

LBOPB 离散版 SAC (Discrete SAC) 算法需求描述

- 作者: GaoZheng
- 日期: 2025-10-23
- 版本: v1.0.0

注: “O3理论/O3元数学理论/主纤维丛版广义非交换李代数(PFB-GNLA)”相关理论参见: [作者 \(GaoZheng\) 网盘分享](#) 或 [作者 \(GaoZheng\) 开源项目](#) 或 [作者 \(GaoZheng\) 主页](#), 欢迎访问!

摘要

本文**离散版 Soft Actor-Critic (SAC)**——制定了详细的技术需求。其核心目标是为连续动作空间设计
的标准 SAC 算法, 成功适配到 LBOPB 框架特有的、由海量离散生物学算子构成的动作空间中。

1. 概述 (Overview)

1.1. 项目目标:

本项目旨在实现一个离散版本的 Soft Actor-Critic (SAC) 算法, 作为 GRL-Prophet 框架的核心强化学习引擎。该引擎将学习在一个由 LBOPB (生命总算子主纤维丛) 定义的、高维度的、离散的算子空间中, 生成最优的算子序列, 以实现预设的生物学或药理学目标。

1.2. 核心挑战:

标准的 SAC 算法是为连续动作空间 (如机器人关节控制) 设计的。而 LBOPB 的动作空间是由海量的、离散的生物学基础算子 (如 `Inflammation`, `Bind`, `Dose` 等) 构成的。因此, 核心需求是将 SAC 的关键组件 (策略网络、Q 网络、熵最大化机制) 从连续域无损地迁移到离散域。

1.3. 算法定位:

该算法是一个**离策略 (Off-Policy)**、****最大熵 (Maximum Entropy) ****的深度强化学习算法, 专注于在复杂环境中进行高效的数据利用和鲁棒的探索。

2. 核心算法组件 (Core Algorithm Components)

该算法由三个主要的神经网络构成：策略网络 (Actor)、Q 网络 (Critic) 和目标 Q 网络。

2.1. 策略网络 (Actor - The Policy Network)

- **功能:** 决定在给定状态下，选择每一个离散算子的概率。
- **输入:**
 - `state` (状态向量): 一个高维浮点数向量，代表了 LBOPB 环境中所有七个幺半群当前状态的综合表示。
- **网络结构:** 一个多层感知机 (MLP) 或更复杂的网络 (如 Transformer Encoder) 。
- **输出:**
 - `action_logits` (动作 logits): 一个维度为 `N_actions` 的向量，其中 `N_actions` 是离散算子的总数量。该向量的每一个元素对应一个算子的原始分数。
- **激活函数:** 输出层之后必须连接一个 **Softmax** 函数，将 `logits` 转换为一个合法的**概率分布** $\pi(a|s)$ ，表示在状态 `s` 下选择动作 `a` 的概率。

2.2. Q 网络 (Critic - The Q-Network)

- **功能:** 评估在给定状态下，执行每一个离散算子的长期价值 (Q-value) 。
- **输入:**
 - `state` (状态向量): 与策略网络相同的状态向量。
- **网络结构:** 一个多层感知机 (MLP) 或与策略网络相似的结构。
- **输出:**
 - `q_values` (Q 值向量): 一个维度为 `N_actions` 的向量。该向量的每一个元素 `q_values[i]` 代表了在当前状态下，执行第 `i` 个算子的 Q 值。
- **设计模式:** 采用**双 Q 网络 (Double Q-Networks)** 设计，即同时训练两个结构相同的 Q 网络 (Q1 和 Q2)，以缓解 Q 值的高估问题。在计算目标 Q 值时，取两者中较小的一个。

2.3. 目标 Q 网络 (Target Q-Networks)

- **功能:** 在计算目标 Q 值时，提供一个稳定的、更新较慢的网络，以增强训练的稳定性。
 - **结构:** 与 Q 网络 (Q1 和 Q2) 完全相同。
 - **更新机制:** 采用**软更新 (Soft Update / Polyak Averaging)**。在每次训练迭代后，目标 Q 网络的权重 `w_target` 会缓慢地向主 Q 网络的权重 `w_main` 靠拢： $w_target \leftarrow \tau * w_main + (1 - \tau) * w_target$ ，其中 τ 是一个很小的超参数 (如 0.005) 。
-

3. 关键机制适配 (Key Mechanism Adaptations)

