

Actor_Critic_Trader

在本项目中，使用了演员-评论深度强化学习算法，包括A2C（优势-演员-评论家）、DDPG（深度确定性策略梯度）和PPO（近端策略优化）来进行投资组合管理。

Introduction

演员-评论家算法 AC (Actor-Critic)

当代理在环境中执行操作和移动时，它将观察到的环境状态映射到两个可能的输出：

- 推荐动作：动作空间中每个动作的概率值。代理中负责此输出的部分称为actor（演员）。
- 未来预期回报：它预期在未来获得的所有回报的总和。负责此输出的代理部分是critic（评论家）。

演员和评论家学习执行他们的任务，这样演员推荐的动作就能获得最大的回报：

- 演员Actor：它将环境的状态作为输入，并为其动作空间中的每个动作返回一个概率值。
- 评论家Critic：它将的环境状态作为输入，并返回对未来总回报的估计。

Actor通过Critic给出的分数去学习：如果Critic给的分数高，那么Actor会调整这个动作的输出概率；相反，如果Critic给的分数低，那么就减少这个动作输出的概率。

Actor-Critic方法结合了值函数逼近（Critic）和策略函数逼近（Actor），它从与环境的交互中学习越来越精确的Critic（评估），能够实现单步更新，相对单纯的策略梯度，Actor-Critic能够更充分的利用数据。

Actor价值函数梯度（梯度上升）：

$$\nabla \bar{R}_\theta = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{T_n} Q^{\pi_\theta}(s_t^n, a_t^n) \nabla \log p_\theta(a_t^n | s_t^n)$$

Critic损失函数（梯度下降）：

$$loss = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{T_n} \left(r_t^n + \max_{a_{t+1}^n} Q^{\pi_\theta}(s_{t+1}^n, a_{t+1}^n) - Q^{\pi_\theta}(s_t^n, a_t^n) \right)^2$$

确定策略梯度 DPG (Deterministic Policy Gradient)

顾名思义，DPG是一种deterministic的policy gradient算法。policy gradient算法的基本思想是，用一个参数化的概率分布 $\pi_\theta(a|s) = P[a|s; \theta]$ 来表示policy，并且由于policy是一个概率分布，那么action a 就是随机选取的，也就是所谓的Stochastic Policy Gradient。DPG做的事情，就是摒弃了用概率分布表示policy的方法，转而用一个确定性的函数 $a = \mu_\theta(s)$ 表示policy。也就是说，给定当前的state s ，选取的action a 就是确定的。

相对于stochastic function，用deterministic function表示policy有其优点和缺点。优点就是，从理论上可以证明，deterministic policy的梯度就是Q函数梯度的期望，这使得deterministic方法在计算上比stochastic方法更高效；但缺点也很明显，对于每个state，下一步的action是确定的。这就导致只能做exploitation而不能做exploration。这可能也是为什么policy gradient一开始就采用stochastic算法的原因。

为了解决不能做exploration的问题，DPG采用了off-policy的方法。也就是说，采样的policy和待优化的policy是不同的：其中采样的policy是stochastic的，而待优化的policy是deterministic的。采样policy的随机性保证了充分的exploration。

$$\begin{aligned}\nabla_{\theta^{\mu}} J &\approx \mathbb{E}_{s_t \sim \rho^{\beta}} \left[\nabla_{\theta^{\mu}} Q(s, a | \theta^Q) \Big|_{s=s_t, a=\mu(s_t | \theta^{\mu})} \right] \\ &= \mathbb{E}_{s_t \sim \rho^{\beta}} \left[\nabla_a Q(s, a | \theta^Q) \Big|_{s=s_t, a=\mu(s_t)} \nabla_{\theta^{\mu}} \mu(s | \theta^{\mu}) \Big|_{s=s_t} \right]\end{aligned}$$

- s 和 a 分别是 state 和 action;
- Q 为 Q 函数, 即 action value 函数, θ^Q 为其参数;
- J 表示的是初始状态分布下的期望回报, 也就是给定初始状态的概率分布, 期望能够获得的总 reward (可能要考虑折扣因子 γ), 我们的目标就是使得 J 越大越好;
- s_t 表示在 t 时刻的状态, 而 ρ^{β} 则表示在随机采样 policy β 之下, 每个 state 被访问的概率分布;
- μ 表示待优化的 deterministic policy, θ^{μ} 是它的参数。

深度Q网络 DQN (Deep Q-Network)

DQN在DPG后一年发表, 主要是解决了用神经网络拟合Q函数 (也就是action-value函数) 导致的训练不稳定的问题。在DQN之前, 用神经网络去拟合Q函数 (也就是action-value函数) 是不被看好的, 因为在训练的时候会非常不稳定。导致训练不稳定的原因:

- 在 observation sequence 里的元素存在相关性, 这会违背机器学习训练样本的 *iid* 假设。例如, 某次 observation sequence 为 $S_0, A_0, R_0, S_1, A_1, R_1, \dots, S_n, A_n, R_n$, 后面的 state, action 和 reward 都会强烈依赖于前面的 state, action 和 reward;
- Q 函数的一点小改动可能会显著地改变 policy, 从而改变 observation sequence 中的数据分布, 这也会违背机器学习训练样本的 *iid* 假设;
- 在 Q 函数 (待优化的对象) 和 $r + \gamma \max_{a'} Q(s', a')$ (优化的 target) 之间也存在强相关, 因为都是来自于同一个 Q 函数。很难想象如果在一般机器学习任务中, data 和 label 都是从一个模型中生成的, 模型到底会学到什么。

基于上面的分析, DQN 提出了几点改进:

- 采用了一个名为 experience replay 的操作, 即把 observation sequence 的序列关系打乱, 只储存 agent 的 experiences (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) ;
- 将待优化的 Q 函数与作为 target 的 Q 函数分开, 待优化的 Q 函数持续更新参数, 每隔一段时间才将前者的参数赋值给后者。

为什么这两个改进能够解决上面的问题呢?

