

종속주행 통신을 위한 보조 빔 기반 추적 기법

오 세 명*, 안 성 빈*

Vehicle Platooning Communication Using Auxiliary Beam-Assisted Tracking Scheme

Semyoung Oh*, Seongbin An*

요 약

본 논문은 종속주행 차량 간의 고속 통신을 위해, 안정적인 빔 정렬과 더불어 효과적인 빔포밍 통신 구현을 목표로 보조 빔 기반 빔 추적 기법을 적용하였다. 제안된 기법의 효용성을 평가하기 위해 차량 주행 및 무선 통신 환경을 구성하고, 랜덤 시뮬레이션을 통해 위치정보 기반 방식과의 전송 성능을 비교하였다.

키워드 : 종속주행, 빔포밍, 보조 빔, 빔 추적

Key Words : Vehicle platooning, beamforming, auxiliary beam, beam tracking

ABSTRACT

This paper applies an auxiliary beam-assisted beam tracking method to achieve stable beam alignment and effective beamforming for high-speed communication between vehicles in a platooning scenario. To evaluate the effectiveness of the applied method, a vehicle dynamics and wireless communication environment were modeled. Furthermore, its data transmission performance was also compared with that of a location-based method through random simulations.

I. 서 론

최근 유·무인 및 자율주행 기술의 발전과 함께 종속주행 또한 주목받고 있다^[1]. 종속주행은 복수의 차량이 동일 경로를 따라 주행하는 방식으로 추종 차량은 선행 차량에서 관측 및 제공된 정보를 활용, 주행환경에 대한 예측으로 더욱 안전하고 효율적인 주행이 가능하다. 이러한 정보는 보행자 등의 주변 환경을 포함한 고해상도 이미지이나 영상일 수 있으며, 이를 원활하게 전달하기 위해서는 고속 데이터 통신이 필요하다. 빔포밍(Beamforming)은 안테나 배열을 통해 특정 방향으로 에너지를 집중시키는 기술로 차량간(Vehicle-to-Vehicle, V2V) 통신에서 전송 속도 개선 목적으로 활발히 연구되고 있다^[2]. 하지만, 곡선 도로 주행 시 차량간 상대위치 변화로 원활한 빔포밍 통신을 위해서는 지속적인 빔 정렬이 필요하며, 이를 위해 빔 훈련(Beam training)이 활용될 수 있다^[3]. 해당 기법은 채널의 이득과 도래각(Angle of Arrival, AoA) 추정을 매 전송 블록마다 실시하여, 높은 정확도의 빔 정렬을 이룰 수 있으나 과도한 오버헤드(overhead)로 통신 지연 또한 발생시킬 수 있다. 이러한 빔 훈련 기법의 대안으로 상대적으로 낮은 오버헤드를 요하는 위치정보 기반 빔 추적(Beam tracking) 방식 또한 고려될 수 있으나 위치정보 오차 및 낮은 갱신속도 등으로 인한 빔 정렬 정확도 저하가 발생할 수 있다^[4].

본 논문은 곡선 도로 종속주행간 V2V 빔포밍 통신에 보조 빔(Auxiliary beam) 기반 빔 추적 기법 적용을 제안한다^[5]. 해당 기법은 추적 주기내 차량간 벡터각 변화는 미미하다는 가정하에 이전 빔 지향각 주변으로 보조 빔을 조사하고 분석하여 현재 지향각을 추정한다.

이어지는 장에서는 두 대의 차량으로 구성된 종속주행 시나리오를 기반으로 차량 주행과 무선채널 모델을 제시하고, 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하여 위치정보 기반 대비 보조 빔 추적 기법의 우수성을 확인하였다.

II. 종속주행 모델

본 논문에서 차량 A (선행) 및 차량 B (추종)는 그림 1과 같이 x - y 평면상 반지름이 R 인 반원 궤적을 반시계 방향 및 속도 v 로 시간 $T = (\pi R - D)/v$ 동안 주행

* 이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(912A25702).

♦° First and Corresponding Author: Agency for Defense Development, add187sm@re.kr, 정희원

* Agency for Defense Development, seongbin.an@add.re.kr

논문번호 : 202505-104-E-LU, Received May 2, 2025; Revised May 21, 2025; Accepted May 21, 2025

