

비전 기반 무선통신 기술 연구 동향

이기훈*, 권기범†, 정방철*

*충남대학교 전자공학과, †(주)아이티엘

kihun.h.lee@cnu.ac.kr, kbbkwon@gooditl.com, bcjung@cnu.ac.kr

Research Trend of Vision-aided Wireless Communication Technologies

Ki-Hun Lee*, Ki-bum Kwon†, Bang Chul Jung*

*Chungnam National University, †ITL Co., Ltd.

요약

본 논문에서는 최근 통신 분야에서 활발히 연구되고 있는 비전 기반 무선통신(vision-aided wireless communications) 기술의 연구 동향을 소개한다. 구체적으로, 무선통신 시스템에서 카메라와 같은 비전 센서의 데이터를 활용하여 극고주파 기반 무선 네트워크의 전파 차단물 예측, 빔 관리 및 자원 할당 등과 같은 네트워크 최적화 연구가 최근 활발히 수행되고 있다. 본 논문에서는 이와 관련된 최신 기술들을 포괄적으로 조사하여 소개한다.

I. 서론

차세대 이동통신 시스템 표준인 6G는 현 5G의 향상된 모바일 브로드밴드(enhanced mobile broadband: eMBB)를 넘어 더욱 높은 대용량의 전송 속도를 요구하는 몰입형 통신(immersive communication)을 주요 서비스 요건(usage scenario)의 하나로써 고려하고 있다 [1]. 이러한 시나리오에서 요구 성능 달성을 위한 기술 중 하나로, 밀리미터파(millimeter wave) 또는 테라헤르츠파(THz wave)와 같은 극고주파 스펙트럼의 넓은 대역폭을 활용하기 위한 기술이 활발히 연구되고 있다. 한편, 그림 1에 도시된 바와 같이 카메라로 대표되는 비전 센서를 활용한 비전 기반의 무선통신(vision-aided wireless communications) 기술이 최근 제안되어 연구되고 있다 [2]. 한 예로 극고주파는 근본적인 물리적 특성에 따라 높은 투과 손실을 가지며, 따라서 두 통신 노드 간 링크가 가시선(line-of-sight: LoS) 전파 환경일 때 신뢰성 있는 통신을 수행할 수 있다. 이를 위해 [3]에서는 기지국에 탑재된 카메라의 비전 데이터를 통해 전파 방해물(또는 차단물, blockage)을 예측하고, 지속적으로 가시선 링크를 확보하는 기술을 제안했다. 본 논문에서는 이를 포함하여 최근 연구된 비전 기반 무선통신 기술들을 소개한다 [3]-[9].

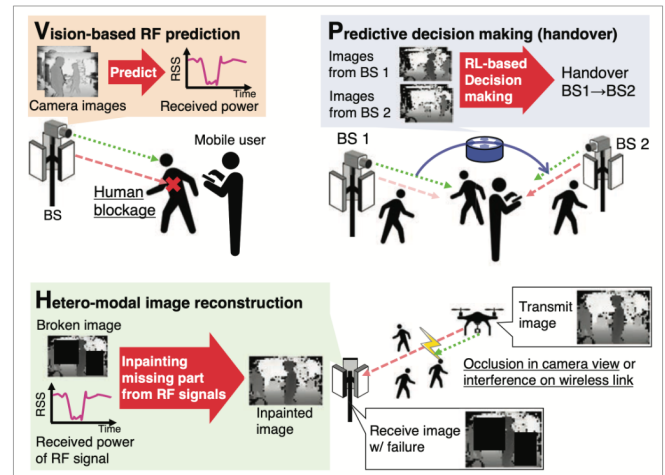


그림 1. 비전 기반 무선통신 시스템 시나리오 예 [2]

