

具身智能引论

Introduction to Embodied Intelligence

丁文超 李维 浦剑 商慧亮 尚笠 杨帆

AI通识基础课程（AIB310002）

Microduck encounter

https://github.com/pollen-robotics/microduck



Hello,

Pollen Robotics engineer here. I know some will see this as a toy (and that's fine, go have fun!) but I think it's important to keep in mind that this thing is a full-on biped humanoid robot with an open-source software stack and a sim2real pipeline that works surprisingly well.

Maybe it's not impressive for some people because there are spectacular videos of Chinese robots doing karate every week, but I've done 10+ years of robotics competitions and getting your biped to stand up, walk and even roller skate by yourself is no small task. Knowing that thousands of enthusiasts will be able to try their hand at reinforcement learning on a biped is insane to me. I would have loved to have this when I started in 2010.

The mobility capabilities of this robot are already decent (still improvable) but the next big challenge is getting to autonomous behaviors. Natural language, SLAM, navigation and grasping will be cool subjects to explore on this platform.

MicroDuck：从虚拟训练到真实运动

一只约 25 厘米高的小型智能双足机器人

它要做到什么

自主保持平衡，按照人的指令行走，并逐步扩展到起身、坐下和互动。

01

虚拟机器人学习运动

在物理仿真中练习站立、行走和恢复

02

神经网络保存运动能力

把学会的动作规律保存为可部署的策略

03

真实 MicroDuck 完成动作

机器人根据身体状态实时调整自己的动作

整体方法

先在仿真中训练运动能力，再把学会的行为部署到实体机器人。真实机器人会根据身体状态不断调整动作。

MicroDuck 把仿真中学会的运动能力带到真实世界，使小型双足机器人能够自主平衡并完成各种动作。

实现 MicroDuck 的四项工作

四条工作线解决四类问题，最后共同支撑稳定站立与行走

01 机械结构

主要工作

制造身体、两条腿、头颈和嘴部。对齐关节位置、转轴、活动范围、质量与质心

目标：身体与仿真一致

02 电气与通信

主要工作

安全稳压供电。把 15 个舵机和 IMU 接入稳定的 1 Mbps 半双工总线

目标：设备与数据可靠

03 实时控制软件

主要工作

每 20 毫秒读取状态、组织输入、运行推理，并写回舵机目标

目标：50 Hz 闭环稳定运行

04 智能模型与迁移

主要工作

在 MuJoCo 训练站立和行走。导出含归一化的 ONNX，再分阶段上真机

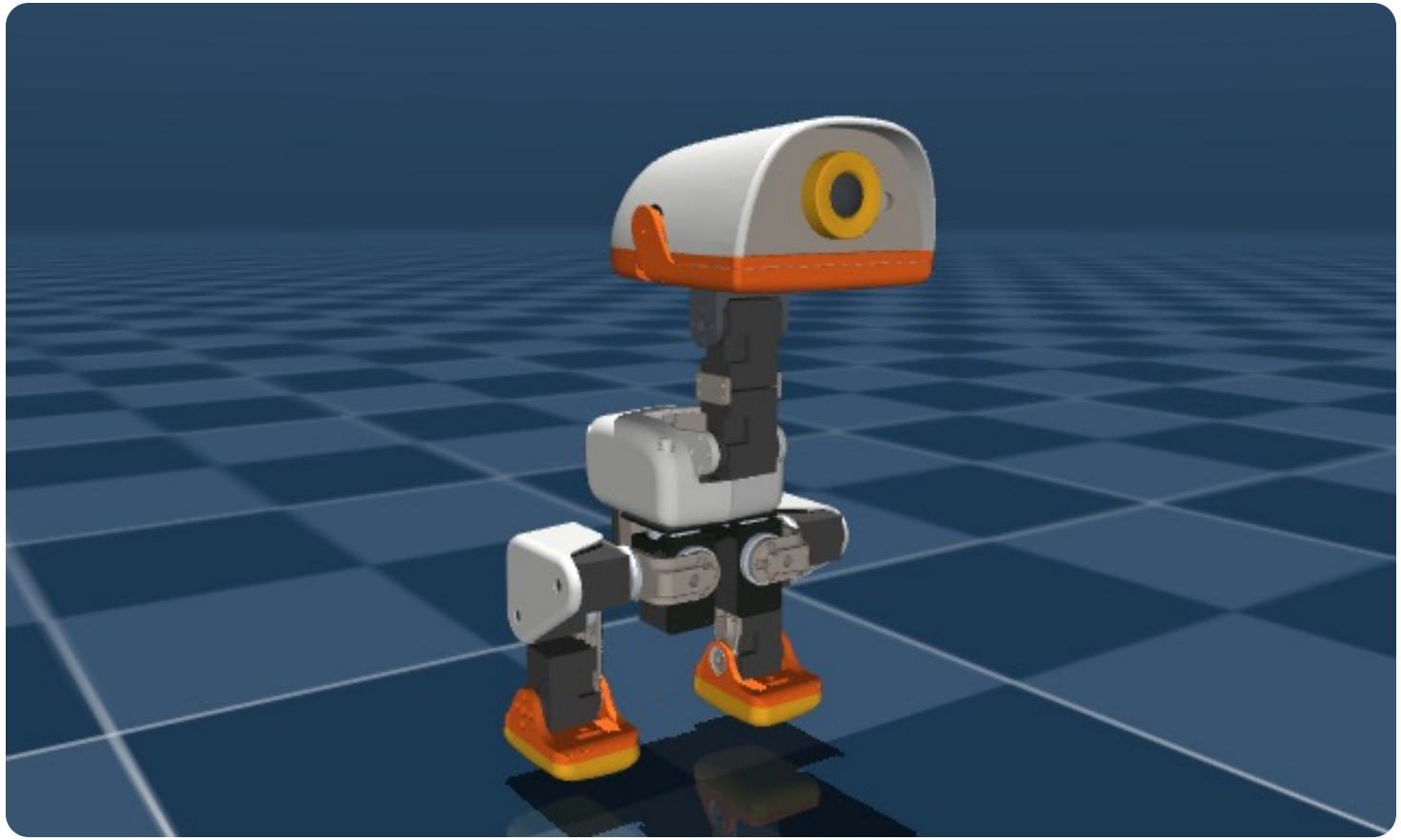
目标：动作保持平衡并产生步态

四条工作线共同支撑：稳定站立与行走

四项缺一不可

MuJoCo 中的 MicroDuck 从哪里来

虚拟机器人由一份装配与物理说明书，加上一组部件外形共同构成



真实模型截图：scene_walk.xml 在 MuJoCo 中的零位姿态

MJCF 管装配和物理

它是一份 MuJoCo XML 说明书，定义身体层级、部件位置和方向、关节轴线与范围、质量与惯量、碰撞，以及所引用的网格。

STL 管部件外形

每个 STL 保存一个部件表面的三角网格。它不包含完整的装配关系，也不等于可直接修改的工程 CAD。

MJCF + STL

MuJoCo 将两者组合成
可运动、可碰撞的虚拟机器人

先回答“怎样装、怎样动”，再谈“怎样制造”

真实 MJCF 示例：左髋关节如何被描述

摘自 MicroDuck 官方 robot_walk.xml

MJCF / XML

```
<body name="yaw2roll"
      pos="0.006 0.0175 -0.005"
      quat="0 -0.707107 -0.707107 0">
  <joint axis="0 0 1" name="left_hip_yaw"
         type="hinge"
         range="-0.4363 0.5236"/>
  <inertial mass="0.0230406" ... />
  <geom type="mesh" mesh="yaw2roll" ... />
</body>
```

为便于课堂阅读，长属性保留核心字段；数值来自原文件。

这段代码告诉 MuJoCo 四件事

1. **部件的位置与朝向**

   body 建立 yaw2roll 部件。pos 和 quat 说明它相对父部件装在哪里、朝向哪里。

2. **关节怎样运动**

   joint 把它定义成左髋偏航关节。hinge 表示绕单轴旋转，axis 指定转轴。

3. **部件有多重**

   inertial 给出质量、重心和转动惯量。这里的质量约为 23 克。

4. **部件长什么样**

   geom 引用 yaw2roll 的 STL 网格，让 MuJoCo 显示它的三维外形。

一句话理解　　STL 说明零件长什么样；MJCF 说明零件装在哪里、朝向如何，以及怎样运动。

从仿真模型到可打印零件

制造需要把虚拟关节、外形参考和真实硬件尺寸重新整合进 CAD

三类输入

MJCF 关节骨架

关节位置、轴线、范围和装配层级

现有 STL 外形参考

部件表面形状与大致空间占用

真实硬件尺寸

舵机、轴承、螺丝和线缆

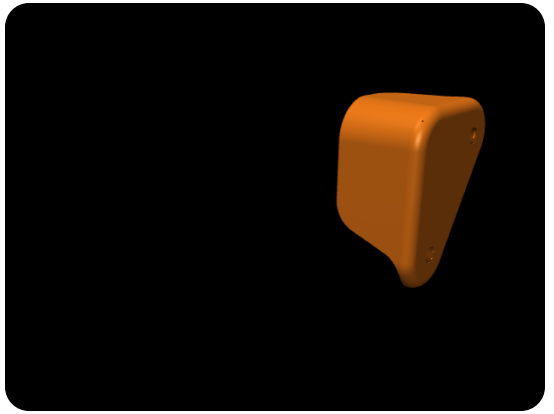
CAD 工程设计

重建安装面和关节接口
设计螺孔与紧固件
加入装配公差
预留线缆与工具空间

制造输出

新的制造 STL

切片后进行 3D 打印



上游 STL 示例：upper_leg_left.stl

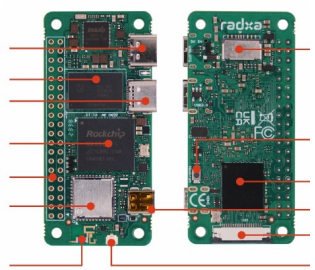
关键结论

仿真 STL 首先是外形参考，CAD 中重新设计的模型才是可制造零件。

原始 STL 没有自动补齐螺孔、公差、安装面和走线空间。

电气系统总览

先认清五类硬件，以及信息和电能怎样在它们之间流动

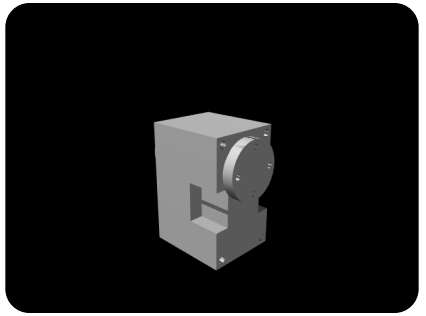


Radxa Zero 3W 主控板

小型 Linux 电脑
运行控制程序和神经网络

总线适配与连接模块

把主控信号接入 Dynamixel
单线半双工 TTL 通信通道



Dynamixel XL330 舵机

把动作命令变成关节运动
整机共 15 个

共享通信通道：主控、所有舵机和 IMU 共用一条链路

电池与电源转换

为主控、总线模块和舵机供电

信息流

电能流

总线是一条共享通信通道及其接口，
不是另一台电脑。

IMU / imu_to_dxl v2

LSM6DSV16X 芯片
测量身体转动和姿态变化

系统软件总览

软件把身体状态变成动作命令，并不断重复这一过程

运行环境

Radxa Zero 3W 上的 Linux / Armbian

管理硬件、文件和网络，为控制程序提供稳定的运行环境

控制程序

读取身体状态

读取 IMU 与舵机反馈

→

计算下一步动作

调用神经网络策略

→

发出目标位置

发送给 14 个策略舵机

感知 → 计算 → 执行 → 再感知

50 Hz：每秒约重复 50 次，形成“感知、计算、执行、再感知”的闭环

MuJoCo 到底是什么?

它是一间遵守物理规律的虚拟实验室，让机器人先在电脑里运动



真实 MicroDuck 仿真场景：机器人 + 地面

交给 MuJoCo 的内容

机器人模型 身体、关节与质量

地面和环境 接触面与周围条件

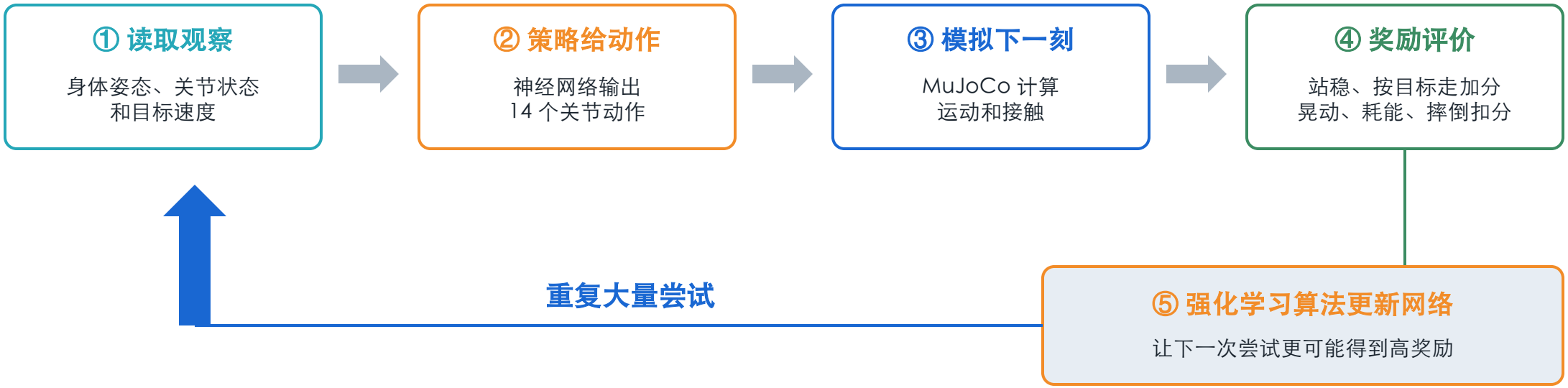
关节动作 每个关节想怎样转

MuJoCo 计算物理后果

重力、摩擦、碰撞和关节运动
共同决定机器人下一刻的状态

强化学习怎样与 MuJoCo 配合?

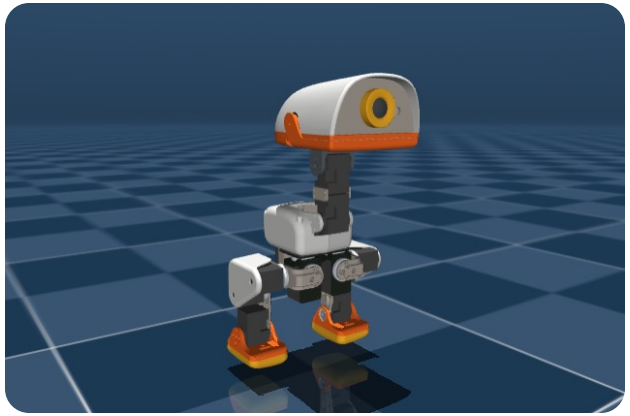
策略在虚拟世界中反复尝试，并根据结果逐渐改进



MuJoCo	负责模拟动作产生的物理结果	强化学习程序	负责试错、评分并更新神经网络

训练最终得到什么?

得到一套可保存、可部署的运动策略，而不是一段预先写死的动作



仿真中训练

反复试错，学会站立或行走

策略神经网络

ONNX

便于在真机上运行

例如：alpha_stand.onnx
alpha_walking.onnx

真实 MicroDuck

读取状态	IMU 与关节反馈
运行 ONNX	计算下一步动作
输出目标	14 个关节目标

真机运行时不再训练

Radxa 主控约以 50 Hz 重复：读取状态 → 运行 ONNX → 输出 14 个关节目标

什么是智能?

