

스마트 시티 설계 최적화를 위한 심층강화학습 적용 연구

박준영, 백지우, 송유재
영남대학교

flipped0412@yu.ac.kr

요약

본 논문에서는 스마트 시티를 설계하기 위한 방안으로써 DQN (Deep Q-learning Network) 알고리즘을 활용하여, 초기 단계부터 스스로 도시를 설계 및 발전해 나가도록 학습시켜 스마트 시티 설계 최적화를 달성하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 인구수의 증가, 생산량의 증가, 거주자들 삶의 질 보장이라는 세 가지 주요 요소를 중심으로 전략을 구성하였다. 특히, 거주자들 삶의 질 보장을 위해 발전하는 도시 속에서 5G 통신 기지국의 수를 적절히 유지하여 통신 속도를 보장하도록 유도하였다. DQN 에이전트는 자원과 인구가 한정된 초기 단계에서 세 가지 주요 요소를 만족시키기 위해 발전 전략을 모색하였다.

I. 서론

최근 전 세계의 대도시에서는 미래형 도시인 스마트 시티의 형태로 발전하려는 모습을 보인다. 스마트 시티는 도시의 경쟁력과 삶의 질 향상을 위하여 건설 및 정보통신기술 등을 융복합 하여 건설된 도시 기반시설을 바탕으로 다양한 도시 서비스를 제공하는 지속 가능한 도시를 말한다[1]. 특히, 스마트 시티의 정의를 말할 때 ICT (Information and Communications Technology) 구현을 강조하고 있으며, 이를 위해 스마트 시티 내 다양한 구성요소 간 연결성 보장 및 빠른 통신 속도 지원이 요구된다. 본 논문에서는 스마트 시티의 구성요소를 거주, 의료, 교통, 통신으로 제한하여 환경을 고려하였으며 강화학습의 대표 알고리즘인 DQN (Deep Q-learning Network)을 이용하여 스스로 지속 가능한 도시를 설계 및 발전시키면서도 통신 속도를 유지하도록 학습시켜 보았다.

II. 본론

본 논문에서는 스마트 시티 설계를 DQN (Deep Q-learning Network) 알고리즘을 통해 실현하기 위해 현실적인 요소들을 고려하면서도 도시 발전이라는 시뮬레이션 목적에 맞게 난이도와 조건들을 조절해 주었다.

환경에서 에이전트의 행동은 다음과 같이 총 5 가지이다: 아파트 건설, 병원 건설, 5G 기지국 (스몰셀) 건설, 지능형 교통 시스템 (ITS) 확장, 유지한다.

아파트는 인구 유입 효과와 인구수를 대변할 매개체로서 아파트 1 채를 건설할 시 100 명의 인구수가 늘어나도록 하였다. 한 아파트당 4 인 가구 기준 25 세대로 가정하였다. 아파트의 건설 비용은 평당 400 만 원 기준 25 평 가구가 25 세대 있다고 가정하여 24 억 원이 되지만 비율을 맞춰 가격을 내려 240 만 원으로 가정하였다.

병원은 인구 유출 감소 효과와 의료를 대변할 매개체로서 병원 1 채를 건설할 시 인구감소 확률이 기존 대비 2% 감소한다. 병원의 건설 비용은 중형종합병원을 기준으로 평당 700 만 원에 5,000 평으로 350 억 원이 되지만 비율을 맞춰 가격을 내려 3,500 만원으로 가정하였다.

지능형 교통 시스템(ITS)은 인구 유입 증가 효과와 교통을 대변할 매개체로서 ITS 를 1 확장 시 아파트당 유입되는 인구수가 기존 대비 3% 증가한다. 그리고 통신 기지국보다 ITS 수가 많을 시 인구 만족도가 감소하고

통신 기지국보다 ITS 수가 적을 시 인구 만족도가 증가한다. ITS 확장 비용은 도로 인프라, CCTV 및 교통관리 인프라를 포함하여 고려하였고 30 억 원이 되지만 비율을 맞춰 가격을 내려 300 만 원으로 가정하였다. 또한 유지 비용은 건설 비용의 3%인 9 만 원으로 가정하였다[2].

5G 기지국은 자본 증가와 통신을 대변할 매개체로서 빠른 통신 속도를 보장하기 위해 스몰셀로 결정하였다[3]. 스몰셀 1 개를 설치할 시 매주 스몰셀당 100 만 원의 수익이 발생한다. 인구수가 1,000 명 단위씩 증감할 때마다 스몰셀당 수익이 10 만 원씩 증감한다. 스몰셀에 할당된 인구수가 200 명이 이하일 시 인구 만족도가 높아지며 초과할 시 낮아진다. 또한 스몰셀을 설치할 시 비용은 5G 스몰셀 디바이스를 기준으로 약 2000 만 원이지만 비율을 맞춰 가격을 내려 2 만 원으로 가정하였다[4].

