripts expressed being dependent on the number of mechano-electric stimulations. Hence, the number of APs a victim triggers while trying to break out of the trap identifies the moving prey as a struggling Na^+-rich animal and nutrition for the plant.

Video Abstract

Introduction

During evolution, plants developed senses to recognize mechanical forces. Such forces can be imposed on plants from environmental clues such as wind and barriers in the soil to animal movement and herbivory. The touch causes an immediate rise in jasmonic acid (JA) biosynthesis [1, 2, 3].

The model plant species *Arabidopsis* senses touch without any specialist cell types or organs. Tendrils of climbing plants, however, have specialized buds that allow a conversion of already weak mechanical forces into a curvature of the climbing organ toward a given support. A similar tendril response can be elicited when, in the absence of touch, jasmonates are administered [4]. Like climbing plants, some carnivorous plants are also equipped with the sophisticated mechano-sensory structures and touch signaling mechanisms [5, 6, 7].

When Charles Darwin observed the Venus flytrap, *Dionaea muscipula*, he was fascinated by this plant's ability to sense and catch animals to circumvent the limitations of its nutrient-poor habitat [8]. The tips of *Dionaea* leaves have developed into bilobed snap trap-type capture organs, equipped with a number of mechano-sensitive hairs and a densely packed array of glands. Insects are attracted to the capture organs by a fruity volatile blend emitted by starving flytraps [9]. Visitors searching for food eventually touch the trigger hairs leading to the electric excitation of the trap; the mechanical stimulus is converted into an all-or-nothing action potential (AP). Once two APs are elicited within 15–20 s of each other, the trap lobes close within a fraction of a second [8]. Ongoing mechanical stimulation of the trigger hairs by the insect as it tries to escape initiates the hermetical sealing of the capture organ into a gross stomach. Secretion of acid and digestive enzymes into the stomach breaks the entire insect down. By establishing this outstanding apparatus, carnivorous plants are able to ingest the prey's components. In addition to carbon, nitrogen, phosphate, and sulfur, substantial amounts of potassium and sodium are also contained in the prey [10, 11, 12]. In this study, we consider whether the Venus flytrap uses the number of prey-triggered APs to identify visitors as food sources, to capture and to process them, and to internalize nutrient cations from the prey. We found that by counting and integrating the mechano-electric signals elicited by the trapped prey, *Dionaea muscipula* triggers biosynthesis of the touch hormone jasmonate, secretion of lytic enzymes, and channel-mediated uptake of prey nutrient-associated sodium loads.

Results

Insect Capture Electrically Excites the Venus Flytrap

In order to investigate the Venus flytrap's signaling cascade involved in the prey capturing and digestion, we monitored the electrical activity of a prey-catching flytrap via surface electrode measurements. For these experiments we used crickets (*Acheta domesticus*) 6–12 mm in length and with an average weight of 23.8 mg. It is well known that only two stimuli are sufficient for provoking fast trap closure, thereby capturing the insect [8]. Once trapped, the still-moving victim continues to activate these mechanosensors, prolonging the electrical stimulation for many hours (Figure 1A). In these experiments, we recorded 63 ± 13 APs during the first hour after prey capture (n = 5, mean ± SE).

Mechano-electric Signals Are Translated into JA Biosynthesis and Hydrolase Production

In a previous study, we showed that when a second AP quickly follows the first, the rapid trap closure is provoked, but there is no increase in the cytoplasmic calcium

