

비지도 학습 기반 심층신경망을 이용한 위치 오차 고려 무인기 궤도 최적화

이용섭

연세대학교

woongsup.lee@yonsei.ac.kr

Optimization of UAV Trajectory Considering Position Error Using DNN based on Unsupervised Learning

Lee Woongsup

Yonsei Univ.

요약

본 논문에서는 무인기 기반 무선 네트워크에서 지상 사용자의 평균 스펙트럼 효율을 극대화하면서, 궤도 불확실성에 강건한 궤도 설계 및 자원 할당 기법을 제안한다. 주요 고려 요소로는 지상 사용자의 이동성, 무인기의 위치 오차 및 비행 금지 구역을 포함하며, 최적의 궤도 설계 및 자원할당 문제를 해결하기 위해서 비지도 학습 기반 심층 신경망 프레임워크를 설계하였다. 제안 기법은 레이블 없이도 학습이 가능하며, 기존 기법 대비 낮은 연산 복잡도로 더 높은 성능을 달성함을 실험을 통해 확인하였으며 위치 오차에 대한 강건성도 검증하였다.

I. 서론

최근 무인기(UAV)의 설계 및 제작 기술이 발전함에 따라, 무인기는 군사 작전, 감시, 물류 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 특히 높은 기동성, 신속한 배치, 온디맨드 연결성과 같은 특성으로 무선 통신 시스템에서도 중요한 역할을 하고 있다. 무인기는 공중 기지국 역할을 통해 무선 커버리지를 확장하고, 통신 신뢰성과 시스템 용량을 향상시킬 수 있다 [1]. 무인기 기반 통신에서는 수신 신호 품질과 데이터 전송률이 주로 LoS 채널의 경로 손실에 의해 결정되며, 무인기의 정밀한 위치 제어는 성능 개선에 중요한 역할을 한다. 이러한 특성에 기반하여 무인기의 궤도 최적화 및 자원 할당 문제에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다 [2].

그러나 실제 환경에서는 지상 사용자의 이동, 비행 금지 구역(NFZ), 무인기 위치 오차 등 다양한 현실적 제약이 존재하며, 이는 궤도 설계의 복잡성을 높이고 통신 성능에 영향을 줄 수 있다. 특히 무인기는 제어의 불완전성, 기체의 흔들림(jitter), 위치 정보의 부정확성 등에 의해 계획된 궤도로부터 이탈할 가능성이 높으며, 이러한 위치 오차는 통신 성능에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 이를 해결하기 위해, 위치 오차를 고려한 정확하고 강건한 궤도 계획 및 자원 할당 기법에 대한 연구가 일부 수행되어 왔다. 예를 들어, [3]에서는 무인기의 기동성 오차, 풍속, 사용자의 위치 불확실성 등을 반영하여, 총 전력 소비를 최소화하는 강건한 궤도 및 자원 할당 방안을 제안하였다. 그러나 기존 연구들은 대부분 노드 이동성, NFZ, 위치 오차 등 개별 요소에 초점을 맞춘 접근이 주를 이루며, 이러한 물리적 제약 요소들을 통합적으로 동시에 고려한 무인기 궤도 및 자원 최적화 연구는 여전히 미흡한 실정이다.

자원 할당과 궤도 설계의 공동 최적화 문제는 일반적으로 비선형 혼합 정수 프로그램으로 모델링되며, 전통적인 최적화 기법은 높은 계산 비용과 시간 소모의 한계를 가진다. 이에 따라 최근에는 딥러닝 기반 접근법, 특히 라벨이 없는 환경에서도 학습이 가능한 비지도 학습 프레임워크가 주목받고 있으며, 무인기 통신 시스템에도 효과적으로 적용될 수 있다 [4].

본 연구에서는 위치 오차, NFZ, 지상 사용자의 이동성 등을 통합적으로 고려한 무인기 통신 시스템 모델을 기반으로, 최소 스펙트럼 효율을 극대화하는 궤도 및 자원 할당 최적화 문제를 다룬다. 이를 위해 심층 신경망 구조와 비지도 학습 기반 손실 함수를 설계하고, 위치 오차를 학습 과정에 반영하여 강건성을 확보하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 제안 기법의 성능을 정량적으로 검증하였으며, 그 결과 위치 오차가 큰 상황에서도 NFZ를 안정적으로 회피하고 궤도 및 자원 할당을 효율적으로 수행함을 확인하였다.