- experience replay 操作只存储四元组 (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) , 而四元组与四元组之间是没有相关性的, 从而成功地将训练样本 $(S_0, A_0, R_0, \dots, S_n, A_n, R_n)$ 之间的相关性转化为训练样本 (四元组) 之间的相关性;
- 将待优化的 Q 函数和作为 target 的 Q 函数分离, 前者更新快而后者更新慢。这首先解决了第二个问题, 虽然 policy 仍对前者的参数敏感, 但是由于训练数据的 target 是由后者生成的, 前者参数的变化不会对训练的 target 造成快速的变化;
- 此外, 上述操作还解决了第三个问题。由于两个 Q 函数分离了, 所以 data (由待优化的 Q 函数生成) 和 target (由作为 target 的 Q 函数生成) 之间的相关性就消失了。

这样, DQN 非常漂亮地解决了神经网络用于 Q 函数近似时的不稳定性问题。但是这个解决方案也不是没有缺陷的, 由于作为 target 的 Q 函数更新缓慢, 所以训练的速度相应地也会减缓。但是作者表示训练的稳定性显然是远远超过训练速度的损失的。

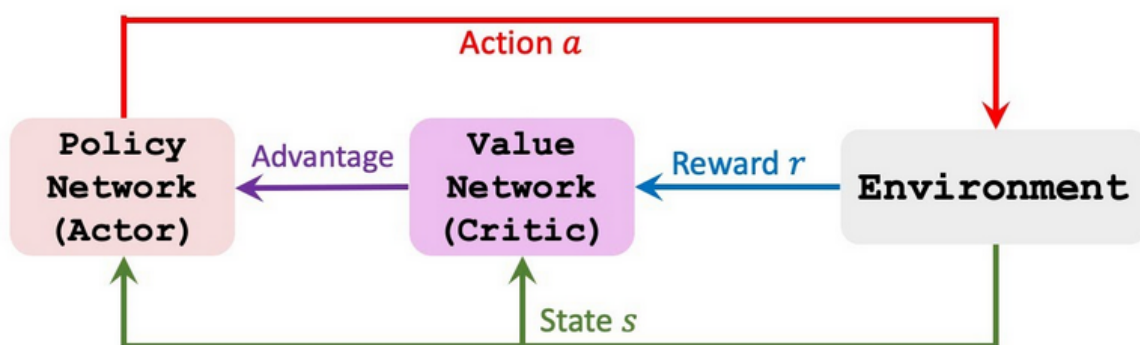
Methods

优势-演员-评论家 Advantage-Actor-Critic (A2C)

深度强化学习中，很多基础算法都是单线程的，也就是一个 agent 去跟环境交互产生经验。基础版 Actor-Critic，由于环境是固定不变的，agent 的动作又是连续的，这样收集到的经验就有很强的时序关联，而且在有限的时间内也只能探索到部分状态和动作空间。为了打破经验之间的耦合，可以采用 Experience Replay 的方法，让 agent 能够在后续的训练中访问到以前的历史经验，而对于基于策略类的算法，agent 收集的经验都是以 episode 为单位的，跑完一个 episode 后经验就要丢掉，更好的方式是采用多线程的并行架构，这样既能解决前面的问题，又能高效利用计算资源，提升训练效率。

Advantage Actor-Critic (A2C) 算法引入了**并行架构**，各个 agent 都会独立的跟自己的环境去交互，得到独立的采样经验，而这些经验之间也是相互独立的，这样就打破了经验之间的耦合，起到跟 Experience Replay 相当的效果。因此通常 A2C 和 A3C 是不需要使用 Replay Buffer 的，因为结构本身就可以替代了。

Advantage Actor-Critic (A2C)



什么是优势？Q值实际上可以分解为两部分：状态值函数 $V(s)$ 和优势值 $A(s, a)$ ：

$$Q(s, a) = V(s) + A(s, a)$$

优势函数能够评估在给定状态下与其他行为相比更好的行为，价值函数则是评估在此状态下行为的良好程度。与其让评论家学习Q值，不如让评论家学习Advantage值。这样，对行为的评估不仅基于行为的良好程度，而且还取决于行为可以改善的程度。优势函数的优势是它减少了策略网络的数值差异并稳定了模型。

Actor价值函数梯度（梯度上升）：

$$\nabla \bar{R}_\theta = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{T_n} (Q^{\pi_\theta}(s_t^n, a_t^n) - V^{\pi_\theta}(s_t^n)) \nabla \log p_\theta(a_t^n | s_t^n)$$