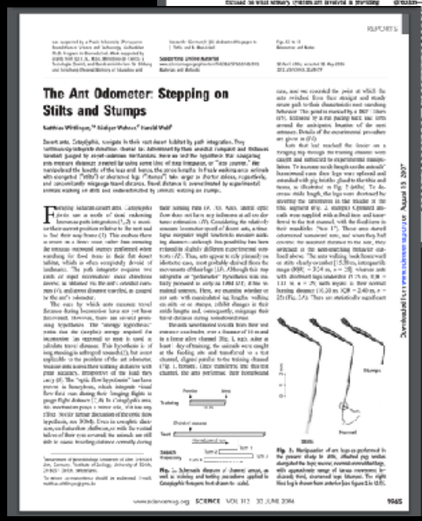
蚂蚁

约有 25 万个神经元

蚂蚁在归巢行为中需要寻找最短的回归路径，动物行为学的观察和实验，说明了某些沙漠蚁有计步和路径累积的能力。

Path integration in desert ants, Cataglyphis fortis

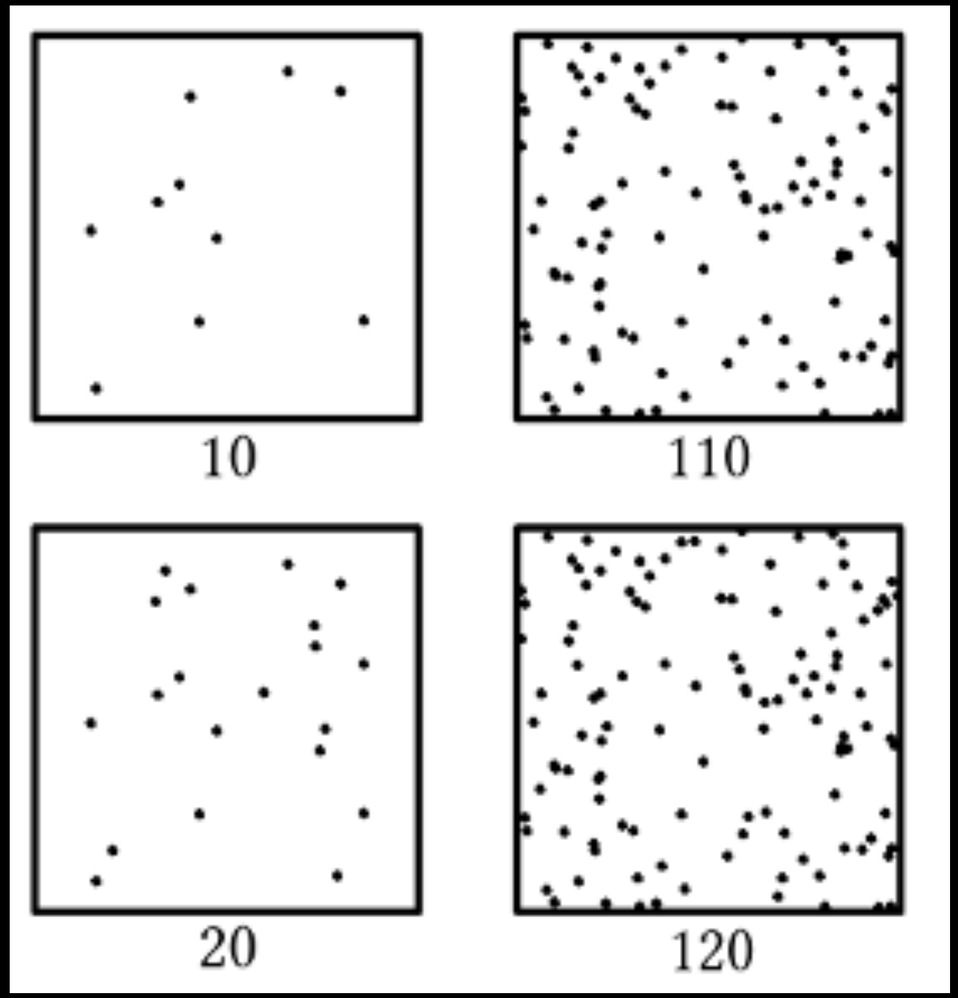
MARTIN MÜLLER AND RÜDIGER WEHNER



The Ant Odometer: Stepping on Stilts and Stumps

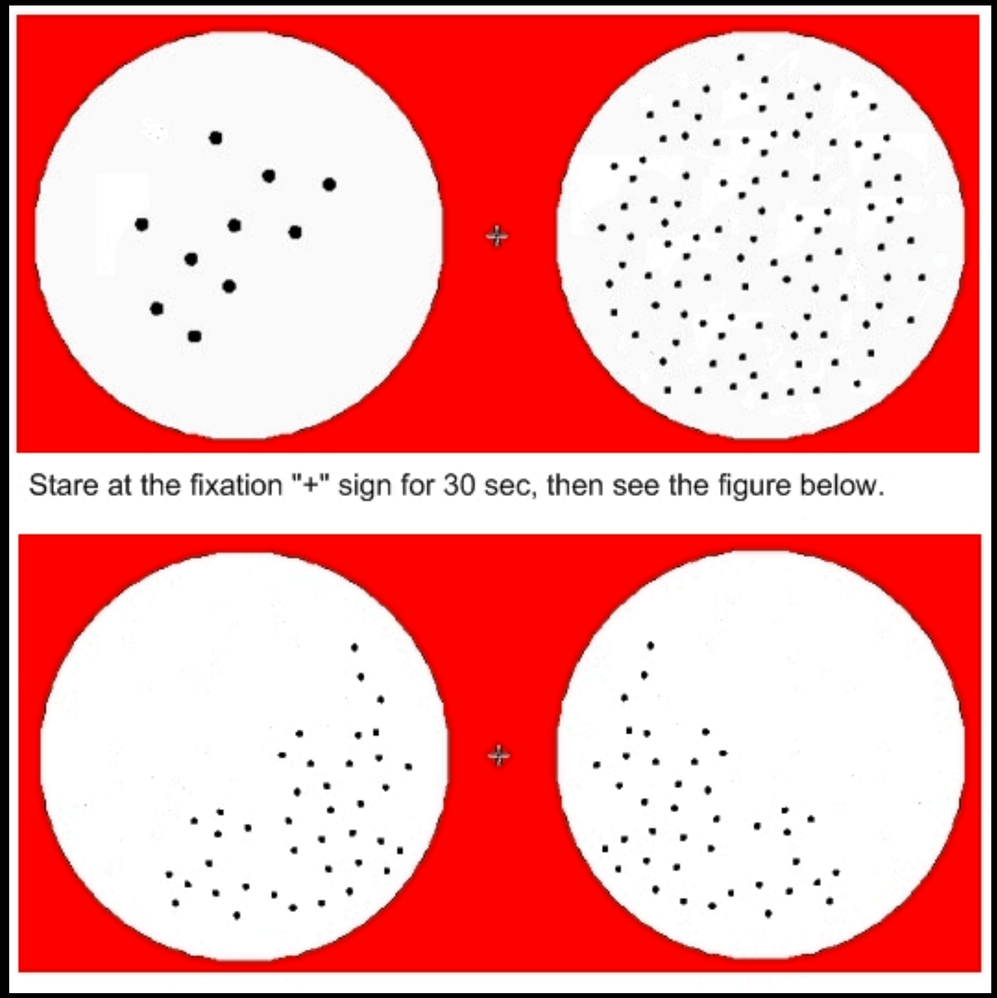
韦伯-费希纳定律

https://en.wikipedia.org/wiki/Weber%E2%80%93Fechner_law



数量适应效应

https://en.wikipedia.org/wiki/Numerosity_adaptation_effect



数感

判断相等、多少的一种直感的能力

- 抽象性：能否跨越不同的标的物?
- 跨模态：能否跨越不同感知手段?

