

낮은 복잡도와 전력 소모의 비동기식 UWB 무선측위 기법

정회원 김재운*, 박영진**, 이순우**, 종신회원 신요안*

An Asynchronous UWB Positioning Scheme with Low Complexity and Low Power Consumption

Jaewoon Kim*, Youngjin Park**, Soonwoo Lee** *Regular Members*,
Yoan Shin*^o *Lifelong Member*

요약

본 논문에서는 낮은 복잡도와 전력 소모로 정밀한 무선측위 성능을 제공할 수 있는 고속 비동기식 UWB (Ultra Wide band) 무선측위 기법을 제안하고, NLoS (Non-Line of Sight) 특성이 강한 다중경로 채널 환경에서 무선측위 성능을 향상시키기 위한 Residual Test를 적용한다. 비콘 (Beacon) 수만큼의 송수신이 요구되는 일반적인 ToA (Time of Arrival) 무선측위 기법과 비교하여, 제안된 UWB 무선측위 기법은 단일 송수신 과정만 필요하므로 소모 전력 및 처리 시간 등을 효과적으로 감소시킨다. 또한 비콘간의 엄격한 시각 동기화가 요구되는 일반적인 TDoA (Time Difference of Arrival) 무선측위 기법과 비교하면, 비동기식 기반 제안된 기법은 시스템 복잡도가 매우 낮은 특성을 보유하고 있다. LoS (Line of Sight) 채널 모델에서의 모의실험 결과, 제안된 기법은 낮은 시스템 복잡도와 전력 소모 등을 요구하지만 일반적인 ToA 및 TDoA 무선측위 기법들과 거의 동등한 정밀도의 무선측위 성능을 제공하는 것을 확인하였다. 더불어, NLoS 특성이 강한 다중경로 채널 환경에서도 제안된 기법은 Residual Test를 이용하여 일반적인 기법들에 근접한 정밀도의 무선측위 성능을 달성하는 것을 확인하였다.

Key Words : OFDM, PAPR, Companding, HPA, Filtering

ABSTRACT

In this paper, we propose an asynchronous UWB (Ultra Wide Band) positioning scheme that can provide precise positioning performance with low complexity and low power consumption. We also present the residual test to improve the positioning performance in multipath channels having heavy NLoS (Non-Line of Sight) components. As compared to conventional ToA (Time of Arrival) positioning scheme that requires round-trip transmissions as many as the number of beacons, the proposed UWB positioning scheme effectively decrease power consumption and processing delay since a single round-trip transmission is only required. Also, as compared to conventional TDoA (Time Difference of Arrival) positioning scheme requiring precise synchronization among the beacons, asynchronous nature of the proposed scheme achieves very low system complexity. Through simulations in LoS (Line of Sight) channel models, we observe that the proposed scheme requires low system complexity, low power consumption, while providing positioning performance of almost the same accuracy as the conventional ToA and TDoA positioning schemes. In addition, the proposed scheme by employing the residual test achieves accurate positioning performance even in multipath channels having heavy NLoS components.

※ 본 논문은 한국학술진흥재단의 기초연구과제지원사업 (No. KRF-2008-313-D00665)의 지원으로 이루어짐.

* 송실대학교 정보통신전자공학부 통신및정보처리연구실(ecko99@amcs.ssu.ac.kr, yashin@ssu.ac.kr) (° : 교신처)

** 한국전기연구원 전기정보망연구센터(yjpark@keri.re.kr, rheesw@keri.re.kr)

논문번호 : KICS2009-09-432, 접수일자 : 2009년 9월 24일, 최종논문접수일자 : 2009년 11월 10일

I. 서 론

2002년에 있었던 미국 연방통신위원회 (Federal Communications Commission)의 주파수 할당 및 상업화 승인 이후 초광대역 (Ultra Wide Band; UWB) 통신 기술에 대한 연구와 개발은 전세계적으로 새로운 전기를 맞고 있다^[1]. 특히 정밀한 무선측위 기능까지 수반하는 저속 저전력 W-PAN용 UWB 시스템은 IEEE 802.15.4a^[2] 표준화 그룹을 중심으로 유수 관련 업체들이 경쟁적인 UWB 연구 개발 대열에 적극 참여하고 있는 상황이다.