Critic损失函数（梯度下降）：

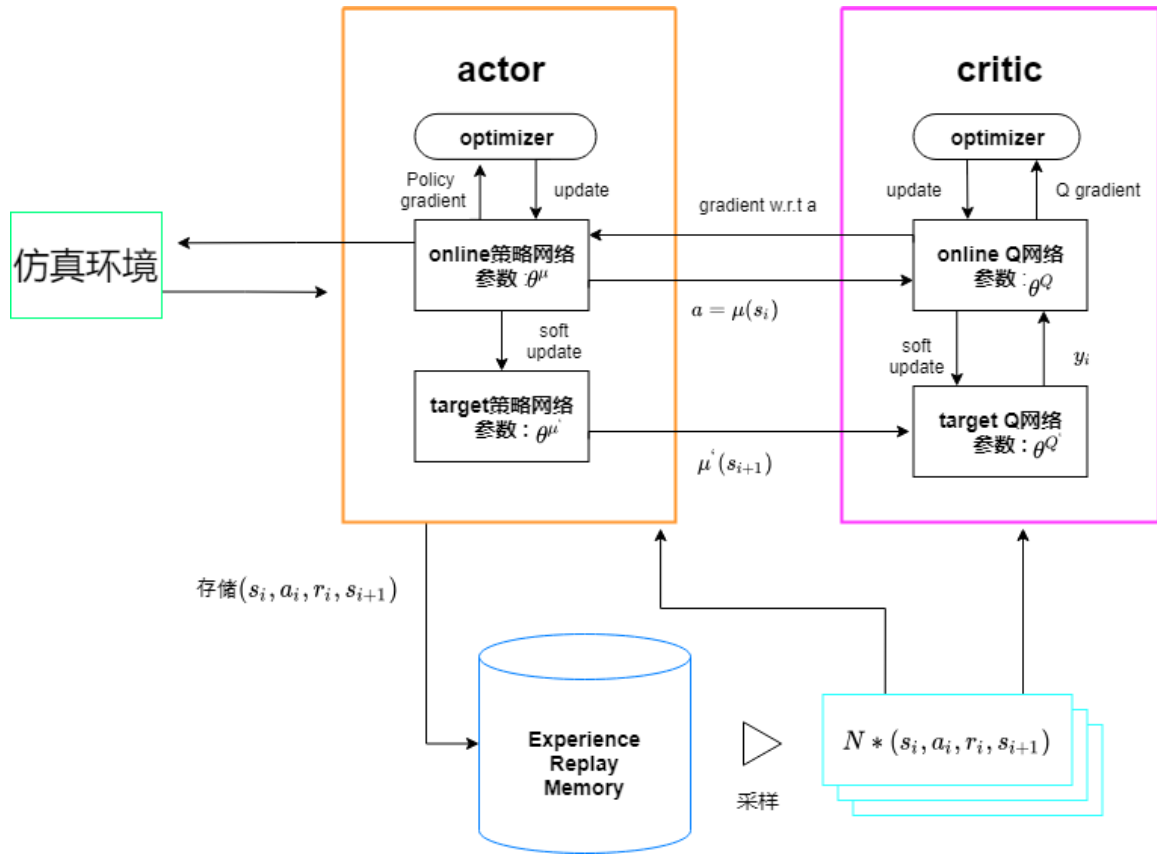
$$loss = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{T_n} (r_t^n + V^\pi(s_{t+1}^n) - V^\pi(s_t^n))^2$$

深度确定策略梯度 DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient)

一种学习连续动作的无模型策略算法。它结合了DPG（确定性策略梯度）和DQN（深度Q网络）的思想，利用DQN中的经验重放和延迟更新的目标网络，并基于DPG，可以在连续的动作空间上运行。

和演员-评论家的方法一样，DDPG也有两个worker：

- 演员提出一个给定状态的动作。
- 评论家预测给定的状态和动作是好（正值）还是坏（负值）。



但是DDPG使用了另外2种技术：

- 使用了两个目标网络（online / target network）增加训练的稳定性，从估计的目标和目标网络学习更新，从而保持它估计的目标稳定。
- 使用了经验回放，用于存储元组列表（状态、动作、奖励、下一个状态），不仅仅从最近的经验中学习，而是从取样中学习到现在为止积累的所有经验。

网络更新算法：

Algorithm 1 DDPG algorithm

Randomly initialize critic network $Q(s, a|\theta^Q)$ and actor $\mu(s|\theta^\mu)$ with weights θ^Q and θ^μ .
Initialize target network Q' and μ' with weights $\theta^{Q'} \leftarrow \theta^Q, \theta^{\mu'} \leftarrow \theta^\mu$
Initialize replay buffer R
for episode = 1, M **do**
 Initialize a random process \mathcal{N} for action exploration
 Receive initial observation state s_1
 for t = 1, T **do**
 Select action $a_t = \mu(s_t|\theta^\mu) + \mathcal{N}_t$ according to the current policy and exploration noise
 Execute action a_t and observe reward r_t and observe new state s_{t+1}
 Store transition (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) in R
 Sample a random minibatch of N transitions (s_i, a_i, r_i, s_{i+1}) from R
 Set $y_i = r_i + \gamma Q'(s_{i+1}, \mu'(s_{i+1}|\theta^{\mu'})|\theta^{Q'})$
 Update critic by minimizing the loss: $L = \frac{1}{N} \sum_i (y_i - Q(s_i, a_i|\theta^Q))^2$
 Update the actor policy using the sampled policy gradient:

$$\nabla_{\theta^\mu} J \approx \frac{1}{N} \sum_i \nabla_a Q(s, a|\theta^Q)|_{s=s_i, a=\mu(s_i)} \nabla_{\theta^\mu} \mu(s|\theta^\mu)|_{s_i}$$

Update the target networks:

$$\theta^{Q'} \leftarrow \tau \theta^Q + (1 - \tau) \theta^{Q'}$$

$$\theta^{\mu'} \leftarrow \tau \theta^\mu + (1 - \tau) \theta^{\mu'}$$

end for
end for

近端策略优化算法 PPO (Proximal Policy Optimization)

基于策略的方法如策略梯度算法和 Actor-Critic 算法虽然简单、直观，但是这种算法有一个明显的缺点：当策略网络是深度模型时，沿着策略梯度更新参数，很有可能由于步长太长，策略突然显著变差，进而影响训练效果，在实际应用过程中会遇到训练不稳定的情况。

我们考虑在更新时找到一块信任区域 (trust region)，在这个区域上更新策略时能够得到某种策略性能的安全性保证，这就是信任区域策略优化 (trust region policy optimization, TRPO) 算法的主要思想。TRPO 算法在 2015 年被提出，它在理论上能够保证策略学习的性能单调性，并在实际应用中取得了比策略梯度算法更好的效果。(TRPO公式和推导过于复杂，详情参考[原文](#))

然而TRPO的计算过程非常复杂，每一步更新的运算量非常大。于是，TRPO 算法的改进版——PPO 算法在 2017 年被提出，PPO 基于 TRPO 的思想，但是其算法实现更加简单。并且大量的实验结果表明，与 TRPO 相比，PPO 能学习得一样好 (甚至更快)，这使得 PPO 成为非常流行的强化学习算法。如果我们想要尝试在一个新的环境中使用强化学习算法，那么 PPO 就属于可以首先尝试的算法。

