

초음파 신호 기반 위치 추정 알고리즘의 개선을 위한 경로 손실 모델 추정

노동진, 임재준, 주재한, 김민석, 김석찬*

부산대학교

rst007@pusan.ac.kr, limlim258@pusan.ac.kr, jhjoo2018@pusan.ac.kr, alstjr2650@pusan.ac.kr, *sckim@pusan.ac.kr

Estimation of path loss model for improving ultrasonic signal-based positioning Algorithm

Dongjhin Noh, Jaejun Lim, Jaehan Joo, Minseok Kim, Suk Chan Kim*

Pusan National Univ.

요약

본 논문은 초음파 신호의 경로 손실 모델(path loss)을 실험적으로 추정하여 TDoA 및 AoA 기법을 이용한 위치 추정 알고리즘의 성능을 개선한다. 초음파 장비를 이용하여 에코 데이터를 수집하고, 저 대역 필터(Low Pass Filter)를 활용한 포락선을 사용해 경로 손실을 추정한다.

I. 서론

본 논문은 초음파 신호의 경로 손실을 모델링하고 이를 활용하여 위치 추정 알고리즘의 반사된 신호 감지 임계 값의 설정 방법을 개선하여 더욱 정확한 위치추정 알고리즘을 설계하는 것을 목적으로 한다. 초음파 신호 장비를 이용해 초음파 기반 신호를 송수신하여 에코 데이터를 수집하고, 저역 대역 필터를 활용한 포락선을 활용해 거리별 최대 신호 세기를 계산하여 경로 손실 모델을 추정한다.

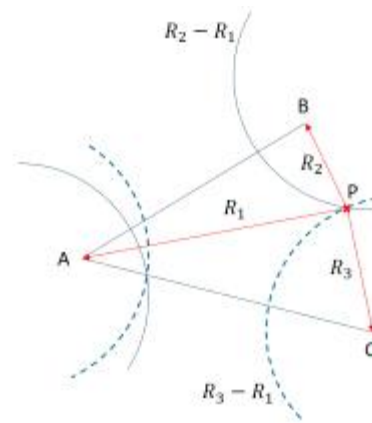


그림 1. TDoA 측정으로부터 형성된 두개의 쌍곡선

II. 본론

대상의 위치를 추정하는(Positioning) 시스템에는 여러 종류의 시스템이 존재한다. 본 논문에서는 초음파 기반 시스템을 활용하였다. 초음파는 초당 20kHz에서 200MHz의 진동수를 갖는 역학적 방사 에너지로, 상온(20°C)의 공기 중에서 약 343m/s의 전파속도를 가진다. 초음파를 발사한 후, 물체에 부딪혀 반사되어 돌아오는 시간(t)을 측정하면 그 물체까지의 거리(d)를 계산할 수 있다.

$$d[m] = 343[m/s] \times \left(\frac{t[s]}{2}\right) \quad (1)$$

물체의 3D 좌표를 추정하기 위해서는 최소한 3개의 수신기가 요구된다. 수신기에서 방사된 초음파가 물체에 반사되어 각 수신기에 각각 도달되는 신호의 시간 차이, 즉 TDoA를 이용한 알고리즘을 이용하여 물체의 위치를 추정할 수 있다. 본 논문에서는 대표적인 방법인 삼각측량(Triangulation) 알고리즘을 기준으로 한다. TDoA의 개념은 신호의 절대 도달 시간이 아니라 신호가 여러 측정유닛(수신기)에 도달하는 시간 차이를 조사하여 대상의 상대적인 위치를 추정하는 것이다. 그림 1에서 3개의 고정된 수신기에서 TDoA 측정으로부터 두 개의 쌍곡선이 형성되어 교차점이 생기게 되고 이 교차점이 대상 P를 위치한다. TDoA 추정위치를 계산하는 대표적인 방법은 상관관계(Correlation) 기술을 이용하는 것이다. 한 쌍의 측정유닛에서 수신된 신호 사이의 교차 상관 관계(Cross-Correlation)로부터 추정될 수 있다. 교차 상관 함수는 다음과 같다.

$$\hat{R}_{x_i, y_j}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x_i(t) x_j(t-\tau) dt \quad (2)$$

TDoA 추정치는 \hat{R}_{x_i, y_j} 를 최대화하는 값 τ , 즉 거리 차이(range differences)이다.