연속적인 정현파를 사용하는 기존의 무선통신 시스템과는 달리, 전형적인 임펄스 라디오 (Impulse Radio) 기반의 UWB 시스템에서는 1 nsec 내외의 매우 좁은 폭을 갖는 펄스 혹은 임펄스를 단독적으로 전송한다^{[3]-[5]}. 이 때문에 UWB 시스템은 수백 MHz~수 GHz의 대역에 걸쳐 매우 낮은 전력의 초광대역 특성 및 간섭 특성을 갖게 되고, 높은 채널 용량과 데이터 전송률을 지원하며 다중경로에 대한 세밀한 분해가 용이하므로 오차가 수십 cm 이내의 정밀한 무선측위가 가능해진다. 특히 UWB 시스템을 기반으로 한 무선측위 응용은 향후 다수의 센서들이 공존하게 될 유비쿼터스 네트워크를 구축하기 위해 매우 중요한 문제로 부각되고 있다^[3].

일반적인 UWB 무선측위 방법^[6]으로는 태그 (Tag)와 비콘 (Beacon)들 사이의 RTT (Round-Trip Time) 정보를 이용한 일반적인 비동기식 ToA (Time of Arrival) 방법^{[7], [8]}, 그리고 모든 비콘들 간에 완벽한 시각 동기화가 요구되는 일반적인 동기식 TDoA (Time Difference of Arrival) 방법^{[7], [9]}이 대표적으로 알려져 있다. 일반적인 ToA 무선측위 기법은 비콘들 간에 엄격한 시각 동기화가 요구되지 않아 시스템 복잡도 측면에서 유리하지만, 비콘의 개수만큼의 UWB 펄스 송수신 과정이 요구되어 전력 소모뿐만 아니라 처리 시간이 증가된다. 일반적인 TDoA 무선측위 기법은 모든 비콘들 간의 시각 동기화를 기반으로 태그로부터의 단 한차례 UWB 펄스 송신만을 이용하게 되어 전력 소모 및 처리 시간의 감소가 가능하지만, 엄격한 시각 동기화로 인해 높은 시스템 복잡도가 요구되고 비콘들 간의 시각 동기 오류가 발생할 경우 심각한 무선측위 성능 열화가 발생하게 된다.

이에 본 논문에서는 이러한 기존의 무선측위 기법들의 단점을 극복하기 위해 낮은 복잡도와 전력 소모로 정밀한 무선측위 성능을 제공할 수 있는 고속 비동기식 UWB 무선측위 기법을 제안한다. 또한 NLoS (Non-Line of Sight) 특성이 강한 다중경로 채널 환경에서 무선측위 성능을 향상시키기 위한 Residual Test를 적용한다. 제안된 UWB 무선측위 기법은 처리 시간과 전력 소모를 감소시키기 위해 단일 송수신만으로 무선측위를 수행할 수 있도록 설계되었고, ToA 기법과 같이 RTT 정보를 이용하여 거리를 추정하게 되므로 비콘들 간에 엄격한 시각 동기화가 요구되지 않아 낮은 시스템 복잡도 특성을 보유하게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 일반적인 ToA 및 TDoA 무선측위 기법에 대해 살펴보고, 3장에서는 제안된 UWB 무선측위 기법을 설명한다. 4장에서는 제안된 기법에 대한 무선측위 성능을 모의실험을 통해 일반적인 무선측위 기법들과 비교 분석한다. 이어 5장에서는 NLoS 성분이 존재하는 채널 환경에서 성능 향상을 위한 Residual Test를 소개하고 모의실험을 통해 성능을 검증한다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

II. 일반적인 UWB 무선측위 기법

일반적인 UWB 무선측위 방법은 각 비콘들과 태그 간의 RTT를 이용한 비동기식 ToA 방법^{[7], [8]}과 비콘들 간의 완벽한 시각 동기화가 요구되는 동기식 TDoA 방법^{[7], [9]}이 대표적이다. 그림 1(a)에서는 RTT 기반의 일반적인 비동기식 ToA 무선측위 과정을 도시하고 있으며, 여기에서는 3개의 비콘을 사용한다고 가정하였다. 이 기법에서는 비콘들과 태그 간의 3번의 송수신 과정을 통해 각각의 비콘들은 자신들이 획득한 송수신 시각 정보를 PU(Processing Unit)에게 전달하게 되고, 이들 시각 정보를 이용하여 PU는 RTT 정보를 계산하게 된다. 그리고, PU에서는 수집된 RTT 정보와 전파 속도 ($c=3.0 \times 10^8$ m/sec)를 이용하여 각 비콘들과 태그 간의 거리 정보를 산출하고 태그의 위치를 계산한다. 따라서, 비동기식 ToA 무선측위 방법에서는 모든 비콘들 간의 엄격한 시각 동기화가 요구되지 않아 시스템 복잡도 측면에서 유리하지만, 사용 비콘 개수만큼의 UWB 펄스 송수신 과정이 요구되어 전력 소모뿐만 아니라 처리 시간의 증가가 불가피하다.

