

MUSIC 을 활용한 UWB 통신 기반 거리 추정 성능 향상 기법

김근우, 이은지, 김성철

서울대학교 전기 정보 공학부, 뉴미디어 통신 공동 연구소

{kimkeunwoo15, ej9309, sckim} @ maxwell.snu.ac.kr

Enhanced UWB communication based distance estimation using MUSIC

Keunwoo Kim, Eunji Lee, Seong-Cheol Kim

Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National Univ.

요 약

Ultra wide band (UWB) 통신 기반 거리 추정의 경우 넓은 대역폭 신호를 바탕으로 한 양방향 거리 추정 기법에 cm 단위의 거리 추정 정확도를 확보할 수 있으며 이로 인해 많은 산업 분야에 활용되고 있다. 하지만, UWB 통신 기반 거리 추정의 경우 낮은 샘플링 주파수 등의 하드웨어적 문제로 인해 거리 추정 성능이 이론적 최대치에 비해 다소 저하되는 경우가 발생한다. 본 논문에서는 MUSIC 기법을 활용하여 하드웨어 문제를 극복하고 거리 추정 성능을 향상시키는 기법을 제안하였으며 거리 추정 성능을 검증하고자 실측 실험을 진행하였다. 실측 실험 결과 MUSIC 기법을 적용하면 거리 추정 오차가 최대 50%까지 감소함을 확인하였다.

I. 서론

실내 위치 추정 및 기기간 거리 추정 어플리케이션에 대한 학계 및 산업계의 관심과 중요도가 커짐에 따라 보다 정밀한 거리 및 위치 추정을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. 다양한 거리 추정 기법 가운데 Ultra wide band (UWB) 통신 기반 거리 추정의 경우 넓은 대역폭과 양방향 거리 추정 기법을 사용함에 따라 시간 정확도가 증가하고, 이로 인해 cm 단위의 거리 추정 정확도를 확보할 수 있어 많은 분야에서 활용되고 있다. 하지만, 이러한 UWB 통신 기반 거리 추정의 경우 낮은 샘플링 주파수 등의 하드웨어적 문제로 인해 거리 추정 성능이 다소 저하되는 경우가 발생한다. 본 논문에서는 이러한 하드웨어 문제를 극복하여 UWB 통신 기반 거리 추정 성능을 향상시키고자 multiple signal classification (MUSIC) 기법을 활용하였으며 실측 실험을 통해 그 성능을 검증하였다.

II. 본론

가. UWB 통신 기반 거리 추정

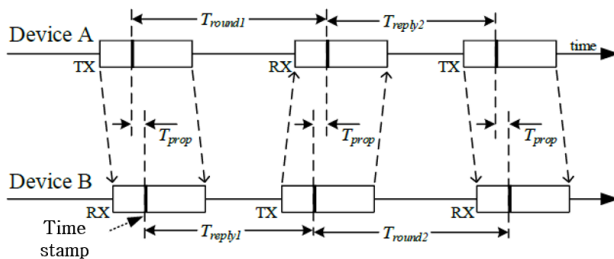


그림 1. UWB 통신 기반 양방향 거리 추정 모사도 [2]

UWB 통신 기반 거리 추정의 경우 그림 1. 과 같은 Time of flight (ToF) 기반 양방향 거리 추정 기법이 사용된다. 송신기 (Tx) 역할을 하는

Device A 에서 송신한 신호를 수신기 (Rx) 역할을 하는 Device B 가 수신한 뒤 다른 신호를 곧장 Device A 에 송신하고, Device A 가 신호를 수신하면 Device A 에서 송수신 신호의 time stamp 를 통해 추정된 ToF \hat{T}_{prop} 을 바탕으로 송수신 노드 간 거리 $\hat{d} = c * \hat{T}_{prop}$ 를 추정한다. 이때 c 는 빛의 속도이다.