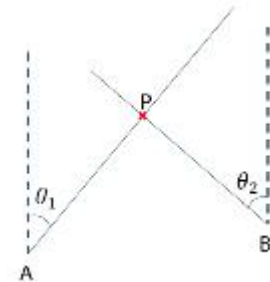


그림 2. 위치 추정(AoA 기반)

AoA(Angle of Arrival)에서 대상의 위치는 수신기에서 대상까지의 원 반경에 의해 형성된 여러 쌍의 각도 방향 라인의 교차점에 의해 찾을 수 있다.

초음파 기반 위치 추정 시스템은 먼저 초음파 장비로 에코 데이터를 수집한다. 그 후 앞서 언급한 TDoA나 AoA 기법을 활용한 위치 추정 알고리즘에 측정된 에코 데이터값을 넣어 결과적으로 대상의 위치 및 각도를 추정하는 것이다. 이때 TDoA를 알기 위해 반사된 신호가 측정된 시간을 추정해야 한다. 신호의 세기가 임의로 정한 임계 지점(threshold point)을 넘는 순간을 반사된 신호가 수신기에 도달되었다고 가정한다. 즉, 임계 값을 어떻게 설정하느냐에 따라 TDoA와 AoA의 결과가 달라질 것이고, 결과적으로 알고리즘의 전체적인 성능에 영향을 끼칠 수 있다. 예시로 그림 3은 반사된 신호의 최대 값이 40 이고 임계 값을 각각 10, 30, 50으로 설정 하였을 때를 표현한 것이다. 임계 값을 30으로 설정(적색 선)했을 때 정상적으로 반사된 신호가



그림 3. 노이즈(SNR=2dB)가 있는 반사된 신호와 각각의 임계값 설정

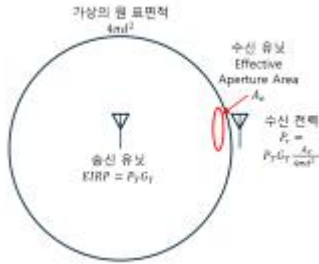


그림 4. Friis Formula

수신기에 측정된 시간을 추정한 것에 비해 임계 값을 너무 크게 설정(청색 선)하면 실제론 반사된 신호가 있어도 신호를 감지하지 못하여 대상의 위치나 각도를 아예 추정할 수 없다. 또한 값을 너무 낮게 설정(자색 선)하면 노이즈 성분들에 취약해져 오탐(False Alarm) 확률이 높아진다.

추가적으로 수신기에서 방사된 신호의 세기는 거리(d)에 따라 감소되는데, 이를 경로 손실(Path Loss)이라고 한다. 따라서 대상과의 거리가 멀어 경로 손실이 많이 발생한 경우, 거리에 따라 감소하는 형태의 임계 값을 설정해 준다면 상수로 임계 값을 설정했을 때 감지하지 못하던 경우도 감지할 수 있다. 이는 알고리즘 성능의 개선, 즉 더욱 멀리 있는 물체를 감지할 수 있는 것이다. 그림 4는 자유공간에서 무선 송수신 전력을 표현하는 프리스 공식(3)을 나타낸다.

$$P_r(d) = P_t(G_t G_r) \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (3)$$

d : 송수신간 거리
 λ : 신호의 파장
 $P_r(d)$: 송수신간 거리 d 에 따른 수신 전력
 P_t : 송신 전력
 G : 안테나 이득 (G_t : 송신, G_r : 수신)