한편, 그림 1(b)에서는 일반적인 동기식 TDoA

1) 본 논문에서는 비콘들 간의 시각 동기화 필요 여부에 따라 동기식 또는 비동기식 측위 시스템으로 구분하기로 한다.

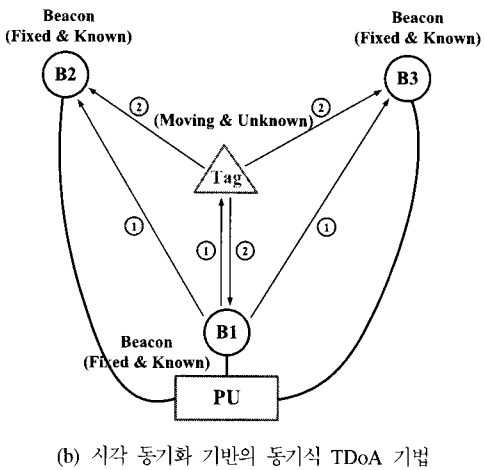
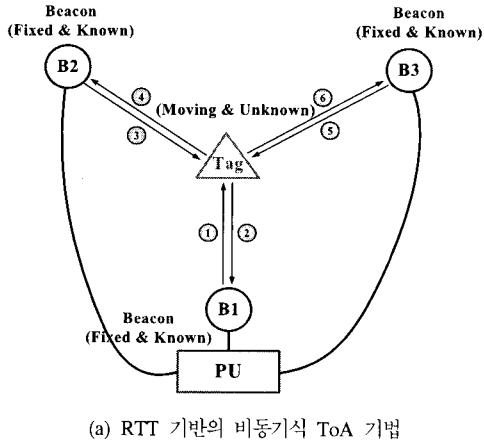


그림 1. 일반적인 UWB 무선측위 기법의 신호 송수신 과정 및 시스템 구성도
Fig. 1. Signalling procedures and system architectures of the conventional UWB positioning schemes

무선측위 과정을 도식하고 있다. 이 기법은 모든 비콘들 간의 시각 동기화를 기반으로 태그로부터의 단 한차례 UWB 펄스 송신만을 하게 된다. 이 때 모든 비콘들은 태그로부터 송신된 펄스의 수신 시각 정보를 PU로 전달하게 되며, PU는 이를 이용하여 거리차 정보를 산출하고 태그의 위치를 계산한다. 이러한 TDoA 방식은 절대적인 시각 정보를 측정하는 것이 아니라 수신된 시간차만을 이용하므로 ToA보다 구현하기 쉽다는 장점이 있다. 따라서 동기식 TDoA 무선측위 기법은 단 한차례 UWB 펄스 송신만을 이용하게 되어 소모 전력 및 처리 시간의 감소가 가능하지만, 비콘들 간의 엄격한 시각 동기화로 인해 높은 시스템 복잡도가 요구되고 만일 비콘들 간의 시각 동기 오류가 발생할 경우 심각한 무선측위 성능 열화가 발생하게 된다. 이러한 현상은 본 논문의 4장에서 모의실험 결과를 통해

확인할 수 있다.

III. 제안된 UWB 무선측위 기법

본 논문에서는 앞서 살펴본 일반적인 ToA 및 TDoA 무선측위 방법의 단점을 극복하여 효율적으로 무선측위가 가능할 수 있도록 낮은 복잡도와 전력 소모의 고속 비동기식 UWB 무선측위 기법을 제안한다. 제안된 UWB 무선측위 기법 기본적으로 RTT 기반의 ToA 알고리즘을 적용하지만 마스터 비콘 (Master Beacon)과 태그가 각각 한번씩 UWB 펄스를 전송하는 단일 송수신 과정만을 필요로 하게 된다. 그림 2에서는 제안된 기법의 전체적인 시스템 구조와 펄스 전송 및 신호처리 과정을 도식하고 있다. 여기서 제안된 기법에서는 기본적으로 태그, 마스터 비콘 B_1 , 두 개의 슬레이브 비콘 (Slave Beacon) B_2 와 B_3 , 그리고 PU로 구성된다. 또한 마스터 비콘은 PU와 직접 연결되어 있으며, 나머지 슬레이브 비콘들은 미리 정해진 위치에 고정된다.