几个相关的概念

- 估数系统
- 循物系统
- 序数能力
- 快估

手、工具与语言

手、工具和火、大脑、社会行为、语言的协同演化历史

260万年前，能人(Homo habilis)时代，石器的使用兴起

100万年前，直立人(Homo erectus)时代，普遍的对火的控制使用

The evolution of early symbolic behavior in Homo sapiens
by Kristian Tylén et al 关于智人早期的符号行为

Human language may have evolved to help our ancestors make tools
by Michael Batter 关于语言和工具制作

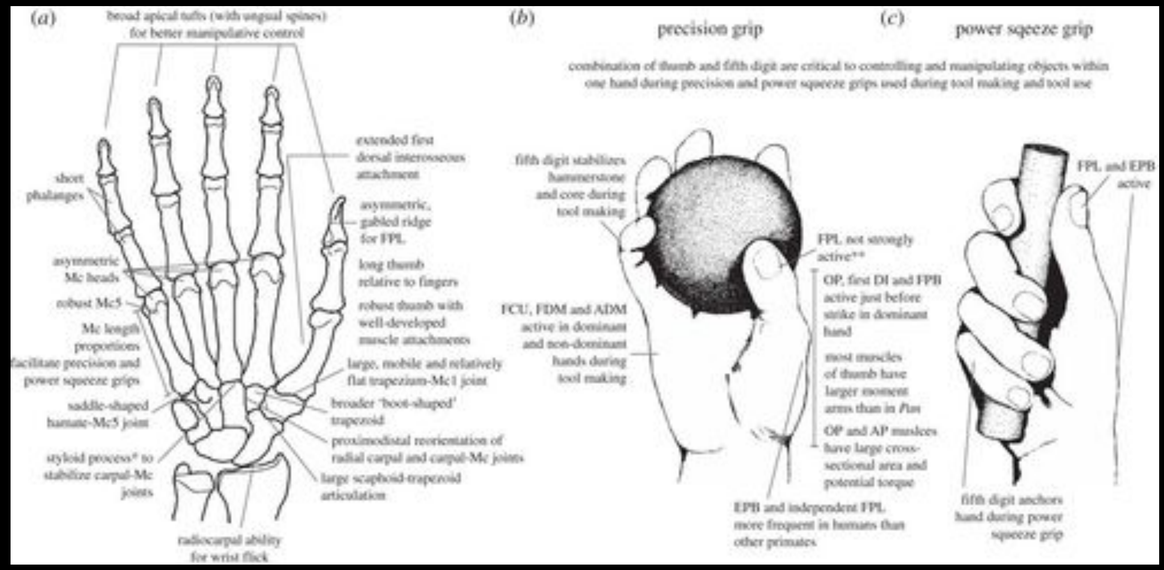
The co-evolution of number concepts and counting words
by Heike Wiese 关于数字概念和语言的协同演化

Empirical approaches to the study of language evolution
by W. Tecumseh Fitch

The mystery of language evolution 关于语言的演化
Review article by Marc Hauser et al

Origin_of_language 语言演化的各种假说 语言的社会性

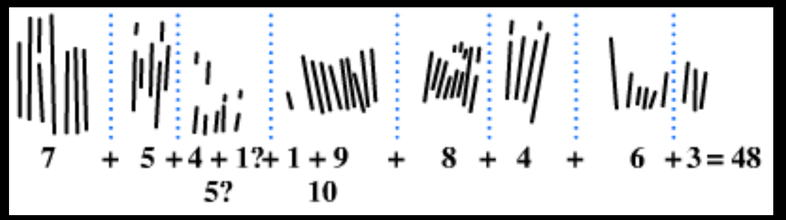
FOXP2 在基因层面的考察

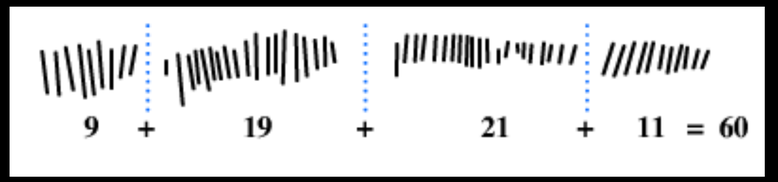


Evidence in hand
Recent discoveries and the early evolution of human manual manipulation
Review article by Tracy L. Kivell

