

MAP-Elites 알고리즘과 응용 연구

박다희, 박지은, 최태종*

전남대학교

dahee@jnu.ac.kr, jinpauleaf@jnu.ac.kr, *ctj17@jnu.ac.kr

Multi-Dimensional Archive of Phenotypic Elites Algorithm and Its Applications

Da Hee Park, Ji Eun Park, and Tae Jong Choi*

Chonnam National Univ.

요약

이 논문은 최근 주목받고 있는 새로운 진화 알고리즘인 Multi-Dimensional Archive of Phenotypic Elites (MAP-Elites)의 기본 개념과 응용 가능성에 대해 소개한다. MAP-Elites는 최적화 문제를 해결하는 새로운 접근 방식으로, 다양성과 품질을 동시에 고려하여 최적의 해결책을 찾는다. 이 논문은 MAP-Elites 알고리즘의 다양한 응용 분야를 소개하고, 알고리즘의 장단점과 개선점을 논의하며, 다양한 분야에서의 응용 가능성을 제시한다. 이를 통해 MAP-Elites 알고리즘의 유용성에 대한 이해를 높이고자 하였다.

I. 서론

진화 알고리즘[1]은 자연 선택의 원리를 모방하여 최적화 문제를 해결하는 방법으로, 개체군을 반복적으로 발전시켜 최적해를 찾는다. 대표적인 예로 유전 알고리즘이 있으며, 교차, 변이, 선택 등을 통해 개체군을 진화시킨다. 진화 알고리즘은 생산 공정 최적화, 작업 일정 계획, 자원 배분 등의 문제를 해결하는 데 성공적으로 적용되었다[2].

Multi-Dimensional Archive of Phenotypic Elites (MAP-Elites) 알고리즘은 최근 큰 주목을 받고 있는데, 이는 다차원 공간에서 우수한 최적해들을 아카이빙하는 진화 알고리즘이다[3]. 이 알고리즘은 특징 공간 (Feature space)의 각 차원에 따라 개체를 구분하고, 각 셀에 가장 우수한 개체를 저장하여 다양한 형태의 최적해를 발견한다. 주로 로봇 공학[2], 게임 디자인[4], 연속 최적화[5] 등에서 창의적이고 다양한 최적해를 탐색하는 데 사용되었다. MAP-Elites는 탐색 공간의 다양한 부분을 균형 있게 탐색하여 전반적인 문제 해결 능력을 향상시킨다.

이 논문에서는 새로운 진화 알고리즘으로서 MAP-Elites 알고리즘의 등장과 그 활용 가능성을 소개한다. 이를 위해 MAP-Elites 알고리즘의 기본 개념을 자세히 살펴보고, 다양한 분야에서의 활용 가능성을 제시한다. 이를 통해 MAP-Elites 알고리즘의 유용성에 대한 이해를 높이고자 하였다.

II. MAP-Elites 알고리즘의 기본 개념

MAP-Elites 알고리즘에서 탐색 공간(Search space)의 후보해는 특징 공간으로 매핑된다(그림1). 이때 탐색 공간은 문제의 모든 가능한 후보해들을 포함하는 공간이고, 특징 공간은 탐색 공간의 후보해들이 가지는 속성들을 기반으로 구성된 공간이다. 예를 들어, 탐색 공간의 한 후보해가 로봇의 특정 움직임 패턴을 나타낸다면, 이 후보해는 특징 공간에서 이동 거리, 에너지 소비량, 안정성 등의 기준으로 평가되어 특정 셀에 할당된다.

MAP-Elites 알고리즘의 기본적인 동작 과정은 다음과 같다. MAP-Elites 알고리즘은 최적화를 시작하기 전에 먼저 특징 공간을 설정

하고, 각 특징의 범위를 일정한 구간으로 나눈다. 이렇게 나눈 특징 공간의 격자 셀 각각은 특정 특징 조합을 나타내는 하나의 구간이다. MAP-Elites 알고리즘의 최적화는 1) 초기화, 2) 진화 단계로 구분된다. 초기화 단계에서는 무작위로 생성된 후보해들이 특징 공간의 각 셀에 배치된다. 각 후보해는 평가되어 해당 셀에 저장된다. 이후 진화 단계에서는 반복적으로 새로운 후보해를 생성하는데, 기존의 우수한 후보해를 부모로 선택하고, 교차 및 변이 연산을 통해 자손을 생성한다. 생성된 자손은 평가되어 기존 후보해보다 우수할 경우 해당 셀을 대체한다. 이러한 과정이 반복되면서 다양한 셀에 최적화된 솔루션이 점진적으로 아카이빙된다.

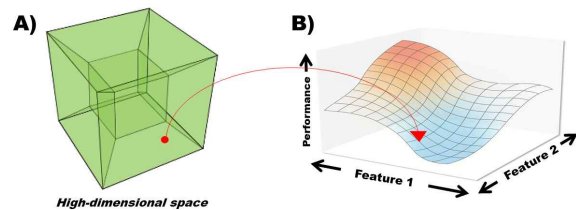


그림1 : MAP-Elites 알고리즘에서 탐색 공간(Search space)의 후보해는 특징 공간(Feature space)으로 매핑됨.

MAP-Elites 알고리즘의 강점은 탐색의 균형성과 다양성에 있다. 특징 공간의 다양한 부분을 균형 있게 탐색하기 때문에 최적해가 특정 영역에 국한되지 않는다. 또한, 각 셀에 가장 우수한 후보해를 저장함으로써 다양한 형태의 최적해를 동시에 유지할 수 있다. 이로 인해 MAP-Elites 알고리즘은 다양한 응용 분야에서 다양한 최적해를 탐색하는 데 매우 효과적이다.

