

고노이즈 환경에서 Top-2 Histogram 기반 초음파 TDoA 위치 추정 기법

노동진, 이훈열, 김석찬*

부산대학교*

djnoh@pusan.ac.kr, hylee98@pusan.ac.kr, sckim@pusan.ac.kr*

Ultrasonic TDoA Localization Using a Top-2 Histogram Method in High-Noise Environments

Dongjhin Noh, Hunyoul Lee, Suk Chan Kim*

Pusan National Univ*

요약

본 논문에서는 고노이즈 환경에서 초음파 신호 기반 위치 추정 시스템의 안정성을 향상시키기 위해 Top-2 Histogram 기반 TDoA(Time Difference of Arrival) 추정 알고리즘을 제안한다. 실제 초음파 실험 환경에서는 잡음, 다중 경로, 반사 신호 등의 영향으로 인해 수신 신호의 도착 시간 추정이 불안정해지며, 단일 TDoA 후보를 선택하는 기준 방식은 이러한 환경에서 위치 추정 오차가 증가하는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 모든 유효한 TDoA 후보들을 히스토그램으로 분석하고, 최빈 클러스터와 차최빈 클러스터를 동시에 고려한 가중 평균 방식을 통해 대표 TDoA를 추정하는 방법을 제안한다. 실험 결과, 제안한 Top-2 Histogram 기반 알고리즘은 고노이즈 환경에서도 기존 단일 선택 방식 대비 보다 안정적인 TDoA 추정 성능을 보였으며, 이를 통해 위치 추정 정확도가 향상됨을 확인하였다.

I. 서론

초음파 기반 위치 추정 기술은 저비용, 저전력, 높은 안전성의 장점을 바탕으로 다양한 실내·외 위치 인식 시스템에 활용되고 있다. 일반적으로 초음파 위치 추정은 신호의 도착 시간을 이용하여 거리 및 각도를 계산하며, 이 과정에서 정확한 TDoA 추정이 핵심적인 요소로 작용한다. 기존 초음파 위치 추정 알고리즘에서는 각 수신기에서 검출된 단일 상승 엣지를 기준으로 TDoA를 계산하거나, 가장 빠른 도착 시간만을 이용하는 방식이 주로 사용되어 왔다. 그러나 실제 실험 환경에서는 초음파 신호의 반사 및 다중 경로로 인해 하나의 에코 구간 내에서도 여러 개의 상승 엣지가 검출되는 경우가 빈번히 발생한다. 이러한 환경에서 단일 TDoA 선택 방식은 잡음이나 비주요 반사 성분에 의해 오차를 유발할 가능성이 높다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, 다수의 상승 엣지로부터 생성된 모든 유효한 TDoA 후보를 히스토그램으로 분석하고, 상위 두 개의 빈도 클러스터를 동시에 고려하는 Top-2 Histogram 기반 TDoA 추정 알고리즘을 제안한다. 이를 통해 보다 안정적이고 강연한 위치 추정이 가능함을 보이고자 한다.

II. 본론

본 연구에서는 하나의 초음파 송신기와 네 개의 수신기로 구성된 초음파 위치 추정 시스템을 사용한다. 송신기에서 발사된 초음파 신호는 물체에 반사되어 각 수신기로 도달하며, 수신기 간 도착 시간 차이를 이용해 물체의 위치를 추정한다. 초음파 신호의 전파 속도는 상온(20 °C) 공기 중에서 약 343 m/s이며, 두 수신기 간의 도착 시간 차이를 이용하면 다음과 같이 거리 차이를 계산할 수 있다. 이를 기하학적 관계에 적용하여 물체의 위치 및 각도를 추정한다.

각 수신기에서 수집된 초음파 에코 신호는 고주파 잡음을 포함한 진동

$$\Delta d = v_s \times \Delta t \quad (1)$$

형태로 측정된다. 본 연구에서는 신호의 도착 시간을 안정적으로 검출하기 위해 그림 1과 같이 Butterworth 저대역 필터를 적용하여 고주파 성분을 제거하고, 필터링된 신호로부터 포락선(envelope)을 추출한다.