Ishango 骨刻

旧石器时代晚期 约公元前 18,000 年 - 公元前 20,000 年

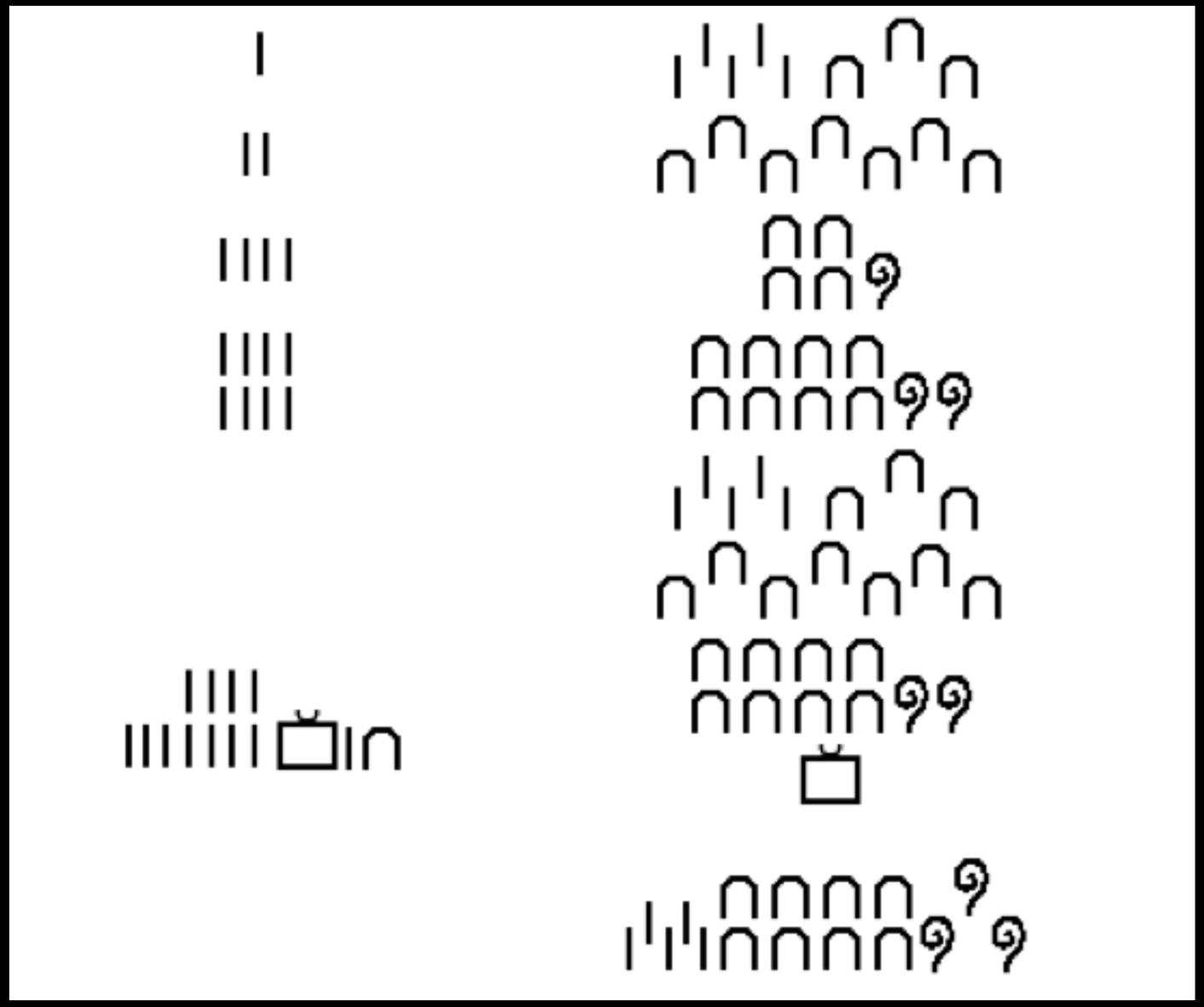




最原始的系统：一进数字系统

最自然的数字表示，但却难于表达大数字

古埃及的数



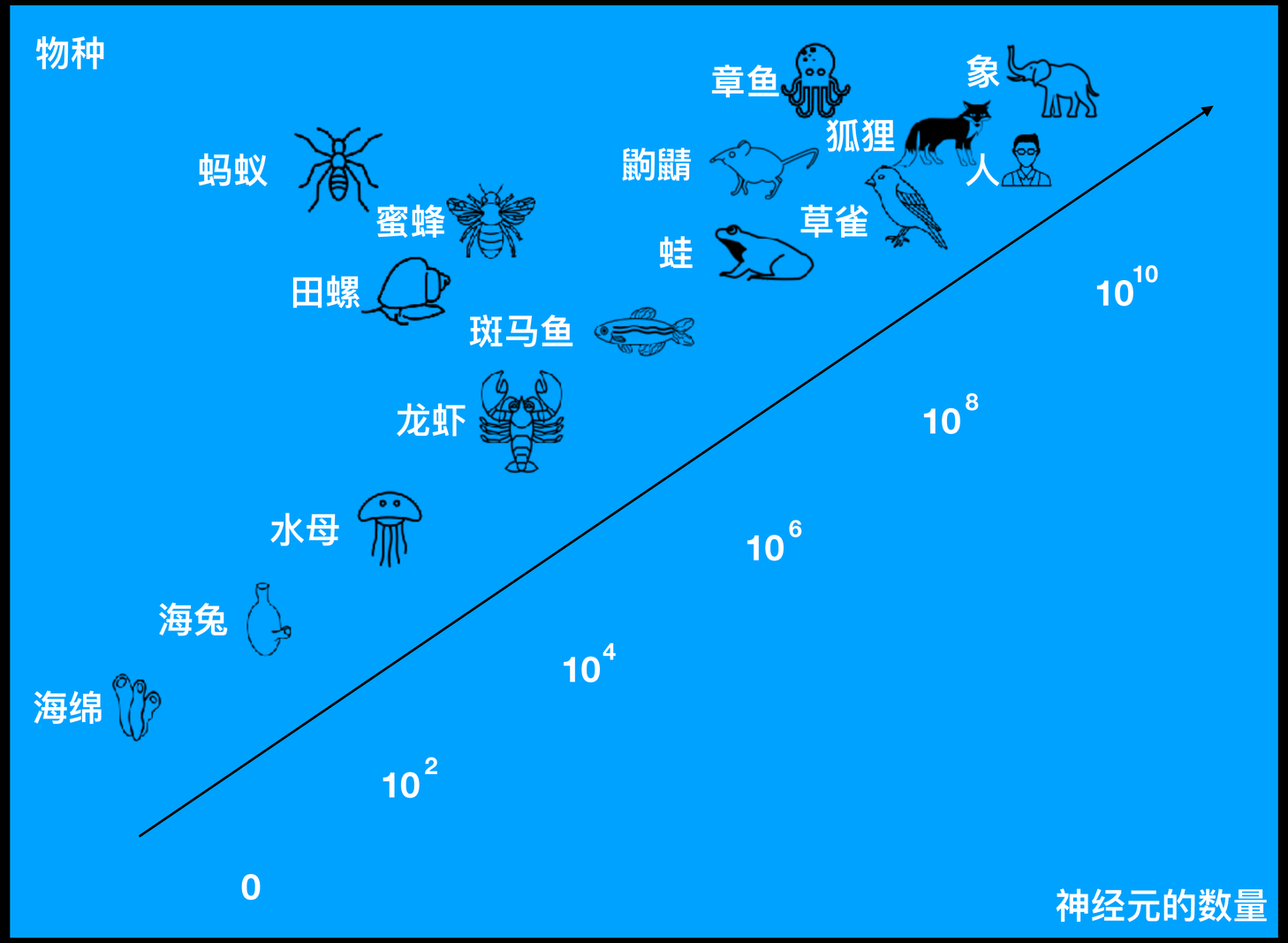
1*	35
2*	70
4	140
8*	280
1+2+8=11	35+70+280=385

在这个时期大数的
表示与运算都比较困难

Ahmes Papyrus

引自 http://www.math.buffalo.edu/mad/Ancient-Africa/mad_ancient_egypt_arith.html

生物演化序作为复杂性度量?