TRPO 使用泰勒展开近似、共轭梯度、线性搜索等方法直接求解。PPO 的优化目标与 TRPO 相同，但 PPO 用了一些相对简单的方法来求解。具体来说，PPO 有两种形式，一是 PPO-惩罚，二是 PPO-截断：

- **PPO-惩罚** (PPO-Penalty) 用拉格朗日乘数法直接将 KL 散度的限制放进了目标函数中，这就变成了一个无约束的优化问题，在迭代的过程中不断更新 KL 散度前的系数。即：

$$\arg \max_{\theta} \mathbb{E}_{s \sim \nu^{\pi_{\theta_k}}} \mathbb{E}_{a \sim \pi_{\theta_k}(\cdot|s)} \left[\frac{\pi_{\theta}(a|s)}{\pi_{\theta_k}(a|s)} A^{\pi_{\theta_k}}(s, a) - \beta D_{KL}[\pi_{\theta_k}(\cdot|s), \pi_{\theta}(\cdot|s)] \right]$$

令 $d_k = D_{KL}^{\nu^{\pi_{\theta_k}}}(\pi_{\theta_k}, \pi_{\theta})$ ， β 的更新规则如下：

1. 如果 $d_k < \delta/1.5$ ，那么 $\beta_{k+1} = \beta_k/2$
2. 如果 $d_k > \delta \times 1.5$ ，那么 $\beta_{k+1} = \beta_k \times 2$
3. 否则 $\beta_{k+1} = \beta_k$

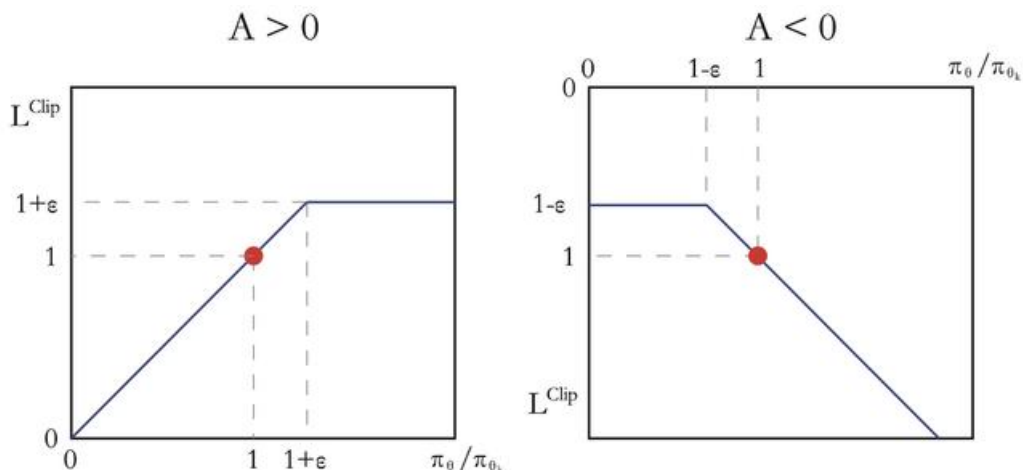
其中， δ 是事先设定的一个超参数，用于限制学习策略和之前一轮策略的差距。

- **PPO-截断** (PPO-Clip) 更加直接，它在目标函数中进行限制，以保证新的参数和旧的参数的差距不会太大。即：

$$\arg \max_{\theta} \mathbb{E}_{s \sim \nu^{\pi_{\theta_k}}} \mathbb{E}_{a \sim \pi_{\theta_k}(\cdot|s)} \left[\min \left(\frac{\pi_{\theta}(a|s)}{\pi_{\theta_k}(a|s)} A^{\pi_{\theta_k}}(s, a), \text{clip} \left(\frac{\pi_{\theta}(a|s)}{\pi_{\theta_k}(a|s)}, 1 - \epsilon, 1 + \epsilon \right) A^{\pi_{\theta_k}}(s, a) \right) \right]$$

其中 $\text{clip}(x, l, r) := \max(\min(x, r), l)$ ，即把 x 限制在 $[l, r]$ 内。上述 ϵ 是一个超参数，表示进行截断 (clip) 的范围。

如果 $A^{\pi_{\theta_k}}(s, a) > 0$ ，说明这个动作的价值高于平均，最大化这个式子会增加 $\frac{\pi_{\theta}(a|s)}{\pi_{\theta_k}(a|s)}$ ，但不会让其超过 $1 + \epsilon$ 。反之，如果 $A^{\pi_{\theta_k}}(s, a) < 0$ ，最大化这个式子会减小 $\frac{\pi_{\theta}(a|s)}{\pi_{\theta_k}(a|s)}$ ，但不会让其超过 $1 - \epsilon$ 。如图所示。



Experiments

Dataset

多只股票交易策略：

- 道琼斯股指 1990 - 2021
- 上证股指 2019 - 2024

单只股票VNPY回测：

- 苹果 (AAPL) 2008 - 2021

Result

多只股票交易策略：

对于多只股票长期的交易策略，由于之前有过强化学习交易经验，深知单只股票简单3种action的缺陷，难以收敛以及模型不具有很强的鲁棒性和泛化性。故本次期末项目中，我尝试使用强化学习模型预测多只股票的不同时期的持仓比例，并以此作为学习的目标。经过实验发现，相较于网上流传较广以及人工智能学习较多的三-动作的策略，该方法更具有可解释性和收敛性。