그림 3에서는 제안된 UWB 무선측위 기법의 신호 송수신 과정을 시간 흐름에 따라 도식하고 있다. 여기서 PU는 마스터 비콘과 슬레이브 비콘들 사이의 거리 정보와 전송 소요 시간을 미리 알고 있다고 가정하였다. 각각의 비콘과 태그 사이의 거리를 고려하여 UWB 펄스간 간섭을 피하기 위해 최대 전송 소요 시간보다 충분히 긴 대기 시간 T 로 정의하였다. 또한 제안된 UWB 무선측위 기법을 통해 측정되어야 할 시간 관련 파라미터들은 표 1에서

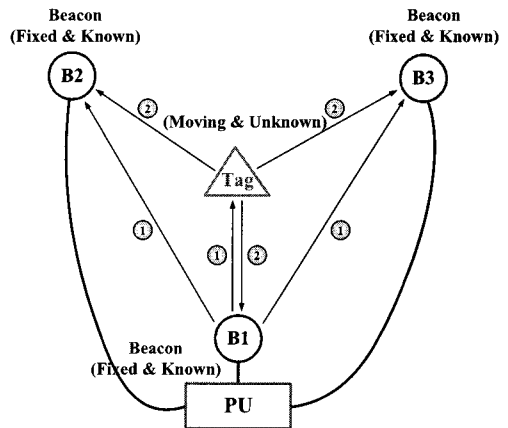


그림 2. 제안된 UWB 무선측위 기법의 송수신 과정 및 시스템 구성도
Fig. 2. Signal procedure and system architecture of the proposed UWB positioning scheme

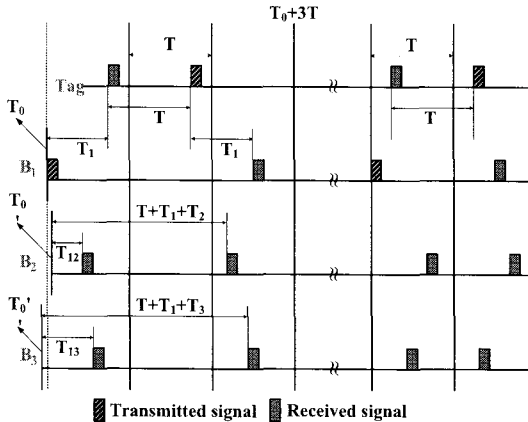


그림 3. 제안된 UWB 무선측위 기법의 시간의 흐름에 따른 신호 송수신 과정
Fig. 3. Transmitting and receiving procedures of the proposed UWB positioning scheme according to time flow

정리하고 있으며, 이를 기반으로 PU에서는 표 2에 정의된 식들을 이용하여 각각의 비콘과 태그 사이의 RTT 정보인 T_1, T_2, T_3 를 얻게 된다. 결국 PU에서는 전파 속도를 이용하여 d_1, d_2, d_3 의 거리 정보를 산출하고 이 정보를 이용하여 태그의 위치를 추정하게 된다.

제안된 UWB 무선측위 기법의 세부적인 절차는 다음과 같다.

1. PU에서는 펄스 전송 시점에 대한 시각 동기 정보 T_0 를 B_1 에 우선순위로 부여함
2. B_1 에서는 T_0 시각에 태그와 슬레이브 비콘에게 UWB 펄스를 전송함
3. B_2 와 B_3 에서는 B_1 에서 전송된 첫번째 수신 펄스의 시각을 측정하여 버퍼에 저장함
4. 태그에서는 B_1 에서 전송된 펄스를 수신한 뒤, 정확히 T 만큼의 시간이 지난 후 각 비콘들에게 다시 펄스를 전송함
5. B_2 와 B_3 는 다시 태그에서 전송된 두번째 수신 펄스의 시각을 측정하여 버퍼에 저장함
6. B_1, B_2, B_3 는 B_1 에서 전송된 첫번째 수신 펄스 시각과 태그에서 전송된 두번째 펄스의 수신 시각을 우선순위로 PU에 전송함
7. PU에서는 미리 알고 있던 거리 및 시각 정보들과 각 비콘들이 전송한 시각 정보를 가지고 태그에 대한 최종적인 무선측위를 수행함

한편 표 2의 계산식을 통해 알 수 있듯이, 제안

표 1. 제안된 UWB 무선측위 기법을 위한 시간 관련 파라미터
Table 1. Time-related parameters for the proposed UWB positioning scheme

