

# 11. DDPG 알고리즘 분석

김호철

---

## Contents

### 1 소개

### 2 DPG(Deterministic Policy Gradient)

- 2.1 DPG 개요 . . . . .
- 2.2 상태 방문 빈도(State visitation frequency) . . . . .
- 2.3 SPG vs DPG 목적 함수 . . . . .

### 3 DDPG(Deep Deterministic Policy Gradient)

- 3.1 DDPG . . . . .
  - 3.2 DDPG 알고리즘 . . . . .
- 

## 1 소개

### • DQN

- 고차원(high-dimensional) 연속적인(continuous) 상태 공간을 가능하게 하였음
- 하지만, 액션공간이 저차원(low-dimensional)이고, 이산적(discrete)임
- 이산화(Discretization) : 연속공간을 이산공간으로 변경하는것
- 이산화하여 사용할 수 있지만 상태공간이 크고 정교한 로봇틱스 같은 분야에서는 불가능

### • DPG(Deterministic Policy Gradient)

- DPG는 연속적 액션 공간에서 액터로 결정적(deterministic) 정책  $a = \mu(s)$ 와 크리틱으로 액션-벨류 함수  $Q(s, a)$ 를 학습한다.
- 폴리시 그레디언트 알고리즘은 보통 액터로 확률적(stochastic) 정책  $\pi(a|s)$ 을 학습한다.

### • DDPG(Deep Deterministic Policy Gradient)

- DDPG는 액터-크리틱 알고리즘이다. 액터는 정책을 추정하고, 크리틱은 Q-평선을 추정한다.
- (정책 추정을 하는 액터 관점) 연속 액션 공간을 핸들링하기 위해 결정적 정책을 학습하는 DPG를 기반으로 한다.
- (Q-평선을 추정하는 크리틱 관점) 경험 리플라이와 타겟 네트워크같은 DQN을 사용한다.
- DDPG의 어려운 점은 가끔 성능이 개선되지 않는 경우(네트워크는 학습되지만 성능 개선은 되지 않는 경우)가 있다. (TRPO, PPO에서 해결)

## 2 DPG(Deterministic Policy Gradient)

### 2.1 DPG 개요

- DPG는 연속 액션 학습을 위해 결정적 정책을 사용한다.
- 확률적(stochastic) 정책 기울기 이론과 유사한 결정적 정책 기울기 이론을 기반으로 한다.
- 결정적 정책은 액션을 반환  $a = \mu(s) \leftarrow$  확률적 정책은 확률을 반환  $\pi(a|s)$
- 확률적 폴리시 그레디언트(SPG)는 **상태와 액션의 쌍**을 사용해서 파라미터들을 업데이트한다.

$$\Delta\theta = Q^\pi(s, a) \nabla_\theta \log \pi_\theta(a|s) \quad (1)$$

- 결정적 폴리시 그레디언트(DPG)는 오직 **상태**만 사용해서 파라미터들을 업데이트한다.

$$\Delta\theta = \nabla_a Q^\mu(s, a) |_{a=\mu_\theta(s)} \nabla_\theta \mu_\theta(s) \quad (2)$$

- 그러므로 DPG는 SPG에 비해 적은 샘플이 요구되어진다.

### 2.2 상태 방문 빈도(State visitation frequency)

- 상태 방문 빈도는 어떤 정책  $\pi$ 에 따라 주어진 상태를 방문할 확률의 할인된 합계이다.

$$\begin{aligned} \rho_\pi(s) &= \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t P(s_t = s | \pi) \\ &= \int_S \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t P_0(s') P(s' \rightarrow s | t, \pi) ds' \end{aligned} \quad (3)$$

- 여기서  $P_0(s')$ 는 초기 상태 방문 확률이고,  $P(s' \rightarrow s | t, \pi)$ 는 정책  $\pi$ 를 따라 t단계에서, 상태  $s'$ 에서 상태  $s$ 로의 방문 확률이다.
- 상수 계수  $(1 - \gamma)$ 와  $\rho_\pi$ 는 상태 공간에 대한 확률 분포로 간주된다.

$$\begin{aligned} \sum_{s \in S} \rho_\pi(s) &= \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t \sum_{s \in S} P(s_t = s | \pi) \\ &= \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t = \frac{1}{1 - \gamma} \end{aligned} \quad (4)$$

- 그러므로  $\rho_\pi$ 에  $1 - \gamma$ 를 곱하면 확률 분포가 된다.