II. 본론

본 연구에서는 비지도학습 기반 심층신경망 구조를 활용하여 최적의 무인기 궤도와 자원할당을 찾는 방안을 제안하였다. [4], [5]를 기반으로 완전 연결망 구조를 활용한 심층 신경망(DNN)을 설계하였다. 제안된 신경망 구조 및 학습 방식은 그림 1에 제시되어 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 본 DNN은 무인기의 초기 위치와 지상 사용자 정보를 입력으로 받아, 무인기의 궤적 및 자원 할당 값을 출력하도록 구성되어 있다. 특히 출력층에서는 Sigmoid 함수와 Softmax 함수를 각각 적용하여, 이진 특성과 출력값의 제약 조건(예: 확률 합 제약 등)을 효과적으로 만족할 수 있도록 설계하였다.

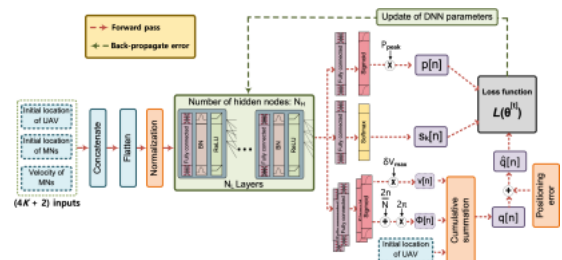


그림 1. 제안된 비지도학습 기반의 UAV 궤적 및 자원할당 최적화를 위한 심층신경망 구조.

다음으로, 구성된 심층 신경망의 학습을 위해 [4]에서 제안된 방식에 따라 최적화 문제의 목적 함수와 제약 조건을 반영한 손실 함수를 정의하고 이를 기반으로 학습을 수행하였다. 목적 함수는 지상 사용자 중 최소 스펙트럼 효율에 음수를 취한 형태로 설정되었으며, 손실 함수를 최소화하는 방향으로 학습이 진행됨에 따라 지상 사용자의 스펙트럼 효율이 증가하도록 신경망의 파라미터가 업데이트되도록 구성하였다.

더불어, 제약 조건이 만족되지 않을 경우 손실 함수의 값이 증가하도록 손실 함수 구조를 설계하였다. 이를 위해 ReLU(Rectified Linear Unit) 함수를 활용하였으며, 제약 조건이 위반되었을 때는 양의 값이, 만족되었을 때는 0의 값이 출력되도록 구성하였다. 이러한 설계를 통해 현실 통신 네트워크 환경에서 반드시 고려되어야 하는 다양한 제약 조건들을 효과적으로 반영할 수 있도록 하였다. 우선, 무인기의 궤적 상 위치가 비행 금지 구역내에 포함될 경우, 손실 함수 값이 활성화되어 해당 궤적이 학습 과정에서 불이익을 받도록 하였다. 또한, 무인기의 시작 지점과 종료 지점 간의 거리 차이를 손실 함수에 포함시킴으로써, 무인기가 비행을 마친 후 초기 출발 지점으로 복귀하는 경로를 유도할 수 있도록 설계하였다. 더불어, 각 타임슬롯에서 사용된 전송 전력의 평균값과 사전에 정의된 평균 송신 전력 간의 차이를 기반으로 손실 항을 정의함으로써, 평균 송신 전력 제약 조건을 만족하는 자원 할당 전략이 도출되도록 학습 구조를 구성하였다.

제안한 심층 신경망의 학습을 위해, 무인기의 초기 위치와 지상 사용자의 위치를 무작위로 생성한 후 이를 신경망의 입력으로 활용하여 학습을 수행하였다. 특히, 신경망에서 출력된 UAV의 궤적에 임의의 노이즈를 추가함으로써, 위치 정보의 부정확성을 모델링하였으며, 이를 통해 UAV의 위치 오차를 학습 과정에 반영할 수 있도록 구성하였다 [5]. 더불어 임의로 움직이는 지상사용자의 움직임도 고려하였다. 이를 통해서 실제 환경에서 발생할 수 있는 위치 오차에 대해 강건한 궤도 예측 성능을 확보가 가능케 구현하였다.

