

군집주행 차량인프라 통신용 확장칼만필터 기반 차량 경로 추적 기술

송지호

한양대학교 ERICA

jihosong@hanyang.kr

Vehicle Tracking for Platoon-based V2I Communications With Extended Kalman Filter

Jiho Song

Hanyang University ERICA

요 약

본 논문에서는 확장칼만필터를 이용하여 차량인프라 네트워크 상 군집주행 차량들의 위치를 추정하는 차량 경로 추적 기술을 제안하였다. 군집주행유닛 내 차량의 위치에 따라 노변 기지국의 위치 추정 성능 차이가 크다는 점을 고려하여, 두 차량이 공유하는 위치오류전이벡터는 위치 추정 성능이 좋은 위치에 있는 차량에서 보낸 수신 신호를 이용해 추정하고, 기 예측된 위치오류전이벡터의 도움을 받아 위치 추정 성능이 나쁜 위치에 있는 차량의 위치를 추정하는 위치 추정 기술을 개발하였다. 모의실험을 통해 제안한 군집주행 차량 경로 추적 기술의 위치 추정 성능을 검증하였다.

I. 서 론

미래모빌리티 커넥티드카 기술은 자율주행 서비스를 수행하는데 필요한 핵심 요소 기술이다 [1]. 미래모빌리티의 대표적인 서비스로는 차량간 정보 공유를 통한 협력주행이 있다 [2]. 본 논문에서는 확장칼만필터를 기반으로 군집주행을 구성하고 있는 차량들의 주행 특성을 고려하여 차량의 위치를 추정하는 차량 경로 추적 기술을 개발하였다. 노변 기지국과 차량간의 y-축상 거리가 x-축상 거리에 매우 짧은 차량인프라 네트워크의 경우 위치 추정 성능이 x-축 상의 거리에 매우 민감하다. 따라서, 군집주행을 구성하고 있는 차량간의 상대적 위치에 따른 차량 추정 성능 차이가 매우 크다. 노변 기지국에서 위치 추정 성능이 상대적으로 좋은 위치의 차량에서 송신한 수신 신호 샘플을 이용해 오류가 큰 위치오류전이벡터를 추정한 뒤, 위치 추정 성능이 상대적으로 나쁜 위치에 있는 차량에서 송신한 수신 신호 샘플과 기 추정한 위치오류전이벡터를 모두 이용하여 오류가 작은 위치오류전이벡터를 보정하는 방식으로 두 번째 차량의 위치를 추정하는 기술을 제안하였다.

II. 본론

가. 시스템 모델

차량의 초기 위치 정보와 차량이 노변 기지국(Road Side Unit)으로 송신한 수신 신호 샘플을 이용해 시간에 따라 변하는 차량의 위치를 추정하는 시스템을 고려하였다. 본 논문에서는 두 대의 차량으로 구성된 군집주행 유닛을 고려하였는데, 시간에 따라 변하는 각 차량의 위치 및 속도 정보는 아래의 상태전이모델을 이용해 정의하였다 [4].

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_\ell^1 &= \mathbf{A}\mathbf{t}_{\ell-1}^1 + \mathbf{c}_\ell + \mathbf{f}_\ell^1 \\ \mathbf{t}_\ell^2 &= \mathbf{A}\mathbf{t}_{\ell-1}^2 + \mathbf{c}_\ell + \mathbf{f}_\ell^2. \end{aligned}$$

위 식에서 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 는 상태전이행렬을 나타내고, \mathbf{c}_ℓ 는 두 차량이 공유한 위치오류전이벡터를 나타내고, \mathbf{f}_ℓ^1 과 \mathbf{f}_ℓ^2 는 각 차량에 개별적으로 영향을 미치는 위치오류전이벡터를 나타낸다. 차량 위치정보를 추정하기 위한 이산시간간의 차이는 $T_s = 10^{-2}$ ms로 설정하였다. 상태전이행렬을 이용해 예측한 상태정보벡터와 실제 차량의 상태정보벡터 사이의 오류를 보정하기 위한 수신 신호 샘플은 아래 식으로 표현하였다 [3].