3.1. 熵计算 (Entropy Calculation)

- 需求:** SAC 的核心是最大化策略的熵，以鼓励探索。对于离散（分类）分布，熵的计算公式为：
$$H(\pi(\cdot|s)) = -\sum [\pi(a|s) * \log(\pi(a|s))]$$
- 实现:** 在策略网络的损失函数中，需要加入这一熵项，并通过一个可自动调整的温度系数 α 来加权。 α 的目标是维持策略熵在一个目标水平。

3.2. Q 值与 V 值的计算 (Q-value and V-value Calculation)

- V 值 (状态价值):** 在离散 SAC 中，状态 s 的价值 $V(s)$ 可以直接通过 Q 值和策略概率计算得出，无需单独的 V 网络：
$$V(s) = \sum [\pi(a|s) * (Q(s,a) - \alpha * \log(\pi(a|s)))]$$

这可以被看作是策略 π 在所有动作上的期望 Q 值，并减去策略本身的熵。
- 目标 Q 值 (Target Q-value):** 用于训练 Critic 网络的“真值”标签 y 的计算方式为：
$$y(r, s') = r + \gamma * V(s')$$

其中 r 是即时奖励， γ 是折扣因子， $V(s')$ 是下一个状态的价值。

3.3. 策略网络损失 (Actor Loss)

- 需求:** 策略网络的目标是更新参数，使其输出的动作能够获得更高的 Q 值。其损失函数为：
$$\text{Loss}_{\text{actor}} = E [\alpha * \log(\pi(a|s)) - Q(s,a)]$$

直观上，对于一个给定的状态，如果某个动作的 Q 值高于当前策略的平均价值，策略网络就会调整参数以增加选择该动作的概率。

4. 环境接口 (Environment Interface)

Discrete SAC 算法需要与 LBOPB 模拟环境进行交互，交互的数据格式必须标准化。

- state (状态):** LBOPB 环境在每一步必须提供一个标准化的、固定维度的向量来描述其“立体状态”。这需要一个函数 `vectorize_state(pem_state, pdem_state, ...)`。
- action (动作):** 算法将输出一个整数 a ，代表被选中的算子在全局算子列表中的索引。
- reward (奖励):** LBOPB 环境在执行一个动作后，必须返回一个标量浮点数作为奖励。该奖励应基于各么半群 `risk` 和 `cost` 的变化量来设计，以提供稠密的奖励信号。
- next_state (下一状态):** 执行动作后的新状态向量。
- done (完成标志):** 一个布尔值，表示一个序列 (Episode) 是否结束 (例如，达到目标状态或达到最大步数)。

5. 训练流程 (Training Loop)

1. **初始化**: 创建策略网络、两个 Q 网络、两个目标 Q 网络，以及一个空的经验回放池 (Replay Buffer)。
 2. **数据收集**:
 - **离线监督集构建 (用于训练)**: 从 `operator_crosswalk.json` 按规则节选，生成 `operator_crosswalk_train.json` 专用于训练；内容应覆盖“最优路径 (算子包)”、以及“次优路径 (算子包)”与“瑕疵路径 (算子包)”。该文件仅用于预热策略与预填回放池，避免与评测数据混淆。
 - **在线交互**: 智能体根据当前策略 $\pi(\cdot|s)$ 选择一个动作 a ，与环境交互，获得 (s, a, r, s', d) 五元组，并将其存入回放池。
 3. **采样与训练**:
 - 当回放池中的数据量足够时，每次迭代从中随机采样一个批次 (mini-batch) 的经验。
 - 使用采样的批次数据，根据上述损失函数，更新两个 Q 网络和策略网络的参数。
 - 软更新目标 Q 网络的参数。
 - (可选) 更新温度系数 α 。
 4. **循环**: 重复步骤 2 和 3，直到算法收敛或达到最大训练步数。
-

6. 超参数 (Hyperparameters)

- `learning_rate`: 学习率 (Actor, Critic, Alpha)
 - `gamma`: 折扣因子
 - `buffer_size`: 经验回放池大小
 - `batch_size`: 批处理大小
 - `tau`: 目标网络软更新系数
 - `target_entropy`: 目标熵 (用于自动调整 α)
-

许可声明 (License)

Copyright (C) 2025 GaoZheng

本文档采用[知识共享-署名-非商业性使用-禁止演绎 4.0 国际许可协议 \(CC BY-NC-ND 4.0\)](#)进行许可。