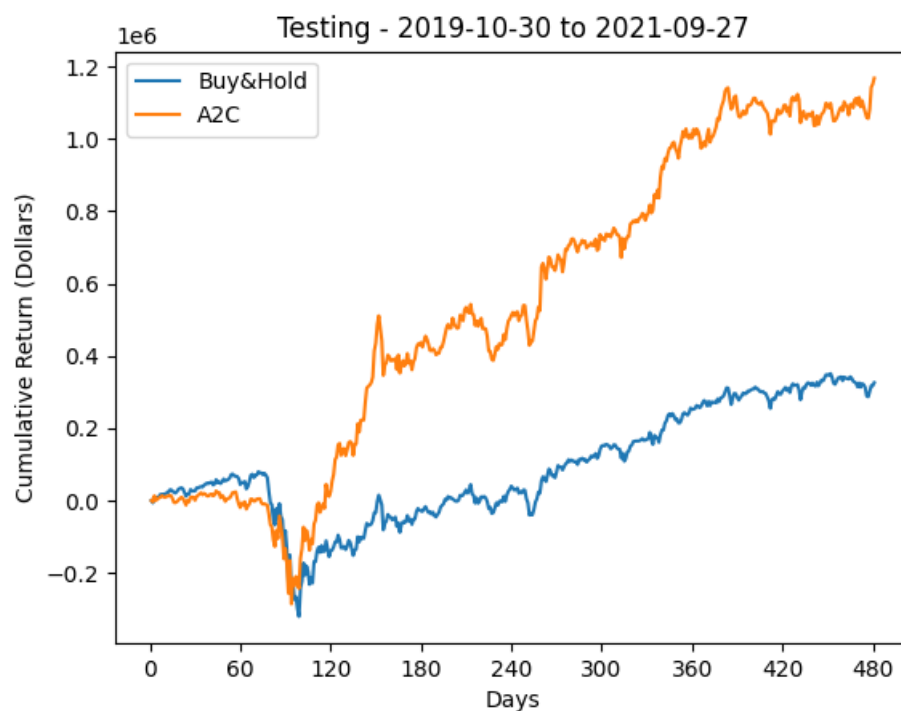
具体代码实现基本基于不同的强化学习算法，实现细节如数据维度、矩阵计算等trick技巧不在此赘述。

以下为最好的实验结果，想要了解其他训练轮数的实验结果，请参照 `plots` 文件夹。

注意：需要说明的是，在本次实验中，由于在代码层面为了尽量减少对依赖包的更改，尊重vnpys自带的单股票的回测方法。同时由于本算法的多只股票是计算股票占总资产的比重（单只股票交易策略为100%占比）的限制，对于多只股票的强化学习交易策略，我只在自己编写的仿真环境中回测，但仍遵循股票买卖的一些限制限制。

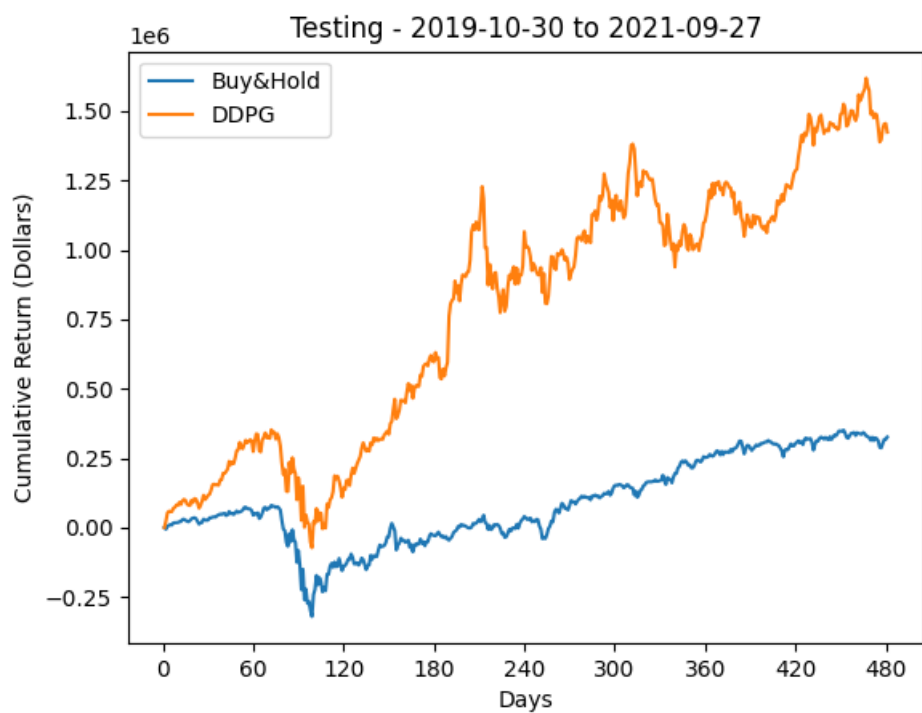
AC (Actor-Critic) 在第13轮训练实现了最高的盈利额，为480天内116%的收益。

index	stat
Annual return	0.501005
Cumulative returns	1.167534
Annual volatility	0.313186
Sharpe ratio	1.453883
Calmar ratio	1.646764
Stability	0.903189
Max drawdown	-0.30424
Omega ratio	1.358105
Sortino ratio	2.265669
Skew	0.211108
Kurtosis	13.59174
Tail ratio	1.217694
Daily value at risk	-0.03765