환경은 1 에피소드 동안 1040 step 을 진행하며 1,040 주인 20 년을 시뮬레이션 한다. 초기 자본은 1,000 만 원으로 충분히 탐험할 수 있도록 하였으며 초기인구는 1,000 명, 초기 만족도는 20 점, 초기 발전 정도는 아파트 5 채, 병원 3 채, 스몰셀 5 채, ITS 2 회 확장으로 보상을 받으며 시작하도록 하였다. 만약 아파트의 수가 병원과 ITS 의 합보다 2 배를 초과한다면 인구 감소 확률이 기존 대비 10% 증가하도록 하였고 아파트당 인구수가 50 명 미만일 시 현재 아파트 수의 10%가 철거되도록 하여 유령 아파트를 없애도록 하였다. 또한 인구수가 100 명 이하로 되거나 만족도가 0 미만이 될 시 큰 처벌을 주며 에피소드를 종료하도록 제한해주었다.

보상 조건은 인구와 자본을 증가시키며 만족도 또한 100 점을 달성할 수 있도록 작성하였다. 보상 조건을 확인했을 때 인구 증가와 자본 증가 그리고 만족도 증가를 모두 확인할 수 있도록 time step t 은 일주일 단위이지만, 보상을 확인하는 주기 \bar{t} 는 4 time steps 즉 한 달 (4 주 기준)을 기준으로 도시의 상태를 확인하였다. 이를 기반으로 $\bar{t}=1,2,\dots$ 번째 달의 평균 인구 $\text{Pop}(\bar{t})$ 와 평균 자본 $\text{Mon}(\bar{t})$ 을 아래 식(1), (2)와 같이 정의할 수 있다:

$$\text{Pop}(\bar{t}) = \frac{1}{4} \sum_{t=4(\bar{t}-1)+1}^{4\bar{t}} \text{Pop}(t), \quad (1)$$

$$\text{Mon}(\bar{t}) = \frac{1}{4} \sum_{t=4(\bar{t}-1)+1}^{4\bar{t}} \text{Mon}(t). \quad (2)$$

위의 식 (1), (2)를 기반으로 지난달 평균 인구 $Pop(\bar{t}-1)$ 와 평균 자본 $Mon(\bar{t}-1)$ 을 이번 달 평균 인구 $Pop(\bar{t})$ 와 평균 자본 $Mon(\bar{t})$ 과 비교하여 아래 식 (3)에서 인구 증가 여부 및 식 (4)에서 자본 증가 여부를 확인하였다:

$$I^{Pop}(\bar{t}) = \begin{cases} 1 & \text{if } Pop(\bar{t}) > Pop(\bar{t}-1) \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

$$I^{Mon}(\bar{t}) = \begin{cases} 1 & \text{if } Mon(\bar{t}) > Mon(\bar{t}-1) \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

식 (5)를 통해 인구 증가 $I^{Pop}(\bar{t})$ 와 자본 증가 $I^{Mon}(\bar{t})$ 가 모두 이루어졌을 경우 양의 보상 α 을 주도록 하였으며, 반대로 모두 감소했을 경우 0의 보상을 주도록 하였다. 이는 인구 증가 $I^{Pop}(\bar{t})$ 와 자본 증가 $I^{Mon}(\bar{t})$ 의 중요도를 같게 하기 위한 것이었다. 특히, 꾸준한 도시의 발전을 위해서 식 (6)을 통해 \bar{t} 기준 3주기 동안 인구와 자본 모두 증가하였을 때는 추가적인 양 β 의 보상을 주었다.

$$R(\bar{t}) = \begin{cases} \alpha I^{Pop}(\bar{t}) I^{Mon}(\bar{t}), \\ \alpha I^{Pop}(\bar{t}) I^{Mon}(\bar{t}) + \beta, & \text{if } C(\bar{t}) \geq 3, \\ 0, & \text{if } I^{Pop}(\bar{t}) = I^{Mon}(\bar{t}) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$C(\bar{t}) = \begin{cases} C(\bar{t}-1) + 1, & \text{if } I^{Pop}(\bar{t}) = I^{Mon}(\bar{t}) = 1, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (6)$$

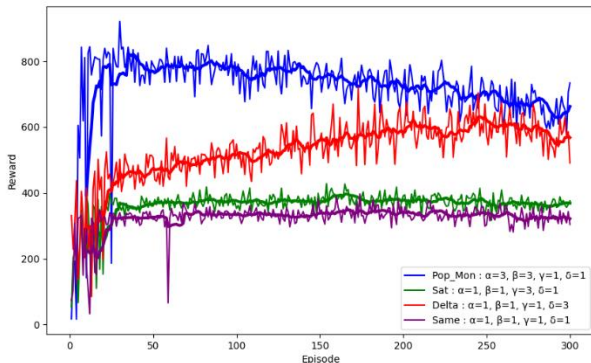
식 (7)을 통해 지난달 만족도 $Sat(\bar{t}-1)$ 와 현재 만족도 $Sat(\bar{t})$ 를 비교하여 만족도 증가 여부를 확인하였다.