T	정해진 공간에서 신호 전송에 요구되는 대기 시간 (Predetermined)
T_1, T_2, T_3	태그와 각각의 비콘들간의 신호 전송 소요 시간 (Unknown)
T_{12}, T_{13}, T_{23}	각각의 비콘들간의 신호 전송 소요시간 (Known)
T_0	무선측위를 위해 마스터 비콘에 제공되는 PU의 시각 동기 정보
T_0', T_0''	슬레이브 비콘들 자체에서 제공되는 시각 동기 정보 (Unknown)
X_T	마스터 비콘에 의해 측정된 태그 신호의 도착 시각 (Measured)
Y_B, Y_T, Z_B, Z_T	슬레이브 비콘들에 의해 측정된 마스터 비콘과 태그 신호의 도착 시각

표 2. 제안된 UWB 무선측위 기법에서 RTT 정보를 추정하기 위한 계산식

Table 2. Equations for estimating RTT information in the proposed UWB positioning scheme

$X_T - T_0 = T_1 + T + T_1$	이 식을 이용하여 T_1 을 추정
$Y_B - T_0' = T_{12}$	이 식을 이용하여 T_0' 을 추정
$Y_T - T_0' = T_1 + T + T_2$	이 식을 이용하여 T_2 을 추정
$Z_B - T_0'' = T_{13}$	이 식을 이용하여 T_0'' 을 추정
$Z_T - T_0'' = T_1 + T + T_3$	이 식을 이용하여 T_3 을 추정

된 UWB 무선측위 기법에서는 비콘들 간의 시각 동기 오차인 T_0', T_0'' 의 영향을 제거할 수 있게 된다. 즉 제안된 기법은 모든 비콘들 간에 정확한 동기화가 요구되지 않는 비동기식 무선측위 기법이므로, 일반적인 TDoA 방식과는 달리 동기화 오차에 따른 영향을 받지 않게 되고 시스템 구성 또한 매우 간단해진다. 이와 더불어, 제안된 기법은 마스터 비콘과 태그 간의 단일 UWB 펄스 송수신 과정만 필요하므로 일반적인 ToA 방식에 비해 전력 소모 및 처리 시간을 효과적으로 감소시킬 수 있다.

IV. 제안된 기법에 대한 무선측위 성능 평가 분석

일반적인 ToA 및 TDoA 무선측위 기법들과 제안된 UWB 무선측위 기법에 대한 무선측위 오차 성능 비교를 위해 IEEE 802.15.4a UWB 다중경로 CM1 (NLoS 특성이 존재하는 "Residential")과 CM7 (LoS 성분이 강한 "Industrial LoS") 채널 모델¹⁰⁾을 고려하였다. IEEE 802.15.4a에서 제시한 UWB 다중경로 채널 모델은 두 개의 Poisson 분포

를 기반으로 하는 변형된 Saleh-Valezuela 모델^[11]에 기초하고 있으며, 각각의 채널 계수는 Nakagami 분포^[12]에 의해 결정된다.

또한 UWB 신호 획득을 위한 프리앰블 신호로는 31 비트로 구성된 다음과 같은 Gold 코드를 적용하였다.

0001101111011010001111110100000

프리앰블 신호에서 각 비트는 그림 4에서와 같이 하나의 UWB 펄스와 보호구간으로 구성되며, 특히 보호구간은 다중경로 채널의 지연 확산에 의한 펄스 간섭을 줄이기 위해 49개의 펄스 간격 (≈ 37.3674 nsec)만큼 충분히 길게 설정하였다. 여기서 하나의 UWB 펄스는 0.7626 nsec의 폭을 갖게 되며, 변조 방식은 BPSK (Binary Phase Shift Keying)를 사용하였다. 또한, 본 논문에서는 상관기를 기반으로 하는 Coherent UWB 수신기를 고용하였다. 따라서 수신단에서는 프리앰블 신호와 동일한 참조 신호를 이용하여 펄스 간격으로 이동하면서 상관 적분을 하게 되고, 상관기 출력값이 특정 임계값을 초과하는 최초 시점을 프리앰블의 시작 시점으로 판단하게 된다. 여기서 임계값은 무선측위의 정밀도를 최대로 높일 수 있게 설정되어야 하며, 본 논문에서는 이 값을 시행착오법을 통해 실험적으로 결정하였다. 마지막으로 본 논문의 모든 실험에서 신호대잡음비는 20 dB로 고정하였다.

본 논문에서는 모의실험을 위해 그림 5에서와 같은 가로와 세로의 길이가 각각 20 m인 정사각형 모양의 2차원 공간을 가정하였으며, 태그는 이 공간 내에서 랜덤하게 위치한다고 가정하였다. 이 때 보다 현실적인 상황을 고려하기 위해, TDoA 방법에 대한 비콘간 시각 동기 오류가 20 m (66.7 nsec)의 2% (1.33 nsec)와 4% (2.67 nsec)까지 발생한 경우를 추가로 고려하였다.