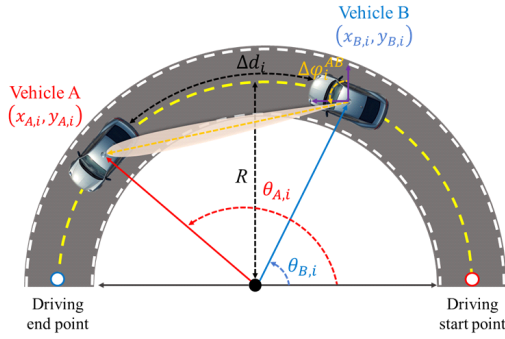


그림 1. 종속주행간 V2V 빔포밍
Fig. 1. V2V beamforming in vehicle platooning

하며 차량 A가 종료지점에 도달 시 두 차량 모두 주행을 중지한다. 주행상태는 Δt 간격으로 갱신되며, 등속도 주행 시 각 차량의 방위각은 $\theta_{A,i} = \omega \Delta t - \pi/2 + D/R$ 및 $\theta_{B,i} = \omega \Delta t - \pi/2$, 위치는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} x_{A,i} &= R \cos(\theta_{A,i}), y_{A,i} = R \sin(\theta_{A,i}) \\ x_{B,i} &= R \cos(\theta_{B,i}), y_{B,i} = R \sin(\theta_{B,i}) \end{aligned} \quad (1)$$

(1)에서 $i = 0, 1, \dots, T/\Delta t$, $\omega = v/R$ 및 $D = \delta_D \pi R$ 는 각각 시간지표, 각속도 및 차간거리이다.

실제 주행환경에서는 다양한 외적 요소에 의해 차간 거리를 지속적으로 동일하게 유지하는 것이 제한된다. 따라서, 이러한 점을 반영함과 동시에 차량 주행 모델을 단순화하기 위해 차량 B의 속도만 P_v 의 확률로 $v_{B,i} = v_{B,i-1} + \Delta v$ 와 같이 갱신되며, Δv 는 $\delta_v U[0,1]$ 의 균일분포를 따른다고 가정하였다. 또한, 이러한 속도 변화로 인해 발생할 수 있는 차량 A와의 충돌을 방지하기 위해, 차간거리인 $\Delta d_i = R|\theta_{A,i} - \theta_{B,i}|$ 가 $\Delta d_{min} = \delta_m D$ 이하로 감소 시 차량 B의 속도를 $\Delta v = (\Delta d_{min} - \Delta d_i)/\Delta t$ 및 $v_{B,i} = \max(v_{B,i-1} - \Delta v, 0)$ 와 같이 감속한다. 결과적으로 차량 B의 위치 방위각은 $\omega_{B,i} = v_{B,i}/R$ 와 함께 $\theta_{B,i} = \theta_{B,i-1} + i \Delta t \omega_{B,i-1}$ 와 같이 재정의 된다.

III. 빔 추적 기법

본 장에서는 종속주행시 차량간 데이터 전송에 활용할 수 있는 빔 추적 기법에 대해 논하고자 한다. 우선, 차량 A는 전방향성(Omni-directional) 안테나를 통해 주행간 획득한 정보를 송신하고 차량 B는 N_A 개의 안테나로 이루어진 균일선형배열(Uniform Linear Array, ULA)를 통해 수신 받는 경우를 고려한다. 여기서, 안테나간 간격은 반파장이며 가시선(Line of Sight, LOS)이

유지된다고 가정한다. ULA의 조향벡터(steering vector)는 $\tilde{\varphi} = -\pi \cos(\varphi)$ 및 $\varphi \in [-\pi, \pi)$ 와 함께 수식 (2)와 같이 정의되며,

$$\mathbf{a}(\tilde{\varphi}) = \frac{1}{\sqrt{N_A}} [1, e^{j\tilde{\varphi}}, \dots, e^{j(N_A-1)\tilde{\varphi}}]^T \in \mathbb{C}^{N_A \times 1}, \quad (2)$$

i 번째 전송 블록에서 수식 (3)의 무선채널을 통해 시험 신호를 전송할 경우 차량 B에서의 수신 신호는 수식 (4)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{H}_i = \sum_{l=0}^L \alpha_l |e^{-j\Delta d_i^e} \mathbf{a}(\tilde{\varphi}_l)^H \quad (3)$$