Minds awaken in a world

世界不是我们创造的，而我们一开始就身处其中。

作为世界的一部分，当我们意识到“我”的同时，也意识到“世界”。自我和世界不是两个分开的东西，而是在同一个经验结构中一起出现的。

我们有能力去认知这个世界。我们的认知过程是主观的、片面的、充满噪声。我们不断反思我们对世界的认知，并在反思中不断提升我们对世界的认知。

所以我们无法站在世界之外去观察世界。我们对世界的理解，本身就是这个世界的一部分。



F. J. Varela, E. Thompson, E. Rosch, “The Embodied Mind Cognitive Science and Human Experience”, MIT Press, 1992

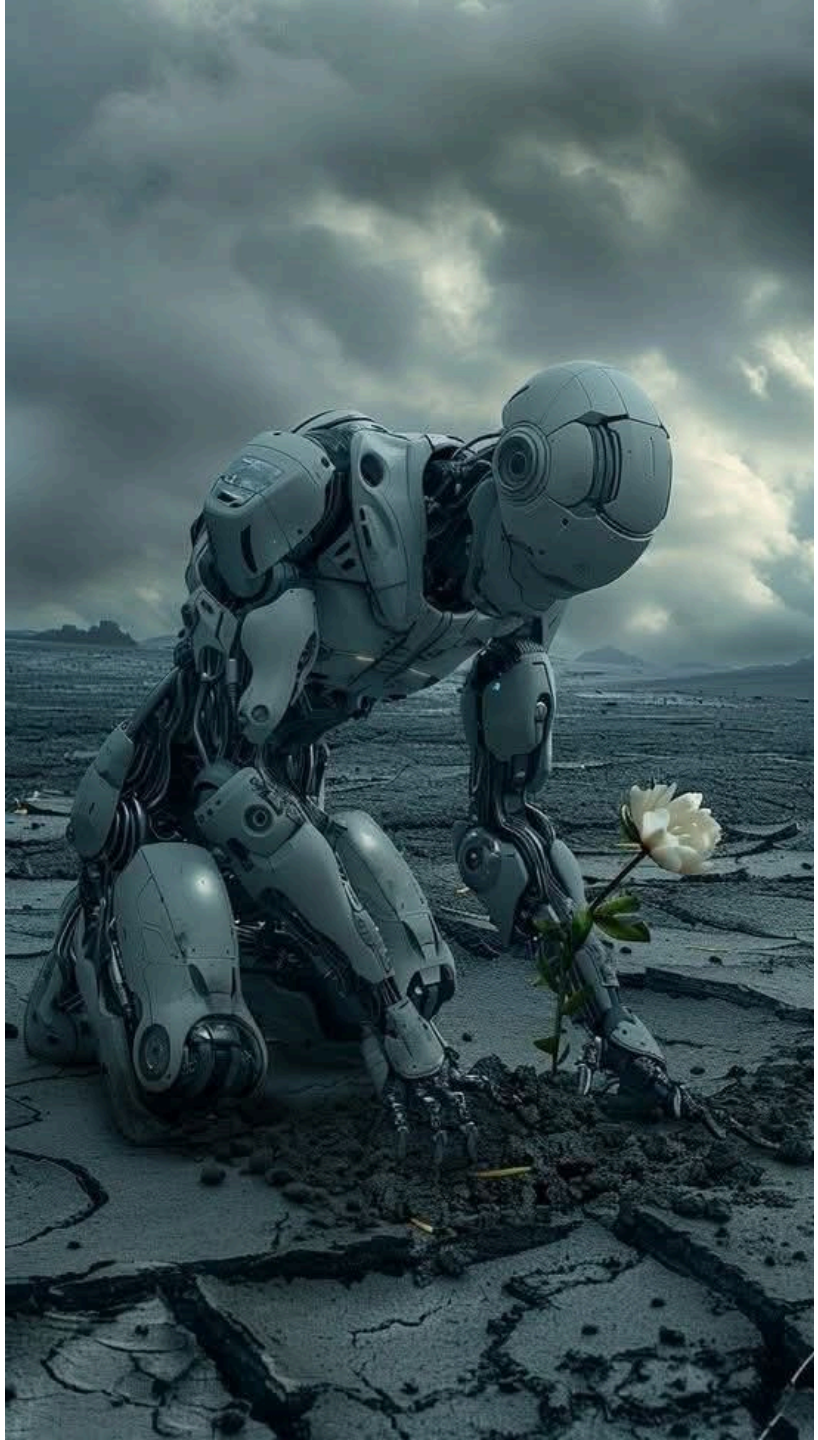
什么是智能?

智能并不是孤立存在于“大脑”或计算系统中。

智能 **必须依赖身体与环境的相互作用** 才能涌现和发挥。

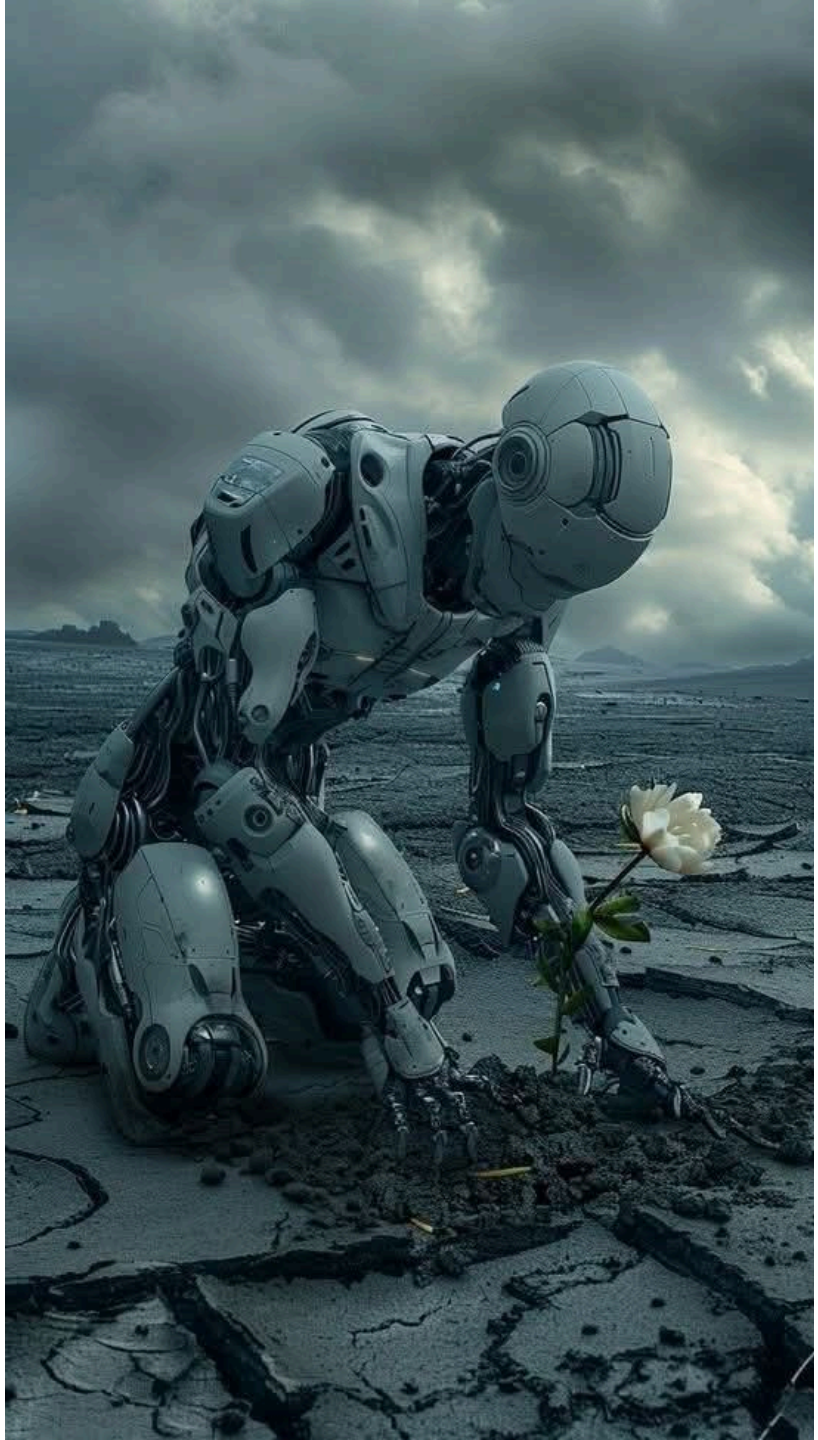
身体提供了感知通道（视觉、听觉、触觉...）、
行动能力（手脚、工具）、以及与物理环境的动态闭环。

没有身体和环境，智能无法产生或体现。



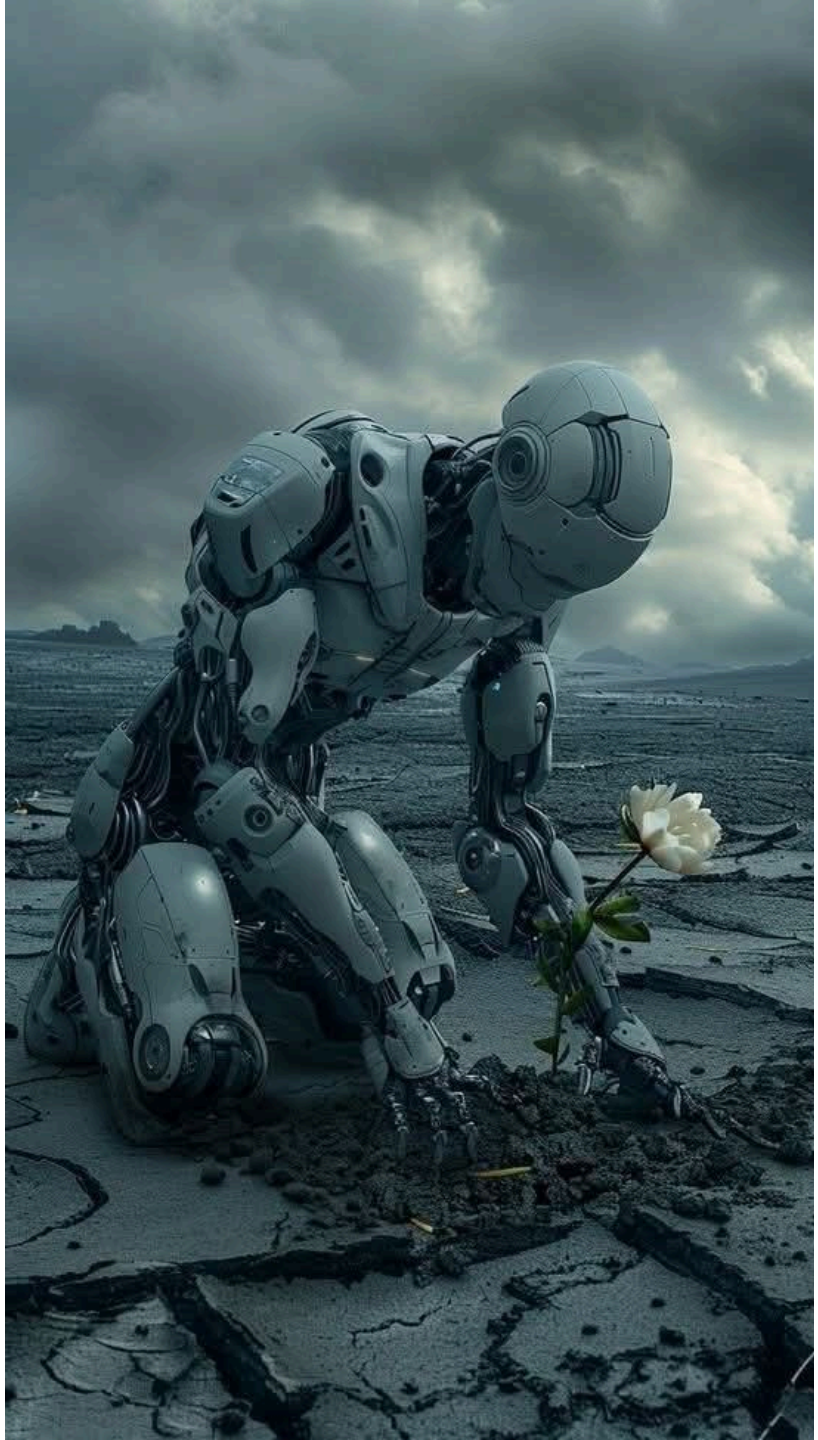
什么是智能?

智能的核心是对世界底层规则的理解?



什么是智能?

智能的核心是对世界底层规则的理解的**能力**



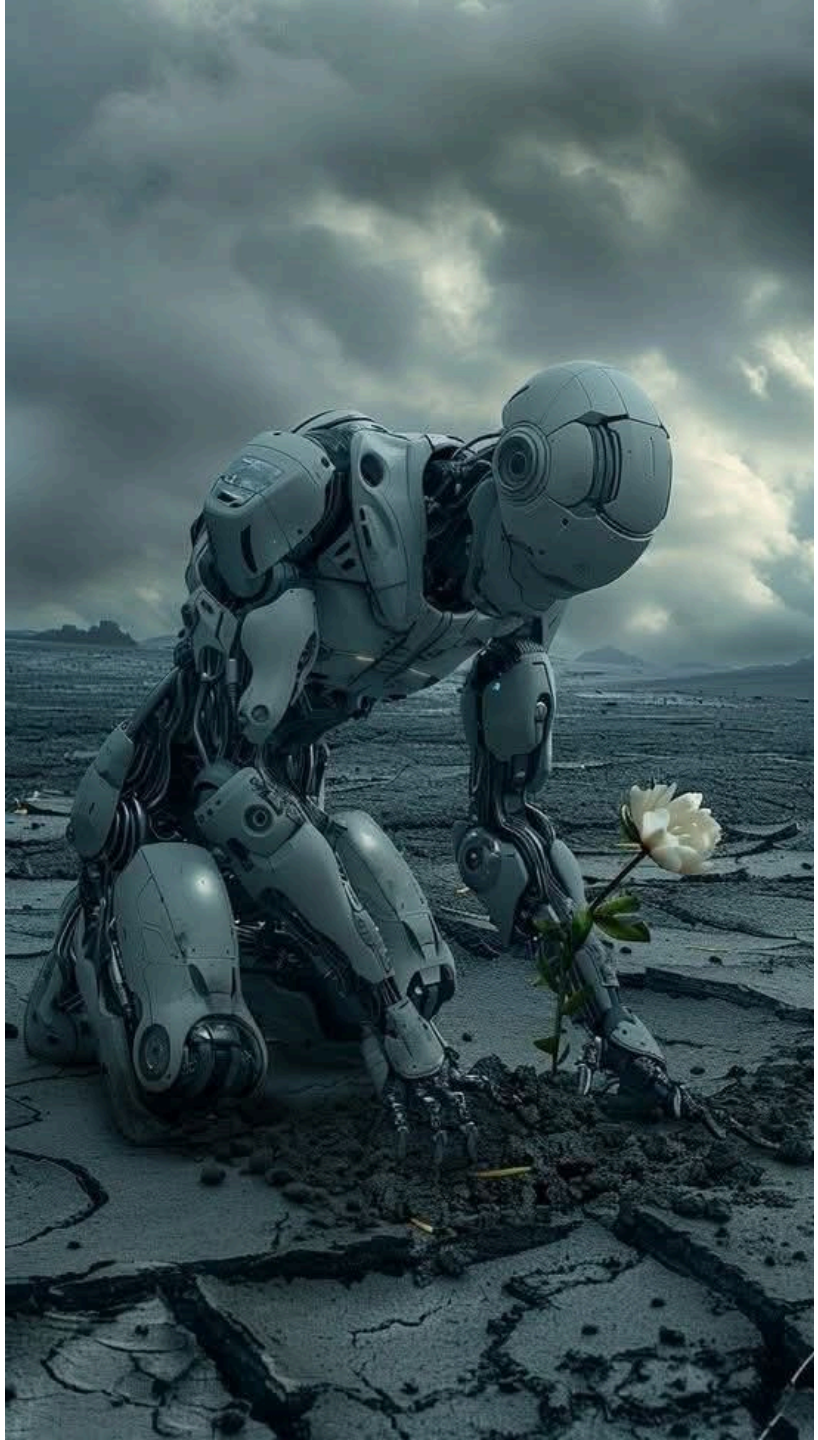
什么是智能?

