

World Models (精简版 ~30 min)

在梦境中学习：基于世界模型的强化学习

Ha & Schmidhuber, 2018

本次分享版本说明

- 面向对象：有基本深度学习/RL 背景的工程师/研究者
- 目标：在 30 分钟内搞清楚：
 - i. World Models 想解决什么问题？
 - ii. V-M-C 架构到底在做什么？
 - iii. 核心数学：VAE (ELBO + 重参数化) 和 MDN (混合高斯)
 - iv. 训练流程和实验结论是什么？
 - v. 为什么后来需要 Dreamer？
- 与完整版的区别：省略代码实现细节和 Workshop 互动环节

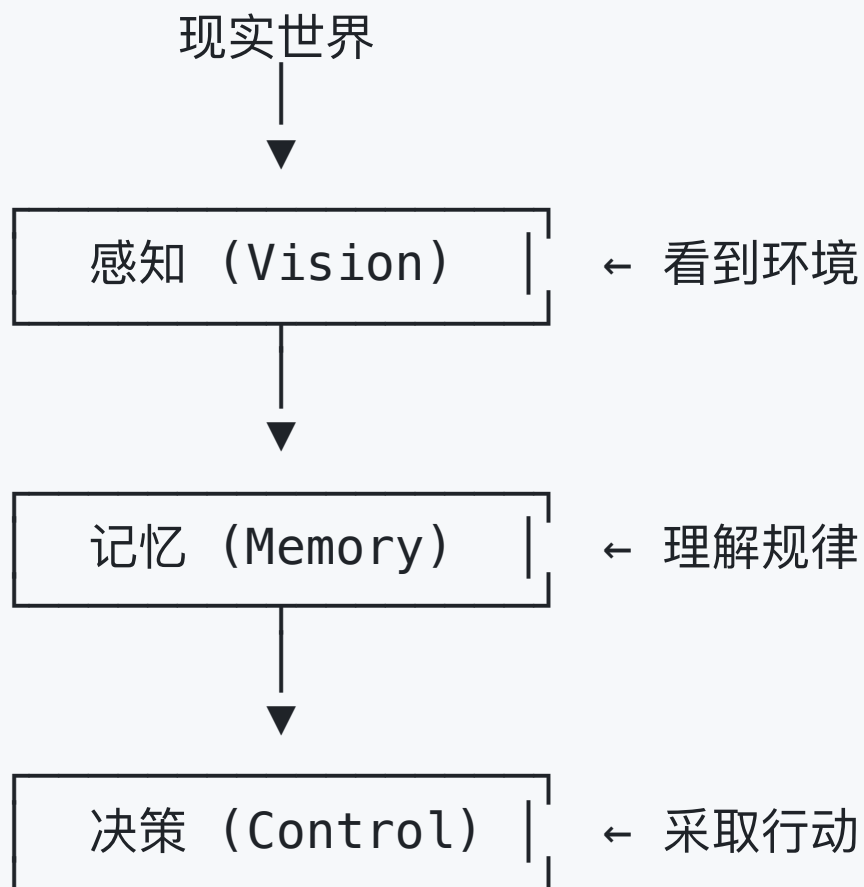
目录（精简版）

1. 动机与核心思想：Why World Models?
2. **V-M-C** 架构：感知、记忆与决策
3. 训练流程与实验结果：从数据到梦境
4. 局限与后续工作：Dreamer 及其改进
5. 总结 & Q&A