## 2.3 SPG vs DPG 목적 함수

- 확률적 폴리시 그래디언트 이론(1999년 서튼 등)

– SPG 목적 함수는,

$$\begin{aligned} J(\theta) &= \mathbb{E}_{s \sim \rho_\pi, a \sim \pi_\theta} [Q^\pi(s, a)] \\ &= \int_S \rho_\pi(s) \int_{\mathcal{A}} \pi_\theta(a|s) Q^\pi(s, a) da ds \end{aligned} \quad (5)$$

– 폴리시 그래디언트를 위해 미분을 적용하면,

$$\begin{aligned} \nabla_\theta J(\theta) &= \int_S \rho_\pi(s) \int_{\mathcal{A}} Q^\pi(s, a) \nabla_\theta \pi_\theta(a, s) ds da \\ &= \mathbb{E}_{s \sim \rho_\pi, a \sim \pi_\theta} [Q^\pi(s, a) \nabla_\theta \log \pi_\theta(a|s)] \end{aligned} \quad (6)$$

– 확률적 폴리시 그래디언트 업데이트는(크리틱 액터),

$$\Delta \theta = Q^\pi(s, a) \nabla_\theta \log \pi_\theta(a|s) \quad (7)$$

- 결정적 폴리시 그래디언트 이론(2014년 실버 등)

– DPG 목적 함수는,

$$\begin{aligned} J(\theta) &= \mathbb{E}_{s \sim \rho_\pi} [Q^\mu(s, a)] \\ &= \int_S \rho_\pi(s) Q^\mu(s, a) da \quad \text{where } a = \mu_\theta(s) \end{aligned} \quad (8)$$

– 폴리시 그래디언트를 위해 미분을 적용하면,

$$\begin{aligned} \nabla_\theta J(\theta) &= \int_S \rho_\pi(s) \nabla_a Q^\mu(s, a)|_{a=\mu_\theta(s)} \nabla_\theta \mu_\theta(s) ds \\ &= \mathbb{E}_{s \sim \rho_\pi} [\nabla_a Q^\mu(s, a)|_{a=\mu_\theta(s)} \nabla_\theta \mu_\theta(s)] \end{aligned} \quad (9)$$

– 결정적 폴리시 그래디언트 업데이트는(크리틱 액터),

$$\Delta \theta = \nabla_a Q^\mu(s, a)|_{a=\mu_\theta(s)} \nabla_\theta \mu_\theta(s) \quad (10)$$

## 3 DDPG(Deep Deterministic Policy Gradient)

### 3.1 DDPG

- DDPG는 DPG 기반의 액터-크리틱 알고리즘이다.
- 연속적인 액션 공간을 핸들링하기 위해, 크리틱은 Q-함수  $Q(s, a)$ 를 학습하고, 액터는 결정적 정책  $a = \mu(s)$ 를 학습한다.
- DDPG는 또한 DQN의 혁신적 두가지 아이디어(경험 리플라이, 타겟 네트워크)를 사용한다.