预测性：如果能理解规则，就能预测未来（例如知道球会沿抛物线下落）。

泛化性：理解规则后，可以把经验迁移到新场景（新杯子也能推倒，而不是只会操作旧杯子）。

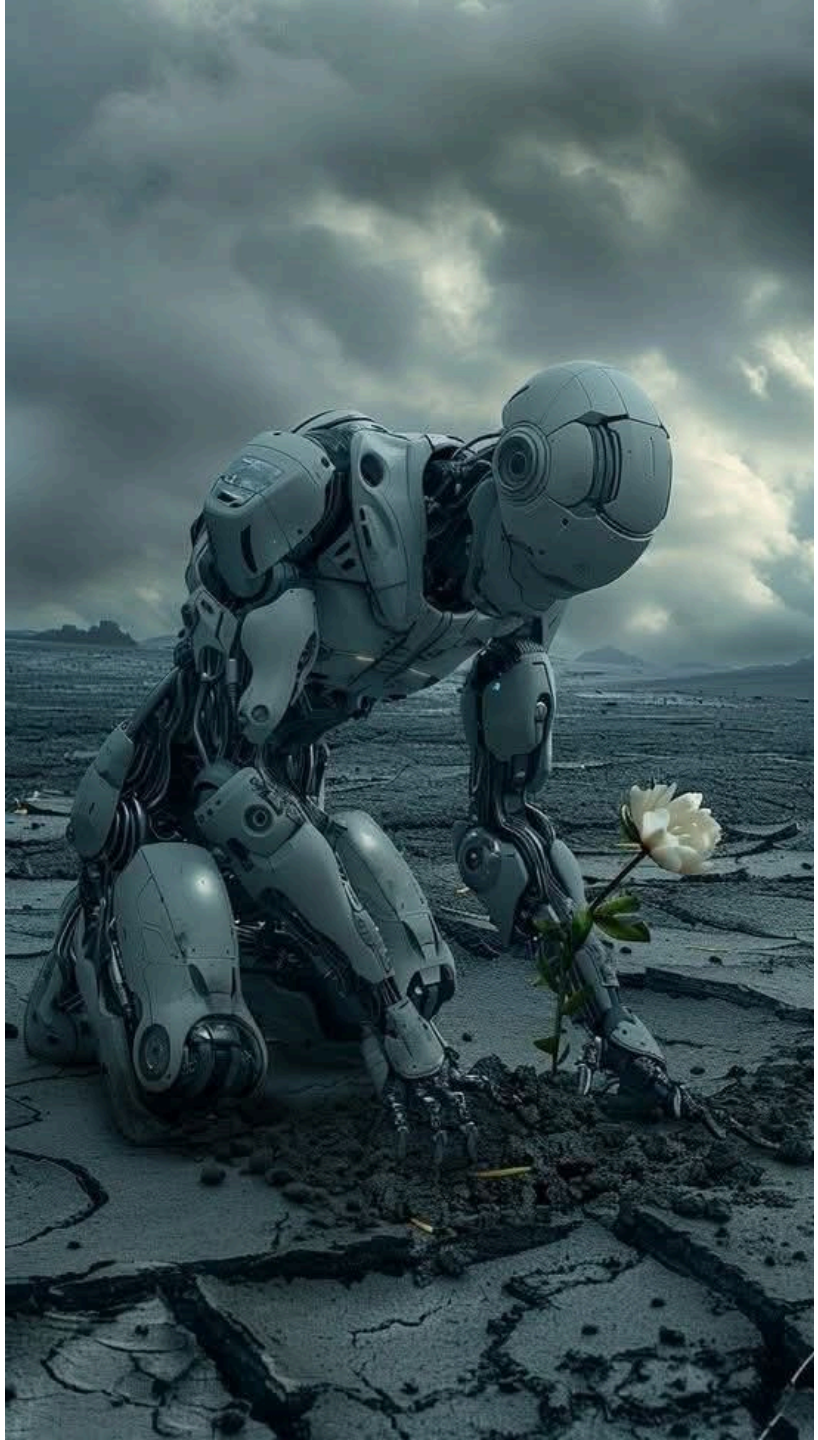
高效性：不用记忆所有细节，只要掌握规律，就能用少量信息解决复杂问题。

创造性：基于规则，可以探索新的组合方式（例如利用杠杆原理发明工具）。



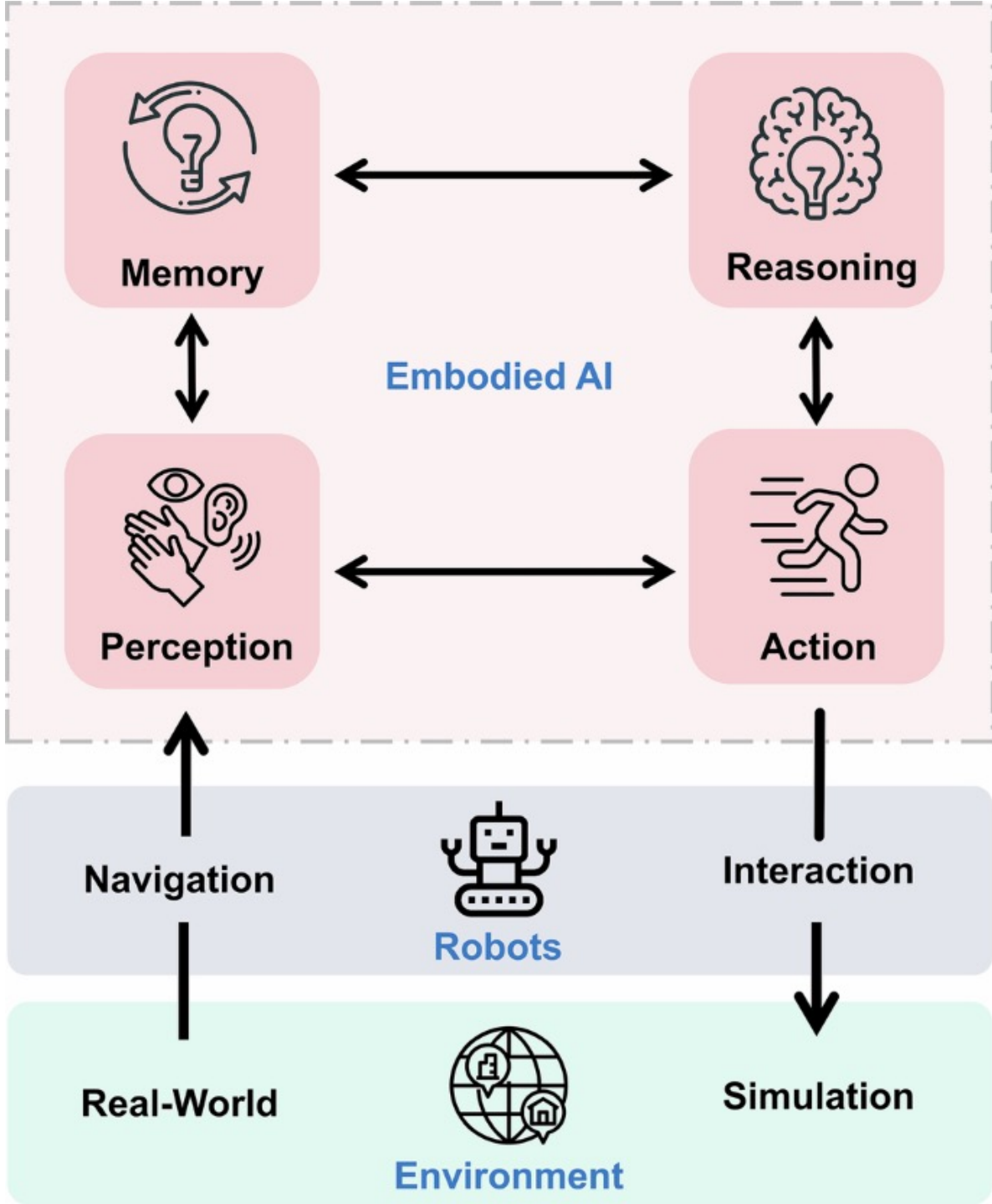
什么是智能?

从具身智能的角度看，智能的核心就是通过身体与环境的交互不断抽象、内化世界的底层规则，从而具备预测、泛化和创造的能力。



具身智能

- 具身智能（embodied intelligence）的概念起源于认知科学、人工智能、机器人和哲学的交叉领域。
- 它挑战了传统的观点，即智能主要是发生在大脑中的一种独立于身体和环境的计算过程。
- 具身智能主张，认知和智能深深植根于主体身体与环境之间的物理互动中。



课程介绍

- 具身智能简介
- 课程相关信息
- 课程内容综览



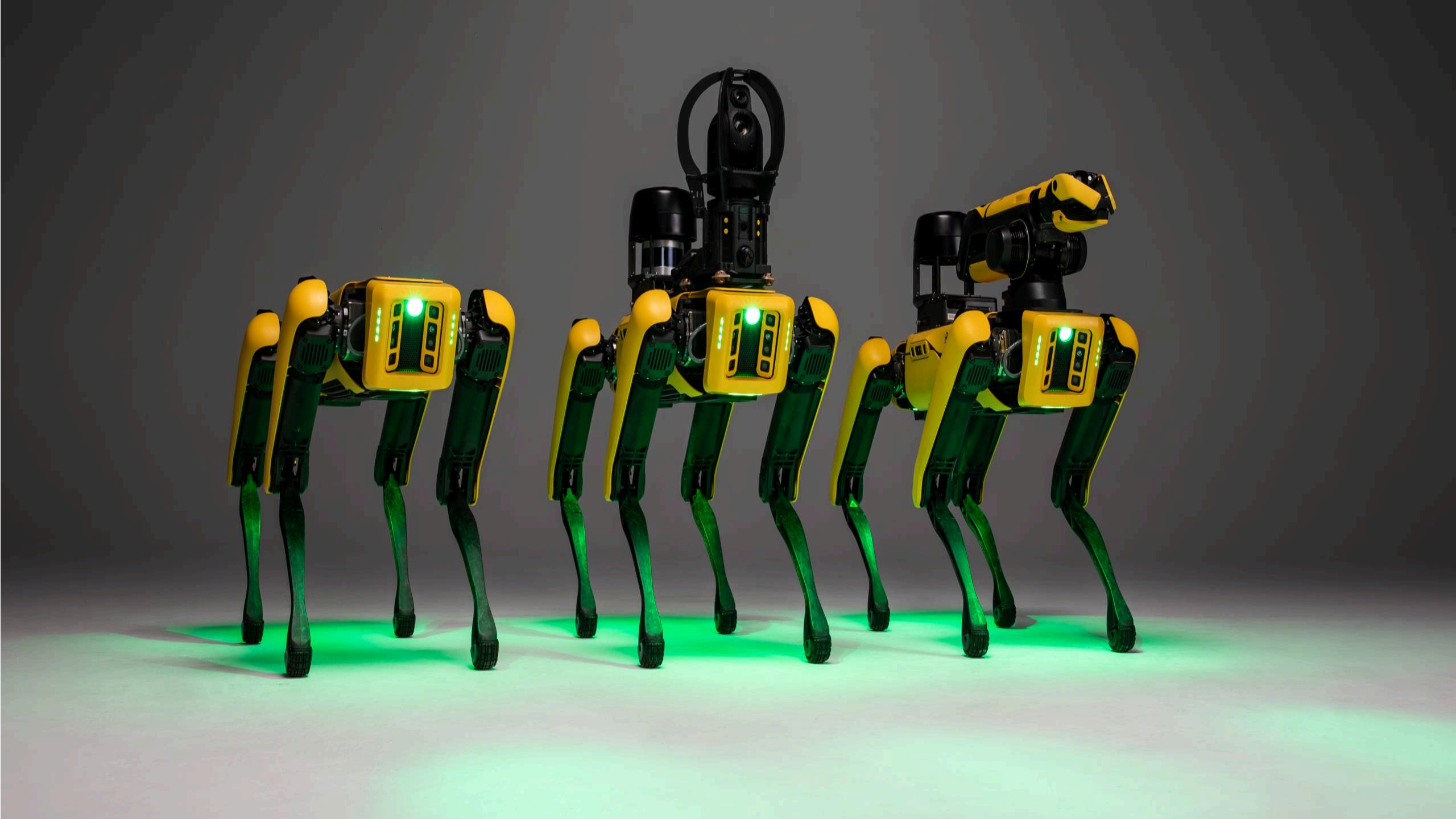
课程介绍

- **具身智能简介**
- 课程相关信息
- 课程内容综览





Evolution of Robots



具身智能-哲学根源

历史背景：19世纪末，自然科学取得巨大成功。世界被重新理解为一个客观、数学化、可机制化的系统。然而，在这种新的科学图景下，人的经验世界，例如意识、意义、逻辑必然性，却难以被纳入同一框架。与此同时，心理主义对逻辑与数学的解释动摇了科学的基础，主观与客观之间的张力日益加剧。

现象学的回应：现象学并未直接参与唯物或唯心的本体争论，而是改变问题的提法。它暂停关于“世界本身是什么”的讨论，转而分析“世界如何在经验中显现”。通过对意识结构与意义构成的分析，现象学试图为科学与逻辑提供更稳固的概念基础。

历史价值：在机制科学尚未成熟的阶段，现象学成为连接科学图景与经验世界的过渡框架。它不是终极答案，而是科学发展过程中一次重要的问题重写。

具身智能-哲学根源

现象学研究“经验如何被给予”的哲学方法，探寻人类经验的本质结构。

- 胡塞尔 (意向性, 经验现象学)： 奠定了“经验优先”的基础。
  ↓
- 海德格尔 (在世存在, 实践优先)：知识和理解不是抽象推理，而是在实践中通过“操劳”和“使用”获得。
  ↓
- 梅洛-庞蒂 (知觉=身体化, 身体图式): 解释我们如何行动和感知。启发“具身认知（Embodied Cognition）”理论。
  ↓
- 具身认知 (Embodied Cognition, 认知=身体+环境): 智能不只是符号运算，概念源自身体经验。
  ↓
- 当代具身智能 (Embodied AI, Robotics, RL, 大模型+身体交互):

具身智能-哲学根源

现象学研究“经验如何被给予”的哲学方法，探寻人类经验的本质结构。

一开始，**胡塞尔**强调，我们理解世界必须从“经验本身”出发，而不是从抽象理论出发；意识总是在“指向某物”，经验是认知的起点。接着，**海德格尔**进一步说，人不是先坐下来思考再行动，而是先在世界里生活、使用工具、解决问题，理解来自实践。**梅洛-庞蒂**再往前推进，指出知觉本身是“身体化”的——我们不是一个纯大脑在计算，而是通过身体的运动与姿态去感知和行动。后来“**具身认知**”理论吸收了这些思想，提出认知是大脑、身体和环境共同作用的结果，概念来源于身体经验。到今天的具身智能与机器人研究，人们开始真正把模型放进身体里，让它在物理世界中行动和学习，强调智能不是单纯的符号运算，而是在与环境的持续互动中形成的。

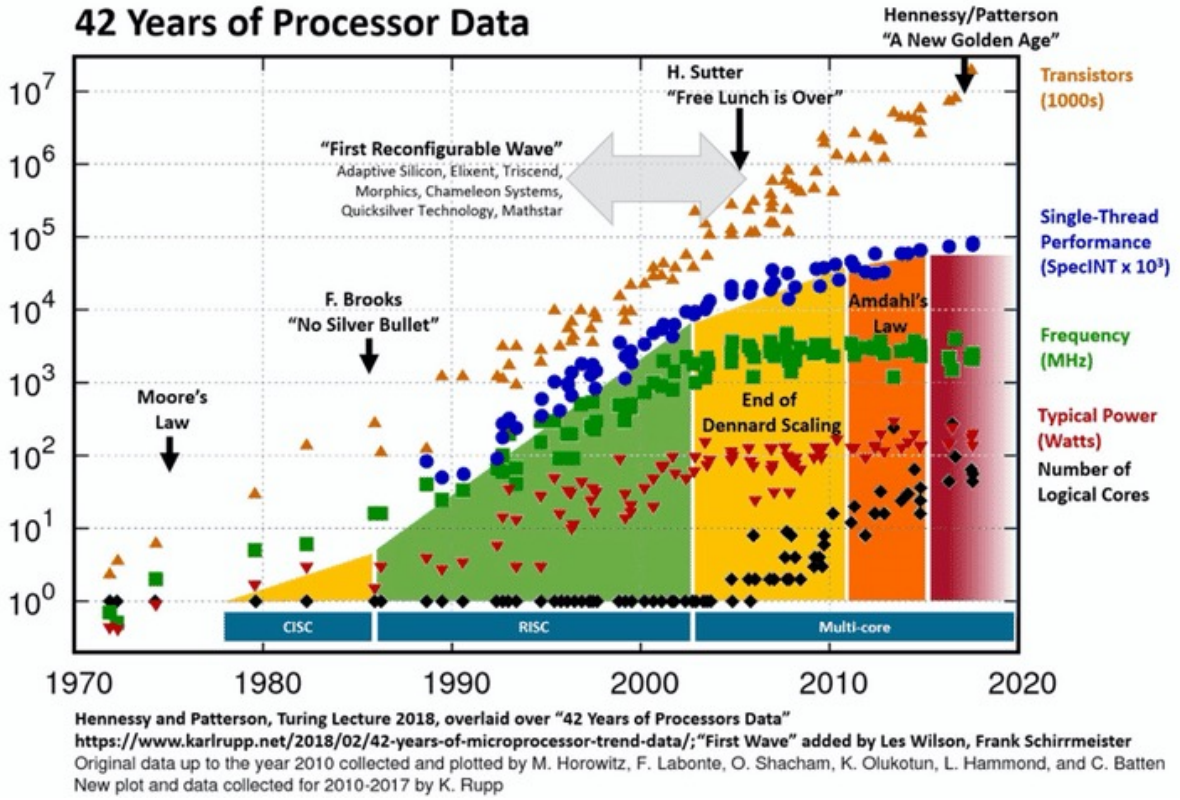
具身智能-哲学根源

- 梅洛-庞蒂（Merleau-Ponty）：具身智能的哲学基础可以追溯到现象学家如梅洛-庞蒂的工作，他认为感知和认知本质上与身体及其在世界中的体验密切相关。他强调，我们对世界的理解是由我们与世界的身体互动所塑造的。
- 强调身体在感知和认知中的核心作用，认为知觉是通过身体与环境的互动直接发生的，而不是通过符号或概念的中介。



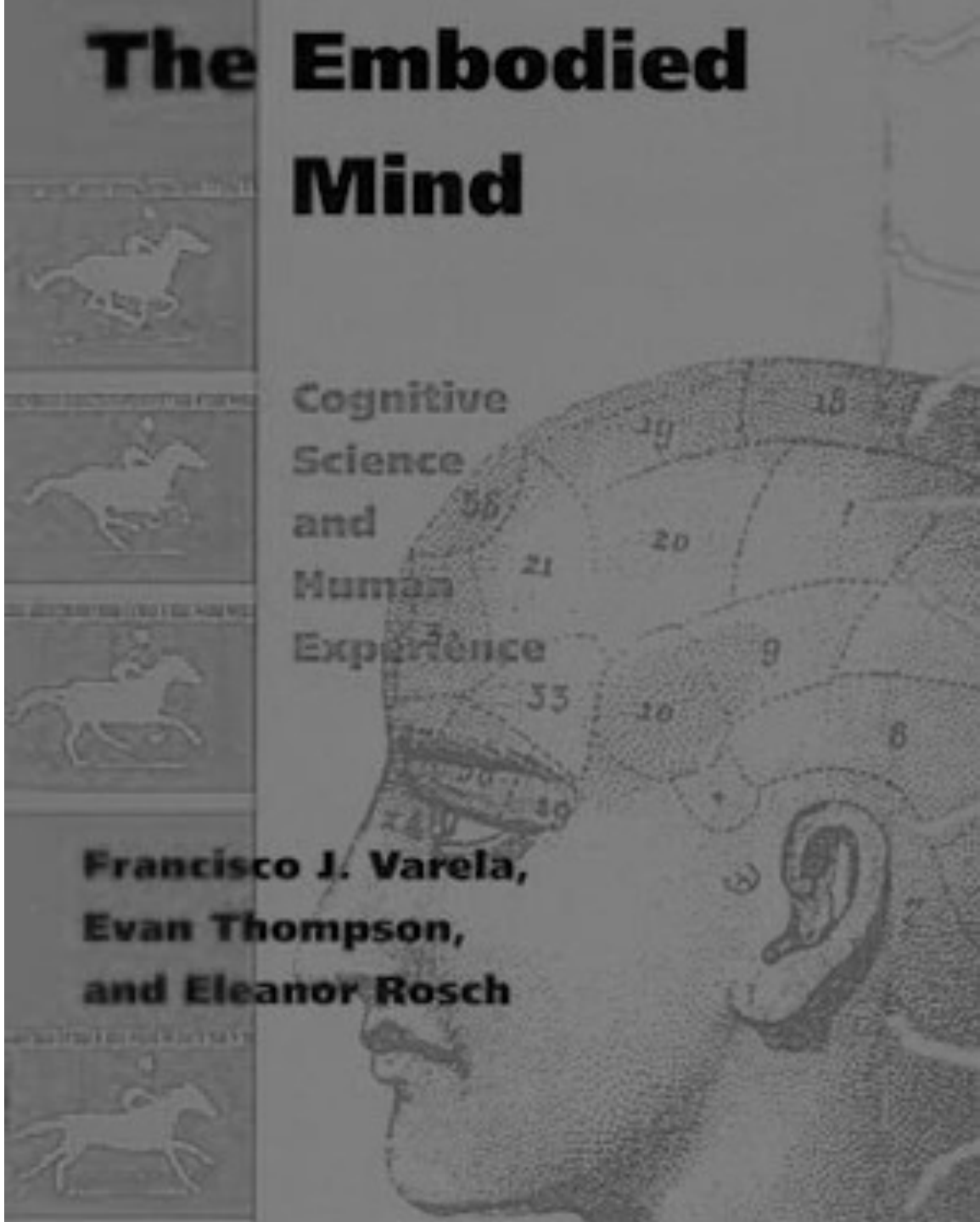
80年代的计算与智能

- 20世纪80年代摩尔定律驱动的计算机硬件性能的指数级增长，驱动人工智能的发展。
- 符号主义是20世纪50年代到80年代主流的人工智能方法，认为智能是符号处理和逻辑推理的结果，可以通过明确的规则和算法来实现。符号主义者将智能视为一种信息处理过程，可以在没有身体的情况下实现。