Part 1

动机与核心思想

人类如何学习？



关键洞察： 我们可以在"脑内模拟"中预演，而不必每次都真实尝试

传统 RL 的困境

问题	影响
样本效率低	需要数百万次真实交互
真实交互昂贵	机器人损耗、时间成本
探索危险	自动驾驶不能随意试错

World Models 的核心想法

学习一个环境模型，在“梦境”中训练策略

- 少量真实数据学习世界模型
- 在想象中生成大量训练数据
- 策略迁移到真实环境

World Model 的形式化

$$P(s_{t+1}, r_t \mid s_t, a_t)$$

给定当前状态和动作，预测下一状态和奖励

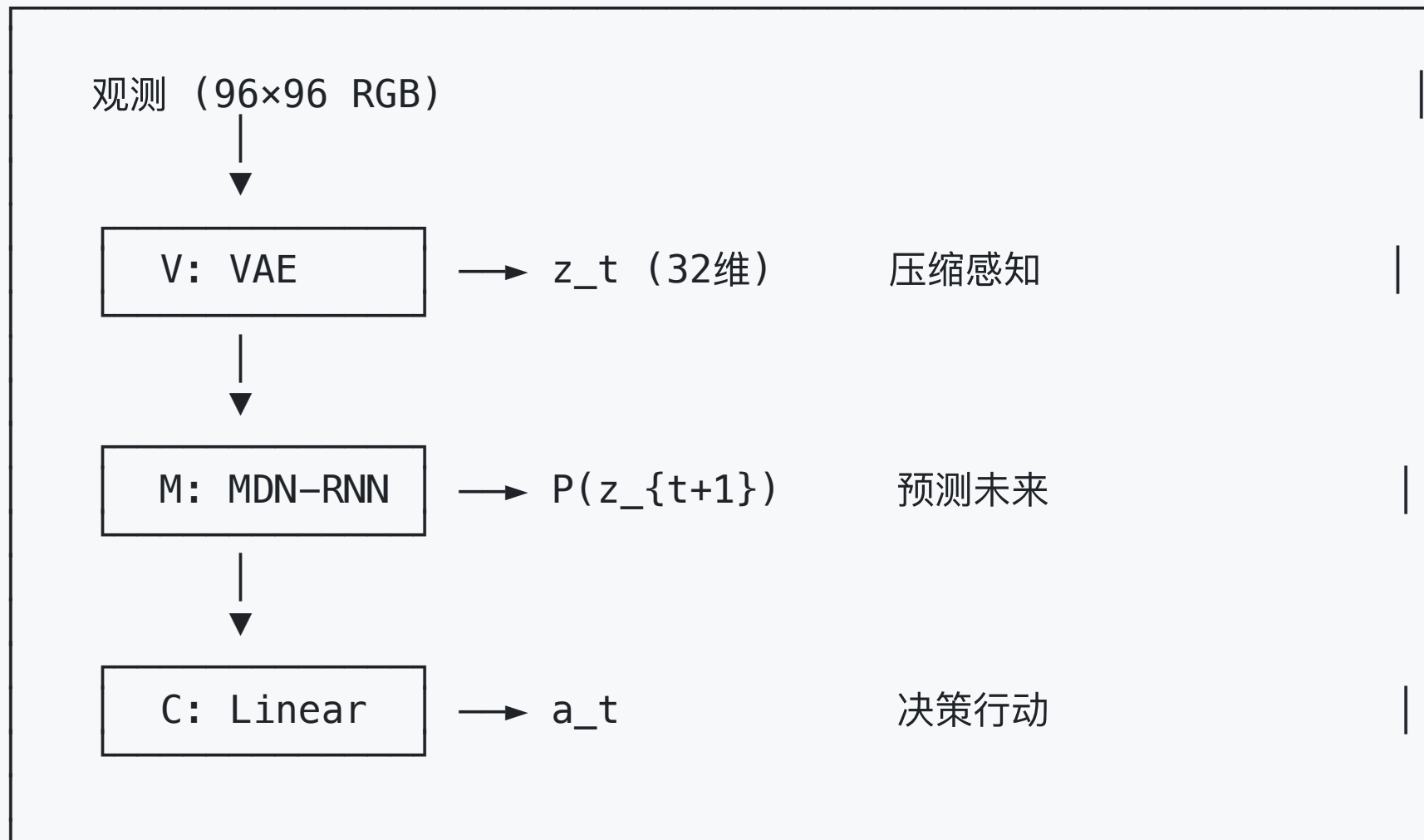
真实环境： $s_t \rightarrow [\text{环境}] \rightarrow s_{t+1}, r_t$ (昂贵)

\downarrow
世界模型： $s_t \rightarrow [\text{模型}] \rightarrow s_{t+1}, r_t$ (便宜)

Part 2

架构设计：V-M-C

三组件总体架构



V: Vision Model (VAE)

作用：将高维图像压缩到低维潜在空间

- 输入：64×64×3 图像 → 输出： $z \in \mathbb{R}^{32}$
- 压缩比约 384:1

为什么用 VAE 而不是普通 AE?

- 概率潜在空间，更规整，方便采样和插值
- 适合在 latent 空间 roll out

VAE 数学原理

损失函数 (ELBO)

$$\mathcal{L} = \underbrace{\|x - \hat{x}\|^2}_{\text{Recon}} + \beta \cdot \underbrace{D_{KL}(q(z | x) \| \mathcal{N}(0, I))}_{\text{KL}}$$

重建损失 + KL 散度正则化

重参数化技巧（关键！）

问题： $z \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ 采样操作不可微

解决： $z = \mu + \sigma \cdot \epsilon, \quad \epsilon \sim \mathcal{N}(0, 1)$

步骤	说明
$\epsilon \sim \mathcal{N}(0, 1)$	随机源（不需要梯度）
	将随机源与均值和标准差结合，生成潜变量 z

M: Memory Model (MDN-RNN)

作用：学习环境动态，预测未来潜在状态

- 输入： (z_t, a_t, h_{t-1})
- 模型： LSTM + MDN (K 个高斯混合)
- 输出： $P(z_{t+1})$ 的分布 + 终止信号 done

