

최근 Semantic Communication의 연구 동향

정창교, 나웅수*

국립 공주대학교, *국립 공주대학교

0322brad@smail.kongju.ac.kr, *wsna@kongju.ac.kr

Recent Research Trends in Semantic Communication

Jeong Chang Gyo Na Woong Soo*

Kongju National Univ., *Kongju National Univ

요약

본 논문에서는 시맨틱 통신의 정보이론적 배경을 시작으로 시맨틱 변수와 시맨틱 왜곡 개념을 중심으로 한 이론적 기반을 정리하고, 학습 기반 시맨틱 통신 모델, 지식 및 생성형 인공지능을 활용한 최신 접근 방법, 그리고 네트워크 수준에서의 시맨틱 통신 확장과 보안 이슈를 체계적으로 분석하였다. 이를 통해 시맨틱 통신의 현재 연구 동향과 향후 6G 핵심 기술로서의 가능성을 논의하였다.

I. 서론

샤논의 정보이론은 통신의 기술적 계층(technical level)에 초점을 맞추어, 송신자가 선택한 메시지를 수신자가 얼마나 정확하게 복원할 수 있는지를 정량화하였다. 그러나 Weaver가 제시한 의미 계층(semantic level)과 효과 계층(effectiveness level)은 기존 통신 이론에서 충분히 다루어지지 못하였다 [1]. 최근 6G 비전에서는 지능형 서비스와 과제 지향 통신의 중요성이 강조되면서, 이러한 의미 계층의 역할이 다시 부각되고 있다. 시맨틱 통신은 송신자가 전달하고자 하는 의미나 의도를 중심으로 정보를 추출하고, 수신자가 이를 이해하고 활용할 수 있도록 하는 통신 방식이다. 이는 비트 단위의 정확한 복원보다는 의미 보존과 과제 성공률을 목표로 하며, 공유 지식, 학습 기반 표현, 의미 인식 자원 관리 등을 핵심 요소로 한다 [2]. 이러한 접근은 기존 통신 패러다임을 넘어, 네트워크 자체가 지능적으로 동작하는 방향으로의 전환을 가능하게 한다.

II. 본론

A. 시맨틱 통신의 이론적 기반

시맨틱 통신의 이론적 토대는 샤논 정보이론을 확장하여 의미 정보를 다루는 데 있다. 최근 연구에서는 메시지로부터 의미를 나타내는 시맨틱 변수를 정의하고, 수신기가 이를 얼마나 정확히 복원하는지를 시맨틱 왜곡(semantic distortion)으로 측정하는 이론적 틀이 제안되었다 [3]. 이는 비트 오류가 존재하더라도 의미가 유지된다면 통신이 성공적일 수 있음을 수학적으로 정당화한다.

이러한 관점은 전통적인 압축 및 채널 부호화 이론과 차별화되며, 의미 중심의 성능 지표와 새로운 통신 한계를 정의할 수 있는 가능성을 제공한다. 특히 6G 환경에서는 의미 정보의 중요도에 따라 전송 여부와 품질을 조절하는 것이 핵심 과제로 부각되고 있다 [2].

B. 학습 기반 시맨틱 통신과 대조학습

딥러닝 기반 시맨틱 통신은 종단 간(end-to-end) 학습을 통해 송수신기를 공동으로 최적화하는 방식으로 발전해 왔다. 초기 연구는 오토인코더 구조를 활용하여 재구성 오류를 최소화하는 데 초점을 맞추었으나, 이는 의미 보존 측면에서 한계를 지닌다.

이를 개선하기 위해 최근에는 대조학습(contrastive learning)을 활용한 시맨틱 통신이 제안되었다. 이 접근은 의미적으로 유사한 메시지 표현

간의 거리를 줄이고, 서로 다른 의미는 명확히 구분하도록 학습함으로써 채널 잡음과 환경 변화에 강인한 시맨틱 표현을 획득한다 [4]. 이러한 방식은 의미 일관성을 유지하면서도 전송 효율을 향상시키는 장점을 가진다.