具身智能-认知科学

- 具身认知（Embodied Cognition）：在20世纪70年代开始，认知心理学的研究开始转向关注实际行动和感知。
- 在20世纪80年代，认知科学家开始挑战以计算为主导的心智模型，这些模型将大脑视为一种独立于身体的、处理符号的计算机。
- 埃莉诺·罗什（Eleanor Rosch）、弗朗西斯科·瓦雷拉（Francisco Varela）和翁贝托·马图拉纳（Humberto Maturana）等研究者提出，认知是从大脑、身体与环境之间的动态互动中产生的，从而推动了具身认知理论的发展。



F. J. Varela, E. Thompson, E. Rosch, “The Embodied Mind Cognitive Science and Human Experience”, MIT Press, 1992

具身智能-机器人

- 罗德尼·布鲁克斯（Rodney Brooks）：在机器人领域，麻省理工学院的罗德尼·布鲁克斯在推动具身智能概念的发展方面发挥了关键作用。在1980年代和1990年代，布鲁克斯提出了行为基础机器人（behavior-based robotics）的理念，强调智能行为可以通过简单传感器和执行器与环境的互动中涌现出来，而不需要复杂的内部表征。
- Intelligence without Representation: 智能行为可以通过一系列直接的感知-行动循环实现，而不需要符号表示或内部模型。这一观点挑战了传统AI对智能的定义和实现方式。

R. A. Brooks, “Intelligence without representation,” 1991



具身智能-2000年-至今

- **多模态整合和深度学习：**现代AI系统越来越多地使用深度学习技术来处理来自不同感官（视觉、听觉、触觉等）的数据。这些系统通过整合多模态数据来模仿人类的感知和行动能力，例如，机器人通过视觉和触觉传感器感知环境，并使用学习算法来规划和执行动作。
- **人机交互和社交机器人：**具身智能在开发社交机器人和人机交互系统方面发挥了重要作用。这些机器人通过模仿人类的社交行为和肢体语言，与人类进行更自然的互动。例如，Pepper机器人和Sophia机器人通过具身行为和自然语言处理技术，与人类进行交流。
- **增强现实和虚拟现实：**具身智能的概念也在增强现实（AR）和虚拟现实（VR）技术中得到应用。这些技术通过身体动作和环境互动，为用户提供沉浸式体验，体现了具身智能在虚拟环境中的应用。

具身智能-未来方向

- **更加自然的交互：**随着人工智能技术的不断发展，具身智能将继续推动更加自然和无缝的人机交互。未来的智能系统将能够更好地理解和适应人类的意图和情感，提供个性化和情境感知的服务。
- **身体与智能的融合：**未来可能会出现更加紧密融合的具身智能系统，这些系统将包括生物传感器、可穿戴设备和嵌入式智能，进一步模糊人类与技术之间的界限。
- **伦理和社会影响：**具身智能的发展也带来了伦理和社会方面的挑战，如隐私问题、自动化对就业的影响、以及机器人和AI系统在人类社会中的角色。这些问题将成为未来具身智能研究和应用的重要议题。



Physical AI, are we there yet?


CCTV 4K
超高清
直播
2026
中央广播电视总台
春节联欢晚会

课程介绍

- 具身智能简介
- **课程相关信息**
- 课程内容综览



课程相关信息

- 本课程围绕具身智能这一新兴人工智能领域的核心理念和教学目标进行构建。
- 着重培养学生对具身智能的基本原理、人工智能（大模型与Agentic AI）技术、机器人软硬件系统集成方法的深入理解和实际应用能力。
- 采用Agentic Coding开发基于大模型/多智能体技术的集成传感器与执行器的机器人系统的技能，通过设计实现与环境和人交互的具身智能系统原型获得实践经验。

我们是否可以从第一性原理出发构建智能?

课程相关信息

- AI通识基础课程（AIB30002）
- 周课时 3，总课时 54
- 授课时间：每周二（H3406 11-13）
- 授课方式：课堂讲授、课内Hackathon、与课程项目为主。学习具身智能领域的相关理论、技术和方法。结合课程项目安排学生运用课堂所学的理论技术与方法设计开发具身智能系统原型。
- 参考教材：
  - Embodied Artificial Intelligence，edited by Fumiya Iida, Rolf Pfeifer, Luc Steels, and Yasuo Kuniyoshi, Springer, 2004, 978-3-540-27833-7
  - Embodied Conversational Agents，Justine Cassell, Joseph Sullivan, Scott Prevost, and Elizabeth Churchill, MIT Press, 2000, 978-0262032780
  - How the Body Shapes the Way We Think，Rolf Pfeifer and Josh Bongard, MIT Press, 2006, 78-0262162395
- 考核和评价方式
- 作业30%
- 讨论与报告20%
- 课程项目、展示、论文50%

教学团队

姓名	所属院系	研究领域
尚笠	计算与智能创新学院	AI Infrastructure、具身智能
商慧亮	未来信息学院	自主无人系统
丁文超	机器人学院	机器人决策规划
杨帆	微电子学院	智能芯片、大模型
李维	人工智能创新与产业研究院	仿生机器人、人形机器人
浦剑	类脑人工智能科学与技术研究院	自动驾驶

商慧亮

研究领域：自主无人系统

未来信息学院副教授，复旦大学博士。机器人与自主无人系统实验室负责人，主要研究方向围绕机器人与自主无人系统开展，涵盖3D视觉感知，自主导航、SLAM，云端机器人系统，机器人抓取与灵巧操作，工业视觉检测分析，深度强化学习、智能工业机器人、特种机器人等。课题组与美国卡耐基梅陇大学、加拿大多伦多大学、日本东京大学等相关研究课题组长期密切合作。商慧亮副教授先后承担或参与国家、省部级及产学研课题30余项，在国内外核心期刊发表论文50余篇。



丁文超

研究领域：机器人决策规划

机器人学院青年研究员。博士毕业于香港科技大学电子及计算机工程系，主要从事机器人的感知和预测决策方向研究。曾任职华为车BU智能驾驶产品部（ADS），获华为“天才少年”，担任ADS预测决策团队负责人，作为核心贡献者参与打造了华为ADS1.0以及ADS2.0智能驾驶系统，贡献了业界领先的智能驾驶预测方案，并实现在北汽极狐、长安阿维塔以及问界等多款车型上的商用。2023年加入复旦大学，入选上海市白玉兰浦江人才计划、小米青年学者等。近5年来在国内外核心会议期刊发表论文十余篇，获IEEE ROBIO 2023最佳论文提名奖。



杨帆

研究领域：智能芯片、大模型

复旦大学微电子学院教授。主要研究方向为集成电路设计自动化，智能芯片、大模型。获2012年上海市自然科学一等奖1项。获2018年Integration, the VLSI Journal最佳论文奖，获DAC’2014, ASPDAC’2017, DAC’2017最佳论文提名。2018年获国家自然科学基金委优青项目资助。



李维

研究领域：仿生机器人、人形机器人

复旦大学人工智能创新与产业研究院研究员，复旦大学人工智能创新与产业研究院、计算机科学与技术学院、大数据学院博士生导师。上海交通大学工学博士。美国The University of Texas at Dallas博士后研究员。在国际顶刊（中科院SCI一区顶刊，Top 5%）上发表“第一作者与通讯作者”论文24篇、“独立作者”论文12篇，作为第一发明人有13项PCT国际发明专利、20多项国内发明专利。



浦剑

研究领域：自动驾驶

复旦大学类脑研究院青年研究员，博士生导师，复旦大学博士。已发表机器学习、自动驾驶等方面的各类学术论文60余篇。近些年来，主要代理团队承担复旦大学与中国一汽集团、蘑菇车联等人工智能联合实验室重大研发任务，研发具有自主知识产权的车载多传感器融合感知、车路协同感知、基于语义的实时建图与定位系统、车辆预决策一体化模型等自动驾驶关键模块。



尚笠

研究领域：机器学习系统、具身智能

复旦大学计算机与智能学院长聘教授。美国普林斯顿大学博士。曾任英特尔中国研究院副院长、首席架构师，美国科罗拉多大学博尔德分校电子计算机与能源工程系终身副教授。主要研究方向包括AI Infrastructure/机器学习系统、具身智能、VLSI/EDA。在相关领域发表论文200余篇，多次荣获最佳论文奖与提名，被引逾万次。曾获美国NSF CAREER Award资助。

邮箱：lishang@fudan.edu.cn



吴萍

机器学习系统与具身智能实验室科研助理。复旦大学硕士毕业于复旦大学管理学院管理科学系，主要负责实验室内学生管理和科研项目管理等工作。曾获复旦大学优秀毕业生、研究生国家奖学金等奖项。

邮箱：ping_wu@fudan.edu.cn



课程助教团队



许震宇

22112020052

研究领域：具身智能



刘诗颖

25113050076

研究领域：具身智能



赵仁杰

23307130060

研究领域：电子信息



邓景宜

26213050009

研究领域：具身智能



方佳鑫

26113050029

研究领域：具身智能



蔡心钰

23307140047

研究领域：微电子

课程设计

Build what you use, use what you build



16周课程设计

先用24小时造出机器人，再用24小时构建它的智能

01 - 08 **造一个机器人** Build a Robot

感知 Sense + 看 See + 听 Hear + 说 Talk + 动 Move

把传感器、交互与运动能力接入同一个物理闭环

09 - 16 **构建智能** Build Intelligence

表征 Represent > 理解 Understand > 预测 Predict > 推理 Reason > 规划 Plan > 控制 Control > 学习 Learn