一个设问方向

具身能力与外化工具扮演了什么角色？真的是数数内在的必须条件吗？

- 具身能力：一个复杂的脑、能写符号的手、能灵活发音的喉管
- 外化工具：图形符号、语音符号

从蚂蚁到人类的上亿年，有很多花在了具身条件的演化上

数数真正的复杂度究竟有多高？

我们能否给蚂蚁一些贴心又方便的辅助工具，使得它们可以操作数字符号？

一个相反的设问方向

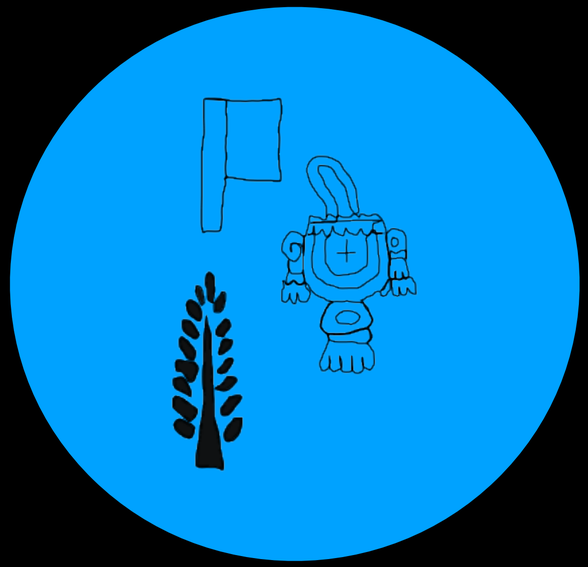
- 主流的方向：看到具身在理性里的作用，但假定理性的普遍
- 另类的方向：人类的理性是否只是人类具身形态的产物?
  - 是否存在其他形态的智能思维，我们还无法理解?

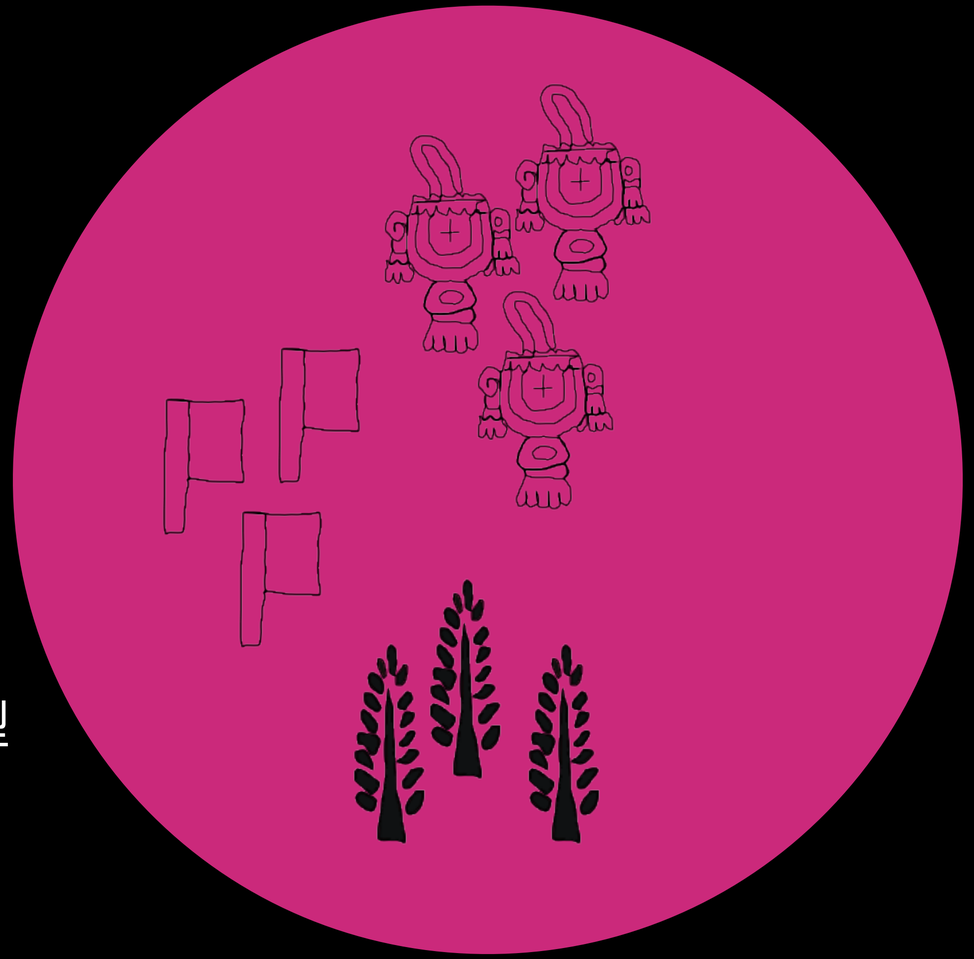
AI 是一种工具，可以让我们在两个方向上同时探索

第二节

什么是让机器数数?

- 让机器数数里的问题
- 为什么要考虑形式定义
  - 相等与比较
  - 基数与序数
  - 皮亚诺公理体系
  - 一进代数系统的初始模型
  - 有限性
  - 判定算法





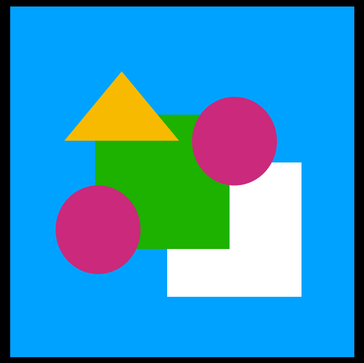
本节致谢李熙、晃晃老师的有益讨论和指导

可理解问题

- 对图灵测试存在诸多的批评
- AI 数数能否检验?

机器

考题



答卷

#% ¥ #@*

考官

? ? ?