한 Device 가 신호를 송신한 후 다른 신호를 수신할 때까지 걸린 시간을 순서대로 T_{round1} , T_{round2} 라 하고 한 Device 가 신호를 수신한 후 다른 신호를 송신할 때까지 걸린 시간을 순서대로 T_{reply1} , T_{reply2} 라 하면 이를 통해 추정된 ToF \hat{T}_{prop} 은 다음과 같다 [2].

$$\hat{T}_{prop} = \frac{T_{round1} * T_{round2} - T_{reply1} * T_{reply2}}{T_{round1} + T_{round2} + T_{reply1} + T_{reply2}} \quad (1)$$

나. MUSIC 기법을 활용한 거리 추정 성능 향상 기법

\hat{T}_{prop} 을 구하기 위해 사용되는 T_{round1} , T_{round2} , T_{reply1} , T_{reply2} 는 송수신 신호에 포함된 time stamp 를 통해 구해진다. 송신 신호의 time stamp 는 Tx 에 부착된 clock 을 통해 정확히 결정되지만 수신 신호의 time stamp 는 Rx 가 수신 신호의 channel impulse response (CIR)를 구한 뒤 line of sight (LOS) 신호를 추정하여 그 신호의 time delay 를 구하는 식으로 결정된다. 이때, 사용한 신호의 대역폭, 샘플링 주파수, 하드웨어 성능 등으로 인해 LOS 신호의 time delay 추정 정확도가 영향을 받게 되며 이에 따라 time stamp 의 정확도가 저하돼 결과적으로 거리 추정 정확도가 떨어지게 된다.

본 연구에서는 수신 신호의 CIR 에 MUSIC 기법을 적용하여 LOS 신호의 time delay 를 보다 정밀히 추정하여 거리 추정 성능을 향상시키는 방법을 고안하였다 [3]. 먼저, M 차원 수신 신호 z 의

correlation matrix $R = E[zz^H]$ 을 구한 뒤 R 의 eigenvalue를 구한다. 그리고 L 개의 큰 eigenvalue들을 통해 L 개의 signal eigenvector \mathbf{v}_i ($i = M - L + 1, \dots, M$)를 구하고 $M - L$ 개의 작은 eigenvalue들을 통해 $M - L$ 개의 noise eigenvector \mathbf{v}_i ($i = 1, \dots, M - L$)를 구한 뒤 noisubspace는 signalspace와 orthogonal하다는 성질을 이용하여 L 개의 distinctive peak를 가지는 개선된 CIR $P(\tau) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{M-L} |r(\tau)|^2 \mathbf{v}_i|^2}$ 를 구한다. 이때 $r(\tau)$ 는 CIR을 구하기 위해 사용된 신호의 auto-correlation이며 이상적인 경우 $r(\tau)$ 는 디랙-델타 함수의 형태로 표현된다. 우리는 이렇게 구한 $P(\tau)$ 의 L 개의 peak의 위치를 추정하여 L 채널 path의 Delay τ_l ($l \in [1, 2, \dots, L]$)를 더욱 정밀하게 구할 수 있으며 이를 통해 더 정확히 LOS 신호의 time stamp를 구할 수 있게 된다. 본 연구에서는 수신 신호를 통해 구한 $P(\tau)$ 에 thresholding을 적용하여 특정 threshold를 초과하는 Delay를 기준으로 수신 time stamp를 추정하였고 이를 통해 기기간 거리를 추정하였다.

다. 모의 실험 설정



그림 2. 실측환경 사진 (좌: d=0.5m, 우: d=10m)

본 실험에서는 고정된 위치에 존재하는 기지국(Anchor)과 이동성이 있는 노드(Tag) 간의 UWB 통신 시나리오를 가정하였다. Decawave사의 EVK 1000 UWB transceiver를 각각 Tag와 Anchor로 이용하여 실측 실험을 진행하였으며 실측 장비의 스펙은 표 1과 같다. 본 실험에서는 그림 2와 같이 두 EVK 1000을 지상으로부터 1m 떨어뜨린 상태에서 Tag와 Anchor 간의 거리를 0.5m 씩 떨어뜨려 가며 총 10m, 20개 지점에서의 CIR을 실측하였고 이를 바탕으로 거리 추정을 진행하였다.

