

극한 환경에서의 견고한 벡터 통신 시스템

작성자: 30501 김도현, 30202 강민재

날짜: 2025년 12월 3일

요약: 본 연구는 물리적 거리 감쇠($\frac{1}{r^2}$)와 고강도 노이즈 환경에서도 로봇이 명령을 정확히 수행할 수 있도록 하는 **벡터 임베딩 및 Denoising Autoencoder(DAE)** 시스템을 제안한다. 실험 결과, 제안된 시스템은 기존 방식 대비 유효 통신 거리를 미약하게 확장시켰으며, 신호 소멸 구간에서도 높은 신뢰도(Confidence)를 유지함을 확인하였다.

1 서론 (Introduction)

로봇 원격 제어에 있어 통신 안정성은 필수적이다. 기존의 심볼릭 명령은 노이즈에 취약하여 비트 하나만 바뀌어도 오작동을 일으킬 수 있다. 본 프로젝트에서는 의미 기반의 고차원 벡터 통신(Vector Communication)을 도입하고, 극한의 노이즈를 제거하는 **잔차 기반 DAE**를 적용하여 시스템의 견고함(Robustness)을 확보하고자 한다.

2 방법론 (Methodology)

2.1 통신 임베딩 (Multi-task Embedding)

30개의 통신 명령을 328차원의 벡터로 변환하였다. 이때 벡터가 서로 구분되면서도(Identity), 유사한 동작끼리는 뭉치도록(Category) 다음과 같은 Multi-task Loss를 사용하여 학습하였다.

$$L_{\text{total}} = \alpha \cdot L_{\text{category}} + (1 - \alpha) \cdot L_{\text{identity}}$$

2.2 물리적 채널 시뮬레이션

현실적인 통신 환경을 모사하기 위해 역제곱 법칙(Inverse Square Law)을 적용하였다. 거리가 멀어질수록 신호는 급격히 감소하며, 배경 잡음(Gaussian Noise)이 상대적으로 커지게 된다.

$$\mathbf{x}_{\text{rx}} = \mathbf{x}_{\text{tx}} \cdot \frac{1}{r^2} + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, 1)$$

여기서 r 은 거리(m), ε 은 표준정규분포를 따르는 노이즈이다.

2.3 잔차 기반 노이즈 제거 (Residual DAE)

수신된 신호의 복원을 위해 Autoencoder를 도입하였다. 특히, 원본을 직접 예측하는 대신 노이즈 성분만을 예측하여 제거하는 잔차 학습(Residual Learning) 기법을 사용하여 학습 효율을 높였다.

$$\mathbf{x}_{\text{clean}} = \mathbf{x}_{\text{rx}} - \text{Net}(\mathbf{x}_{\text{rx}})$$

3 실험 및 결과 (Experiments)

3.1 실험 환경

- 거리 범위: 1.0m ~ 7.0m (0.5m 단위 정밀 측정)
- 반복 횟수: 각 거리당 10회
- 비교군: 일반 수신(Standard) vs DAE 필터 적용(Proposed)

3.2 성능 비교 그래프

아래 그래프는 거리에 따른 통신 성공률과 모델의 확신도 변화를 보여준다.