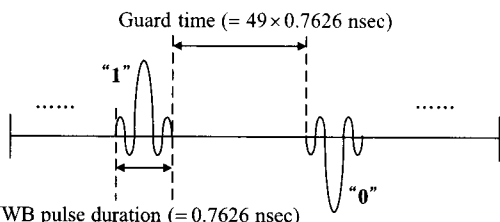


그림 4. UWB 무선측위를 위한 프리앰블 구조
Fig. 4. The preamble structure for UWB positioning

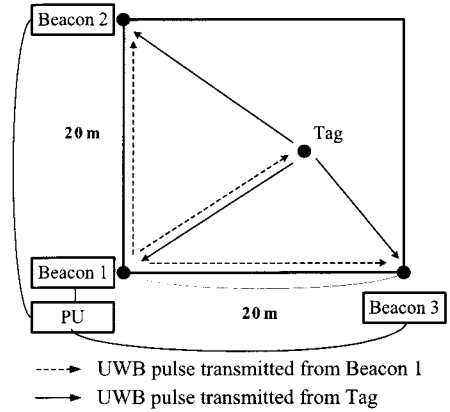


그림 5. 무선측위 모의실험을 위해 설정된 2차원 공간
Fig. 5. The two-dimensional space for positioning simulation

그림 6에서는 IEEE 802.15.4a CM1과 CM7 채널 모델에서 제안된 기법 (“Proposed”)과 일반적인 ToA 기법 (“Basic ToA”) 및 TDoA 기법 (“TDoA”)의 무선측위 성능 결과를 도시하고 있다.

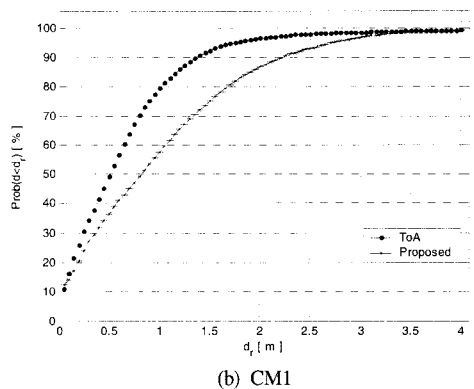
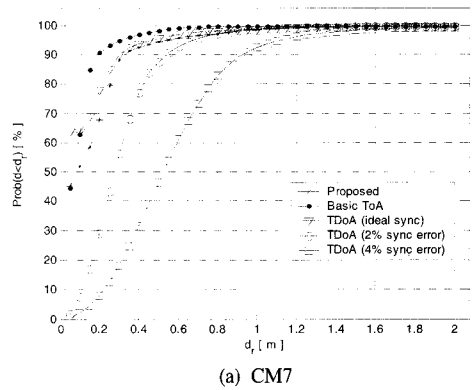


그림 6. 제안된 기법과 일반적인 ToA 및 TDoA 기법들의 무선측위 오차 성능 비교
Fig. 6. Comparison of positioning error performance among the proposed scheme and the conventional ToA, TDoA schemes

그림 6(a)를 통해 알 수 있듯이, LoS 성분이 강한 채널 환경에서 제안된 기법은 낮은 전력 소모 및 복잡도와 고속 처리의 장점에도 불구하고 일반적인 ToA 및 TDoA 기법과 거의 유사한 무선측위 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 반면 TDoA 기법의 무선측위 성능은 시차 동기 오차에 매우 민감하여 매우 작은 오차에도 무선측위 성능이 심각히 열화되는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 6(b) 결과를 통해 확인할 수 있듯이 NLoS 성분이 존재하는 채널 환경에서는 제안된 기법의 무선측위 성능이 일반적인 ToA 기법에 비해 열화되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 제안된 기법은 LoS가 보장된 채널에서는 정밀한 무선측위가 가능하지만, 일정 정도 NLoS 성분이 존재하는 채널에서는 다중경로 지연의 정도에 따라 무선측위 성능이 많은 영향을 받게 된다는 것을 알 수 있다.