每一周在前一周的基础上，为同一个智能体补上一种能力

概念跃迁

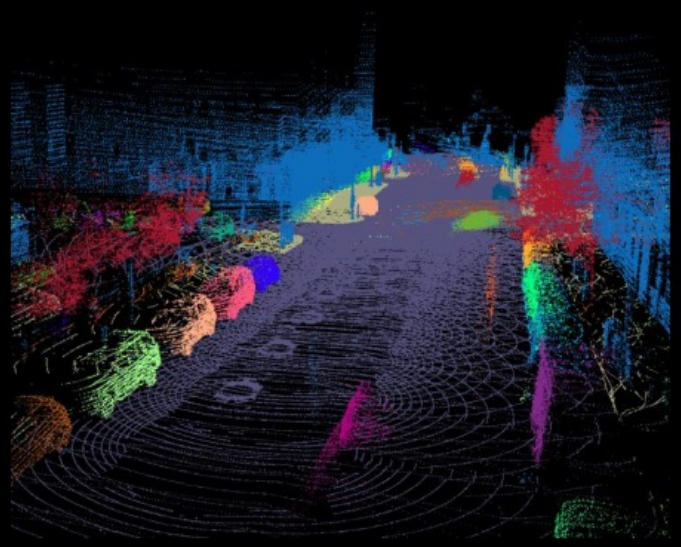
机器人 Robot → 具身智能体 Embodied Agent

学生最终看到的是一套完整的智能架构，而不是彼此分离的算法专题。

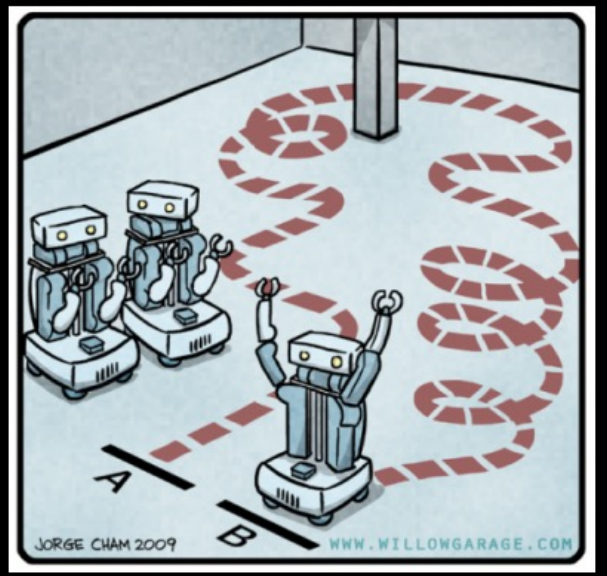
机器人

- **感知：** 观察并理解他们环境的状态
- **规划：** 规划实现目标所需的行动
- **控制：** 知道如何使用硬件来执行这些行动

我们希望有一款机器人能够在任何环境中、对任何物体完成任何目标和任务，且无需任何人类的帮助。这些具备普遍智能和广泛能力的完全自主机器人系统被称为通用机器人。



Perception



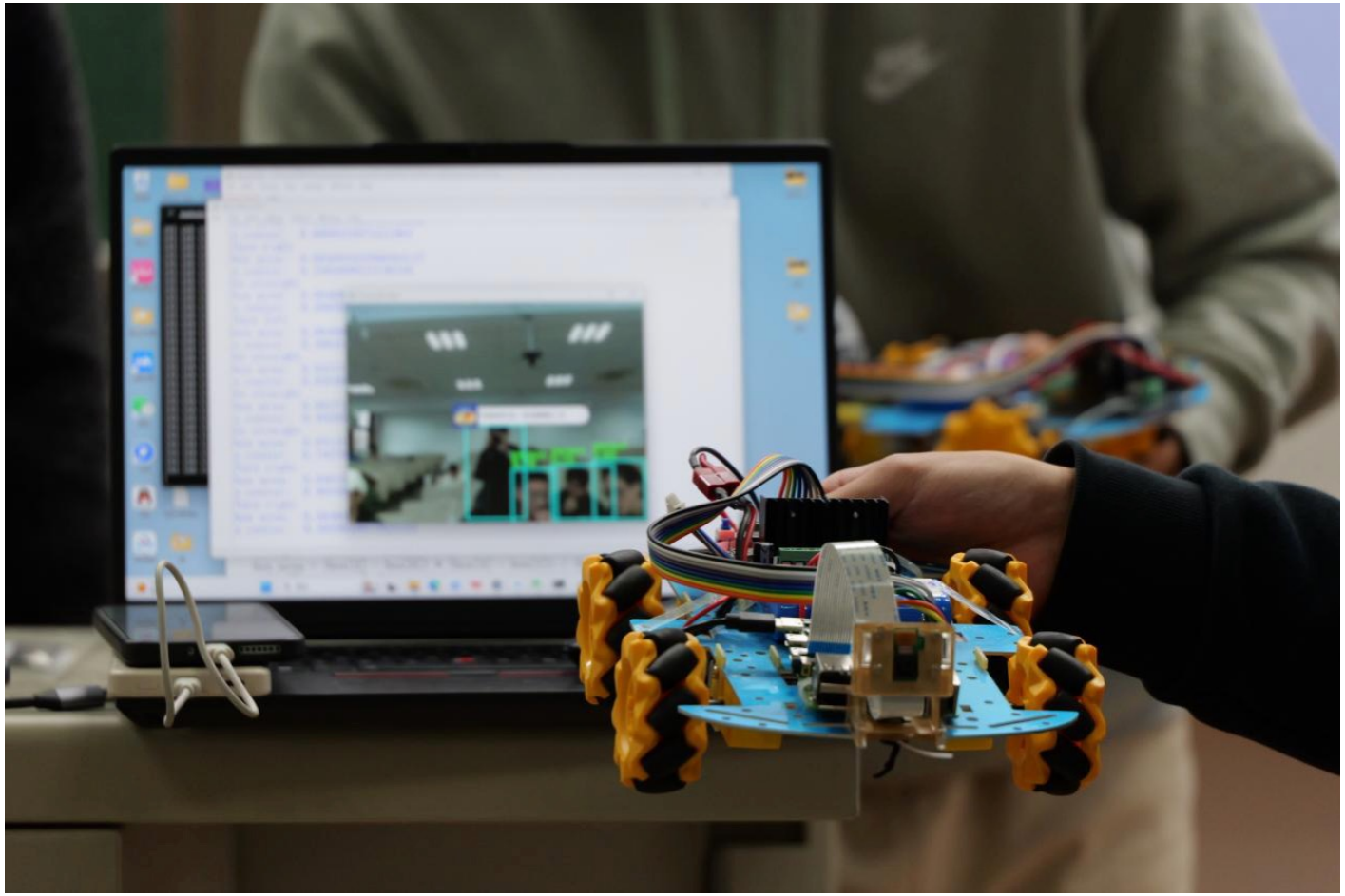
Planning



Control

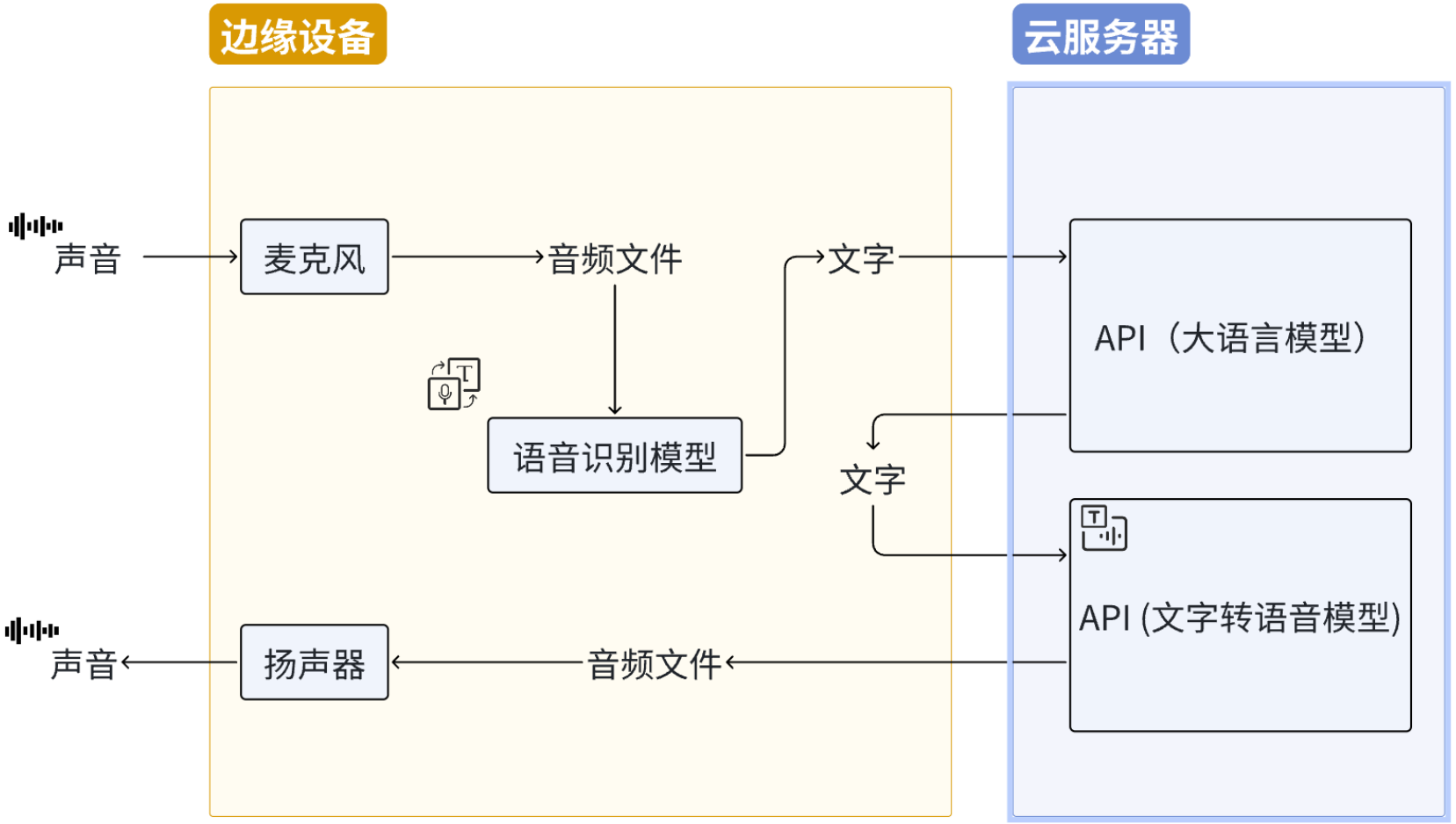
课程设计：智能小车

- 语音交互
- 视觉理解
- 机械控制



语音交互

- 音频采集与播放
- 语音识别
- 语音合成



视觉理解

- 场景识别
- 视觉问答
- 物体定位
- 深度估计

Input:“Get the white coffee cup.”



Scene Caption:“The image features a black laptop computer sitting on a black table. Next to the laptop, there is a glass of water and a coffee cup.”

Visual Question Answering
Question: Is the coffee cup white?
Answer: Yes.

Object Segmentation:
-“where is the white coffee cup”

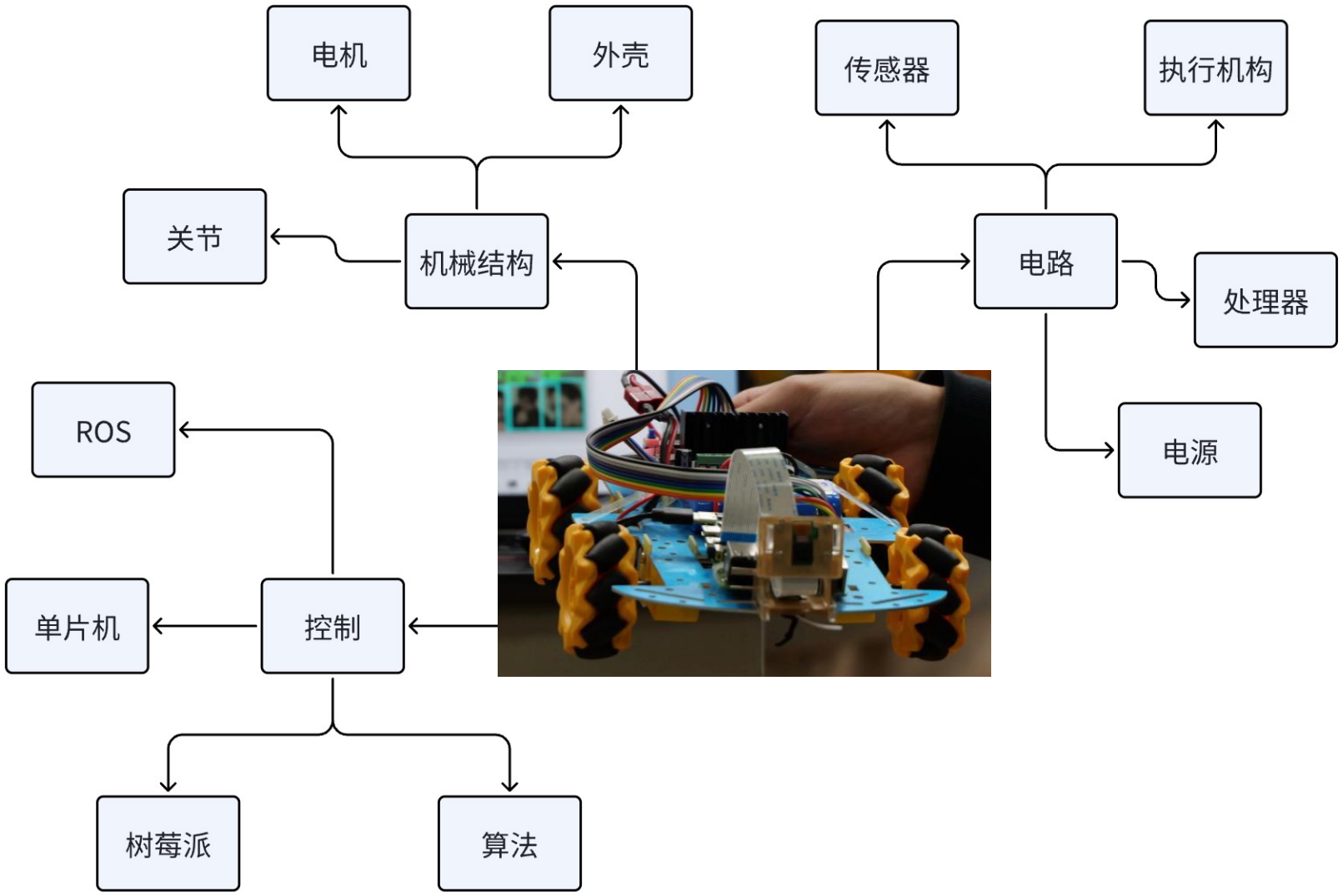


Depth Estimation: How far is it?



机械结构与控制

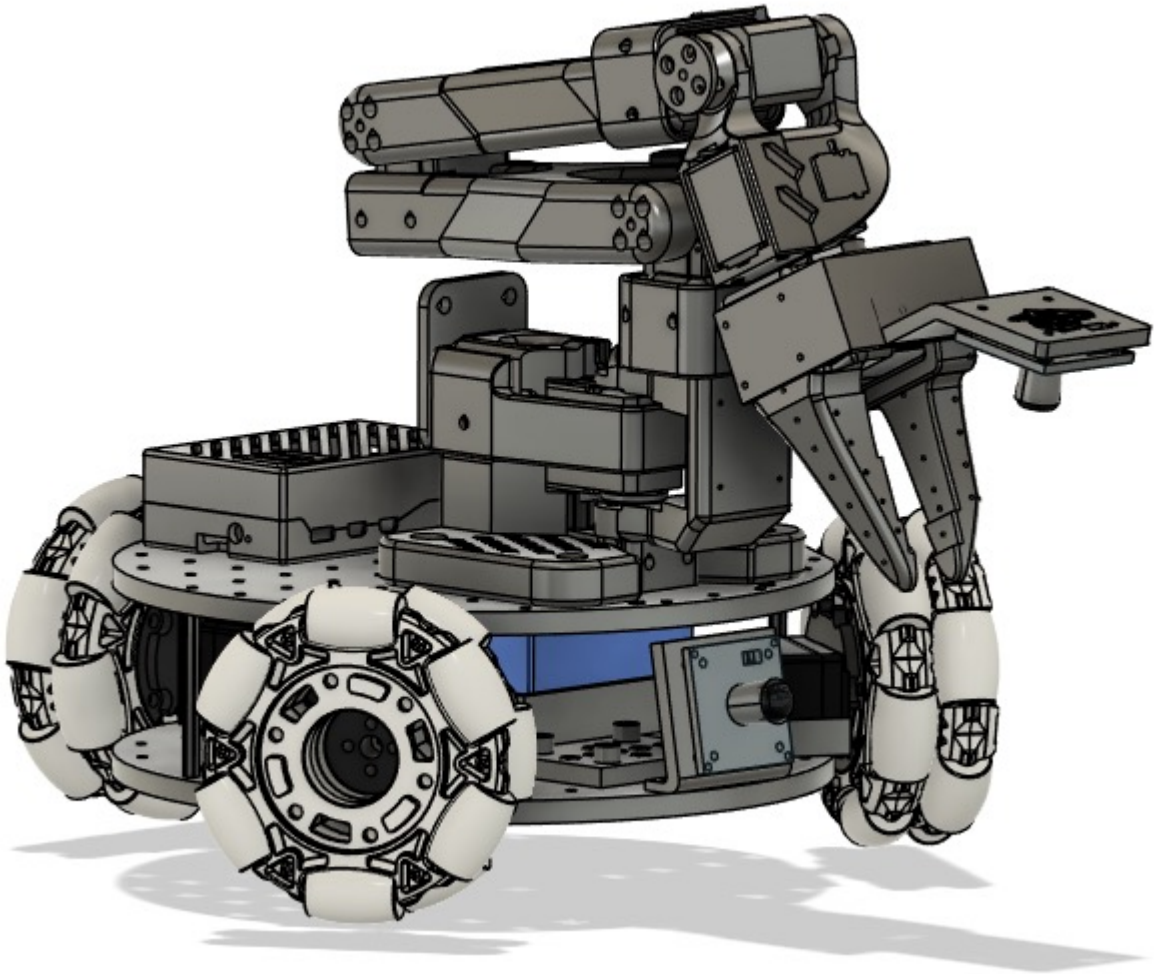
- 收集信息
- 与上位机通信
- 执行动作





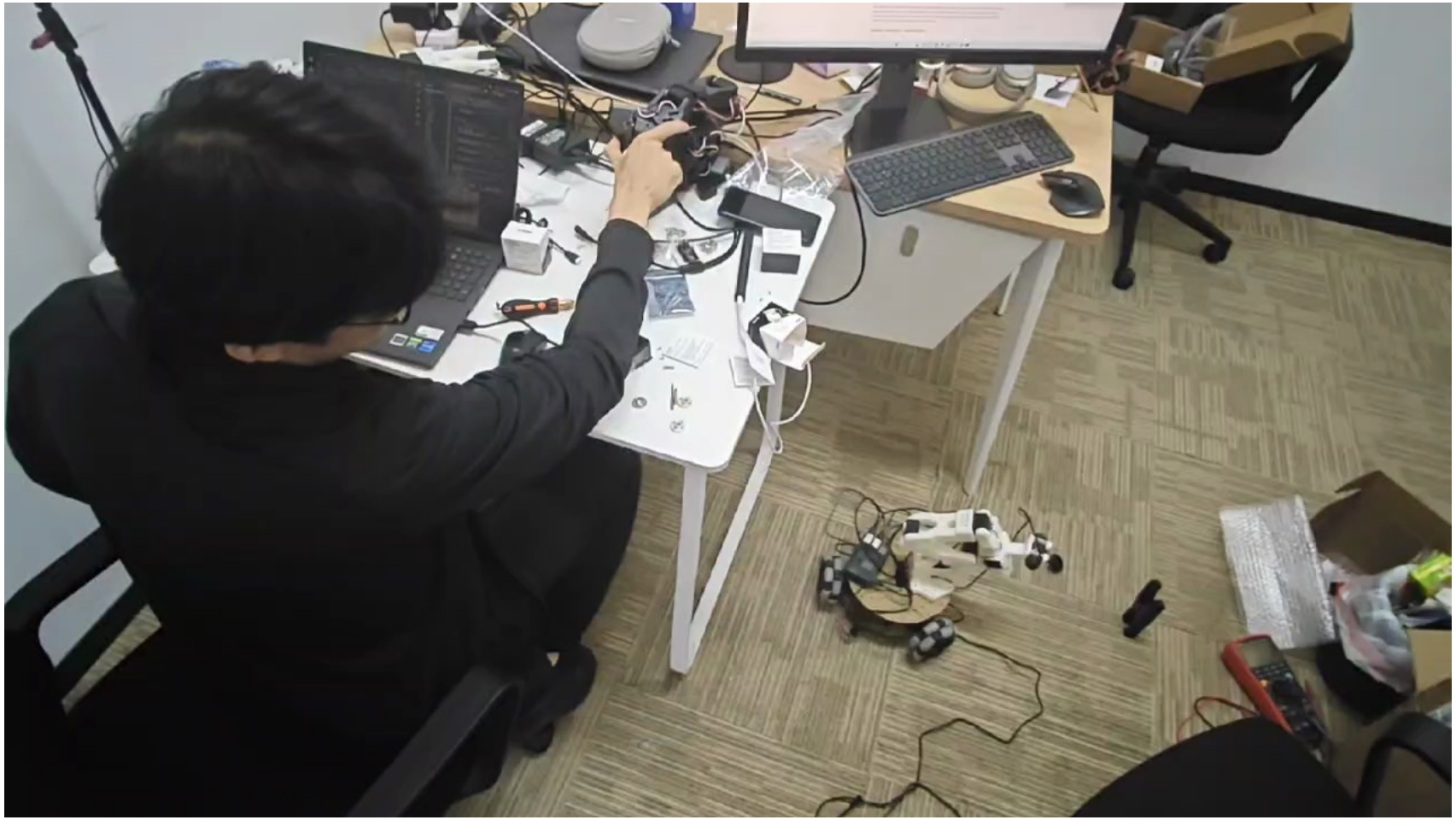
课程设计：具身智能小车 (LeKiwi)

- 机械控制
- 视觉理解
- 语音交互
- 自主抓取



机械控制

- 通过键盘按键控制底盘移动、通过主臂操控从臂；

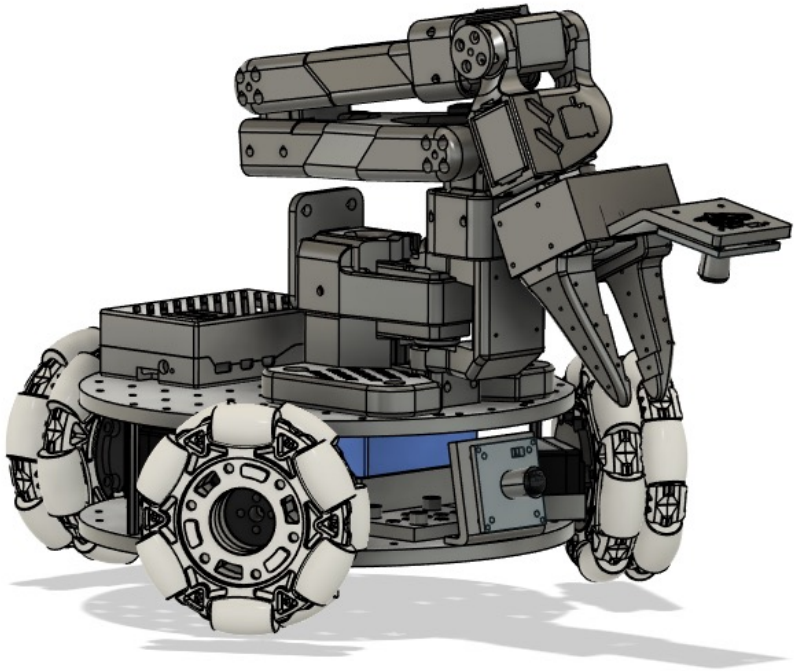


自主抓取

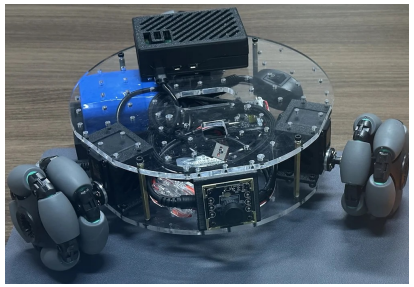
- 使用主臂收集机械臂抓取的数据，训练从臂完成自主抓取；



课程设计：具身智能小车 (LeKiwi)