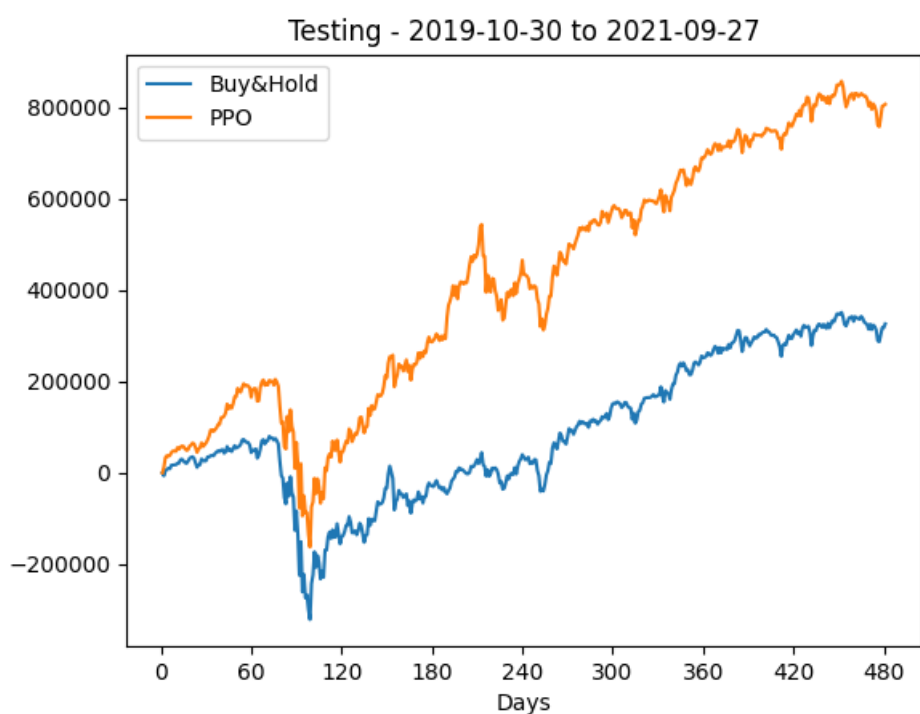
DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient) 在第14轮训练实现了最高的盈利额，为480天内142%的收益。

index	stat
Annual return	0.591703
Cumulative returns	1.423814
Annual volatility	0.37695
Sharpe ratio	1.422367
Calmar ratio	1.88296
Stability	0.864256
Max drawdown	-0.31424
Omega ratio	1.299809
Sortino ratio	2.132271
Skew	-0.01881
Kurtosis	5.445235
Tail ratio	1.014544
Daily value at risk	-0.04536



PPO (Proximal Policy Optimization) 在第33轮实现了最高的盈利额，为480天内80%的收益。

index	stat
Annual return	0.363893
Cumulative returns	0.806028
Annual volatility	0.274843
Sharpe ratio	1.267362
Calmar ratio	1.195302
Stability	0.90252
Max drawdown	-0.30444
Omega ratio	1.30618
Sortino ratio	1.833882
Skew	-0.16044
Kurtosis	12.17401
Tail ratio	0.988949
Daily value at risk	-0.03324