제안된 방안의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션 환경을 다음과 같이 설정하였다. 사용자 수는 4명, 총 시뮬레이션 시간은 25초이며, 무인기의 최대 속도는 30 m/s, 사용자 속도는 3 m/s, 비행 고도는 10 m, 시간 간격은 0.5초로 설정하였다. 또한, 평균 송신 전력은 35 dBm, 최대 송신 전력은 41 dBm으로 구성하였다. 또한 중심 좌표가 (-15, -15) m이고 반지름이 10 m인 원형 비행금지구역을 고려하였다. 무인기와 지상 사용자의 초기 위치는 한 번이 100 m인 정사각형 영역 내에 무작위로 배치되었으며, 지상 사용자의 이동 방향도 무작위로 설정되었다. 딥러닝 모델로는 6개 층과 1000개의 은닉 노드로 구성된 완전연결망 구조를 사용하였으며, 학습률은 0.00005, 미니배치 크기는 8192, 에폭 수는 5000으로 설정하였다.

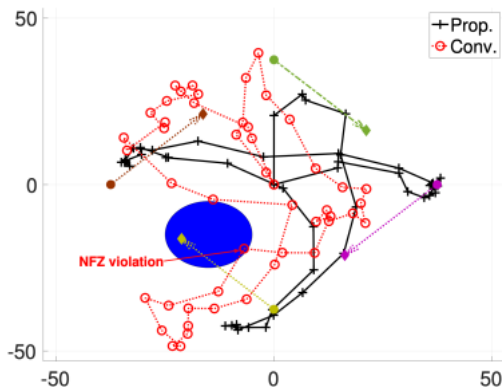


그림 2. 제약된 비지도학습 기반의 UAV 궤적.

그림 2는 제안된 기법과, 위치 오차를 고려하지 않은 기존 심층신경망 기반 기법에서 도출된 UAV의 궤적을 비교하여 보여준다. 결과에서 확인할 수 있듯이, 제안 기법은 위치 오차가 존재하는 상황에서도 비행 금지 구역(NFZ) 제약을 안정적으로 만족한 반면, 기존 기법은 비행 금지 구역을 침범하는 현상이 발생하였다. 이를 통해 제안 기법의 위치 오차에 대한 강건성을 확인할 수 있다. 또한, 최소 스펙트럼 효율의 경우, 제안 기법은 6.179 bps/Hz, 기존 기법은 5.176 bps/Hz로 측정되어, 제안 기법의 우수한 성능과 최적성을 입증하였다. 마지막으로, 제안 기법의 계산 시간은 1.4ms로 매우 짧게 측정되었으며, 이를 통해 실시간 적용 가능성 역시 확인할 수 있었다.

III. 결 론

본 논문에서는 지상-무인기 통신 네트워크에서 무인기의 궤도 및 자원 할당을 최적화하여 최소 평균 스펙트럼 효율을 극대화하는 딥러닝 기반 프레임워크를 제안한다. 제안 기법은 지상 사용자의 이동성, 비행금지구역, 무인기의 위치 오차와 같은 현실적 제약을 고려하며, 비선형 최적화 문제를 효율적으로 해결하기 위해 심층신경망 구조와 비지도 학습 기반 훈련 기법을 설계하였다. 손실 함수는 목적함수의 극대화와 제약조건의 만족을 반영하여 설계되었으며, 시뮬레이션을 통해 위치 정보에 오차가 있는 경우에도 비행금지구역을 침범하지 않는 무인기 궤도를 찾는 것을 확인할 수 있었다. 또한 제안 방안이 낮은 계산복잡도로 동작하여 실제 환경에서 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다. 향후 연구로는 현재 제안 방안의 수학적 검증과 다중 무인기가 공존하는 환경에서의 최적 자원할당을 진행할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00449555, 비전 환경 인식을 통한 대형 멀티모달 모델 기반 사물인터넷 오케스트레이션 최적화).

참 고 문 헌

- [1] Z. Wei *et al.*, "UAV-assisted data collection for Internet of Things: A survey," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 17, pp. 15460-15483, Sep. 2022.
- [2] G. Park, K. Heo, W. Lee, and K. Lee, "UAV-assisted wireless-powered two-way communications," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 2641-2655, Mar. 2024.
- [3] D. Xu, Y. Sun, D. W. K. Ng, and R. Schober, "Multiuser MISO UAV communications in uncertain environments with no-fly zones: Robust trajectory and resource allocation design," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 5, pp. 3153-3172, May 2020.
- [4] W. Lee, O. Jo, and M. Kim, "Intelligent resource allocation in wireless communications systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 1, pp. 100-105, Jan. 2020.
- [5] W. Lee and K. Lee, "Resource allocation scheme for guarantee of QoS in D2D communications using deep neural network," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 25, no. 3, pp. 887-891, Mar. 2021.