为什么要 MDN? 未来可能是多模态的 (T 字路口左/右转)

MDN 数学原理

混合高斯分布

$$p(z_{t+1}) = \sum_{k=1}^K \pi_k \cdot \mathcal{N}(z_{t+1} \mid \mu_k, \sigma_k^2)$$

- π_k : 混合权重, $\sum_k \pi_k = 1$ (由 softmax 保证)
- μ_k, σ_k : 第 k 个高斯的均值和标准差

损失函数 (负对数似然)

$$\mathcal{L} = -\log \sum_{k=1}^K \pi_k \cdot \mathcal{N}(z_{t+1} \mid \mu_k, \sigma_k^2)$$

MDN 图解：为什么需要多模态



单一高斯: $\mu = (\mu_1 + \mu_2) / 2 \rightarrow$ 预测"直走" ✗

MDN: $P(z) = 0.5 \cdot N(\mu_1, \sigma_1^2) + 0.5 \cdot N(\mu_2, \sigma_2^2)$ ✓

温度参数 τ : 控制梦境"难度"

采样时的温度调节

$$\pi'_k = \frac{\pi_k^{1/\tau}}{\sum_j \pi_j^{1/\tau}}, \quad z \sim \mathcal{N}(\mu_k, \tau \cdot \sigma_k^2)$$

τ	效果	用途
$\tau < 1$	更确定, 走"熟悉的路"	简单模式
$\tau = 1$	标准设置	默认
$\tau > 1$	更随机, 出现"意外情况"	噩梦模式

论文关键发现: 在 $\tau > 1$ 的"噩梦"中训练的 agent 更鲁棒!

C: Controller (线性策略)

作用：基于感知和记忆做出决策

```
# 输入: [z_t, h_t] = [32, 256] = 288 维  
# 输出: a_t = 3 维 (steering, gas, brake)
```

```
action = W @ [z, h] + b    # 线性变换
```

```
# 参数量:  $288 \times 3 + 3 = 867$  个
```

论文：故意保持 Controller 极简，避免它记住世界模型的漏洞

- 防止过拟合世界模型误差
- 强迫学"大方向"的鲁棒策略
- 适合用 CMA-ES 这种无梯度进化算法

Part 3

训练流程 & 梦境 Rollout

四阶段训练概览

Stage 1: 数据收集

随机策略在真实环境中 Rollout, 收集 (图像, 动作)

Stage 2a: 训练 VAE

图像 \rightarrow z , 最小化重建损失 + KL 正则

Stage 2b: 训练 MDN-RNN

(z, a) 序列 \rightarrow 预测 z_{t+1} 分布

Stage 3: 在梦境中训练 Controller

固定 V+M, 用 CMA-ES 在世界模型中进化策略

Stage 1: 数据收集（真实环境）

```
for episode in range(10000):  
    obs = env.reset()  
    for step in range(1000):  
        action = env.action_space.sample() # 随机探索  
        frames.append(preprocess(obs))  
        actions.append(action)  
        obs, reward, done, _ = env.step(action)  
        if done:  
            break
```

- 约 1 万条轨迹，累计数百万帧
- 只做一次真实收集，后续训练主要在"梦境"里进行

Stage 2: 训练世界模型

- **2a: 训练 VAE (图像 $\rightarrow \mathbf{z}$)**
 - 损失 = 重建误差 + KL 散度
 - 得到压缩的潜在表示 z_t
- **2b: 训练 MDN-RNN ($\mathbf{z}, \mathbf{a} \rightarrow \mathbf{z}'$)**
 - 在 z 序列上训练序列模型
 - 输出下一步潜在状态的分布 $P(z_{t+1})$

得到一个可以"在 latent 空间中模拟未来"的世界模型

Stage 3: 梦境中训练 Controller

```
for generation in range(300):  
    population = cmaes.ask() # 采样一批候选参数  
    fitness = []  
    for params in population:  
        controller.set_params(params)  
        rewards = [dream_rollout(controller)  
                    for _ in range(16)]  
        fitness.append(mean(rewards))  
    cmaes.tell(population, fitness) # 更新分布
```

- 所有评估都在世界模型里完成，无需真实环境
- 通过进化搜索找到在梦境中表现最好的线性策略

梦境 Rollout (核心直觉)

```
def dream_rollout(controller):  
    z = vae.encode(random_frame) # 初始潜在状态  
    hidden = None  
    total_reward = 0  
    for step in range(1000):  
        h = hidden[0] if hidden else zeros  
        action = controller([z, h])  
        pi, mu, sigma, reward, done, hidden = rnn(z, action, hidden)  
        z = sample_mdn(pi, mu, sigma) # 在 latent 中前进一步  
        total_reward += reward  
        if done > 0.5:  
            break  
    return total_reward
```