C. 생성형 모델 기반 시맨틱 통신

최근에는 사전 학습된 생성형 모델을 활용한 시맨틱 통신이 주목받고 있다. 이 접근에서는 송신자가 원본 데이터를 직접 전송하지 않고, 의미를 표현하는 저차원 조건 정보나 프롬프트만을 전달한다. 수신자는 이를 기반으로 생성 모델을 통해 원본 신호를 복원한다 [5].

특히 확산 모델(diffusion model) 기반 접근은 지연(latency)을 고려한 시맨틱 전송에서 우수한 성능을 보이며, 초저율 통신 환경에서도 높은 지각적 품질과 의미 유사도를 달성할 수 있음이 보고되었다 [5]. 이는 생성형 인공지능과 시맨틱 통신의 결합 가능성을 명확히 보여준다.

D. 네트워크 수준 확장과 자원 할당

시맨틱 통신은 절대점 통신을 넘어 네트워크 수준으로 확장되고 있다. 네이티브 지능형 시맨틱 네트워크에서는 의미 중요도, 과제 우선순위, 지연 제약을 고려하여 자원 할당과 스케줄링이 수행된다 [1]. 이러한 접근은 기존 QoS 중심 자원 관리보다 더 효율적인 네트워크 운용을 가능하게 한다.

또한 시맨틱 인식 자원 할당 기법은 제한된 대역폭과 에너지 자원을 의미적으로 중요한 데이터에 집중적으로 할당함으로써 전체 과제 성능을 향상시킨다 [6].

E. 보안과 신뢰성

시맨틱 통신은 전송 데이터의 양을 줄이고 의미만을 전달함으로써 보안 측면에서도 새로운 가능성을 제공한다. 그러나 의미 조작, 지식 불일치, 모델 공격과 같은 새로운 위협도 함께 발생한다. 이에 따라 시맨틱 통신 환경에 특화된 보안 모델과 신뢰성 평가 기법이 필요하다 [7].

III. 결론

본 논문에서는 시맨틱 통신의 이론적 기반과 최신 연구 동향을 종합적으로 분석하였다. 시맨틱 통신은 비트 중심 통신의 한계를 극복하고, 의미와 과제 수행 성능을 직접적으로 고려하는 새로운 통신 패러다임이다. 대조

학습과 생성형 모델의 도입, 네이티브 지능형 네트워크로의 확장은 시멘틱 통신의 실용성을 크게 향상시키고 있다.

향후 연구에서는 시멘틱 성능 지표의 표준화, 과제 일반화 성능 확보, 계산 복잡도와 통신 효율 간의 균형, 그리고 보안 및 신뢰성 문제 해결이 핵심 과제가 될 것이다. 이러한 연구가 진전된다면 시멘틱 통신은 6G 핵심 기술로서 중요한 역할을 수행할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터 육성 지원 사업(IIITP-2026-RS-202200156353) 및 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(RS-2019-NR040074)

참 고 문 헌

- [1] S. E. Trevlakis, N. Pappas, and A.-A. A. Boulogeorgos, "Toward Natively Intelligent Semantic Communications and Networking," IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 5, pp. 1486 - 1520, 2024.
- [2] X. Xie et al., "Less Data, More Knowledge: Building Next-Generation Semantic Communication Networks," IEEE Communications Magazine, vol. 62, no. 2, pp. 98 - 104, 2024.
- [3] Y. Liu, H. Yang, and Z. Zhang, "A Theory of Semantic Communication," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023.
- [4] J. Park et al., "Contrastive Learning-Based Semantic Communications," IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023.
- [5] Z. Qin et al., "Latency-Aware Generative Semantic Communications With Pre-Trained Diffusion Models," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024.
- [6] H. Li et al., "Adaptive Resource Allocation for Semantic Communication Networks," IEEE Transactions on Communications, 2023.
- [7] Z. Qin et al., "Secure Semantic Communications: Fundamentals and Challenges," IEEE Network, 2024.