II. 비전 기반 무선통신 기술 연구 동향

앞서 소개한 바와 같이, 문헌 [3]에서는 밀리미터파 및 테라헤르츠파 통신 시스템에서 지속적인 가시선 링크 확보를 위한 비전 기반 무선통신 기술을 제시했다. 극고주파의 기본적인 물리적 특성에 따라, 이 대역에서의 통신은 높은 경로 및 투과 손실을 가지며, 여기서 높은 투과 손실은 두 통신 노드 간 전파 차단물 없이 가시선 링크가 확보되어야 신뢰성 있는 송수신을 가능하게 한다. 구체적으로, 극고주파 통신 링크가 방해물로 인해 가시선 전파가 차단되는 경우, 일차적으로 투과 손실로 인해 수신 신호 강도가 크게 낮아지고 이는 수신 신호 대 잡음비 열화로 이어진다. 이에 따라, 본 문헌에서는 차량과 같은 동적 방해물이 존재하는 환경에서 지속적인 가시선 링크 확보를 위한 비전 기반 통신 방해물 예측 및 사전 핸드오버 기술을 제안했다.

한편, 사전 핸드오버는 빔 코드북 탐색에 따른 지연을 완화하기 위해서도 활용될 수 있다. 고주파 기반 무선 네트워크에서는 큰 경로 감쇄를 해결하기 위한 방법의 하나로 대규모 다중 안테나를 통한 극지향성 빔을 활용하며, 이에 따라 빔 코드북 또한 많은 원소를 갖는다. 즉, 가시선 링크 확보를 위해 다른 기지국으로 핸드오버를 하더라도 코드북 탐색에 긴 시간이 요구되며, 이는 네트워크에서 큰 지연을 야기하게 된다. 이에 따라 본 문헌에서는 비전 센서(RGB 카메라)와 게이트 순환 유닛(gated recurrent unit: GRU) 네트워크를 기반으로, 연속적인 RGB 프레임과 밀리미터파 빔포밍 벡터 시퀀스를 관찰하고, 향후 가시선 링크 차단 여부를 학습하는 알고리즘을 통해 사용자 핸드오버를 수행하는 기술을 제안했다. 이와 같은 동적 차단 예측을 통해 사용자 핸드오버를 사전에 설정할 수 있으며, 이를 통해 지연 성능을 향상할 수 있는 결과를 도출했다.

문헌 [4]에서는 차량·사물(vehicle to everything: V2X) 통신시스템을 위한 컴퓨터 비전 기반 빔 쌍(beam pair) 선택 및 빔 결맞음(coherence) 시간 예측 기술을 개발했다. 기지국에 비전 센서를 탑재하여 네트워크 내 모든 이동 단말(mobile station: MS)을 식별하고 처리하며 운용하는 문헌 [3]과는 달리, 이로 인하여 발생하는 오버헤드를 완화하기 위해 이동 단말에 비전 센서를 탑재하는 시나리오를 제시했다. 반송파 주파수(carrier frequency)

로는 밀리미터파 대역을 고려하며, 기지국과 단말 모두 균일한 선형 배열(uniform linear array: ULA) 안테나를 이용한다. 이에 따라, 기지국과 각 단말은 빔 코드북을 가지며, 본 문헌에서는 모바일 단말에 설치된 카메라의 이미지를 통한 최적의 빔 정렬, 즉 기지국과 단말 간 최적의 빔 코드북 쌍을 선택하는 프레임워크를 제안했다. 이동 단말(차량)은 비전 센서를 통해 자신 주변의 동적 환경 정보를 획득하며, 이 정보를 기반으로 심층 신경망(deep neural network: DNN)을 통해 파일럿 신호 오버헤드 없이 자신과 기지국 간 최적의 빔 쌍을 선택한다. 나아가, 본 문헌에서는 비전 정보를 토대로 한 빔 결맞음 시간 예측 기술을 개발하여 더욱 효율적인 빔 정렬 기술을 제안했다. 특히, 모의실험 결과를 통해, 본 문헌에서 제안한 비전 기반의 빔 정렬 방법론이 기존 라이다(light detection and ranging: LIDAR) 기반의 솔루션보다 향상된 전송률 성능을 보이면서 더 낮은 하드웨어 복잡도 및 통신 오버헤드를 갖는 것으로 검증했다.