$$y_i = \sqrt{P_t N_A} \mathbf{H}_i \mathbf{W}_i s + n_i \quad (4)$$

위의 식에서 L 은 신호 경로의 개수, α_l 및 $\tilde{\varphi}_l = -\pi \cos(\varphi_l)$ 은 각각 l 번째 신호의 채널 이득 및 AoA, $\Delta d_i^e = \|\mathbf{X}_{AB,i}\|$ 은 차량 A와 B간 거리이다. 참고로, $\mathbf{X}_{AB,i} = (x_{AB,i}, y_{AB,i})$ 는 $x_{AB,i} = x_{A,i} - x_{B,i}$ 및 $y_{AB,i} = y_{A,i} - y_{B,i}$ 로 정의되는 상대위치 벡터이다. 그리고 $l > 0$ 인 경우, α_l 와 φ_l 은 각각 정규분포 $N(0, \sigma_l)$ 및 균일분포 $U[0, \pi]$ 를 따르며, $l = 0$ 인 경우 LOS 신호임으로 $\alpha_0 = 1$ 및 $\tilde{\varphi}_0 = -\pi \cos(\Delta \varphi_i^{AB})$ 이다. 이때, $\Delta \varphi_i^{AB} = \tan^{-1}(x_{AB,i}/y_{AB,i})$ 은 차량간 벡터각이며, 채널 이득은 $\sum_{l=0}^L |\alpha_l|^2 = 1$ 와 같이 정규화된다. 추가적으로, P_t 는 송신전력 $\mathbf{W}_i = \mathbf{a}(\tilde{\varphi}_i) \in \mathbb{C}^{N_A \times 1}$ 는 빔포밍 벡터, s 는 단위전력을 가지는 시험 신호 그리고 n_i 은 N_0 의 전력을 가지는 가우시안 잡음이다.

곡선 구간 주행간 주기적인 빔 정렬이 이루어지지 않을 경우 통신 품질 저하 나아가 두절 상태에 이를 수 있다. 이는 차량 B에서 생성된 빔이 차량 A를 적절히 조사하지 않아 수신 신호의 SNR (Signal-to-Noise Ratio)이 대폭 감소할 수 있기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 보조 빔을 활용하는 빔 추적 기법을 적용⁵⁾, $\Delta \varphi_i^{AB}$ 를 추정하는 것을 제안한다. 구체적으로 차량 B는 $\tilde{\varphi}_{i-1} - \Delta \varphi$ 및 $\tilde{\varphi}_{i-1} + \Delta \varphi$ 방향으로 보조 빔 ($\Delta \varphi = \delta_w \pi / N_A$)을 생성하여 시험 신호를 전송하고 차량 A는 수식 (5)의 SNR을 측정하여 차량 B에서 회신하며, 차량 B는 해당 정보를 활용하여 수식 (6)과 같이 $\tilde{\varphi}_i$ 를 갱신한다. 참고로, $\tilde{\varphi}_i$ 는 i 에서 추정된 차량 A와 B간 벡터각이다.

$$\gamma_i^L = P_t N_A |\mathbf{H}_i \mathbf{W}_i^L|^2 / N_0, \quad \gamma_i^R = P_t N_A |\mathbf{H}_i \mathbf{W}_i^R|^2 / N_0 \quad (5)$$

$$\tilde{\varphi}_i = \tilde{\varphi}_{i-1} - \sin^{-1} \left(\frac{\varepsilon_i \sin(\Delta\tilde{\varphi}) - \varepsilon_i \sqrt{1 - \varepsilon_i^2} \sin(\Delta\tilde{\varphi}) \cos(\Delta\tilde{\varphi})}{\sin^2(\Delta\tilde{\varphi}) + \varepsilon_i^2 \cos^2(\Delta\tilde{\varphi})} \right) \quad (6)$$

여기서, $\mathbf{w}_i^L = \mathbf{a}(\varphi_{t,i} + \tilde{\varphi}_{i-1} - \Delta\varphi)$ 및 $\mathbf{w}_i^R = \mathbf{a}(\varphi_{t,i} + \tilde{\varphi}_{i-1} + \Delta\varphi)$ 는 보조 빔의 빔포밍 벡터이며, ε_i 는 $(\gamma_i^L - \gamma_i^R)/(\gamma_i^L + \gamma_i^R)$, $\varphi_{t,i}$ 는 ULA의 기울기 각으로 정의된다. 또한, 수식 (6)은 $i-1$ 및 i 전송 블록간 차량의 위치와 채널은 불변이며, $i=0$ 에서의 두 차량의 위치는 정확히 알고 있다는 가정하에 유도되었다. 마지막으로 추정된 $\tilde{\varphi}_i$ 와 $\tilde{\mathbf{w}}_i = \mathbf{a}(\varphi_{t,i} + \tilde{\varphi}_i)$ 를 기반으로 메인 빔을 생성하여 데이터를 전송하며, 이때 전송률은 수식 (7)과 같다.

$$\rho_i(\tilde{\varphi}_i) = \log_2 \left(1 + P_t N_A |\mathbf{H}_i \tilde{\mathbf{w}}_i|^2 / N_0 \right) \quad (7)$$

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

Parameters	R	ν	Δt	δ_D	δ_ν	δ_m
values	191 [m]	14 [m/s]	0.01 [s]	0.6	1	0.4
Parameters	p_ν	L	σ_L	p_t	N_0	δ_w
values	0.2	4	1	10 [w]	1 [w]	0.5