III. 응용 분야 사례

1. 전송 네트워크 최적화

전송 네트워크 최적화는 네트워크 용량과 라우팅 경로를 효율적으로 설계해 데이터 전송의 비용과 시간을 최소화하는 문제이다. 기존 방법은 네트워크의 복잡성으로 인해 효율적인 해결이 어려웠으나, [5] 연구에서는 MAP-Elites 알고리즘을 사용해 다양한 네트워크 구조와 라우팅 경로

를 탐색해 최적의 솔루션을 찾아냈다. MAP-Elites 알고리즘은 다양한 해를 동시에 탐색하고 평가할 수 있는 장점이 있어, 여러 네트워크 구성과 조건을 고려해 최적화된 전송 네트워크를 설계할 수 있었다. 실험 결과, MAP-Elites 알고리즘은 기존의 휴리스틱 및 메타휴리스틱 방법보다 일관되게 더 나은 성능을 보여주었으며, 네트워크 용량 효율성과 데이터 전송 속도를 크게 향상시켰다. 특히, MAP-Elites 알고리즘은 복잡한 네트워크 환경에서도 높은 탐색 효율성을 보여주어 전송 비용과 시간을 줄이고, 네트워크 장애 상황에서도 유연하게 대처할 수 있는 경로를 제공하여 안정성을 높였다. 연구 결과, 다양한 네트워크 구성에서 MAP-Elites 알고리즘의 유용성이 검증되었으며, 이는 향후 전송 네트워크 최적화 분야에서 중요한 도구가 될 것으로 기대된다.

2. 자동 로봇 제어 시나리오

[6] 연구에서는 로봇 제어 학습 문제를 해결하기 위해 MAP-Elites 알고리즘을 사용했다. 저자들은 MAP-Elites 알고리즘을 활용하여 로봇이 다양한 환경에서 안정적이고 효율적으로 동작할 수 있는 시나리오를 학습하는 것을 목표로 하였다. 저자들은 로봇의 다양한 상태와 행동을 대표하는 다차원적 특징 공간을 정의하고, MAP-Elites 알고리즘을 통해 이 공간을 탐색하여 최적의 제어 정책을 탐색했다. 이를 위해 로봇의 움직임과 환경 상호작용을 시뮬레이션하고, 각 시나리오의 성능을 평가해 우수한 시나리오를 선택했다. 실험 결과, MAP-Elites 알고리즘이 기존의 강화학습 알고리즘이나 최적화 기법보다 높은 성능을 보였고, 다양한 환경 변화에 대응하는 로봇의 적응력과 안정성이 크게 향상되었다. 이를 통해 복잡한 환경에서도 로봇 제어가 더 효율적임을 증명했으며, 로봇이 예기치 않은 상황에서도 안정적으로 동작할 수 있도록 해 로봇 제어 시스템의 신뢰성을 높였다. 결과적으로 이 연구에서는 MAP-Elites 알고리즘이 로봇 제어 정책 학습에 있어 중요한 도구로 활용될 수 있음을 보여주었다.

IV. 결론

본 논문에서는 Multi-Dimensional Archive of Phenotypic Elites (MAP-Elites) 알고리즘의 기본 개념과 다양한 응용 분야에 대해 소개하였다. MAP-Elites 알고리즘은 탐색 공간을 다양한 특징으로 나누어 각 셀에 최적의 솔루션을 저장함으로써, 탐색의 균형성과 다양성을 동시에 추구한다. 이러한 접근 방식은 복잡한 최적화 문제를 해결하는 데 있어 기존의 진화 알고리즘보다 뛰어난 성능을 발휘할 수 있음을 여러 사례를 통해 입증하였다.

그러나 MAP-Elites 알고리즘은 고차원의 특징 공간에서는 탐색의 효율성이 저하되는 한계점도 존재한다. MAP-Elites 알고리즘의 성능을 더욱 향상 시키기 위해 새로운 초기화 기법과 알고리즘 병렬화 방안을 연구하고자 한다. 후속 연구에서는 이러한 과제들을 통해 MAP-Elites 알고리즘의 적용 범위를 확대하고, 다양한 최적화 문제를 효과적으로 해결하는 과제들에 대하여 다루고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00214326 및 RS-2023-00242528).

참고 문헌

- [1] Sfikas, Konstantinos, Antonios Liapis, and Georgios N. Yannakakis. "Controllable exploration of a design space via interactive quality diversity." *Proceedings of the Companion Conference on Genetic and Evolutionary Computation*. 2023.
- [2] Huang, Peide, et al. "CaDRE: Controllable and Diverse Generation of Safety-Critical Driving Scenarios using Real-World Trajectories." *arXiv preprint arXiv:2403.13208* (2024).
- [3] Stanley, Kenneth O., et al. "Designing neural networks through neuroevolution." *Nature Machine Intelligence* 1.1 (2019): 24-35.
- [4] Albaghajati, Aghyad, and Moataz Ahmed. "Video game automated testing approaches: An assessment framework." *IEEE transactions on games* 15.1 (2020): 81-94.
- [5] PIERROT, Thomas, and Arthur Flajolet. "Evolving Populations of Diverse RL Agents with MAP-Elites." *The Eleventh International Conference on Learning Representations*. 2022.
- [6] Fontaine, Matthew, and Stefanos Nikolaidis. "A quality diversity approach to automatically generating human-robot interaction scenarios in shared autonomy." *arXiv preprint arXiv:2012.04283* (2020).