- 손실 함수(최소화)

$$L(\phi) = \mathbb{E}_{s \sim \rho_\pi} \left[ \left( r + \gamma \hat{Q}_{\hat{\phi}}(s', \hat{\mu}_{\hat{\theta}}(s')) - Q_\phi(s, a) \right)^2 \right] \text{ where } a = \mu_\theta(s) \quad (11)$$

– 크리틱  $Q_\phi(s, a)$  업데이트는 타겟 네트워크를 사용하여 다음과 같다.

$$-\Delta(\phi) = (r + \gamma \hat{Q}_{\hat{\phi}}(s', \hat{\mu}_{\hat{\theta}}(s')) - Q_\phi(s, a)) \nabla_\theta Q_\phi(s, a) \quad (12)$$

- 목적 함수(최대화)

$$J_\theta = \mathbb{E}_{s \sim \rho_\mu} [Q_\phi(s, a)] \text{ where } a = \mu_\theta(s) \quad (13)$$

– 액터  $\mu_\theta(s)$  업데이트는 다음과 같다.

$$\Delta(\theta) = \nabla_a Q_\phi(s, a)|_{a=\mu_\theta(s)} \nabla_\theta \mu_\theta(s) \quad (14)$$

- 액터와 크리틱 모두 행위(behavior)와 타겟에서 동일한 네트워크를 공유하지만, 각자 자체 가중치( $\phi$ -행위 크리틱,  $\theta$ -행위 액터,  $\hat{\phi}$ -타겟 크리틱,  $\hat{\theta}$ -타겟 액터)를 사용한다.
- 정책의 결정적으로 인해 더 많은 탐색을 위해 추가 노이즈가 필요하다. 추가 노이즈 처리는,

$$\mathcal{N} : a_t = \mu_\theta(s_t) + \mathcal{N}_t \quad (15)$$

- 타겟 네트워크 업데이트는 [소프트 업데이트](#)를 적용한다.

$$\begin{aligned} \hat{\phi} &\leftarrow \tau \phi + (1 - \tau) \hat{\phi} \\ \hat{\theta} &\leftarrow \tau \theta + (1 - \tau) \hat{\theta} \end{aligned} \quad (16)$$

### 3.2 DDPG 알고리즘

크리틱 네트워크  $Q(s, a; \phi)$ 와 액터 네트워크  $\mu(s; \theta)$ 를 무작위 초기화

타겟 네트워크  $\hat{Q}, \hat{\mu}$ 를 가중치  $\hat{\phi} = \phi, \hat{\theta} = \theta$ 로 초기화

리플라이 버퍼  $\mathcal{R}$ 을 초기화

에피소드 1에서 M까지 반복

액션 탐색을 위해 노이즈 프로세스  $\mathcal{N}$ 을 무작위 초기화

초기 관측 상태  $s_1$ 을 받는다.

t를 1에서 T까지 반복

액션  $a_t = \mu(s_t; \theta) + \mathcal{N}$ 을 선택 (DQN에서는  $a_t = \operatorname{argmax}_a Q(s_t, a; \theta)$ )

$a_t$ 를 실행하고,  $r_{t+1}, s_{t+1}$ 을 관측한다.

$\mathcal{R}$ 에서 트랜지션  $(s_t, a_t, r_{t+1}, s_{t+1})$ 를 저장한다.

$\mathcal{R}$ 에서 B개의 트랜지션  $(s_t, a_t, r_{t+1}, s_{t+1})$  미니배치를 샘플링한다.

각 샘플에 대해서 타겟을 계산한다.

$$y_i = r_{i+1} + \gamma \hat{Q}(s_{i+1}, \hat{\mu}(s_{i+1}; \hat{\theta}); \hat{\phi})$$

손실함수를 최소화하도록 크리틱 네트워크를 업데이트한다.

$$L = \frac{1}{B} \sum_i (y_i - Q(s_i, a_i; \phi))^2$$

결정적 폴리시 그래디언트를 사용하여 액터 네트워크를 업데이트 한다.

$$\nabla_{\theta} J \approx \frac{1}{B} \sum_i \nabla_a Q(s_i, a; \phi)|_{a=\mu(s_i; \theta)} \nabla_{\theta} \mu(s_i; \theta)$$

타겟 네트워크를 업데이트 한다.

$$\hat{\phi} \leftarrow \tau \phi + (1 - \tau) \hat{\phi}, \hat{\theta} \leftarrow \tau \theta + (1 - \tau) \hat{\theta}$$