V. NLoS 채널 환경에서 Residual Test를 적용한 성능 향상

앞서 4장에서 살펴본 바와 같이, 제안된 기법은 NLoS 성분이 존재하는 채널 환경에서는 정밀한 무선측위 성능을 제공하지 못하게 된다. 이에 본 논문에서는 NLoS 채널 환경에서 무선측위 성능을 개선하기 위한 방식으로 Residual Test^[13]을 소개하고, 이를 제안된 기법에 확장 적용한다. Residual Test는 많은 수의 비콘에서 추정된 태그의 위치 정보 중 LoS 정보라고 판단되는 세 개의 비콘을 찾아낸 다음 그 비콘들의 정보를 이용하여 무선측위를 수행하는 것이다. 즉, 만일 목표 태그와 LoS 채널 조건을 갖는 비콘을 정확하게 추정할 수 있다면 제안된 기법을 통해서도 태그의 위치를 매우 정밀히 추정할 수 있게 된다. 본 논문에서는 Residual Test를 적용하기 위해 7개의 비콘을 사용하였다.

Residual Test에서는 각 비콘과 태그 사이의 ToA 정보를 ML (Maximum Likelihood) 방식^[14]으로 추정한다. 식 (1)에서와 같이 각 비콘과 태그 사이의 측정된 거리를 δ_i , 실제 거리를 R_i 라고 하였을 때, 식 (2)의 값이 최소가 되는 조건을 찾게 된다. 여기서 N 은 비콘의 개수를 의미하며 한다.

$$\delta_i = R_i + \epsilon_i \quad (1)$$

$$J = \sum_{i=1}^N (\delta_i - R_i) \quad (2)$$

$$\sum_{i=3}^7 C_i = 99 \quad (3)$$

Residual Test에서는 식 (3)에서와 같이 7개의 비콘으로 이루어지는 가능한 모든 조합의 개수 99가지 경우에 대하여 ML 방식에 의해 2차원 좌표 추정치 $(\hat{x}(k), \hat{y}(k))$ 에 대한 무선측위를 계산한 뒤, 각각의 결과 값에 대하여 식 (4)의 값을 구하게 된다.

$$\chi_x^2(k) = \frac{[\hat{x}(k) - \hat{x}(99)]}{B_x(k)} \quad (4)$$

$$\chi_y^2(k) = \frac{[\hat{y}(k) - \hat{y}(99)]}{B_y(k)} \quad (k=1, \dots, 98)$$

여기서 $(\hat{x}(99), \hat{y}(99))$ 는 일곱 개의 비콘 모두가 LoS라고 가정했을 때의 ML 추정 값이며, $B_x(k)$ 와 $B_y(k)$ 는 CRLB (Cramer-Rao Lower Bound) 값을 나타낸다. CRLB는 이상적인 환경에서만 구할 수 있는 값이므로 본 논문에서는 이를 ML 기법에 의해 추정된 무선측위 결과 값으로 대체하였다.

한편, 7개의 비콘 모두가 LoS일 경우 식 (4)는 평균이 0, 분산이 1인 정규화된 가우시안 PDF (Probability Density Function)를 형성한다. 하지만 하나의 비콘이 NLoS인 경우 추정치는 정확한 태그의 위치로부터 일정 양만큼 벗어난 정보를 갖게 되어 그림 7에서와 같이 임계값 TH보다 큰 값을 갖는 것의 개수가 증가하게 된다. 여기서 $D=7$ 는 7개의 비콘 중 7개 모두가 LoS 비콘임을, $D=6$ 은 6개의 비콘만이 LoS 비콘임을 의미한다. 만일 임계값 TH보다 큰 값을 갖는 것의 개수가 전체의 10% 이하이면 7개의 비콘 모두 LoS라고 판단하고 무선측위를 수행한다. 만일 10% 이상이면 7개의

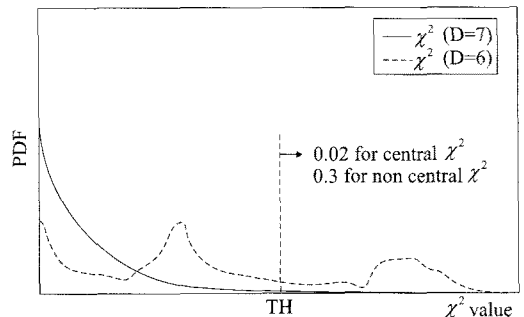


그림 7. Residual Test에서의 실험치 및 실제 χ^2 PDF
Fig. 7. Experimental and actual χ^2 PDFs in residual test

비콘 모두가 LoS 비콘은 아님을 알 수 있다. 따라서 $D=7$ 의 경우, 즉 7개의 비콘중 6개의 비콘이 LoS인지 아닌지를 판단하기 위한 과정을 $D=7$ 과 같은 방식으로 수행한다. 동일한 방법으로 $D=3$ 일 때까지 Residual Test를 반복하여 수행하면 7개의 비콘 중 LoS 비콘의 개수를 찾을 수 있게 된다. 표 3에서는 Residual Test에 의한 LoS 비콘 검출 과정을 요약한 것이다.