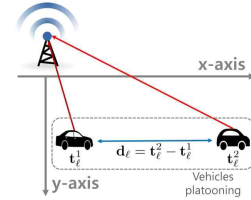


그림 1. 군집주행 차량인프라 통신 시스템 개요

$$r_\ell = \sqrt{\rho_\ell} \mathbf{z}_\ell \mathbf{h}_\ell s + n_\ell \in \mathbb{C}.$$

위 식에서 \mathbf{h}_ℓ 는 노변 기지국과 차량사이의 단일입력 다중출력(SIMO) 상향(Uplink) 무선 채널 벡터를 나타내고, \mathbf{z}_ℓ 는 노변 기지국의 각 안테나에서 수신한 신호들을 결합하는 결합 벡터를 나타내고, ρ_ℓ 는 송신 신호의 전력을 나타내고, n_ℓ 는 수신기에서의 가산성 백색 가우시안 잡음(AWGN)을 나타낸다. 제안한 군집주행 차량인프라 통신 시스템의 개요는 그림 1에 정리하였다.

나. 확장칼만필터 기반 군집주행 차량 경로 추적 기술

노변 기지국은 군집주행유닛 내 차량들로부터 수신 신호 샘플을 획득한 뒤 각 차량의 위치를 추정한다. 먼저, 노변 기지국은 군집주행유닛 내 차량 중 좋은 위치에 있는 차량에서 송신한 신호의 샘플을 이용해 상태정보벡터와 오류공분산행렬을 예측한다. 상태전이모델을 이용해 갱신된 상태정보벡터와 오류공분산행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{t}}_{\ell|\ell-1}^1 &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{t}}_{\ell-1}^1 \\ \hat{\mathbf{Q}}_{\ell|\ell-1}^1 &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{Q}}_{\ell-1}^1\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}_c + \mathbf{Q}_f. \end{aligned}$$

갱신된 상태정보벡터와 오류공분산행렬을 수신 신호 샘플을 이용해 다음과 같이 보정한다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{t}}_\ell^1 &= \hat{\mathbf{t}}_{\ell|\ell-1}^1 + \tilde{\mathbf{K}}_\ell^1(\tilde{\mathbf{r}}_\ell^1 - \tilde{\mathbf{Z}}_\ell^1 \mathbf{h}(\hat{\mathbf{t}}_{\ell|\ell-1}^1)) \\ \hat{\mathbf{Q}}_\ell^1 &= (\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{K}}_\ell^1 \tilde{\mathbf{Z}}_\ell^1 \tilde{\mathbf{D}}_\ell^1) \hat{\mathbf{Q}}_{\ell|\ell-1}^1. \end{aligned}$$

위 식에서 확인할 수 있듯이, 군집주행유닛 내 차량 중 수신 신호 품질이 좋은 첫 번째 차량의 신호 샘플을 이용하여 상대적으로 오류가 큰 위치오류전이벡터(공유오류전이벡터), \mathbf{c}_ℓ 와 개별적으로 차량에 영향을 미치는 위치오류전이벡터, \mathbf{f}_ℓ^1 를 모두 보정하였다.

다음으로, 나쁜 위치에 위치한 차량으로부터 송신한 신호 샘플을 이용하여 군집주행유닛 내 차량간 거리를 추정한다. 상태전이모델을 이용해 갱신된 차량간 거리의 상태정보벡터와 오류공분산행렬은 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{d}}_{\ell|\ell-1} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{d}}_{\ell-1}$$

$$\hat{\mathbf{Q}}_{\ell|\ell-1}^d = \mathbf{A}\hat{\mathbf{Q}}_{\ell-1}^d\mathbf{A}^T + 2\mathbf{Q}_f.$$

갱신한 상태정보벡터와 오류공분산행렬을 나쁜 품질의 수신 신호 샘플을 이용해 아래 식과 같이 보정한다.

$$\hat{\mathbf{d}}_{\ell} = \hat{\mathbf{d}}_{\ell|\ell-1} + \tilde{\mathbf{K}}_{\ell}^d(\tilde{\mathbf{r}}_{\ell}^2 - \tilde{\mathbf{Z}}_{\ell}^d\hat{\mathbf{t}}_{\ell|\ell-1}^2).$$

윗 식에서 $\hat{\mathbf{t}}_{\ell|\ell-1}^2$ 상태정보벡터에 대한 추정이 필요한데 아래 식에서와 같이 기 추정된 첫 번째 차량의 상태정보벡터를 이용해 생성하였다.