문헌 [5]에서는 밀리미터파 기반 다중 안테나(multiple-input multiple-output: MIMO) 통신시스템에서 컴퓨터 비전 기반의 코드북 설계 기술을 제시했다. 앞서 언급한 바와 같이, 고주파 기반의 네트워크에서 근본적인 문제 중 하나는 큰 경로 감쇄이다. 이를 해결하기 위한 방법의 하나로써 다중 안테나를 통한 극지향성 빔(beamforming)을 이용하며, 이러한 빔포밍을 수행하기 위한 코드북이 사전 정의되어 운용된다. 코드북 설계의 가장 간단한 방법으로는 섹터와 같이 통신 노드를 기준으로 주변 360°(전방향)를 해당 노드의 다중 안테나로 가능한 빔 개수만큼 등간격으로 나누어 서비스하는 범용(universal) 코드북 설계 방법이 있다. 하지만, 실질적인 환경에서 기지국은 대개 방해물 등으로 인해 전 방향이 아닌 일부 영역만을 서비스하게 되는 경우가 많으며, 이러한 환경을 고려하여 영역별(site-specific) 코드북 설계 기술이 연구되고 있다. 이를 위해 네트워크의 채널 상태 정보(channel state information: CSI)에 기반한 코드북 설계 기술이 제시되었으나, 이는 높은 복잡도와 큰 오버헤드가 동반된다.

이를 위해 본 문헌에서는 컴퓨터 비전 기반 코드북 설계 기술을 제시했다.

구체적으로, 가시선 링크 사용자에게 대해서는 이미지 기반의 코드북 설계를, 비가시선 링크 사용자에게 대해서는 FusionNet 기반의 코드북 설계를 각각 수행한다. 결과적으로, 기존 코드북 설계 기술 대비 채널 상태 정보에 대한 오버헤드를 크게 줄이면서 이에 견줄만한 평균 빔포밍 이득(average beamforming gain)을 달성하는 결과를 도출했다.

문헌 [6]에서는 무인기 중계 통신 네트워크에서 컴퓨터 비전 기반 최적화 기술을 고려했다. 앞서 소개한 문헌들과 마찬가지로 극고주파 대역을 활용하는 무인기 네트워크를 고려하며, 비전 센서는 무인기에 탑재된다. 나아가, 본 문헌에서도 앞서 소개한 문헌 [3]에서와 같이 가시선 링크 확보의 중요성을 제시하며, 이를 위해 무인기 중계 노드가 서비스하기 위한 지상 수신기의 위치 추적(localization)을 고려한다. 구체적으로, 본 문헌에서는 무인기에 탑재된 카메라로 수신한 비전 정보를 기반으로 무인기의 궤적과 전력 할당을 공동으로 최적화하는 프레임워크를 제안했다. 무인기는 우선 수신기의 위치를 추적하고 가시선 링크 확보를 위해 목표 검출 네트워크를 적용한다. 이로부터 획득한 정보를 바탕으로 비행에 소모되는 전력, 신호 송신 전력 및 이동 속력과 최소 고도를 고려하여, 달성 가능한 전송률(achievable rate)을 최대화하기 위한 이동 궤적, 빔포밍 및 송신 전력을 최적화한다. 특히, 제시한 비전 기반 무인기 네트워크는 기존 기술 대비 비용과 오버헤드를 크게 완화할 수 있다는 결과를 도출했다.

문헌 [7]에서는 비전 기반 통신시스템에서 다중 사용자 정합(multi-user matching) 및 자원 할당에 관한 연구를 수행했다. 기본적으로 비전 센서를 통해 감지된 시각 정보를 응용하기 위해서는 전파 신호와 시각 정보 간의 정합, 즉, 시각 정보를 통해 수집된 모든 객체로부터 이에 상응하는 타겟의 식별이 요구된다. 본 문헌에서는, 모든 기지국에 비전 센서인 RGB 카메라가 장착되어 있으며, 중앙처리장치(central processing unit: CPU)에서 모든 기지국의 시각 정보가 모여 처리되는 시스템 모델을 고려한다. 이후 여러 대의 카메라로부터 수집된 데이터를 종합하여 3차원 검출 방법을 통해 모든 객체의 위치, 크기 및 방향 정보와 같은 정보를 획득하며, 이 정보를 이용하여 객체들의 바운딩 박스(bounding box: BBox)를 생성하고 사용자들의 위치를 추정한다.

