

미분을 활용한 UWB 펄스 신호의 leading edge 탐지 및 ToA 추정

이훈열, 주재한, 주귀화, 김석찬*

부산대학교, 부산대학교, 부산대학교, *부산대학교

yeal96011@pusan.ac.kr, jhjoo2018@pusan.ac.kr, jhjoo2018@pusan.ac.kr, *sckim@pusan.ac.kr

Leading edge detection and ToA estimation of UWB pulse signal using differentiation

Hunyoul Lee, Jaehan Joo, Guohua Zhu, Suk Chan Kim*

Pusan National Univ., Pusan National Univ., Pusan National Univ., *Pusan National Univ.

요약

본 논문에서는 미분을 활용해서 UWB 펄스 신호의 leading edge를 탐지하고, 이를 바탕으로 ToA 및 거리를 추정하는 연구를 진행한다. 기존에 사용하는 상호상관 대신 미분을 활용해서 복잡도를 줄이고, 정확도를 높이는 것을 중점으로 한다. 실험은 시뮬레이션으로 진행했고, 제안된 방법 및 상호상관과 비교분석 한다. 시뮬레이션은 두 가지를 비교한다. 첫 번째, 제안된 방법의 SNR에 따른 step대 RMSE, 두 번째, 제안된 방법과 상호상관의 복잡도 비교이다. 시뮬레이션을 통해 제안된 방법의 적절한 step을 확인하고, 복잡도가 낮음을 확인한다.

I. 서론

최근, UWB(Ultra - Wideband)를 활용한 위치추정 기술은 다양한 애플리케이션에 활용되고 있다[1]. 위치추정에 활용되는 기법으로는 대표적으로 상호 상관법을 활용한 ToA(Time of Arrival) 추정이 있다. 하지만, 이러한 방식은 시스템의 복잡도가 높아서 계산량이 많고 실시간성이 떨어진다. 그러므로 안전사고를 예방하기 위한 애플리케이션에 사용되기는 어렵다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 미분을 활용한 leading edge 탐지를 제안한다.

II. 본론

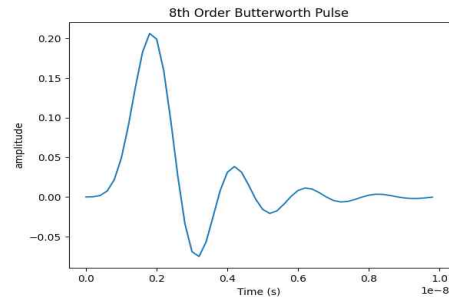
본 논문에서는 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 채널 상황에서 UWB 기반의 앵커와 태그 사이의 ToA 및 거리를 추정하는 경우를 고려한다.

앵커가 수신하는 UWB 펄스 신호는 IEEE 802.15.4-2020에 따라 3dB 주파수가 500MHz인 8차 버터워스 펄스로 생성했다[2]. [그림 1]의 UWB 펄스 신호에서 샘플링 주파수는 대역폭의 10배인 5GHz로 설정하여 신호를 생성했다.

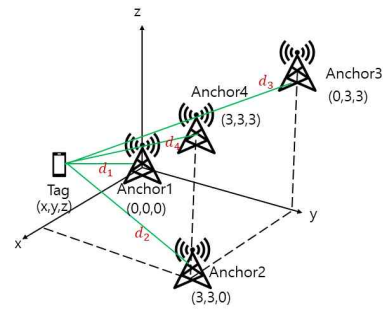
장애물이 없는 공간에서 네 개의 앵커와 하나의 태그로 구성된다. 태그는 브로드캐스팅을 통해 UWB 펄스 신호를 송출하고 있고, 각 앵커는 태그가 브로드캐스팅 하는 신호를 수신한다. [그림 2]와 같이 앵커는 각각 직교좌표계에서 (0,0,0), (3,3,0), (0,3,3), (3,3,3)에 배치되어 있고, 태그는 (0,0,0)에서 (3,3,3) 사이 임의의 점에 배치되는 상황을 고려한다. [그림 2]에서 각 앵커와 태그 사이의 거리 d_1, d_2, d_3, d_4 를 추정하기 위해 태그가 송신한 UWB 펄스 신호를 AWGN 채널 상황에서 각 앵커가 수신하게 된다. 이렇게 각 앵커가 수신한 신호를 기반으로 각 앵커의 ToA를 추정하게 되고, 각 ToA를 기반으로 d_1, d_2, d_3, d_4 를 계산한다. 앵커 중 i 번째 앵커와 태그 간 거리는 식(1)과 같이 계산된다.

$$d_i = t_i * c \quad (1)$$

여기서 t_i 는 i 번째 앵커가 추정한 ToA 값이고, c 는 빛의 속도이다. 이처럼 ToA를 이용해 추정된 거리를 활용하여 태그의 좌표를 추정할 수 있다.



[그림 1]. 앵커가 수신하는 UWB 펄스 신호



[그림 2]. 앵커 및 태그 배치

UWB 펄스 신호는 주파수 영역에서 넓은 대역폭을 가지고, 이로 인해 시간 영역에서 짧은 상승시간을 가진다. 짧은 상승시간, 즉 짧은 시간의 변화량을 잘 활용할 수 있는 방법으로 미분을 생각할 수 있다. 미분의 정의는 식(2)과 같다.

$$\dot{f}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t} \quad (2)$$

식(2)에서 UWB 펄스 신호는 상승시간이 매우 짧으므로 시간의 변화량이

매우 적고, 이에 따라 상승하기 시작하는 leading edge 부근에서 미분 된 UWB 펄스 신호의 피크값은 매우 크다. 이러한 점을 활용해 앵커에서 수신된 UWB 펄스 신호의 leading edge를 탐지할 수 있다. 미분을 활용해서 leading edge를 탐지할 경우, 상호상관보다 복잡도가 작고, SNR (Signal to noise ratio) 이 매우 낮지 않은 상황에서는 상호상관과 비슷한 성능을 가지는 장점들이 있다.