$$\hat{\mathbf{t}}_{\ell|\ell-1}^2 = \hat{\mathbf{t}}_{\ell}^1 + \hat{\mathbf{d}}_{\ell|\ell-1} \simeq \hat{\mathbf{t}}_{\ell}^1 + \hat{\mathbf{d}}_{\ell|\ell-1} - \hat{\mathbf{e}}_{\ell}^1.$$

본 논문에서는 오류, $\mathbf{e}_{\ell}^d = \mathbf{d}_{\ell} - \hat{\mathbf{d}}_{\ell}$ 를 최소화하는 방향으로 칼만이득행렬을 계산하는데, 계산한 칼만이득행렬을 이용해 보정한 오류공분산 행렬은 $\hat{\mathbf{Q}}_{\ell}^d = (\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{K}}_{\ell}^d\tilde{\mathbf{Z}}_{\ell}^d\tilde{\mathbf{D}}_{\ell}^2)\hat{\mathbf{Q}}_{\ell|\ell-1}^d$ 와 같다. 마지막으로, 첫 번째 차량의 위치상태벡터와 차량간 거리상태벡터를 이용해 추정한 두 번째 차량의 위치상태벡터는 $\hat{\mathbf{t}}_{\ell}^2 = \hat{\mathbf{t}}_{\ell}^1 + \hat{\mathbf{d}}_{\ell}$ 와 같다.

다. 모의 실험 결과

본 논문에서 제안한 경로 추적 기술의 위치 추정 성능을 평가하기 위한 모의실험을 수행하였다. 모의실험을 위해 64개의 안테나를 가진 노변 기지국이 지면 15 m 높이에 설치된 것으로 가정하였다. 모의실험을 위한 밀리미터파대역 무선채널은 한 개의 가시선 라디오 경로와 두 개의 비가시선 경로들을 이용해 만들어 주었는데, 가시선 라디오 경로의 수신 전력 과 비가시선 경로 수신 전력들간의 차이를 나타내는 Ricean K-factor는 13 dB로 설정하였다. 군집주행유닛 내 차량들이 공유하는 위치오류전이 벡터의 공분산 $\mathbf{E}[\mathbf{c}_{\ell}\mathbf{c}_{\ell}^T] = \mathbf{Q}_{\ell}$ 과 각 차량에 독립적으로 영향을 미치는 위치오류전이벡터의 공분산 $\mathbf{E}[\mathbf{f}_{\ell}^u(\mathbf{f}_{\ell}^u)^T] = \mathbf{Q}_f$ 생성을 위한 랜덤변수의 분산계수는 다음과 같다 ($\sigma_c = T_s \times 10^{1.5}$, $\sigma_f = T_s \times 10^{0.5}$, $T_s \times 10^1$). y-축상의 노상 기지국과 자동차간의 거리는 17 m로 설정하였고 자동차의 이동 방향인 x-축상의 초기 위치는 왼쪽에 위치한 차량을 기준으로 10 m, 20 m로 설정하였다. 차량의 초기 속도는 60 km/h로 설정하였고, 마지막으로 두 차량 간의 상대위치의 초기 값은 36 m로 설정하였다. 각 시나리오의 설정값들은 표1에 정리하였다.

그림 2, 3에서 모의실험 시나리오 1, 2의 세부 설정을 고려하여 차량 경로 추적 기술들의 위치 추정 성능을 평가하였다. y-축상의 노변 기지국과 차량간의 거리가 x-축상의 거리에 비해 매우 짧은 차량인프라(V2I) 네트워크의 경우 차량 추정 성능이 x-축 상의 거리에 매우 민감하다 [4]. 군집주행을 구성하는 차량의 위치를 개별적으로 추정하는 기존의 차량 추정 기술 [3]을 이용하는 경우 노상 기지국과의 x-축 거리가 짧은 첫 번째 차량의 경우 위치 추정 성능이 매우 우수한 반면, 노상기지국과의 x-축 거리가 긴 두 번째 차량의 경우 위치 추정 성능이 좋지 못하다. 이에 반해, 제안한 차량 추정 기술의 경우 두 가지 종류의 위치오류전이벡터 중 오류가 큰 공유오류전이벡터를 첫 번째 차량에서 보낸 수신 신호 샘플을 이용해 추정하고, 노변 기지국에서 첫 번째 차량의 샘플을 이용해 추정한 공유오류전이벡터와 두 번째 차량의 샘플을 이용해 추정한 두 차량 간의 상대 거리를 이용해 두 번째 차량의 위치를 추정하는 방식으로 작동한다. 그림 2, 3의 왼쪽 결과들에서 확인할 수 있듯이 제안한 기술의 경우, 첫 번째 차량의 위치 추정 성능은 기존 차량 추정 기술에 비해 조금 열화