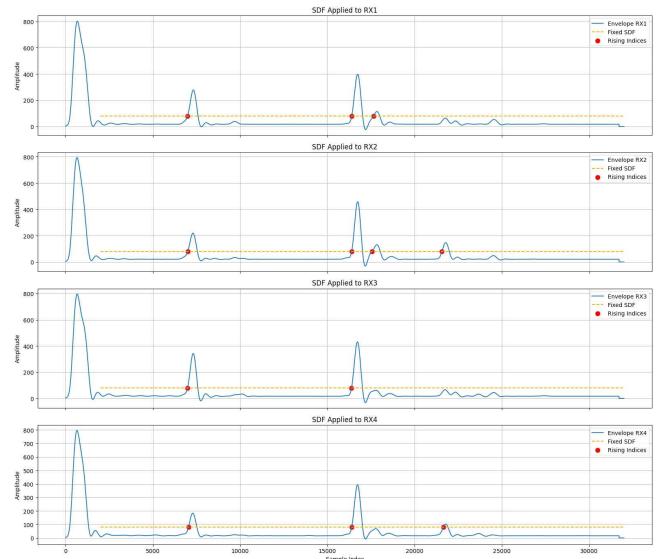


그림 1 저대역 필터를 적용한 원신호 데이터와 상승 엣지 포락선 신호에 대해 '신호 탐지 함수'를 적용하여 상승 엣지를 검출하며, 네 개의 수신기에서 시간적으로 일정한 상승 엣지가 동시에 검출되는 경우에만 유효한 에코로 판단한다. 이 과정을 통해 유효한 에코 구간의 중심 인덱스(Target Index)를 결정한다. 이후, Target Index를 기준으로 원래의 초음파 원신호를 확대하여, 해당 구간 내에서 다수의 상승 엣지를 검출하고 TDoA 후보를 생성한다.

기존 Cross-correlation 기법은 두 수신 신호 간의 유사도를 전체 샘플 구간에 대해 계산하여 최대 상관값이 발생하는 지연(lag)을 TDoA로 추정하는 방식으로, 이상적인 단일 반사 환경에서는 높은 정확도를 보일 수 있다. 그러나 실제 초음파 실험 환경에서는 다중 반사, 잡음, 수신기별 신호 세기 차이 등의 영향으로 상관 함수의 피크가 여러 국소 최대값으로 분산되며, 이로 인해 비주요 반사 성분에 의해 TDoA 추정이 불안정해질 수 있다. 이러한 한계를 고려하여 본 연구에서는 보다 안정적인 각도 추정을 위해 TDoA 기반 접근 방식을 채택하였다.

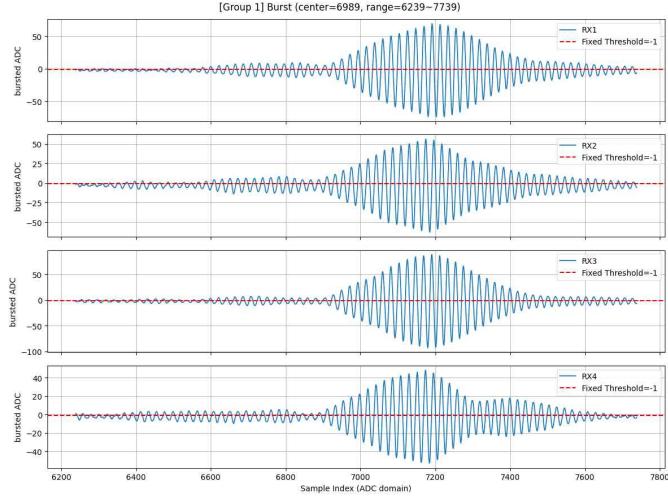


그림 2 확대된 원신호

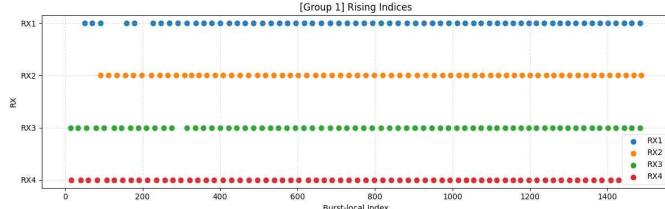


그림 3 확대된 원신호에서의 상승엣지

확대된 원신호 구간 내에서는 그림 2와 3과 같이 각 수신기 쌍에 대해 여러 개의 상승 엣지가 검출될 수 있다. 본 연구에서는 두 수신기 간의 모든 가능한 상승 엣지 조합에 대해 유효 범위 내의 TDoA 후보를 생성한다. 생성된 TDoA 후보 집합에 대해 히스토그램을 구성하고, 가장 높은 빈도를 가지는 클러스터(최빈 클러스터)와 두 번째로 높은 빈도를 가지는 클러스터(차최빈 클러스터)를 선택한다.[그림 4] 각 클러스터에 속한 TDoA 후보들의 평균값을 각각 τ_1, τ_2 라 하고, 해당 클러스터의 후보 개수를 N_1, N_2 라 할 때, 최종 대표 TDoA는 다음과 같이 계산된다.