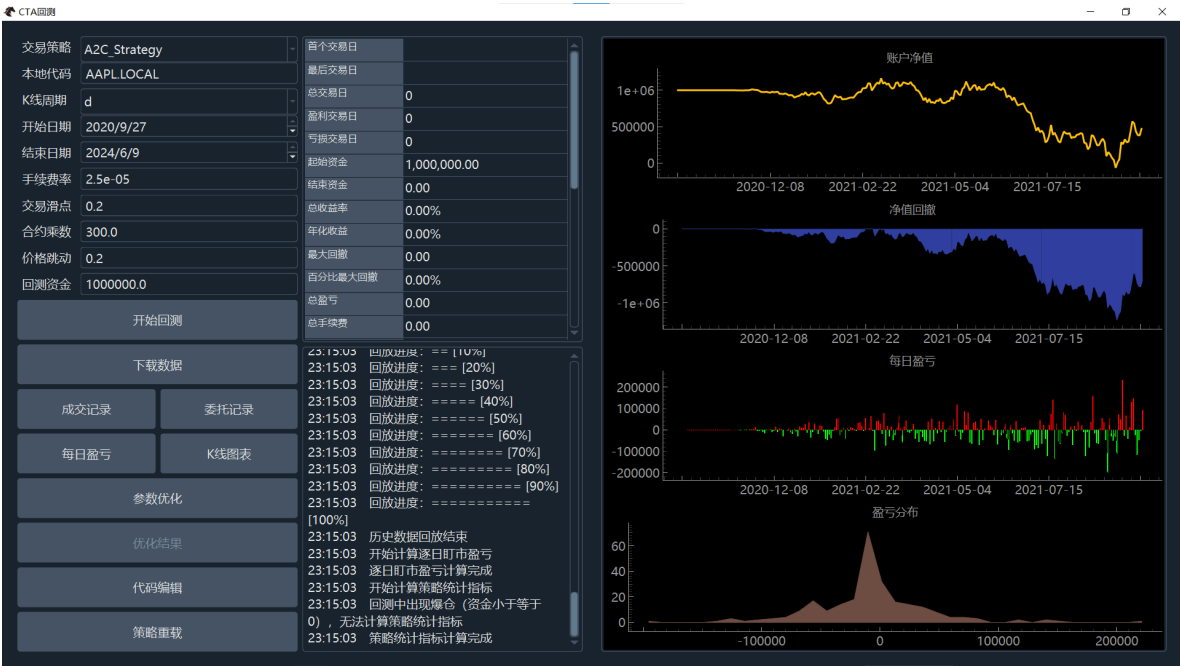
基于VNPY单只股票交易策略：

基于单只股票的交易策略主要围绕actor-critic强化学习算法。特此鸣谢杜楷劼同学的开源代码带来的启发。

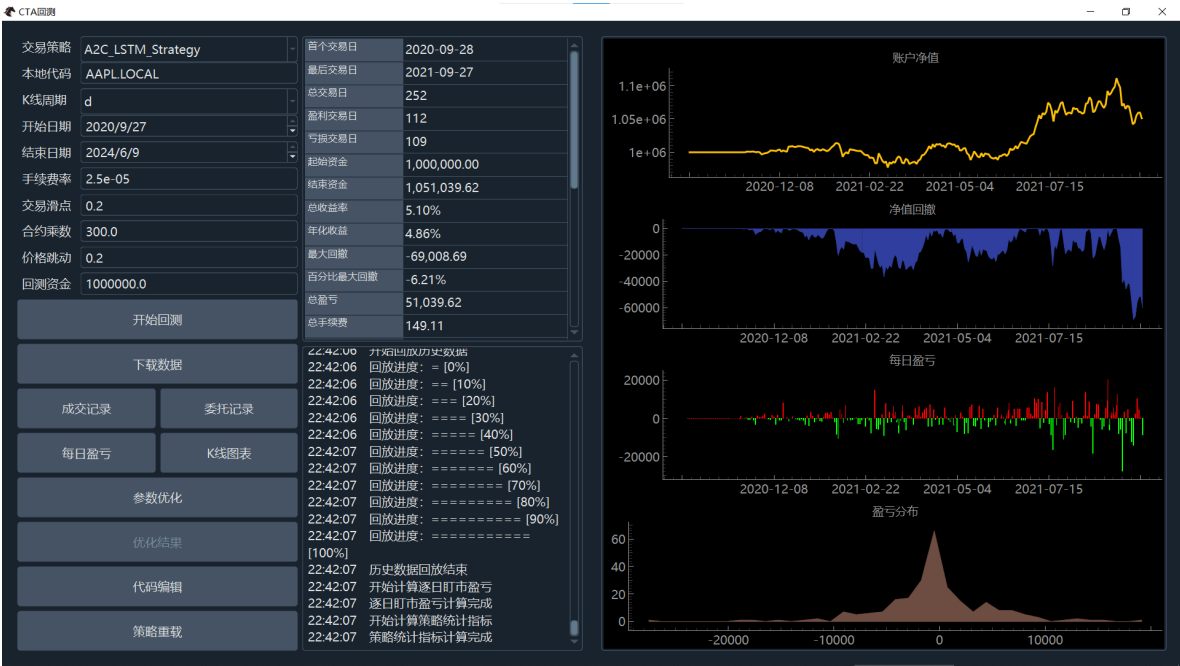
在基于vnpy的交易策略中，主要实现了基于强化学习和lstm、cnn、transformer等数据编码模型的算法。在我之前的强化学习股票交易的尝试中，我一直局限于单种模型，忽视了多模型隐藏层之间的交互作用。受到杜同学的启发，我尝试使用lstm、cnn、transformer等一种编码模型对多天的股价信息进行编码并传输到actor和critic模型中进行强化学习的训练。

注意：值得注意的是，杜同学的算法实现并非完美的，在复现过程中，我有幸发现其中的漏洞所在：1. 原代码中并未编写reward的计算策略，导致每次回测时reward为常数0；2. 原代码中对于数据的处理不够完善，当规格差异较大的数据传入lstm模型中，势必会导致梯度消失和梯度爆炸的现象出现，从而导致实验过程中模型返回结果永远为一个特定的常数。基于以上两点我做了对比和改进，发现原代码中实现的超额收益很可能是由于数据原因，使得最终收益仍然为一个较为客观的数值。