IV. 시뮬레이션 결과 및 결론

본 장에서는 제시된 기법의 성능 확인을 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 실시하였다. 총 1,000개의 샘플을 생성하였으며 이때 표 1의 값들을 이용하였다. 그림 1의 곡선은 $\rho_i(\tilde{\varphi}_i)$ 의 샘플 평균값이며 차량간 빔 정렬이 이루어 지지 않았을 때와 비교하여 위치정보 대비 보조 빔 기반 빔 추적 기법의 개선 정도를 보여준다. 이때, 위치정보는 5m CEP (Circular Error Probability)의 정확도 및 10 Hz의 수신 주기를 가지는 위성항법장치를 통해 제공된 것으로 가정하였다. 좌측 그림에서 확인할 수 있듯이, 보조 빔 기반 추적 기법이 전송률 측면에서 우수한 성능을 보이고 있다. 또한, ULA 안테나 개수가 증가함에 따라 두 기법 간의 성능 차가 더욱 뚜렷해졌으며, $N_A = 128$ 의 경우 성능차가 $N_A = 32$ 일 때와 비교하여 평균적으로 4.75배 크다. 이는 보조 빔 기법의 빔 추적 우수성으로 인해 차량 A가 빔 중심 각 주변에 위치할 가능성이 더욱 높으며 결과적으로 위치정보 기반 대비 배열 이득(array gain) 증가 효과가 두드러지기 때문이다. 실제로 $N_A = 128$ 에서 위치정보 기반의 경우

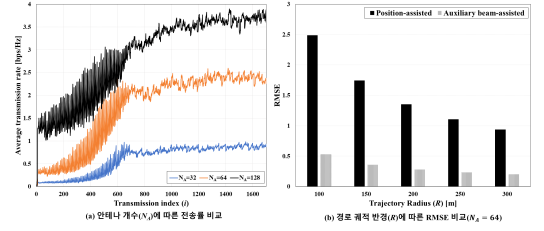


그림 2. 위치정보 및 보조 빔 기반 빔 추적 방식의 전송률과 RMSE 비교
Fig. 2. Comparison of the transmission rates and RMSE between the position- and auxiliary beam-assisted tracking

$\Delta\varphi_i^{AB}$ 와 $\tilde{\varphi}_i$ 간의 RMSE (Root Mean Square Error)는 1.41인 반면 보조 빔은 0.35이다. 추가적으로 우측 그림은 R 에 따른 $\Delta\varphi_i^{AB}$ 와 $\tilde{\varphi}_i$ 간의 RMSE를 보여주고 있으며, 곡률($\approx 1/R$)이 증가함에도 불구하고 RMSE 증가 정도가 작은 것을 알 수 있다. 마지막으로, 위의 결과는 주행 방향과 무관하며 이는 보조 빔 기반 추적 기법의 대칭성 때문이다.

본 논문에서는 중속주행 빔포밍 통신에서의 보조 빔 기반 빔 추적 기술의 효용성을 확인하였으나 이상적인 조건만 고려하였다는 점에서 한계가 있다. 따라서, 후속 연구에서는 LOS가 단절되거나 곡률이 일정하지 않은 실제 도로 환경에서 제안된 기법의 효과성을 검증할 예정이다.

References

- [1] M. Kang, H. Choi, H. Hong, S. Jang, K. Park, T. Kwon, H. Yun, Y. Cho, and S. Kwon, "Development of an agricultural robot platform for autonomous driving tasks in weeding operations," *J. Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, vol. 23, no. 8, pp. 68-76, Aug. 2024. (<https://doi.org/10.14775/ksmpe.2024.23.08.068>)
- [2] C. Mahabal, H. Wang, and H. Fang, "Dual mode localization assisted beamforming for mmWave V2V communication," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 9, pp. 9450-9459, Sep. 2022. (<https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3175165>)
- [3] S. H. Lim, S. Kim, B. Shim, and J. W. Choi, "Efficient beam training and sparse channel estimation for millimeter wave communications under mobility," *IEEE Trans.*

Commun., vol. 68, no. 10, pp. 6583-6596, Oct. 2020.

(<https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3010024>)

- [4] S. Ozawa, T. Ikuta, Y. Sasaki, R. Iwaki, J. Nakazato, and M. Tsukada, "Location-aided fast beam tracking algorithm for millimeter-wave V2I," *IEICE Commun. Express*, vol. 13, no. 5, pp. 146-150, May 2024.

(<https://doi.org/10.23919/comex.2024XBL0001>)

- [5] D. Zhu, J. Choi, and R. W. Heath, "Auxiliary beam pair enabled AoD and AoA estimation in closed-loop large-scale millimeter-wave MIMO systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 7, pp. 4770-4785, May 2017.

(<https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2702617>)