$$\tau_{rep} = \frac{N_1\tau_1 + N_2\tau_2}{N_1 + N_2} \quad (2)$$

이 방식은 단일 최빈값 선택 방식 대비 잡음에 대한 영향을 최소화하는 동시에, 보다 안정적인 TDoA 추정을 가능하게 한다.

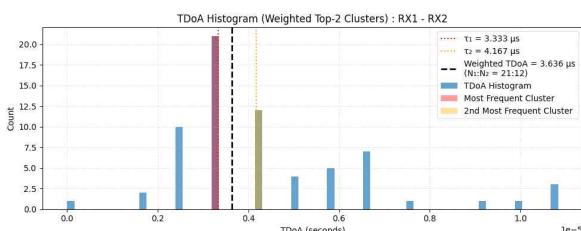


그림 4 수신기 1과 2의 TDoA Top-2 히스토그램

III. 실험 결과

제안한 Top-2 Histogram 기반 TDoA 추정 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 실제 초음파 장비를 이용한 실험을 수행하였다. 실험 환경에서는 물체의 거리와 각도를 변화시키며 초음파 에코 데이터를 수집하였다. 실험 결과, 단일 상승 엣지를 기준으로 TDoA를 선택하는 기존 방식은 특정 환경에서 추정 값이 크게 변동하는 현상이 관찰되었다. 또한 전체 평균 값을 사용한 TDoA 계산 방식 대비 안정적인 추정이 가능하였다. 제안한 Top-2 Histogram 기반 알고리즘은 TDoA 분포의 주요 클러스터를 안정적으로 반영하여, 위치 추정 결과의 분산을 효과적으로 감소시켰다. 특히 임계값이 매우 낮아 노이즈가 많이 발생하는 환경에서도 추정 결과가 비교적 안정적으로 유지됨을 확인하였다.

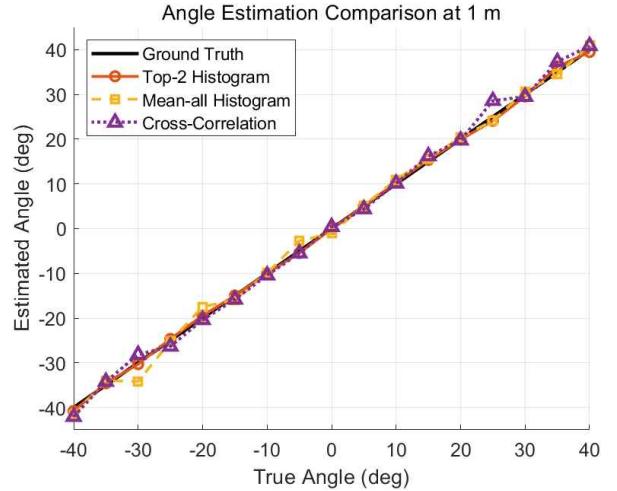


그림 5 1m 물체에 대한 다양한 각도에 대한 결과

IV. 결론

본 논문에서는 초음파 신호 기반 위치 추정 시스템에서의 높은 노이즈 성분으로 인한 TDoA 불안정 문제를 해결하기 위해 Top-2 Histogram 기반 TDoA 추정 알고리즘을 제안하였다. 모든 유효한 TDoA 후보를 통계적으로 분석하고, 상위 두 개의 빈도 클러스터를 가중 평균하는 방식을 통해 기존 단일 선택 방식 대비 강인한 위치 추정이 가능함을 확인하였다. 향후 연구에서는 히스토그램 bin 설계 최적화 및 실시간 구현을 위한 계산량 감소 기법에 대한 추가 연구를 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임

(No. 2022R1A2C1092737)

참 고 문 현

- [1] Chan Y. T., Ho K. C., "A simple and efficient estimator for hyperbolic location," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 42, no. 8, pp. 1905 - 1915, Aug. 1994.
- [2] Gustafsson F., Gunnarsson F., "Positioning using time-difference of arrival measurements," IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), pp. 553 - 556, 2003.