$$I^{Sat}(\bar{t}) = \begin{cases} 1, & \text{if } Sat(\bar{t}) > Sat(\bar{t}-1), \\ 0, & \text{if } Sat(\bar{t}) = Sat(\bar{t}-1), \\ -1, & \text{if } Sat(\bar{t}) < Sat(\bar{t}-1), \end{cases} \quad (7)$$

식 (8)은 현재 만족도 $Sat(\bar{t})$ 가 100미만일 때 만족도가 증가했다면 양의 보상 γ 을 주고 감소했다면 음의 보상 γ 을 주었다. 현재 만족도 $Sat(\bar{t})$ 가 100이상일 때 다른 보상 조건에 집중할 수 있도록 더 이상 보상을 받지 않도록 해주었다. 또한 만족도가 90 이상일 때 인구와 자본이 증가한다면 추가 보상 δ 을 주어 만족도가 일정 수준 이상일 때에도 꾸준한 발전을 하도록 하였다.

$$R(\bar{t}) = \begin{cases} R(\bar{t}) + \gamma I^{Sat}, & \text{if } Sat(\bar{t}) < 100, \\ R(\bar{t}), & \text{if } Sat(\bar{t}) \geq 100, \\ R(\bar{t}) + \delta I^{Pop} I^{Mon}, & \text{if } Sat(\bar{t}) \geq 90. \end{cases} \quad (8)$$

그림 1은 같은 조건에서 보상 값을 변경하며 학습한 모델들의 에피소드별 누적 보상 값이다.



[그림 1] 에피소드별 누적 보상

표 1은 그림 1의 모델들에서 만족도 100점을 충족하며 가장 높은 보상을 받은 에피소드이다. Pop_Mon은 인구와 자본 증가에 중요도를 주기위해 α 와 β 값에 3을 주었다. 인구와 자본 증가로 높은 보상을 받는 것은 성공했지만 만족도 또한 100점을 충족하기 위해 학습을 하며 누적 보상 값이 줄어드는 모습을 보였다. 조건을 만족하는 에피소드에서 오히려 인구와 자본 값이 가장 작은 것을 확인할 수 있었다. Sat은 만족도 증가에 중요도를 주기위해 γ 값에 3을 주었다. Pop_Mon 그래프보다 안정된 모습을 보였으며 더 빠르게 만족도 100점을 충족하였다. Delta는 만족도가 90 이상일 때 인구와 자본 증가에 중요도를 주기위해 δ 값에 3을 주었다. Pop_Mon 그래프와는 반대로 만족도를 충족할수록 보상 값을 많이 받는 모습을 보였고 인구와 자본 값도 가장 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한 만족도 충족을 가장 빠른 에피소드에서 달성하였다. Same은 α , β , γ , δ 값 모두에 1을 주었다. Sat과 그래프 그리고 결과 값 모두 유사한 모습을 보였다.

항목	Pop_Mon	Sat	Delta	Same
아파트	142 채	150 채	166 채	142 채
병원	129 채	135 채	145 채	129 채
스몰셀	552 개	508 개	461 개	522 개
ITS	108 회	115 회	118 회	132 회
인구	70,876 명	83,043 명	105,369 명	90,747 명
자본	974 백만원	1,121 백만원	1,140 백만원	1,163 백만원
만족도	100 점	100 점	100 점	100 점
보상	736 점	414 점	720 점	360 점

[표 1] 다른 보상 값의 학습에서 가장 높은 보상을 받은 에피소드

III. 결론

본 논문에서는 통신 속도가 중요한 스마트 시티에서 유동적으로 변하는 인구수와 자본을 예측하고 통신 속도를 유지함과 동시에 도시 발전을 계획하도록 모델을 구현하였다. 그 결과, 주어진 시뮬레이션 기간 동안 확장 속도를 조절하며 도시 발전 계획을 학습하는 것을 확인하였다. 또한 보상 조건에서 많은 인구와 많은 자본이 중요한 것이 아니라 적절한 발전 속도와 발전 순서가 중요하게 지정된 것을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 스마트 도시 조성 및 산업진흥 등에 관한 법률 제2조 제1항.
- [2] 강경훈. *민자고속도로 ITS 비용 산정 연구*. 2014. PhD Thesis. 한양대학교.
- [3] 방승찬, et al. 5G 이동통신 기술 방향. *한국통신학회지 (정보와 통신)*, 2013, 30.12: 25-36.
- [4] 권동승; 나지현. 5G 스몰셀 기술 및 활용 기술 동향. *[ETRI] 전자통신동향분석*, 2022, 37.2.