如果机器会自创符号了
考官会不会看不懂?

有限与无限的问题

困难在于

- 从 1 数到 100，它会数数了吗？到千、万、亿……就会了吗？
- “有限经验的学习可以泛化到无限？”这句话是什么意思？

请对比如下两个说法

- 有限经验的学习如何能跨越到无限？
- 有限经验的学习如何能跨越过任何给定边界？

请考虑下面的两个学习目标

- 一个个独立的数
- 一段递归程序且有递归起点

关于数数的学习

- 可以是有监督学习—学会人类已有的数字系统
- 最好是无监督学习—机器自己发明新的数字系统

学习的目标是什么

泛化

检验

经验 vs 先验

比图灵测试更难?

- 可理解问题，让数数问题的测试不同于图灵测试
- 创造能力也更接近于智能本质
- 数数问题的测试可能会比图灵测试更难吗?

为什么需要自然数定义?

最朴素的想法

- 有定义后，我们可以验证机器的输出是否满足定义

但是

- 合适的定义是什么?
- 合适的输出又是什么?
- 验证的算法是清晰的吗?

但如果没有定义，那就进入荒诞不经的领地了。

相等和比较

相等是具有如下性质的关系

- 自反性
- 对称性
- 传递性

某种归纳原理?

良序是具有如下性质的关系

- 三岐性
- 传递性
- 良基性

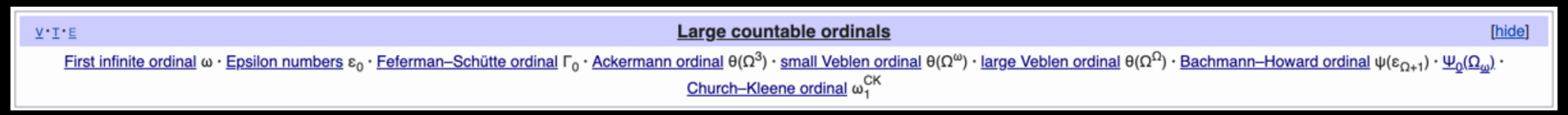
基数

- 数感是一种比较多少的能力，把相等的侧面上升为数学概念就是基数
- 全体自然数的基数是 $\aleph_0$ ，从 0 到 $\aleph_0$ 只是全部基数的一小部分
- 能否通过增加定义中的条件，来从基数中限定出来我们想要的一部分呢?
  比如，增加一个有限性的条件?

有限性 vs 有限

序数

- 数感是一种比较多少的能力，把比较的侧面上升为数学概念就是序数
- 第一个无穷序数是 ω
- 有趣的可数序数有很多



可构造的从有限趋于无限的方式有很多

“数”可以被发明的空间也同样很大

皮亚诺公理

- P1：0 是自然数

可引入后继函数 S

- P2：自然数在 S 下封闭 成链
- P3：S 是入射 无叉
- P4：不存在自然数 x 使得 S(x) = 0 无环

- P5：归纳公理

自然数唯一性

个体到全体的跨越

结构归纳法

一进代数系统

如下的函数签名定义的代数系统

- 0 :: N
- S :: N -> N

它的初始代数是自然数系统，初始代数模型可以由项代数给出

有限性

脱离了我们人类的自然数，我们能谈论有限吗?

有限的戴德金定义

- 一个集合有穷，当且仅当，不存在从它到它真子集的单射

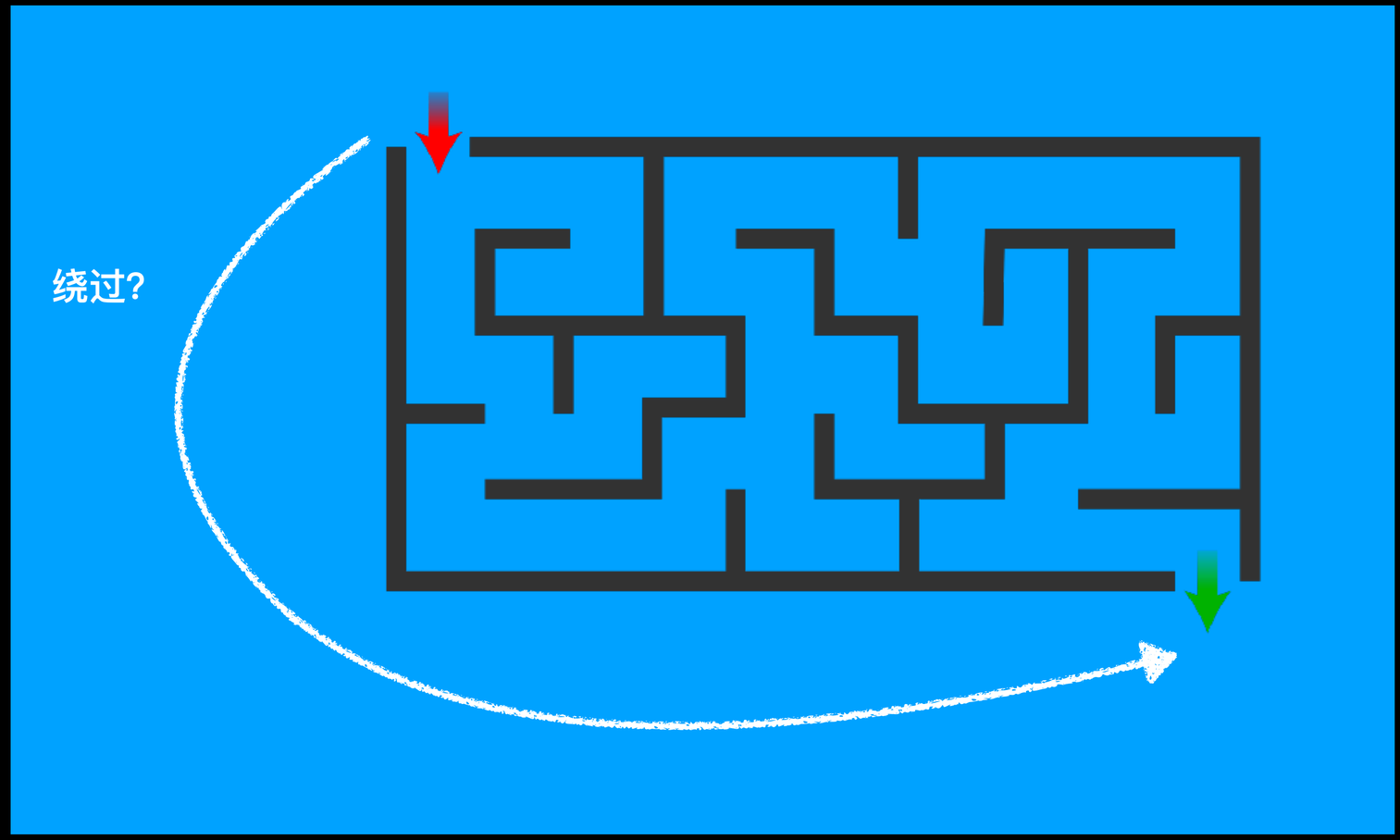
存在通用的判定算法吗?