整个轨迹都发生在 latent 空间的"梦境"中

CMA-ES vs 梯度下降（直觉）

方面	梯度下降	CMA-ES
梯度需求	需要可微的动态模型	无需梯度
长轨迹	易梯度爆炸/消失	只看最终得分
随机性	高方差	多次评估平均
适用参数量	任意	小于 ~1k 最合适

类比：

- 梯度下降：盲人摸着斜坡走
- CMA-ES：往几个方向扔石头，看哪个滚得最远

Part 4

实验结果 & 局限

论文参数 & 复现实验

组件	参数	值
数据	Rollouts	10,000
	Max steps	1,000
VAE	Latent dim	32
	LR	1e-4
MDN-RNN	Hidden	256
	Gaussians K	5
CMA-ES	Population	64
	Generations	300

CarRacing 结果对比（论文）

方法	得分
随机策略	~0
纯梦境训练	~900
梦境 + 微调	906
人类水平	~900

在完全基于想象训练的前提下，CarRacing 可达到接近人类水平

CartPole 实验的反例

方法	Dream	Real	Gap
Simple WM (LSTM)	~103	~17	6x
Full WM (MDN-LSTM)	~208	~9.6	22x
DQN (baseline)	-	~193	-

为什么失败？

1. 用随机策略收集的数据质量差
2. CartPole 对初始条件和微小误差极其敏感
3. 原设计偏向高维图像任务，低维状态未必适配

启示：World Models 不是银弹，要与任务匹配

World Models 的主要局限

1. 分阶段训练

- V、M、C 分开训练，不能端到端联合优化
- V/M 中的缺陷无法通过策略学习被反向纠正

2. 简单 Controller 的表达力有限

- 867 参数的线性策略
- 对复杂任务可能不足

3. 世界模型误差累积

- 长轨迹 roll out 时误差逐步放大

4. "作弊"问题

- Agent 学会利用模型缺陷获取高分，而非学习真实世界规律

Part 5

Dreamer 及后续发展

从 World Models 到 Dreamer

World Models (2018)



PlaNet (2019)

- RSSM: 确定性 + 随机性双路径
- MPC 规划



Dreamer (2020)

- Actor-Critic 在想象中训练
- 端到端联合优化



DreamerV2/V3 (2021/2023)

- 离散 latent
- 多任务通用世界模型

Dreamer 相对 World Models 的改进

维度	World Models	Dreamer
训练方式	分阶段（先 V/M 再 C）	端到端联合训练
控制器	线性 + CMA-ES	Actor-Critic + 梯度
状态表示	纯随机 z	RSSM: 确定性 h_t + 随机 z_t
优化目标	最终 episodic reward	TD 目标 + Entropy Regularization

整体上：从"先建好世界再在梦里搜索" → "一边学世界一边学行为"

总结

核心要点回顾

World Models 的贡献

1. 提出了 "在梦境中训练" 的可行路径
2. 给出了 V-M-C 的通用架构模板
3. 强调了简单 Controller 对鲁棒性的作用
4. 对后续 PlaNet / Dreamer 系列有直接影响

关键技术组件

- VAE: 压缩高维观测
- MDN-RNN: 建模多模态未来
- CMA-ES: 无梯度策略优化
- 温度参数 τ : 控制梦境难度与随机性

一句话总结

学习一个世界模型，在"梦"里训练策略，再迁移回现实。

Q&A & 讨论问题

可以深入讨论的问题：

1. **数据收集**：随机策略 vs 专家策略，哪个更好？为什么论文用随机？
2. **模型容量**：线性 Controller 只有 867 参数，这是优点还是限制？
3. **Dream-Reality Gap**：如何减小梦境和现实的差距？
4. **应用场景**：哪些领域适合 World Models？（机器人？游戏？自动驾驶？）

关键公式速查

模块	公式
VAE 损失	$\mathcal{L} = \ x - \hat{x}\ ^2 + \beta \cdot D_{KL}$
KL 散度	$D_{KL} = -\frac{1}{2} \sum (1 + \log \sigma^2 - \mu^2 - \sigma^2)$
重参数化	$z = \mu + \sigma \cdot \epsilon, \epsilon \sim \mathcal{N}(0, 1)$
MDN	$p(z) = \sum_k \pi_k \cdot \mathcal{N}(z \mid \mu_k, \sigma_k^2)$
温度采样	$\pi'_k \propto \pi_k^{1/\tau}, \sigma' = \sqrt{\tau} \cdot \sigma$
Controller	$a = \text{activation}(W \cdot [z, h] + b)$

参考资料

- 论文: <https://arxiv.org/abs/1803.10122>
- 官网: <https://worldmodels.github.io/>
- 代码: `world_models/experiments/3_car_racing_world_model.py`
- 完整版: `World_Models_Presentation_long.md` (90 min, 含代码和互动)