여기서 비례계수 $(\frac{\lambda}{4\pi d})^2$ 은 자유공간 경로 손실(FSPL)이라 한다. 이를 dB단위로 표현하면 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} FSPL[dB] &= 10\log_{10}\left(\left(\frac{4\pi df}{c}\right)^2\right) \\ &= 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) \\ &= 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) - 147.55 [dB] \end{aligned} \quad (4)$$

III. 실험 결과

다음 표 1은 초음파 장비를 이용하여 0° 기준, 물체를 30cm부터 90cm 까지 거리를 늘려가며 반사되어 수신기로 들어오는 최대 에코 데이터값을 5번 수집하여 평균을 낸 결과이다. 그림 5는 각 데이터를 정규화하여 그래프로 나타낸 그림이다.

표 1. 거리별 반사된 최대 에코 데이터의 평균

Dist.(cm)	30	40	50	60	70	80	90
Max	664.0	611.3	576.7	478.2	399.3	324.4	220.7

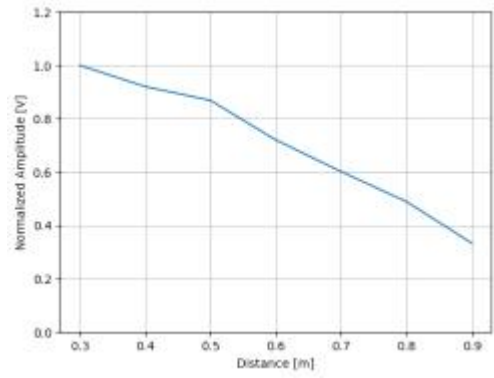


그림 5. 정규화한 최대 진폭

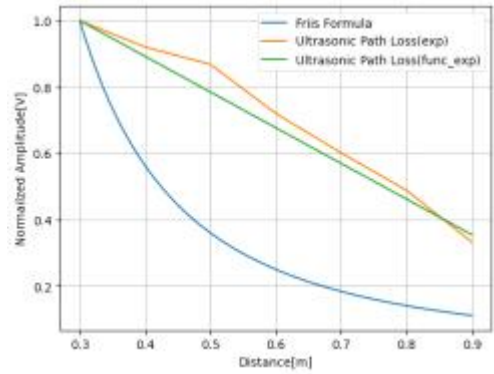


그림 6. 이론적 FSPL과 함수화한 경로 손실 비교

그림 6에서 이론적인 경로 손실, FSPL은 지수함수적인 형태의 감소를 보여주는 반면 실제 초음파의 경로 손실은 전체적으로 선형적인 감소를 보여준다. Linear interpolation을 활용하여 실제 경로 손실을 1차 함수화 하면 $y = -0.1x + 1.3$ when $0.3 \leq x \leq 0.9$ 의 1차 함수를 얻을 수 있다. 추가적으로 분석해 보면 30cm에서 50cm까지는 손실이 비교적 천천히 줄어들다가 50cm 이후로 이전의 두 배의 기울기로 줄어들고 특히 80cm 이후로는 더욱 급격히 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다. 경로 손실 모델을 활용하여 기존 단순 상수 값이었던 임계 값을 함수화한다면 더욱 정확하고 유효 사거리가 긴 위치 추정 알고리즘을 설계할 수 있을 것이고, 함수가 구체적일 수록 성능이 좋아질 것이다.

IV. 결론

이 논문은 위치 추정 알고리즘의 개선을 위해 경로 손실 모델을 추정하는 것을 목적으로 한다. 이론적 FSPL 모델과 실험적으로 구한 경로 손실 모델을 각각 함수화하여 임계 값 설정에 활용해 보고 다양한 알고리즘 성능 개선 방법에 대해 연구해 볼 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

-(국)이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (00144500)

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2022R1A2C1092737)

참고 문헌

- [1] Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. Hui Liu, Student Member, IEEE, HoushangDarabi, Member, IEEE, Pat Banerjee, and Jing Liu
- [2] Model-Based Estimation of Ultrasonic EchoesPart I: Analysis and Algorithms. Ramazan Demirli, Student Member, IEEE, and Jafar Saniie, Senior Member, IEEE