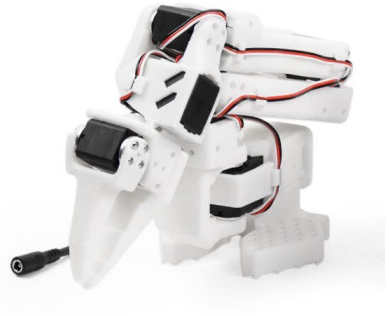
LeRobot = 软件平台（AI 框架、工具链）
SO-ARM100 = 硬件机械臂（固定在桌子上的“手”）
LeKiwi = 硬件移动机械手（有“手臂 + 轮子”的机器人）
三者关系：**LeRobot 提供大脑，SO-ARM100 和 LeKiwi 提供身体。**



底盘（树莓派+电池+摄像头）：与电脑通信，接收指令并生成控制信号，驱动轮子和从臂；



机械臂主臂：
让人通过手柄直接控制从臂，或用于训练数据采集；



机械臂从臂：
模仿主臂动作，或由算法实现自主抓取；

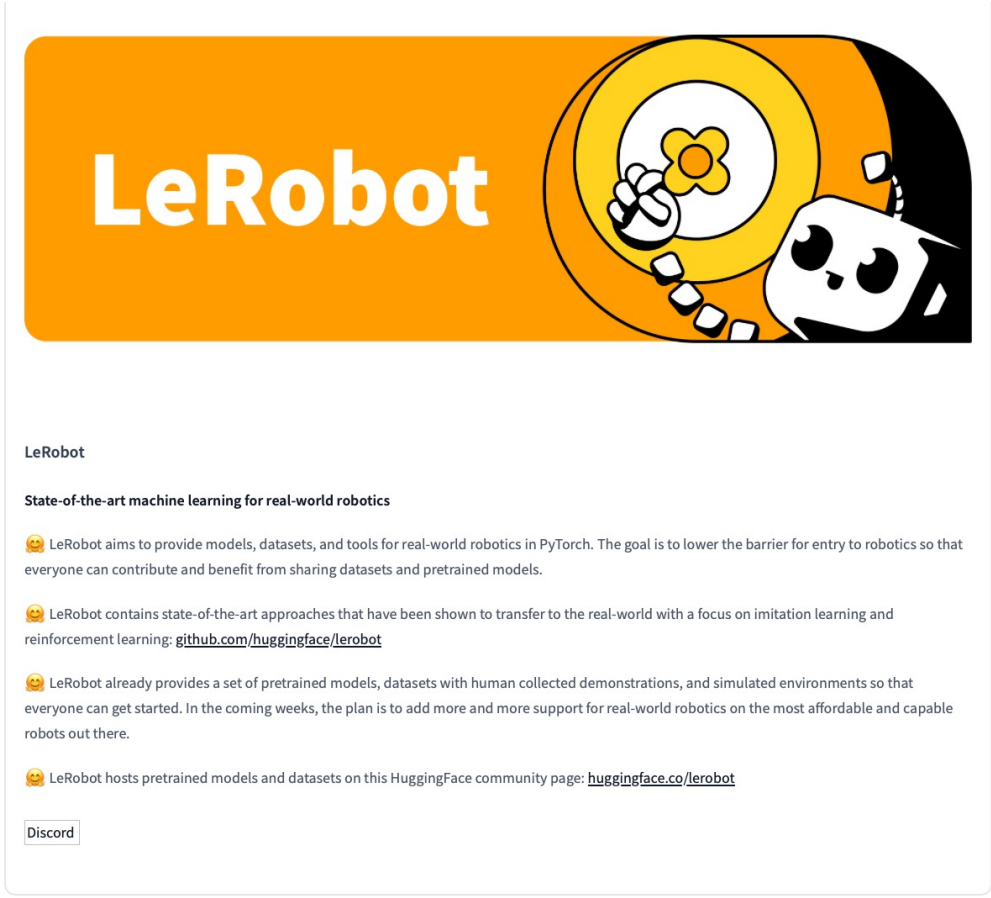
课程设计：具身智能小车 (LeKiwi)

Hugging Face 的 LeRobot 平台（软件生态）

作用：像 “机器人界的 Transformers 库” 一样，提供 数据收集、训练、推理、共享 的一整套工具。

类比：就好比 PyTorch 是深度学习的框架，LeRobot 是机器人学习的框架。

特点：依托 Hugging Face Hub，你可以上传/下载机器人数据集和模型。



课程设计：具身智能小车 (LeKiwi)

SO-ARM100

机械臂开源硬件

作用：提供一个低成本、开源的 机械臂，让学生和开发者可以自己 3D 打印、组装、学习控制。

特点：重点是“手臂”部分，用来做抓取、放置等操作。

关系：SO-ARM100 可以作为 LeRobot 的实验硬件 —— 你可以用 LeRobot 采集数据、训练模型、再控制 SO-ARM100 去执行动作。



课程设计：具身智能小车 (LeKiwi)

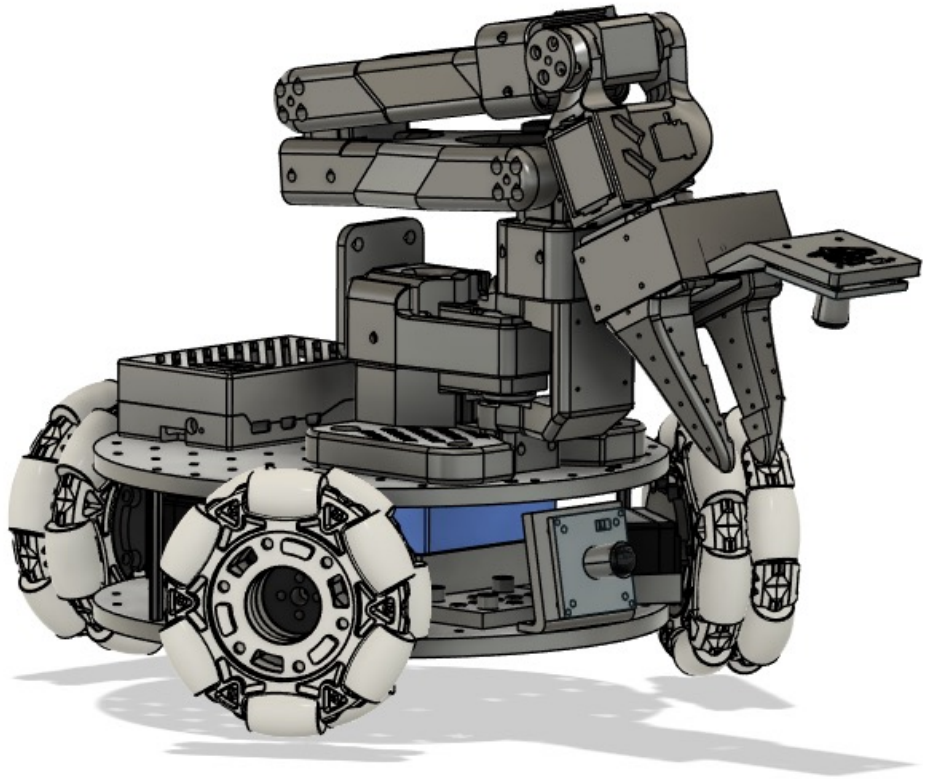
LeKiwi

移动机械手硬件平台

组成：SO-ARM101（机械臂） + Kiwi 全向轮底盘（会移动）。

作用：不仅能抓东西，还能自己移动到目标位置。

关系：LeKiwi 也是完全兼容 LeRobot 平台的，可以直接用 LeRobot 来做数据收集、模仿学习和训练。





具身智能引论

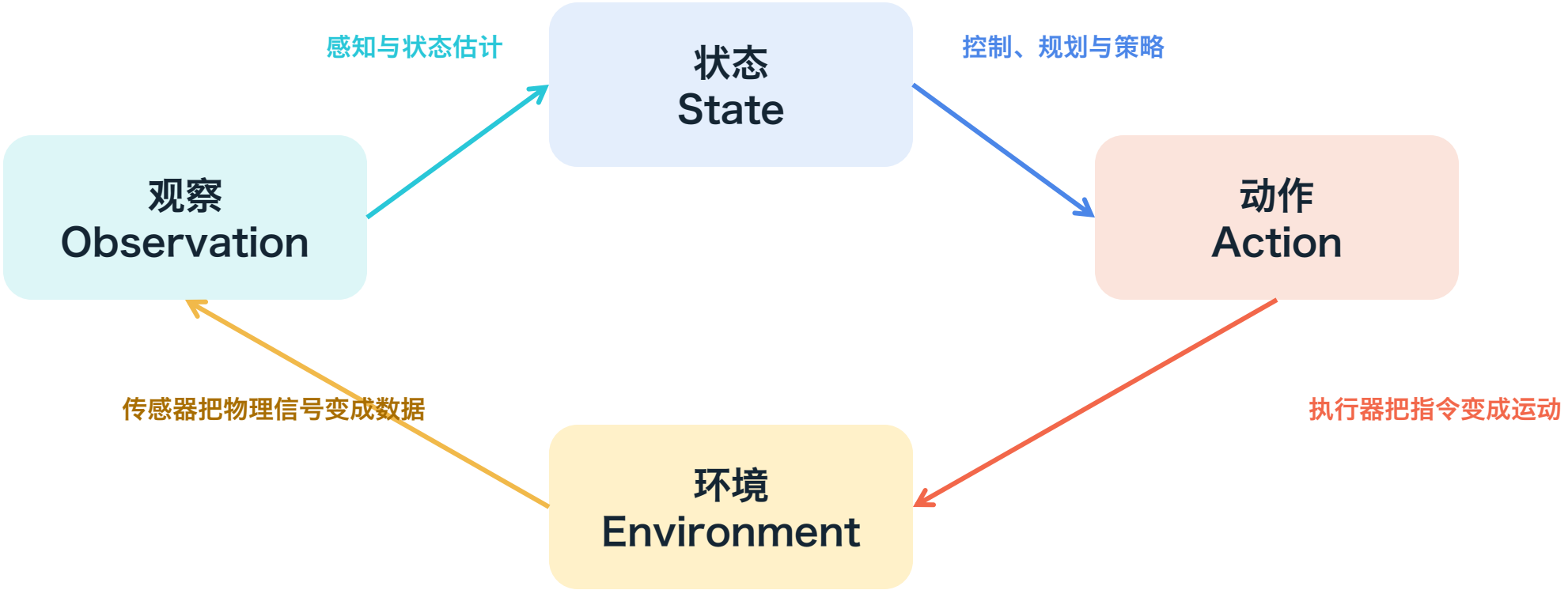
前 8 周课程概览

从一个能动的关节，到一个能看、能听、能与环境交互的桌面机器人



我们一起用8周时间回答一个问题

机器人如何获得输入、形成状态、采取动作，并再次改变环境?



一套平台，逐层打通三个层次

SO-ARM 101、摄像头和电脑贯穿全部实验

01 **物理层** 舵机、电机、机械结构、相机

02 **系统层** 通信、操作系统、坐标系与控制

03 **智能层** 机器学习、大模型、Agent 与多模态交互

每周 3 × 45 分钟 讲清概念 现场实验 形成可复现产出

01

认识完整系统

Python · Git · AI 辅助工程

本周核心问题

一个具身智能系统由哪些部分组成？它们如何形成闭环？

理解

用观察、状态、动作和环境描述机器人系统，并掌握后续实验需要的最小开发工具。

课堂实践

拆解教师 Demo；建立 Python 项目与 Git 仓库；审查一段由 Coding Agent 生成的舵机控制代码。

Agentic Coding

如何利用Agentic Coding辅助实现系统搭建。

本周在闭环中的位置

观察 Observation › 状态 State › 动作 Action › 环境 Environment

02

让一个关节安全地动起来

Actuator · Servo · PID · Bus

本周核心问题

软件中的目标位置，怎样变成真实世界中的运动和力？

理解

看懂舵机中的电机、减速器、编码器和控制器，理解 PID 与串行总线的作用。

课堂实践

拆解舵机；观察通信与驱动信号；读取位置、电流和温度；控制一个再控制多个关节。

阶段产出

完成机械臂组装与舵机配置，写出读取全部关节并安全回到初始位的脚本。

本周在闭环中的位置

观察 Observation › 状态 State › **动作 Action** › **环境 Environment**

03

电脑如何连接真实世界

Computer · OS · I/O · LeRobot

本周核心问题

光线和关节状态，如何穿过硬件与操作系统，变成 Python 能读取的数据？

理解

理解 USB、串行通信、驱动、进程与库如何共同提供稳定的机器人输入输出。

课堂实践

测量摄像头分辨率、帧率与延迟；观察缓冲和掉帧；用 LeRobot 同时读取相机与关节状态。

阶段产出

完成 observation loop，记录相机 FPS 与循环频率，并画出相机链路和舵机链路。

本周在闭环中的位置

观察 Observation › 状态 State › 动作 Action › 环境 Environment

04

几何与控制形成第一个闭环

Coordinate System · FK · IK · Visual Servoing

本周核心问题

机器人知道每个关节角以后，怎样知道手在哪里，并移动到目标位置？

理解

建立坐标系、正运动学、逆运动学、雅可比矩阵、工作空间和奇异点的直觉。

课堂实践

计算末端位置；控制末端沿笛卡尔方向移动；用颜色目标完成简单视觉伺服。

阶段产出

一个真实闭环：检测目标、计算图像误差、控制机械臂，并绘制误差随时间的变化。

本周在闭环中的位置

观察 Observation › 状态 State › 动作 Action › 环境 Environment

05

让数据替代部分手写规则

Machine Learning · Deep Learning · Policy

本周核心问题

感知与控制中的映射，哪些可以从数据中学习?

理解

理解数据、标签、模型、损失、训练测试划分、泛化与过拟合，并区分模块化学习和端到端策略。

课堂实践

训练图像到目标位置的小模型；比较手写视觉、学习视觉和简单行为克隆策略。

阶段产出

替换 Week 4 的一个手写模块，在真实机械臂闭环中报告测试误差与失败案例。

本周在闭环中的位置

观察 Observation › 状态 State › 动作 Action › 环境 Environment

06

大模型负责高层理解与组织

Foundation Model · VLM · Agent · Skill

本周核心问题

面对语言、多模态输入和复杂任务，机器人如何选择并组合已有技能？

理解

理解基础模型、视觉语言模型、工具、技能、记忆与 Agent 循环，以及分层控制的必要性。

课堂实践

让 VLM 理解相机场景；为机械臂定义技能；让 Agent 根据语言指令选择安全动作。

阶段产出

一个最小 robot Agent，包含语言输入、至少三个技能，以及动作白名单或关节限位。

本周在闭环中的位置

观察 Observation › 状态 State › 动作 Action › 环境 Environment

07

视觉交互机器人课堂任务

System Design · Integration · Debug

本周核心问题

如何把相机、感知、几何与控制组合成一个可验证的视觉任务?