- 如果
  - 接受有限性是数数问题的一个本质特征
  - 接受检测程序必须能停机才算通过检测
- 我们能看到一个非常危险的信号：
  - “判断任意一个生成结构是否是有限生成”可能会把我们导向停机问题

第三节

绕过困难的新思路吗?

- 塞伦盖蒂游戏的想法
- 游戏具体设计的尝试
- 基于几何的元理论?



游戏的想法

如果能找到一个游戏场景

- 1、智能体需要通过数数才能获得更好的生存
- 2、智能体可以自己画符号
- 3、为了达成 1，通过 2 发明的符号是必须的

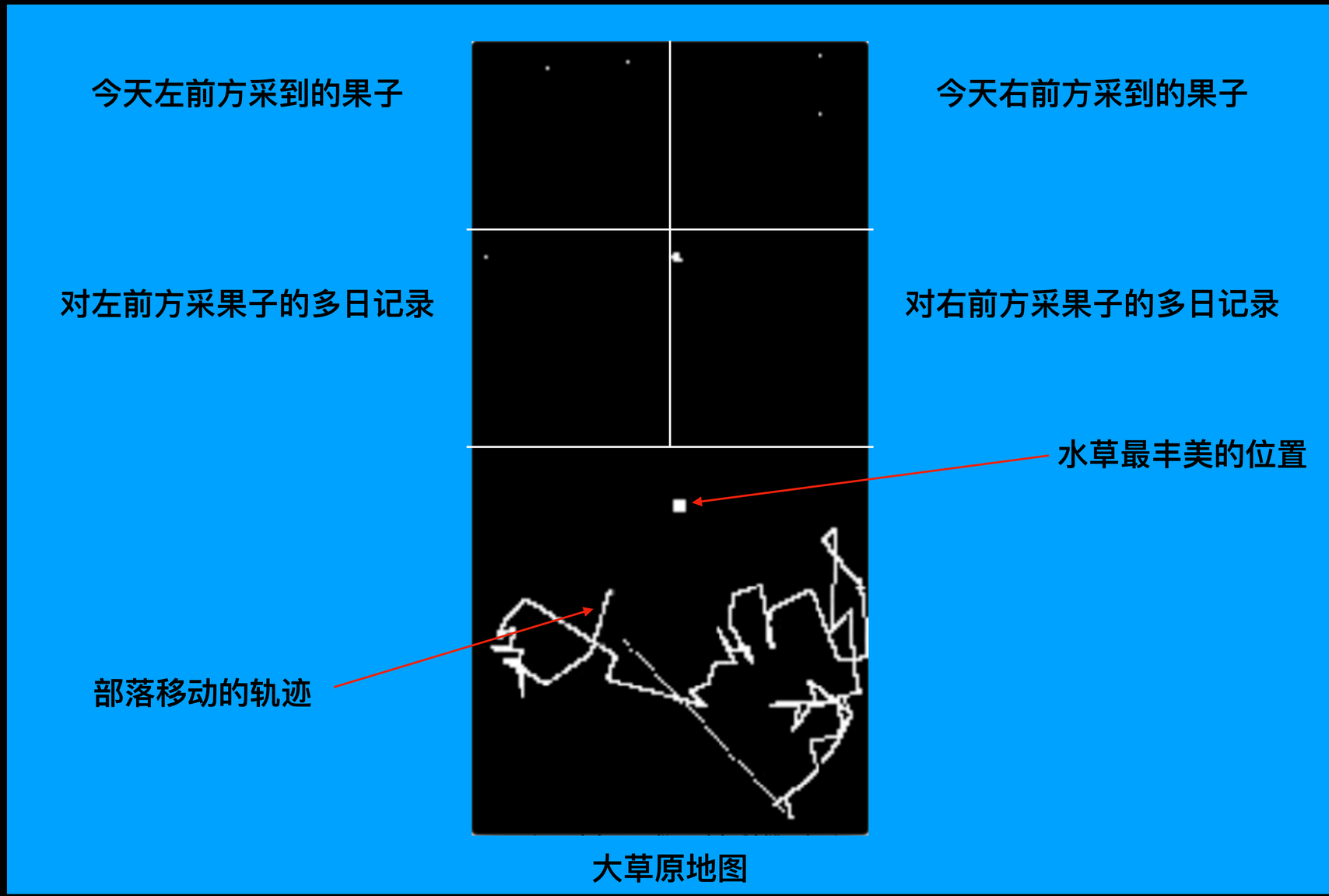
初步的设计

塞伦盖蒂游戏

假想一个原始人部落在塞伦盖蒂草原逐水草而居。他们需要通过左前方和右前方采到的浆果数量，来判断部落移动的方向，获得最高分的部落是到达水草最丰美位置的部落。

采到的浆果的数量有一定的随机因素，原始人必须要累计多日的采集结果，才能获得稳定的信号。而多日的累计需要通过某种符号记录下来。

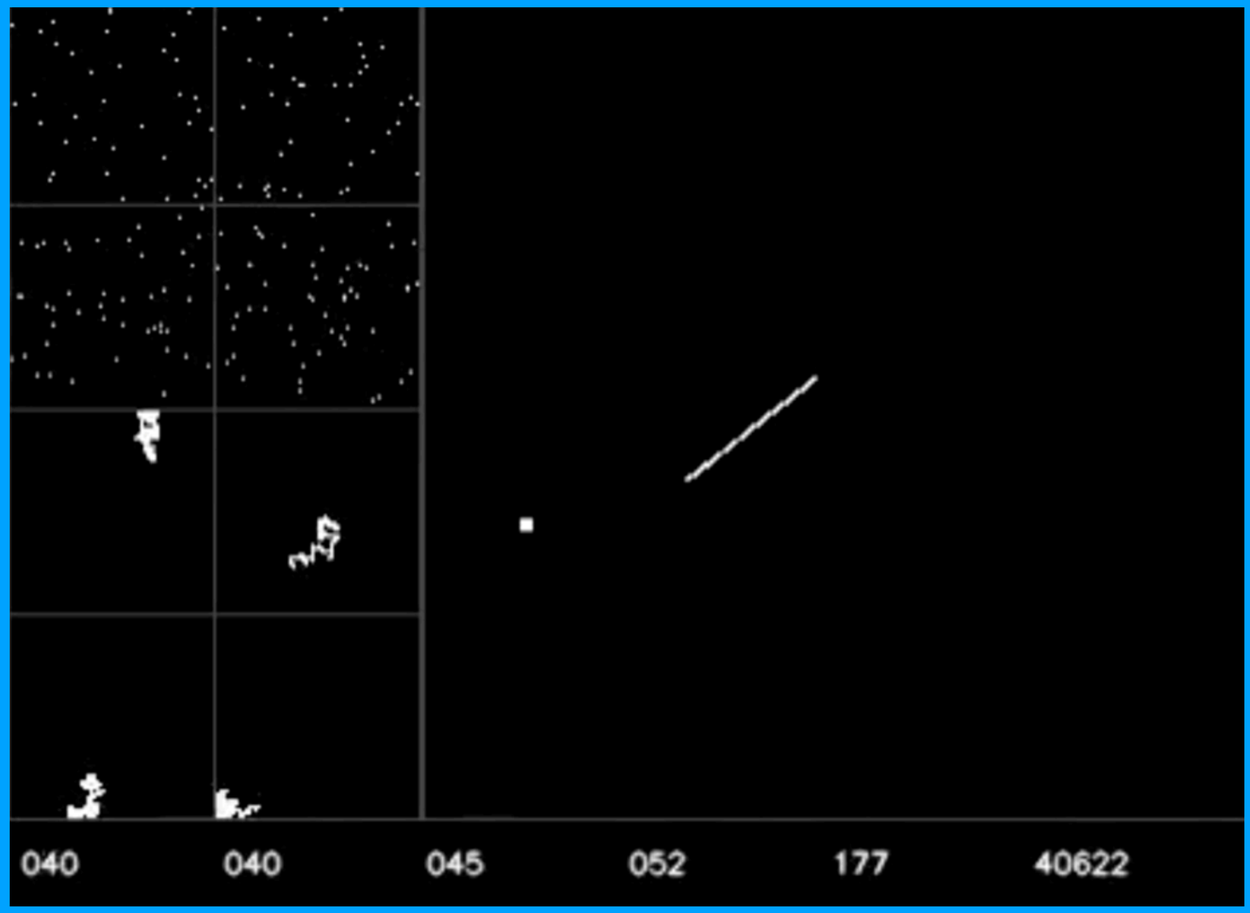
我们的 AI 原始人能能自己发明出来一种计数的符号体系吗？这是我们想考察的问题。



设计的改进

左前、右前、左后、右后
四个采集地

四块画板分别记录
四个采集地多日的收成



根据四个收成记录
可计算梯度
决定走向和步幅

设计里的体会

- 具身与世界：彼此融洽一致的多种具身性、主体与世界遭遇的方式