| 모의실험 세부 파라미터 | |
|--------------|---|
| 시나리오 1 | $\sigma_c = T_s \times 10^{1.5}, \sigma_f = T_s \times 10^1, y_0 = 14 \text{ m}, x_0 = 20 \text{ m}, v_0 = 60 \text{ km/h}$ |
| 시나리오 2 | $\sigma_c = T_s \times 10^{1.5}, \sigma_f = T_s \times 10^{0.5}, y_0 = 14 \text{ m}, x_0 = 10 \text{ m}, v_0 = 60 \text{ km/h}$ |

표 1. 모의 실험 시나리오 세부 파라미터

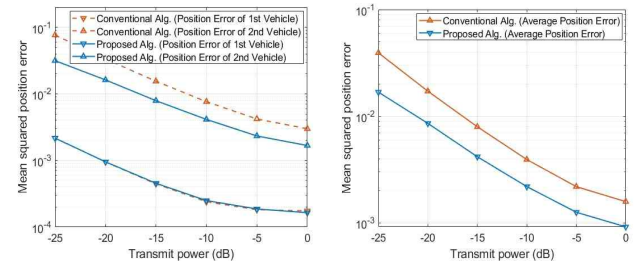


그림 2. 차량 위치 추정 성능 (모의실험 시나리오 1)

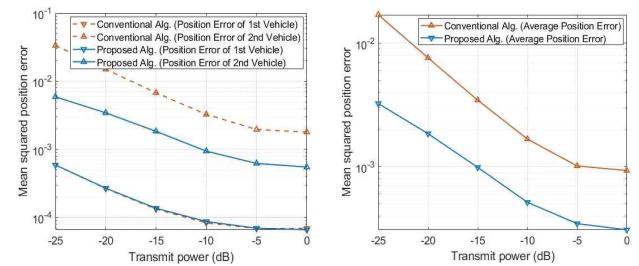


그림 3. 차량 위치 추정 성능 (모의실험 시나리오 2)

되었지만, 두 번째 차량의 위치 추정 성능은 기존 기술 대비 비약적으로 향상되어 평균 추정 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 군집주행 차량인프라 네트워크를 위한 확장칼만필터 기반 차량 경로 추적 기술을 개발하였다. 군집주행을 구성하는 차량들간의 상대적 위치를 기반으로 차량간 실시간 정보 교환 없이 위치 추정 성능을 향상시키는 차량 경로 추정 기술을 개발하였는데 제안한 군집주행 차량 경로 추적 기술은 모의실험을 통해 검증하였다. 모의실험 결과 제안한 군집주행 차량 경로 추적 기술이 각각의 차량 경로를 독립적으로 추정하는 기존 기술에 비해 위치 추정 성능을 향상시키는 것을 확인하였다. 제안한 차량 경로 추적 기술을 발전시켜 위치 및 속도 추정 성능을 향상시키는 송신 전력 분배 기술을 제안할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2022R1F1A1073034).

참 고 문 헌

- [1] Qualcomm, "5G NR based C-V2X," 2018.
- [2] J.-H. Lee and J. Song, "Full-duplex relay for millimeter wave vehicular platoon communications," *Sensors*, vol. 20, no. 21, Oct. 2020.
- [3] S.-H. Hyun, J. Song, K. Kim, J.-H. Lee, and S.-C. Kim, "Adaptive beam design for V2I communication using beam tracking with extended Kalman filter," *IEEE Trans. Veh. Technol.* vol. 71, no. 1, Jan. 2022.
- [4] J. Song, S.-H. Hyun, J.-H. Lee, J. Choi, and S.-C. Kim, "Joint Vehicle Tracking and RSU Selection for V2I Communications With Extended Kalman Filter," *IEEE Trans. Veh. Technol.* vol. 71, no. 5, May 2022.