理解

把系统拆成明确接口，并用真实失败定位感知误差、延迟、工作空间和分布外输入问题。

课堂实践

小组设计并实现寻找、指向、靠近或抓取指定物体的系统，现场 Demo 和复盘。

阶段产出

完整代码、视频、系统流程图、量化指标，以及一份说明原因和改进方向的失败分析。

本周在闭环中的位置

观察 Observation › 状态 State › 动作 Action › 环境 Environment

08

Mini-JARVIS 与期末项目启动

Speech · Multimodal Agent · 3D Printing

本周核心问题

机器人怎样听懂语言、结合视觉，并通过可复用技能完成真实交互？

理解

连接语音识别、视觉、Agent 和机器人技能，并了解项目所需的最小 3D 设计与打印流程。

课堂实践

构建桌面智能伙伴；完成语音或多模态任务；发布 Desktop JARVIS 期末项目。

阶段产出

期末项目提案，明确观察、状态、动作、算法、技能、3D 打印需求和可量化成功标准。

本周在闭环中的位置

观察 Observation › 状态 State › 动作 Action › 环境 Environment

八周之后，你将能解释并构建一个完整闭环

每一周都留下一个可运行、可测量、可复现的增量

1 - 3

连接世界

硬件、通信、相机与开发工作流

4

闭合回路

几何、控制与视觉反馈

5 - 6

加入学习

学习模型、基础模型与 Agent

7 - 8

完成交互

视觉任务、Mini-JARVIS 与项目提案

最终方向

Desktop JARVIS：能感知、能理解，并通过真实反馈与用户和环境交互

具身智能引论

后 8 周课程概览

从一个能看、能听、能与环境交互的机器人到智能系统。



9 3D 感知与状态估计

3D Perception · State Estimation

01 任务定义

机器人如何从连续、带噪声的传感器数据中，估计自身位姿并维护可用于行动的三维世界状态？

输入：相机、激光雷达、IMU 与轮速计的历史观测
输出：机器人位姿、三维几何、运动物体及其不确定性

02 根本困难

1. **观测不完整** — 遮挡和有限视场意味着单帧只看到世界的一部分。
2. **对应关系不确定** — 系统必须判断两次观测中的点或物体是否来自同一实体。
3. **误差会积累** — 每一步很小的位姿误差会逐渐扭曲地图，动态物体还会破坏静态假设。

03 技术路线

1. **几何重建** — 深度、立体视觉、点云
2. **里程计与 SLAM** — 同时估计运动与地图
3. **多传感器融合** — 结合视觉、激光与惯性
4. **语义与动态状态** — 追踪物体、可通行区和不确定性

本周边界：感知的结果不是一张图片，而是供预测、规划和控制共同使用的状态估计。

9 LOAM：把实时运动估计与精细建图分开

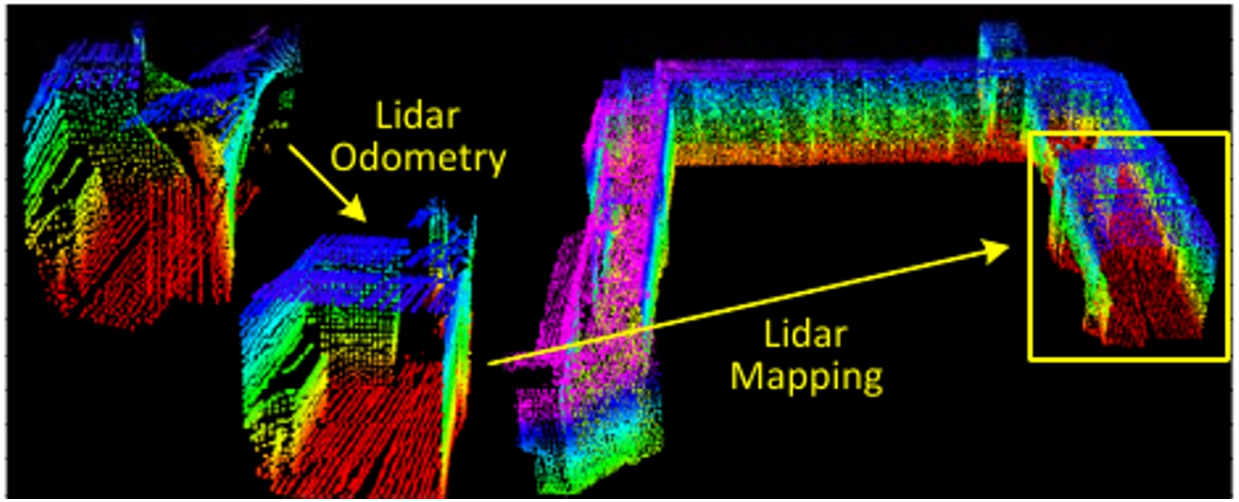
Zhang & Singh · RSS 2014

01 输入与输出

输入：一圈扫描期间连续到达的激光点
输出：6 自由度位姿 T 与累计三维地图

02 关键困难

扫描一圈时传感器仍在运动，同一帧点云已经发生形变。若位姿估计不准，新点云就无法与旧地图对齐。



03 两级优化

提取特征
尖锐边缘 + 平坦表面

→

高频里程计
点到线 / 点到面

→

低频建图
新点云对齐局部地图

→

位姿 + 地图

边缘残差：点到匹配直线的距离　　**平面残差：点到匹配平面的距离**

优化目标：调整当前位姿 T，使全部几何残差的平方和最小

方法边界　LOAM 没有回环检测。它降低局部漂移，但长时间运行后仍可能产生全局误差。

10 视觉、VLM 与世界模型

Vision · VLMs · World Models

01 任务定义

机器人如何从“识别当前画面”进一步走向“预测某个动作将怎样改变世界”？

输入：图像、语言指令、机器人状态与候选动作
输出：物体和关系的语义解释，以及动作条件下的未来状态分布

02 根本困难

1. **语义不等于物理** — 知道“这是玻璃杯”不代表知道推动它是否会倾倒。
2. **未来存在多种可能** — 接触、摩擦和人的行为都带来随机性，单一预测可能误导决策。
3. **长时预测会漂移** — 模型每一步的小误差会进入下一步，滚动预测越长越不可靠。

03 技术路线

1. **视觉识别** — 物体、属性和关系
2. **视觉语言模型** — 开放词汇理解与问答
3. **动作条件世界模型** — 预测做完动作后的状态
4. **基于模型的规划** — 比较候选未来并滚动重算

本周边界：VLM 主要解释“现在是什么”，世界模型必须回答“做了以后会怎样”。

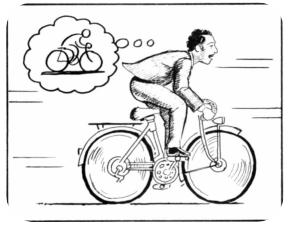
10 World Models：先学习可预测的内部世界

Ha & Schmidhuber · 2018

经典方法

01 问题形式

给定当前图像 x_t 和动作 a_t，学习下一时刻的内部状态分布，再用预测结果选择动作。



02 三个可单独训练的模块

V：视觉编码器
x_t 压缩为 z_t

→

M：记忆模型
预测 $p(z_{t+1} \mid z_t, a_t, h_t)$

→

C：小控制器
$a_t = C(z_t, h_t)$

→

环境或模型
产生下一状态

03 训练顺序

① 用采集到的图像训练 V，把高维画面压缩成潜变量 z。
② 用动作序列训练 M，学习潜变量怎样随时间变化。
③ 固定 V 和 M，只训练参数很少的 C，使累计回报最大。

为什么能在“梦境”中训练？

M 可以生成动作条件下的预测轨迹。控制器在这些轨迹中试错，再回到真实环境测试。风险是策略可能利用模型的预测漏洞。

方法边界 论文主要在游戏环境验证。潜变量预测并不自动保留真实机器人需要的接触、几何和安全信息。

11 语言、语音与多模态交互

Language · Speech · Grounding

01 任务定义

机器人如何把人的语言映射到当前场景中的具体对象、空间关系和可执行技能?

输入：语音或文字、当前图像、场景状态和技能库
输出：消除歧义后的目标对象、动作约束与下一项可执行技能

02 根本困难

1. **指代依赖现场** — “把那个杯子拿来”只有结合视线、位置和历史对话才有含义。
2. **合理不代表可行** — 语言模型可能提出正确步骤，但机器人未必够得到或做得稳。
3. **歧义需要显式处理** — 系统要能发现多个候选解释，并在风险较高时向人澄清。

03 技术路线

1. **语音识别与意图** — 把声音转成任务意图
2. **多模态指代消解** — 把词语对齐到对象和区域
3. **技能落地** — 用可供性和约束筛选动作
4. **VLA 与交互闭环** — 联合理解、执行和确认

本周边界：语言提供任务语义，物理可行性必须由当前机器人和环境来验证。

11 SayCan：语言建议必须通过物理可行性检查

Ahn et al. · 2022

经典方法

01 任务

指令：“饮料洒了，请帮我处理。”
技能库：寻找物体、移动、抓取、放置等已训练技能



02 同一个候选技能获得两个分数

Say：语言相关性
pLM(技能 | 指令, 历史)

→

Can：执行成功率
V技能(当前状态)

→

联合得分
Say × Can

→

选最高分
执行后再观察

03 一次决策怎样发生

候选技能	语言判断	机器人经验	结果
拿海绵	与清理相关	能到达并抓取	**优先执行**
使用吸尘器	语言上似乎相关	不适合当前液体	联合得分降低
说声抱歉	语义相关	不能改变环境	不会完成任务

方法边界 SayCan 只能在预先训练好的有限技能库中选择。它解决高层技能排序，不直接生成连续电机控制。

12 具身推理、记忆与智能体

Embodied Reasoning · Memory · Agents

01 任务定义

机器人如何把一个高层目标变成可执行步骤，并根据行动结果持续修正计划？

输入：目标、当前状态、历史轨迹、可调用工具和技能
输出：下一步动作，以及失败后更新的子目标与计划

02 根本困难

1. **任务跨越很长时间** — 长期目标必须分成短步骤，同时保留尚未完成的子目标。
2. **记忆不只是聊天记录** — 系统需要区分事实、过去动作、失败原因和仍然有效的计划。
3. **推理必须接受验证** — 语言上顺畅的计划仍可能违反几何、资源或安全约束。

03 技术路线

1. **符号规划**
   前置条件和效果明确
2. **分层任务与行为树**
   把长期任务拆成可复用技能
3. **LLM 工具智能体**
   用语言选择工具并读取反馈
4. **具身验证智能体**
   让几何、安全与执行结果约束推理

本周边界：智能体的核心不是生成一份长计划，而是维护目标并在反馈中选择下一步。

12 ReAct：让推理与环境反馈交替进行

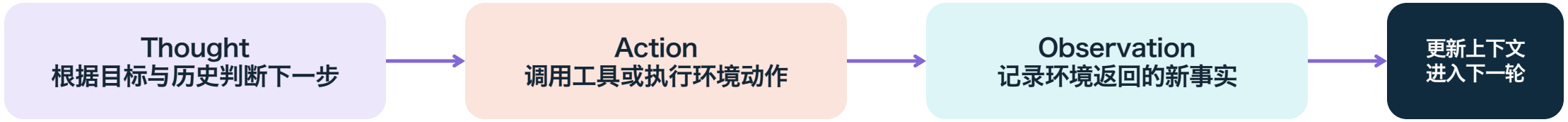
Yao et al. · ICLR 2023

经典方法

01 固定计划为什么失败

环境具有部分可观测性。智能体执行动作后才会获得新信息，因此计划必须允许中途更新。

02 轨迹结构



下一轮条件：目标 + 过去的 Thought / Action / Observation

03 最小执行例

目标	**找到杯子并放入水槽**
第 1 轮	Thought：杯子通常在厨房　Action：搜索厨房　Observation：未找到
第 2 轮	**Thought：根据新观察改查餐桌　Action：搜索餐桌　Observation：发现杯子**

方法边界　ReAct 原论文主要验证问答和文本化环境。把上下文写进提示词，不等于解决机器人长期记忆与安全验证。

13 运动规划与操作

Motion Planning · Manipulation

01 任务定义

机器人如何在关节、碰撞、接触和任务约束下，找到能够真实执行的动作序列？

输入：起始状态、目标、机器人模型、障碍物和接触约束
输出：无碰撞路径、带时间的轨迹，以及抓取或放置方式

02 根本困难

1. **搜索空间维度很高** — 七轴机械臂的一个点包含七个关节角，不能逐点穷举。
2. **狭窄通道难发现** — 门缝、桌边和夹爪接近方向只允许很少的可行姿态。
3. **接触改变问题性质** — 抓取后物体成为机器人系统的一部分，碰撞和动力学都随之变化。

03 技术路线

1. **图搜索与势场** — 在低维空间寻找路径
2. **采样规划** — RRT、PRM 探索高维空间
3. **轨迹优化** — 直接优化平滑度、距离和约束
4. **TAMP 与学习引导** — 联合选择任务步骤、抓取和运动

本周边界：目标位姿只是终点，规划必须给出整条机器人都安全可达的过程。

13 RRT-Connect：从起点和终点同时探索配置空间

Kuffner & LaValle · ICRA 2000

经典方法

01 规划空间

一个配置 $q = [q_1,\cdots,q_n]$ 记录全部关节角。
目标是在无碰撞区域 Cfree 中找到从 qstart 到 qgoal 的连续路径。

02 双树搜索



03 每轮计算

采样 qrand → 最近节点 qnear → 朝采样方向延伸一步 → 碰撞检测 → 另一棵树主动尝试连接；随后交换两棵树。

方法边界 算法保证有机会找到可行路径，但不保证最短，也没有自动满足速度、力矩和接触动力学。

14 动力学与基于模型的控制

Dynamics · Feedback · MPC

01 任务定义

机器人如何把期望轨迹变成实时电机命令，并在模型误差和外部扰动下保持稳定？

输入：期望状态、当前状态、动力学模型和执行器约束
输出：下一时刻的力、力矩或速度命令

02 根本困难

1. **真实动力学不完全已知** — 摩擦、负载和柔性会变化，离线模型永远不可能完全准确。
2. **接触带来突变** — 脚落地、物体碰撞和抓取滑动会让受力瞬间改变。
3. **反馈存在延迟和限制** — 传感、计算和执行都需要时间，电机输出还有上限。

03 技术路线

1. **PID 与局部反馈** — 用当前误差立即修正
2. **状态空间与最优控制** — 使用动力学计算控制律
3. **模型预测控制** — 在约束下反复优化短期未来
4. **模型加学习修正** — 学习残差，同时保留稳定与安全约束

本周边界：规划给出理想运动，控制利用实时反馈让真实机器人尽量跟上它。

14 Cheetah 3 Convex MPC：滚动优化足端力

Di Carlo et al. · IROS 2018

经典方法

01 控制变量

状态 x：机身位置、姿态与速度
决策 u：未来每个接触脚的地面反作用力
目标：跟踪期望运动，同时减少过大的控制力

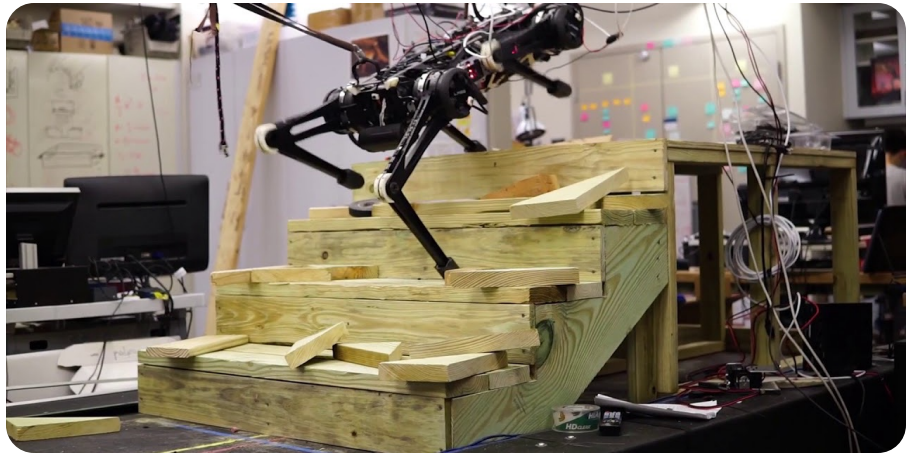
02 有限时域优化

最小化 Σ 状态跟踪误差 + 控制力代价

约束：简化机身动力学、接触时序、摩擦锥、法向力范围

论文中的实时性

预测最长约 0.5 秒；优化在 1 ms 内求解；控制器以 20 - 30 Hz 重算地面反作用力。



03 滚动时域



读取新状态后，整个优化再次求解

方法边界 控制器依赖可靠的状态估计、简化动力学和预先给定的接触模式。模型或接触判断错误仍会导致失败。

15 机器人学习

Imitation · Reinforcement · Offline Learning

01 任务定义

机器人如何从示范和试错中获得行为，并把经验迁移到新物体、新环境和新身体？

输入：示范轨迹、交互数据、奖励或成功标签
输出：从观测到动作的策略，以及对新场景的泛化能力

02 根本困难

1. **真实数据昂贵** — 采集速度慢，会磨损设备；失败探索还可能损坏环境。
2. **分布变化普遍存在** — 光照、材质、相机位置或机器人身体变化都会使训练数据失效。
3. **奖励和评价难设计** — 短期成功可能牺牲安全、稳定或长期任务完成率。

03 技术路线

1. **模仿学习** — 复制专家示范
2. **强化学习** — 根据试错回报改进行为
3. **离线与自监督学习** — 复用已有数据并自动生成标签
4. **通用策略与 VLA** — 预训练后适配任务和机器人身体

本周边界：学习减少手写规则，但数据覆盖、安全探索和迁移仍决定它能否离开实验室。

15 大规模自监督抓取：闭环手眼协调

Levine et al. · 2016 / IJRR 2018

经典方法

01 学习目标

网络 $Q_\theta(I_t, a)$ 预测：看到当前图像 I_t 时，执行候选动作 a，最终抓取成功的概率。

监督信号不需人工框选物体：夹爪抬起后是否抓住物体，直接产生成功或失败标签。



02 训练数据

超过 80 万次真实抓取尝试

两个月内由 6 - 14 台机器人并行采集

03 执行时的闭环

看当前图像 I_t → 给候选动作评分 $a^* = \text{argmax}\, Q_\theta(I_t, a)$ → 移动一小步 重新拍照

循环直到闭合夹爪并抬起；新的图像可以纠正前一步造成的偏差。

关键区别：策略学习的不是一个固定抓取点，而是每次观察后下一小步该怎样移动。

方法边界 实验集中在桌面杂乱物体的二指抓取。新材质、新相机或新夹爪仍可能造成分布变化。

Multi-Agent

Hide and Seek

16 集成具身智能体与前沿问题

Integrated Embodied Agents · Safety

01 任务定义

感知、世界模型、推理、规划、控制和学习怎样组成一个可靠的长期自主系统?

输入：人的长期目标和持续变化的真实环境
输出：可解释、可恢复、满足安全约束的闭环行为

02 根本困难

1. **模块接口会丢失信息** — 上游若只传一个确定答案，下游就看不到不确定性和备选解释。
2. **不同模块运行速度不同** — 语言规划以秒计，控制以毫秒计，系统必须协调多种时间尺度。
3. **能力越强，失误代价越大** — 开放任务需要权限管理、风险判断、人类接管和故障恢复。

03 技术路线

1. **模块化机器人栈**
   每层职责明确、容易验证
2. **学习接口与共享表征**
   减少手工定义的中间符号
3. **端到端 VLA**
   直接把图像和语言映射到动作
4. **混合安全架构**
   大模型提议，世界模型和安全层验证

本周边界：真正的具身智能来自持续闭环，而不是把多个强模型简单串联。

16 RT-2：把机器人动作加入视觉语言模型的输出词表

Brohan et al. · 2023

经典方法

01 统一接口

输入：相机图像 + 自然语言指令
输出：离散动作 token，再解码为末端位移、旋转和夹爪命令

02 联合训练数据

网络图文任务
图像问答、描述、语义关系

机器人轨迹
图像、指令、动作序列

→ 同一个 VLM
共同微调



03 动作怎样变成 token

连续动作先按维度分箱，例如把 x 方向位移映射到 256 个离散区间。每个区间使用模型词表中已有的整数 token 表示。

图像 + 指令 → 生成动作 token → 解码并执行

方法边界 RT-2 的实验集中在特定桌面操作平台。语义迁移有所提升，但长期规划、精确动力学和安全仍需其他模块。

16

通用具身智能体与前沿问题

Integrated Embodied Agent · Safety · Frontier Topics

核心问题

这些模块怎样合成一个安全、自主、可持续学习的系统?