- 灵活控制：否则主体太笨拙，很难学习一个高技巧任务
- 最简化：随机游走里的复杂性，必须要简化设定到最必要的条件
- 基线对比：要有基线对比方案

规避了困难吗?

- 可理解性：可以被 RL 评分比较好的规避掉
- 无限性：
  - 可以通过可伸缩的大小的画布和可游走的视界窗口解决吗?
  - 会发现它和塞伦盖蒂游戏是类似的一个问题
  - RL 的无限叠加？还是别的可能?
    - 有没有可能构造同样一个 RL 的多层叠加，每次提升都缩小了数数的范围

攻克无限性（一）

- 方案一：无限大画布、可移动视窗和可移动的笔

攻克无限性（二）

攻克无限性（三）

基于几何的元理论

- 如果能用 RL 来很好的刻画数数问题
- RL 在优化过程中的每一步，都可以用几何的语言来理解
- 在寻求一个代价更低的势能面
- 这是否意味着，我们可以发展一种关于数的几何理论?

致谢与参考文献

- 致谢李熙、晁晁、王东和夏海宁老师的有益探讨和指导
- 动物的图标均来自 the Noun Project
- 其他的图片都来自维基共享资源项目

谢谢

NumberX 项目

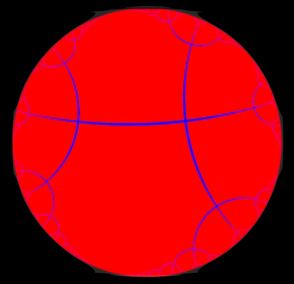
塞伦盖蒂游戏是其中之一

Skiverse 项目

另类数字自催化网络想法的探索

SelfX 项目

探讨自我概念的产生



更神秘的项目

请大家等待会在下面逐渐开启