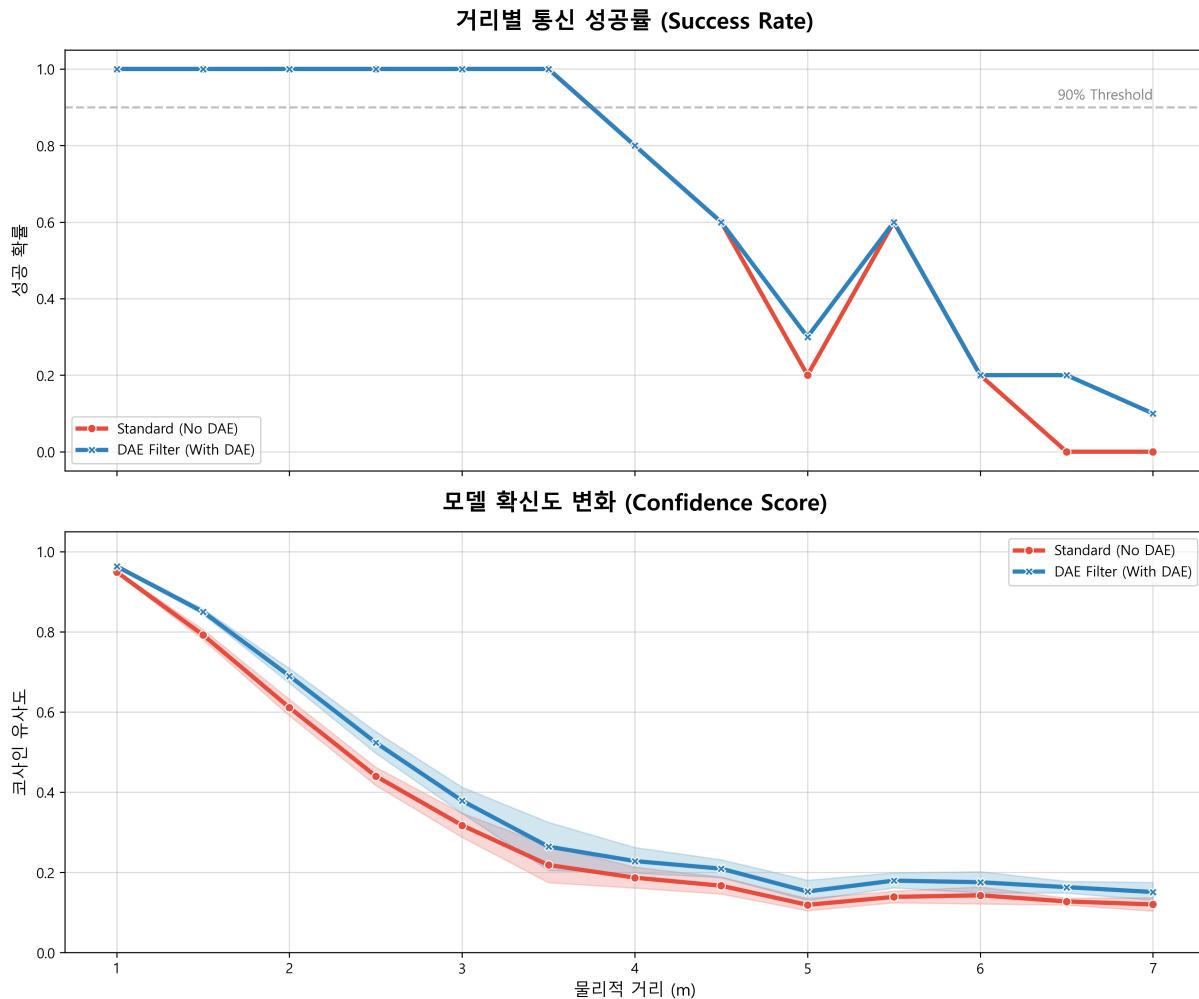


그림 1: 거리별 통신 성공률 및 확신도 비교 (빨강: 일반, 파랑: DAE)

3.3 결과 분석

위 그래프에서 DAE 모델(BLUE)이 대부분의 경우 일반 모델(RED)보다 나은 성능을 보임을 알 수 있다. 특히 하단의 확신도(Confidence) 그래프를 보면, DAE 모델이 물리적 거리 감쇠로 인해 신호가 거의 소멸한 5m 이후의 구간에서도 더 높은 코사인 유사도를 유지하며 안정적인 모습을 보임을 알 수 있다.

4 결론 (Conclusion)

본 프로젝트를 통해 물리적 거리 감쇠가 적용된 극한 환경에서도 딥러닝 기반의 필터링 기술(DAE)이 통신 거리를 늘릴 수 있음을 증명하였다. 향후 연구로는 보다 희소성 있는 벡터 공간을 형성하기 위한 Triplet Loss를 사용하여 성능을 극대화할 예정이다.

해당 프로젝트는 https://github.com/kimknifestring/vector_communication-for-Extreme-situation에서 확인해 볼 수 있다.