前沿问题

模块化、端到端与混合架构如何取舍？哪些知识能够跨不同机器人身体迁移?

关键认识

完整系统必须连接理解、记忆、世界模型、规划、控制与反馈，并在不确定时减速、询问或拒绝行动。

从失败开始

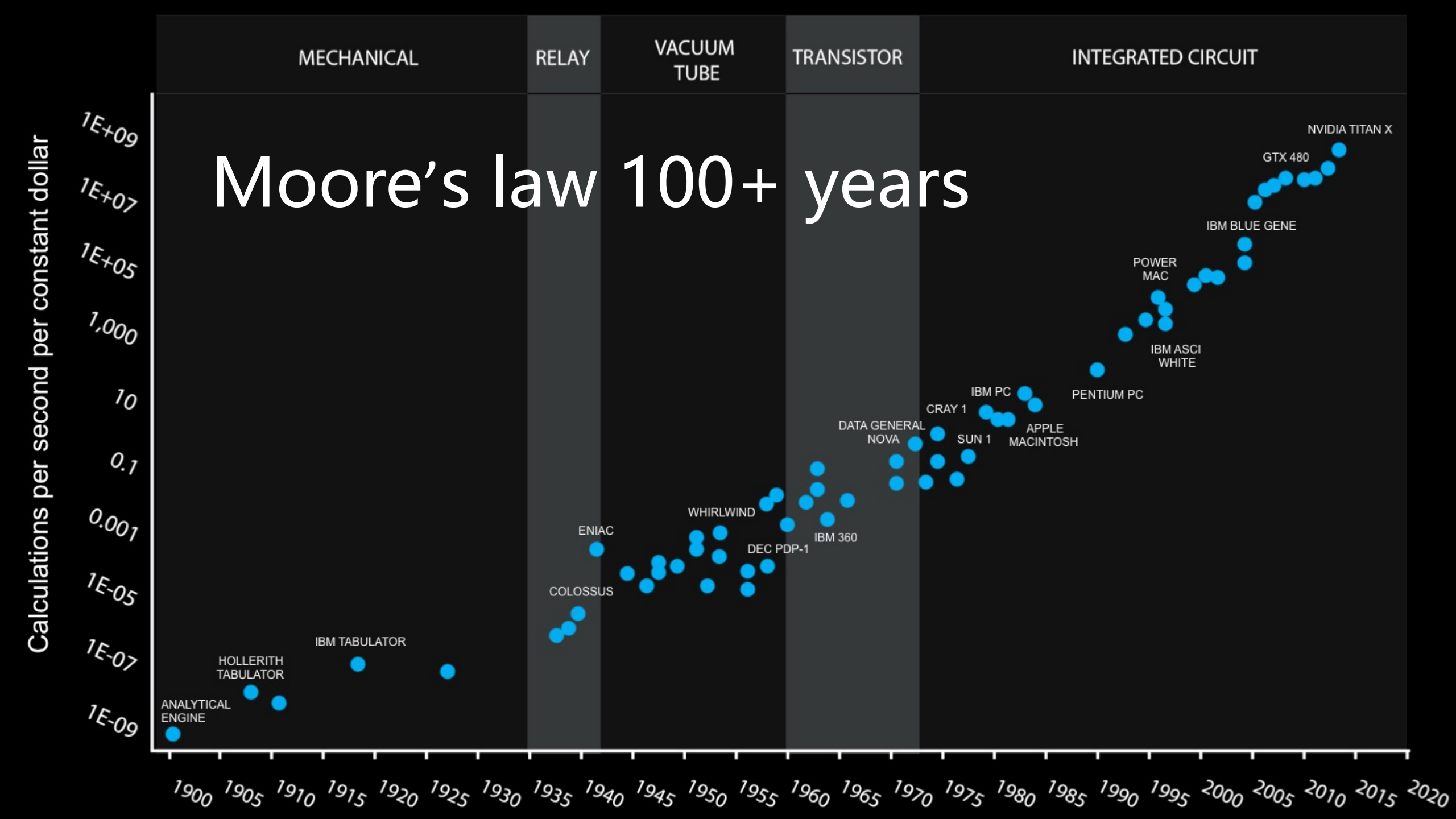
机器人寻找蓝色笔记本时遇到目标缺失。成熟系统应继续搜索、调用记忆，并在需要时向人求助。

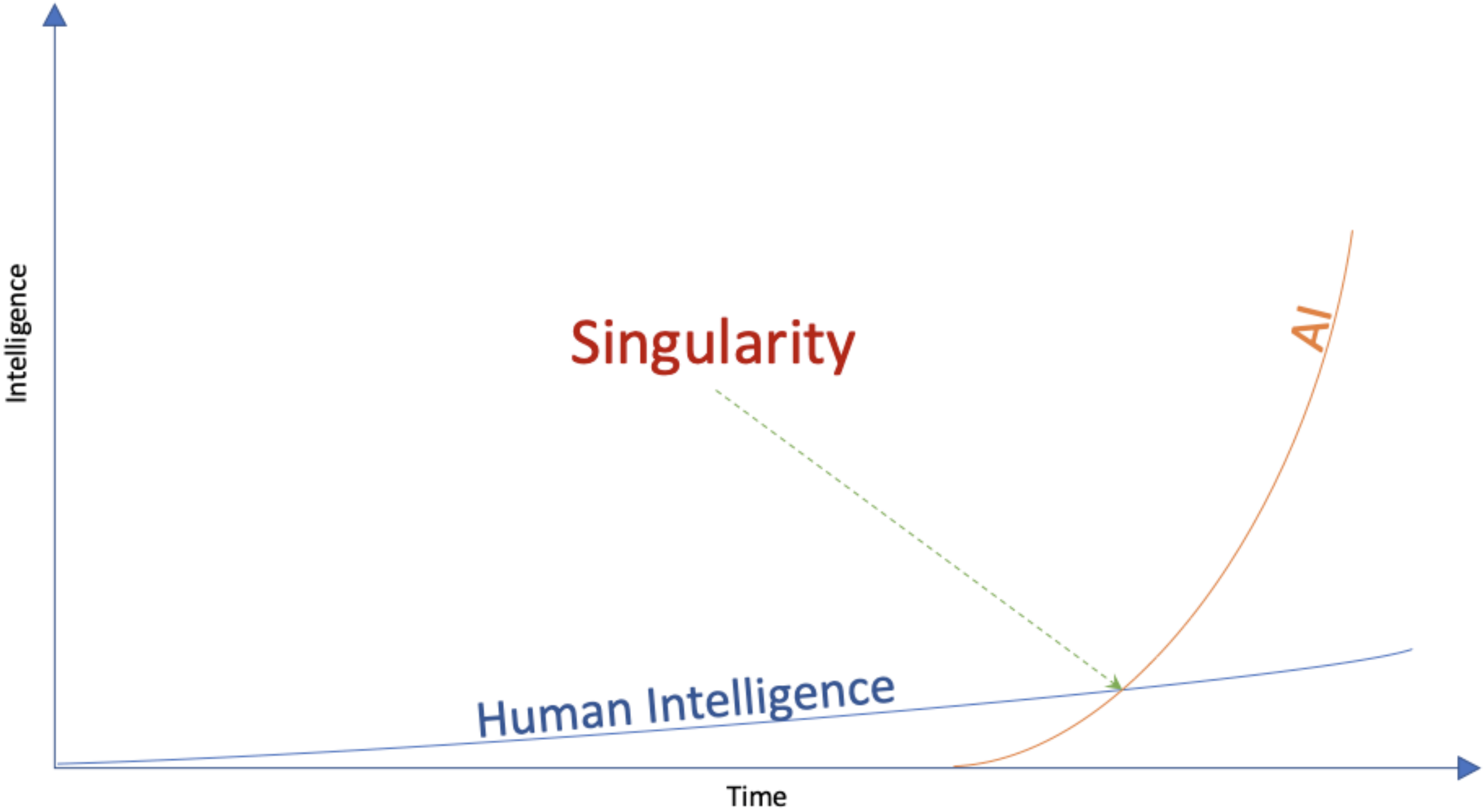
本周方法链

人类目标 → 理解与预测 → 规划与控制 → 反馈、安全、学习

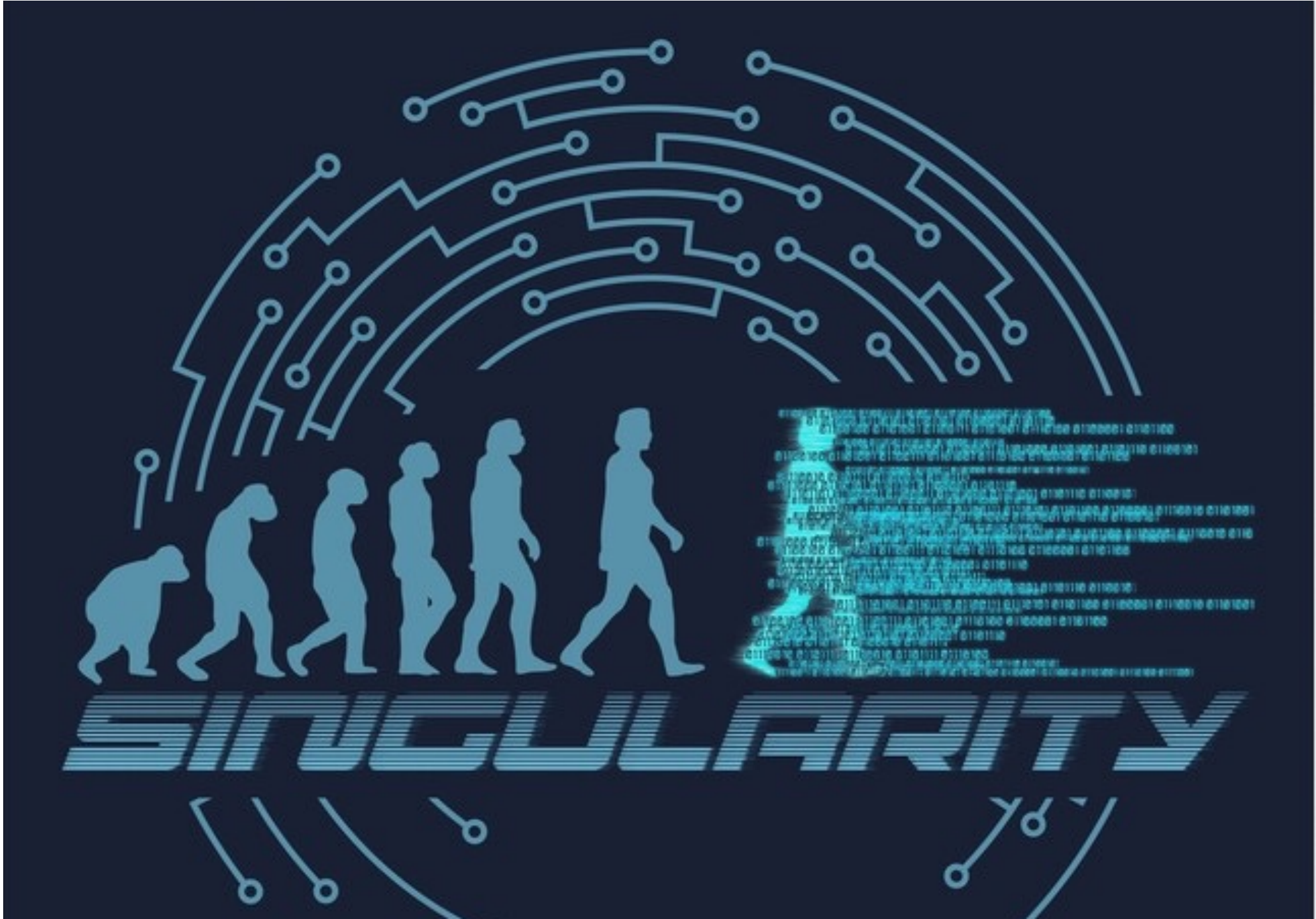
进阶主线

表征 — 预测 — 决策 — 执行 — 学习

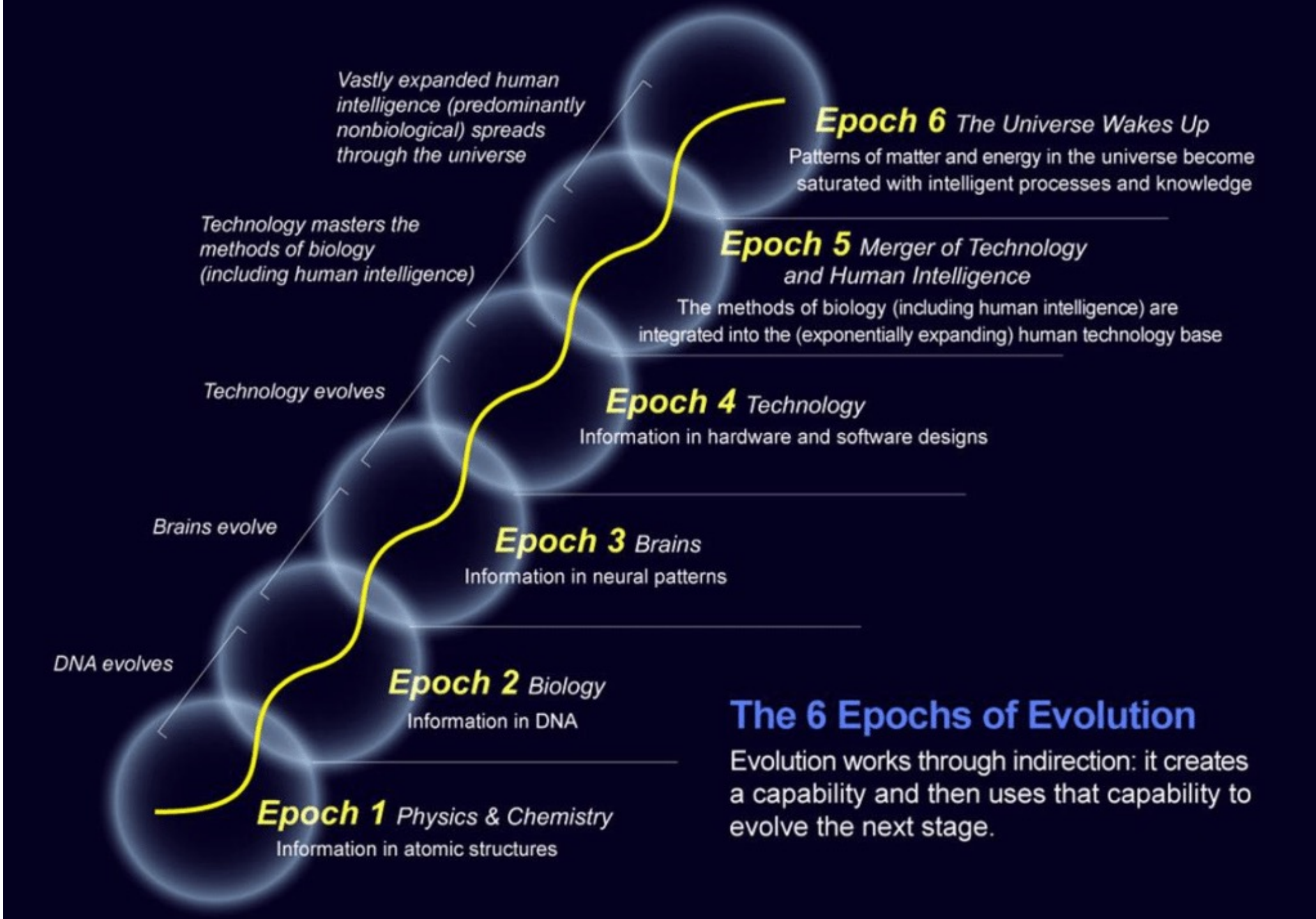

MECHANICAL
RELAY
VACUUM TUBE
TRANSISTOR
INTEGRATED CIRCUIT
Moore's law 100+ years
Calculations per second per constant dollar
1E+09
1E+07
1E+05
1,000
10
0.1
0.001
1E-05
1E-07
1E-09
NVIDIA TITAN X
GTX 480
IBM BLUE GENE
POWER MAC
IBM ASCI WHITE
PENTIUM PC
IBM PC
CRAY 1
APPLE MACINTOSH
DATA GENERAL NOVA
SUN 1
WHIRLWIND
ENIAC
IBM 360
DEC PDP-1
COLOSSUS
IBM TABULATOR
HOLLERITH TABULATOR
ANALYTICAL ENGINE
1900
1905
1910
1915
1920
1925
1930
1935
1940
1945
1950
1955
1960
1965
1970
1975
1980
1985
1990
1995
2000
2005
2010
2015
2020


Intelligence
Singularity
AI
Human Intelligence
Time

Superhuman Intelligence



Digital immortality





具身智能引论

Introduction to Embodied Intelligence

丁文超 李维 浦剑 商慧亮 尚笠 杨帆

AI通识基础课程（AIB310002）