또한, 본 문헌에서는 시간 및 주파수 자원의 오버헤드를 줄이기 위한 시각 정보 기반의 자원 할당 기술도 고려했다. 구체적으로, 링크 간 간섭을 고려하여, 네트워크 내 합 전송률을 최대화하는 송신 전력 및 스케줄링 최적화 방법을 제시했다. 앞서 문헌들에서 제기된 바와 같이 기존 자원 할당 방법은 통상적으로 모든 기지국과 단말 간 무선 채널 상태 정보에 기반하여 최적화가 이루어진다. 본 문헌에서는 비전 정보에 기반하여 자원 할당을 최적화함으로써 오버헤드를 완화할 수 있다고 언급했다.

문헌 [8]에서는 컴퓨터 비전 정보에 기반한 빔 관리 기술을 제시했다. 앞서 여러 번 언급했다시피 종래 5G NR을 포함한 차세대 무선 통신시스템은 극고주파 스펙트럼의 활용을 고려하며, 경로 손실, 대기 흡수 등을 보상하기 위해 빔포밍 기술이 활용된다. 여기서, 이러한 빔포밍을 위해 기존 5G NR 시스템은 빔 스위핑(sweeping), 정제(refinement) 과정을 거쳐 최적의 빔 코드 워드를 선택하는 프레임워크를 갖는다. 하지만, 이 과정에서 요구되는 탐색 및 피드백 과정뿐만 아니라 채널 상태 정보 획득, 핸드셰이크로 인해 높은 오버헤드가 발생하고 이에 따라 송신 전력, 지연 및 자원 관리 측면에서 비효율성을 야기하게 된다. 특히, 사용자 단말의 위치가 변할 때마다 이 과정을 반복해야 한다는 문제도 있다.

이에 따라 본 문헌에서는 RGB-depth 카메라를 통해 획득한 시각 정보를 이용하여 사용자 단말의 위치를 식별하고 이를 통해 빔포밍을 수행하는 프레임워크를 제안했다. 결론적으로, 기지국은 코드북 양자화 및 사용자 단말과의 핸드셰이크 과정 없이 빔포밍을 통해 신호를 전송하며, 이를 통해 송신 전력과 지연을 대폭 줄일 수 있는 결과를 도출했다.

문헌 [9]에서는 컴퓨터 비전 기반의 지능형 재구성 표면(reconfigurable intelligent surface: RIS) 최적화 기술을 제시했다. 요컨대, 지능형 재구성 표면은 소규모 수동 메타 소자들을 평면에 다수 배치하고, 각 소자의 반사 계수를 실시간으로 제어하여 표면으로 입사되는 전자기파를 원하는 방향으로 집중시켜 반사함으로써, 통신 성능을 향상시키는 기술이다. 이러한 지능형 재구성 표면을 이용하는 네트워크의 주요 과제 중 하나는 동적 환경에서 적절한 반사 계수 최적화를 통해 동적 빔 추적을 하여 통신 성능을 극대화하는 것이다. 이를 위해 기존 채널 상태 정보(CSI) 기반, 빔 스위핑 기반, 심층 학습 기반 기법들이 제안되었으나, 채널 상태 정보 기반의 방법론은 그 자체로는 효율적이나 대규모 메타 소자로부터 통신 노드까지의 채널 상태 정보

획득에 매우 큰 오버헤드를 갖는다는 한계가 있다. 또한, 빔 스위핑 방법론은 채널 추정에 요구되는 부하를 완화할 수 있으나, 스위핑을 수행하는 데 시간이 많이 소모되며, 큰 지연을 초래한다. 마지막으로, 심층 학습 기반의 방법론은 위치 정보 획득이나 전력 분배에 상당한 훈련 오버헤드를 초래한다는 단점을 언급했다.