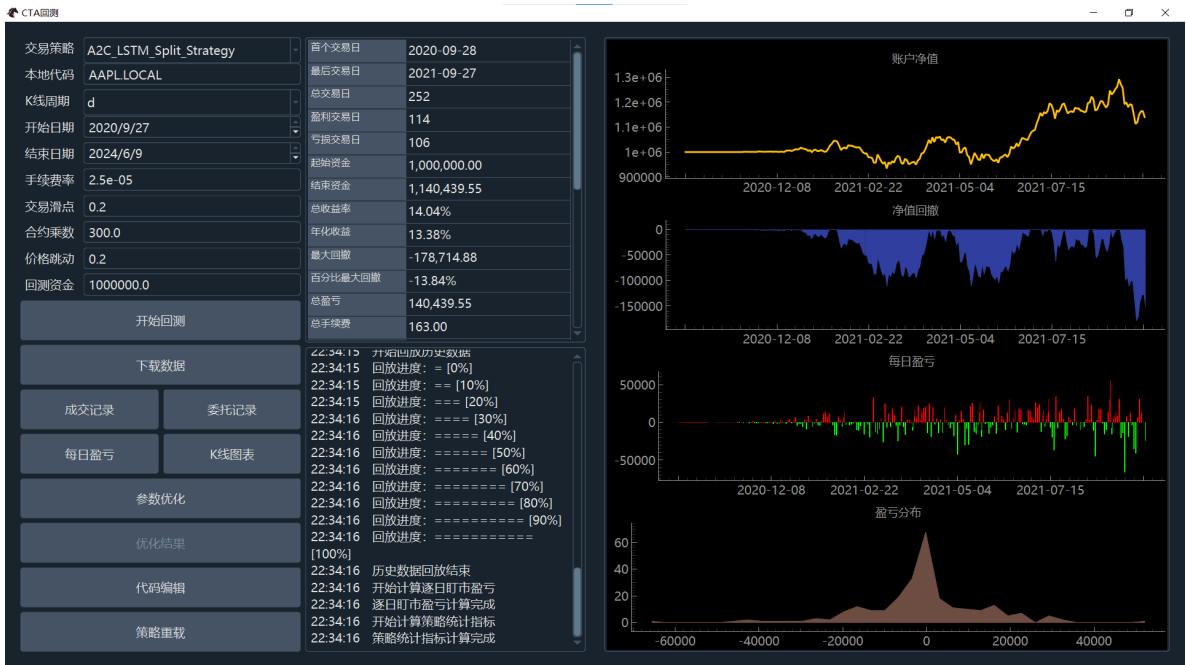
基于纯actor-critic的交易策略



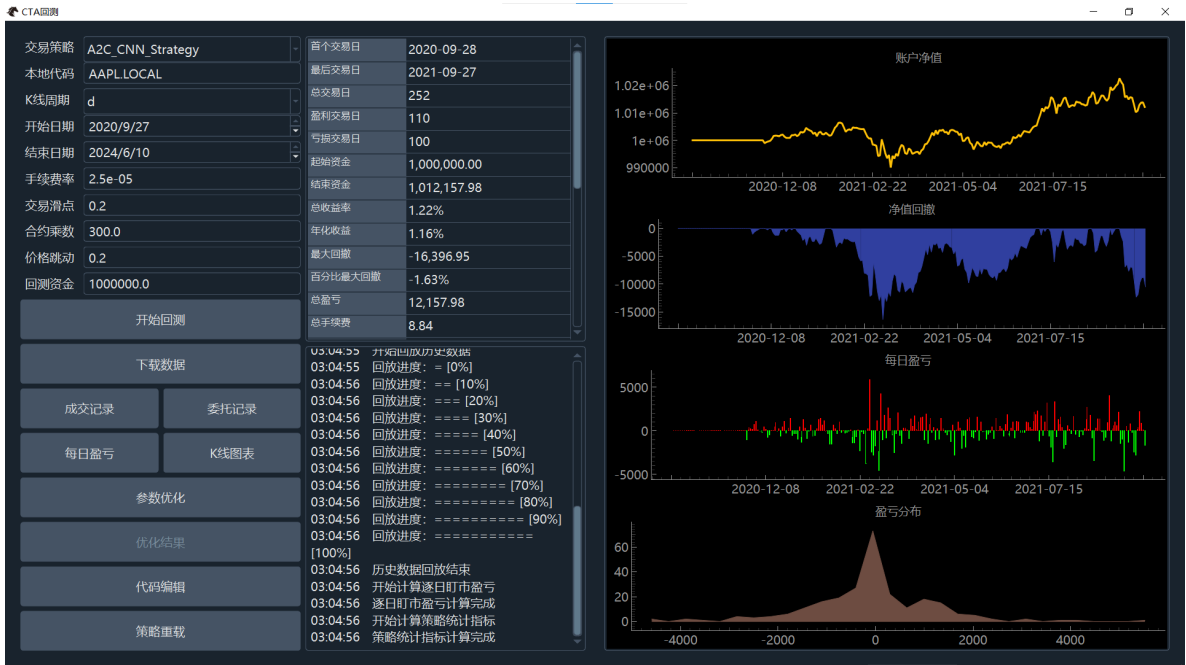
基于actor-critic和lstm结合的交易策略



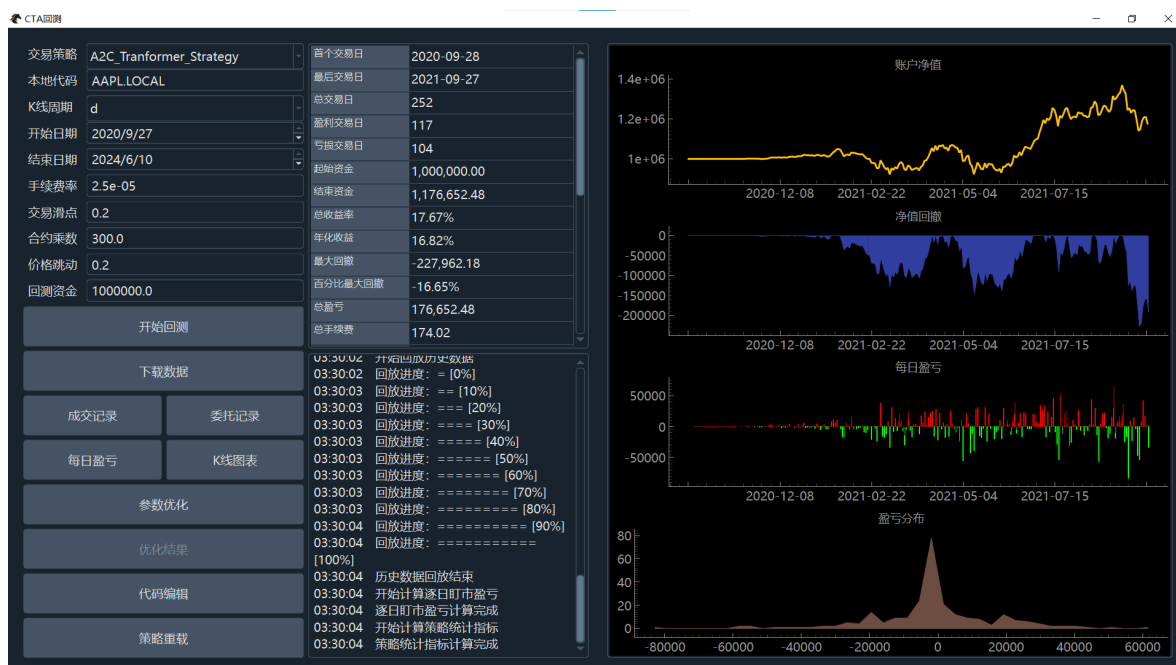
基于两个agent的actor-critic和lstm结合的交易策略



基于actor-critic和cnn结合的交易策略



基于actor-critic和transformer结合的交易策略



在本次项目中，我主要使用了ac强化学习方法，综合使用vnpy仿真交易工具和lstm、cnn、transformer等一众模型，实现了单只和多只股票的交易策略，并且在回测过程中都实现了十分可观的收益。

Reference

https://www.paddlepaddle.org.cn/documentation/docs/zh/practices/reinforcement_learning/actor_critic_method.html#actor-critic-method

https://www.paddlepaddle.org.cn/documentation/docs/zh/practices/reinforcement_learning/advantage_actor_critic.html

<https://zhuanlan.zhihu.com/p/337976595>

<https://hrl.boyuai.com/chapter/2/trpo%E7%AE%97%E6%B3%95/>

<https://hrl.boyuai.com/chapter/2/ppo%E7%AE%97%E6%B3%95/>

<https://arxiv.org/pdf/1509.02971>

<https://arxiv.org/abs/1502.05477>