본 논문에서는 Tag와 Anchor 간의 통신은 LOS 환경에서 이루어진다고 가정하였으므로 $L = 1$ 로 가정하였으며 실험에 사용된 수신 신호 z 의 차원은 $M = 993$ 이다.

Parameter	Value
Center frequency	6.5 GHz
Bandwidth	500 MHz
Transmission power	-14 dBm (-41.3 dBm / MHz)
Sampling frequency	1 GHz
Data rate	110 kbps

표 1. EVK 1000 specification

라. 모의 실험 결과

모의 실험 결과는 그림 3과 같으며 이는 ToF 기반 거리 추정시 Anchor와 Tag 간 거리에 따른 추정 거리의 평균 제곱근 오차(Root mean square error, RMSE)를 나타낸다. MUSIC 기법을 적용한 경우 그렇지 않은 경우에 비해 측정 거리 별로 최대 0.15 m 가량의 RMSE가 감소한 것을 확인할 수 있으며 이는 기존 기법 대비 약 50% 가량의 거리 추정 정확도 향상이다. 이를 통해 적용한 MUSIC 기법이 수신 time stamp 추정 성능을 높여 거리 추정 성능을 증가시키는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 측정 거리가 늘어남에 따라 RMSE가 증가하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있는데 이는 거리가 늘어남에 따라 수신 신호의 세기가 줄어들어 CIR을 통한 LOS 신호 추정 성능이 떨어지고 time stamp의 오차가 누적되기 때문으로 분석된다.

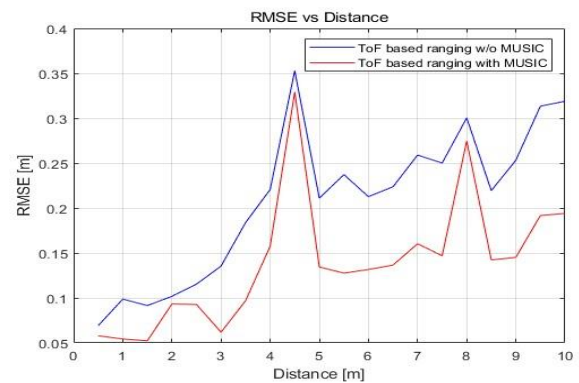


그림 3. MUSIC 기법 적용 전과 후의 거리에 따른 거리 추정 RMSE

III. 결론

본 논문에서는 UWB 통신에 사용되는 ToF 기반 양방향 거리 추정 방식에 사용 가능한 MUSIC 기반 거리 추정 성능 향상 기법을 제안하였다. 수신 신호의 CIR에 MUSIC 기법을 적용하여 LOS 신호의 time delay를 더욱 정확히 추정해 내었으며 이를 통해 ToF 추정 성능을 향상시켜 거리 추정 성능을 높였다. 해당 기법을 적용한 실측 실험 결과 최대 50% 가량의 거리 추정 오차 감소를 확인하였다. 추후 연구에서는 이를 토대로 한 위치 추정 향상 기법에 대한 연구를 진행할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

"본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP-2021-0-02048)

참고 문헌

- [1] 김근우, 지오근, 이은지 and 김성철, "Prior knowledge를 사용한 UAV 3D 측위 기법," 한국통신학회 학술대회논문집 2022.6(2022): 471-472.
- [2] "DW3000 FAMILY USER MANUAL", version 1.1, Decawave Ltd 2019.
- [3] Jeon, Nam-Ryul, et al. "Superresolution TOA estimation with computational load reduction." IEEE transactions on vehicular technology 59.8 (2010): 4139-4144.