본 문헌에서는 동적 네트워크에서 지능형 재구성 표면에 카메라를 설치하여 주변 비전 정보를 획득하고, 이로부터 입사 빔 방향(incident beam direction)과 원하는 반사 빔 방향(desired reflected beam direction)을 식별하여 메타 소자들의 반사 계수를 실시간으로 최적화하는 빔 추적 기술을 제시했다. 특히, 이미지로부터 노드의 3차원 좌표를 획득하기 위해 스테레오 비전을 이용하며, 이를 위해 지능형 재구성 표면에 두 대의 카메라를 탑재했다. 뿐만 아니라 본 문헌에서는 이러한 컴퓨터 비전 기반 지능형 재구성 표면의 프로토타입을 구현하고 실증 또한 진행했으며, 결론적으로 시각 정보가 기존 방법들 대비 지능형 재구성 표면의 동적 빔 추적을 위해 신속한 반사 계수 조정을 원조할 수 있다는 결과를 도출했다.

III. 결론

본 논문에서는 최근 무선통신 분야에서 연구되고 있는 비전 기반 무선통신(vision-aided wireless communications) 기술을 소개했다. 차세대 통신 시스템의 핵심 기술 중 하나로 거론되는 극고주파 기반 무선 네트워크에서 전파 차단에 의한 투과 손실 방지, 빔 관리 등을 위해 최초로 고안된 비전 기반 통신 기술이, 최근에는 무인기 기반 비지상(non-terrestrial) 네트워크 또는 고주파 대역을 고려하지 않은 지능형 재구성 표면 시스템에도 응용되는 연구 동향을 살펴보았다. 특히, 컴퓨터 모의실험을 통해 비전 기반 통신 기술의 효율성을 검증하는 것을 시작으로, 최근 연구 결과는 프로토타입을 구현하여 실증까지 진행하는 결과를 볼 수 있었다. 특히, 향후에도 여러 네트워크에서 비전 기반 무선통신 기술을 응용해볼 수 있을 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 1415181141, 프론트 에이프런 모듈 30% 경량화를 위한 경량금속 기반 일체화 기술 및 AI분석기반 접합공정 고도화 기술개발).

참 고 문 헌

- [1] Recommendation ITU-R-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond, ITU-R Standard M.2160-0, Nov. 2023.
- [2] T. Nishio, Y. Koda, J. Park, M. Bennis, and K. Doppler, "When wireless communications meet computer vision in beyond 5G," *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 5, no. 2, pp. 76-83, Jun. 2021.
- [3] G. Charan, M. Alrabeiah, and A. Alkhateeb, "Vision-aided 6G wireless communications: Blockage prediction and proactive handoff," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 10, pp. 10193-10208, Oct. 2021.
- [4] W. Xu, F. Gao, X. Tao, J. Zhang, and A. Alkhateeb, "Computer vision aided mmWave beam alignment in V2X communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 4, pp. 2699-2714, Apr. 2023.
- [5] J. Chen, F. Gao, X. Tao, G. Liu, C. Pan, and A. Alkhateeb, "Computer vision aided codebook design for MIMO communications systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 5, pp. 3341-3354, May 2023.
- [6] Z. Hua, Y. Lu, G. Pan, K. Gao, D. B. d. Costa, and S. Chen, "Computer vision-aided mmWave UAV communication systems," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 14, pp. 12548-12561, Jul. 2023.
- [7] W. Xu, F. Gao, Y. Zhang, C. Pan, and G. Liu, "Multi-user matching and resource allocation in vision aided communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 71, no. 8, pp. 4528-4543, Aug. 2023.
- [8] Y. Ahn, et al., "Toward intelligent millimeter and terahertz communication for 6G: computer vision-aided beamforming," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 30, no. 5, pp. 179-186, Oct. 2023.
- [9] M. Ouyang, F. Gao, Y. Wang, S. Zhang, P. Li, and J. Ren, "Computer vision-aided reconfigurable intelligent surface-based beam tracking: Prototyping and experimental results," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 12, pp. 8681-8693, Dec. 2023.