제안하는 방법은 다음과 같다. N개의 앵커 중, i번째 앵커에서 수신된 UWB 펄스 신호를 $x_i(t)$ 라 할 때, $\dot{x}_i(t)$ 미분 신호는 식(3)과 같이 구할 수 있고, i번째 앵커가 추정된 ToA는 식(4) 와 같이 구할 수 있다.

$$\dot{x}_i(t) = \frac{x_i(t + \Delta t) - x_i(t)}{\Delta t} \quad (3)$$

$$t_i = \underset{t}{\operatorname{argmax}} \dot{x}_i(t) \quad (4)$$

여기서 $\dot{x}_i(t)$ 는 미분 신호이고, Δt 는 미분 시 시간의 변화량의 간격이다. Δt 가 커질수록 순간변화율보다는 평균변화율에 가까워진다. $\dot{x}_i(t)$ 의 피크값이 나타나는 시점을 leading edge라 하고 i번째 앵커에서 추정된 ToA 값이다.

III. 시뮬레이션

시뮬레이션은 두 가지를 비교했다. 첫 번째, SNR의 크기별로 step 대 실제 거리와 추정 거리의 RMSE (Root mean square error), 두 번째 상호상관과 제안된 방법의 복잡도 비교이다. 여기서 step은 Δt 를 샘플링 주파수 f_s 로 샘플링한 값이다. 즉, UWB 펄스 신호가 수신된 배열의 인덱스 변화량이다.

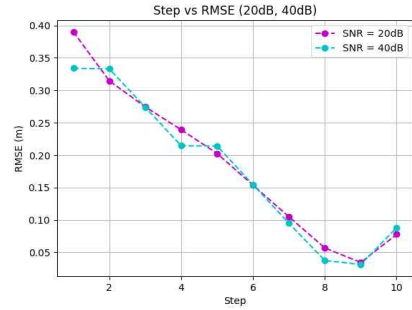
첫 번째 시뮬레이션에서 태그는 (0,0,0)부터 (3,3,3)까지 각 좌표축을 0.5 간격으로 증가시켜서 총 343개를 배치했다. 각 앵커와 태그 간 ToA를 추정하고, 추정된 ToA 값으로 식(1)을 활용해 앵커와 태그 간 거리를 구했다. 구한 거리와 실제 거리의 RMSE값을 계산해서 시뮬레이션했다.

[그림 3], [그림 4]는 각각 SNR이 높은 상황과 낮은 상황에서 step 대 RMSE를 비교한 그래프이다. [그림 3], [그림 4]에서 보듯, 대부분 상황에서 step의 크기를 9로 설정할 경우, 성능이 우수하다. 이는 step의 크기가 커질 경우, 평균 변화량에 가까워지면서 노이즈에 강인해지는 효과가 생기기 때문이다. 또한, UWB 펄스 신호의 시작지점부터 피크 지점까지 샘플수가 9개이고, 이와 같은 step을 사용했기 때문에 leading edge를 더 정확하게 추정할 수 있다.

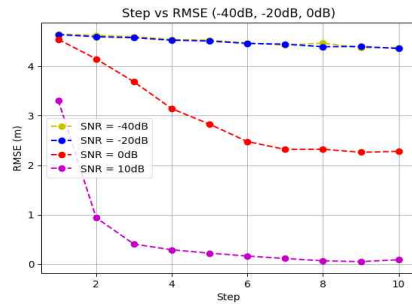
상호상관의 복잡도는 $O(n^2)$ 이고, FFT(Fast fourier transform)를 활용해서 구할 경우 $O(n \log n)$ 이 된다. 제안된 방법의 복잡도는 배열의 이동 연산으로 인해 $O(n)$ 이 된다. 즉 상호상관보다 적은 복잡도를 가진다는 것을 확인할 수 있다. [표 1]은 상호상관과 제안된 방법의 복잡도 비교이다.

[표 1]. 상호상관과 제안된 방법의 복잡도 비교.

Method	Complexity
Cross-correlation	$O(n^2)$
Cross-correlation using FFT	$O(n \log n)$
Proposed method	$O(n)$



[그림 3]. Step vs RMSE (20dB, 40dB)



[그림 4]. Step vs RMSE (-40dB, -20dB, 0dB, 10dB)

IV. 결론

본 논문에서는 미분을 활용해 수신된 UWB 펄스 신호의 leading edge 및 ToA를 추정했다. 시뮬레이션 결과, 변화량인 step을 9로 설정할 때 성능이 우수했다. 또한, 상호상관과 비교해서 복잡도가 낮은 것을 확인했다. 추후 연구에서는 먼저, 상호상관과 제안된 방법의 성능을 비교해보고, 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실제 UWB 기반의 앵커와 태그를 활용해서 위치추정 시스템을 구축할 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] Jang, Byung-Jun. "Principles and trends of UWB positioning technology." The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science 33.1 (2022): 1-11.
- [2] "IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks," in IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015), vol., no., pp.1-800, 23 July 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9144691.