그림 8에서는 Residual Test를 적용한 일반적인 ToA 및 제안된 기법에서의 송수신 과정을 도시화한 것이다. 그림 8(a)에서 알 수 있듯이, 일반적인 ToA 기법에서는 7개의 비콘 모두 태그와의 송수신을 필요로 하기 때문에 처리 시간이 길게 된다. 하지만 마스터 비콘을 1개라고 가정한 경우에 대한 제안된 기법의 경우 그림 8(b)에서와 같이 단 한번의 마스터 비콘과 태그사이의 송수신만으로 무선 측위가 이루어진다. 따라서 각 비콘과 태그 간 지연 시간을 $T_{di} \sim T_{di}$ 이라 하였을 때 기본적인 ToA의 경우 총 처리 지연 시간은 $\sum_{i=1}^7 T_{di} + 7T$ 가 되지만 제안된 기법의 경우 $T_{di} + 7T$ 가 되어 처리 시간이 크게 단축된다. 또한 태그가 1회 송신 시 요구되는 전력 소모량을 P 라 하였을 때, 기본적인 ToA 기법에서는 1회 무선측위 시 총 $7P$ 만큼의 전력이 필요하지만, 제안된 기법은 P 만큼의 전력만 요구되어 일반적인 ToA의 경우에 비해 전력 소모를 7분의 1로 줄일 수 있게 된다.

앞서 설명된 Residual Test 방안을 도입한 경우

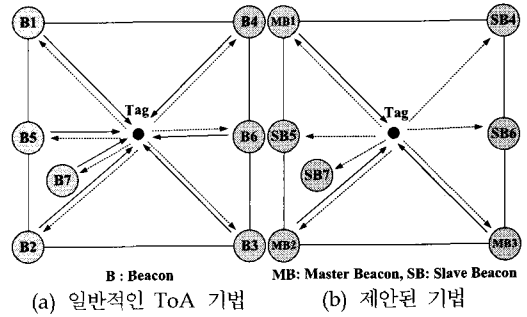


그림 8. Residual Test를 도입한 경우 일반적인 ToA 기법과 제안된 기법의 신호 송수신 과정 및 시스템 구조
Fig. 8. Signalling procedures and system architectures of the conventional ToA and the proposed UWB positioning schemes, when employing residual test

에 대한 제안된 UWB 무선측위 기법의 성능을 검증하기 위해 모의실험을 수행하였다. 모의실험을 위한 시스템 파라미터들은 앞서 4장의 조건과 모두 동일하지만, 채널은 NLoS 성분이 존재하는 IEEE 802.15.4a CM1 채널 모델만 고려하였다. 또한, 제안된 기법에서는 마스터 비콘의 레인지 정확도를 개선하기 위해 3개의 마스터 비콘을 사용하여 무선 측위를 실행한다. 그림 9에서는 IEEE 802.15.4a CM1 채널 모델에서 Residual Test를 적용한 경우 일반적인 ToA 기법 (“ToA”)과 제안된 기법 (“Proposed”)의 무선측위 성능 결과를 비교 도시하고 있다. 이 결과를 통해 알 수 있듯이, Residual Test를 고용한 제안된 기법은 NLoS 성분이 존재하는 채널 환경에서 일반적인 ToA 기법과 거의 동등한 무선측위 정밀도를 제공할 수 있게 됨을 확인할 수 있다.

표 3. Residual Test에 의한 LoS 비콘 검출 방식
Table 3. LoS beacon detection method by residual test

<ol style="list-style-type: none"> $\sum_{i=3}^7 C_i$ 개의 위치 정보를 ML 방식으로 추정 식 (4)의 값을 계산 식 (4)에서 일정 임계값 TH를 넘는 확률 변수의 개수 ℓ을 구함. 만약 ℓ이 20개 이하면 $D=7$이라 판정, 그렇지 않으면 $D=6$ 경우를 검사 $D=6$ 경우를 검사하기 위해서 ${}^7C_6 = 7$ 개의 경우를 설정하고 각 경우에 대하여 $\sum_{i=3}^6 C_i$ 개의 위치 정보를 ML 방식으로 추정 1~3의 과정 수행 후 7개 경우에 대한 ℓ을 구함 $D=3$일 때까지 반복 ($D=5, D=4$ 검사 과정은 $D=6$의 경우와 동일)
--

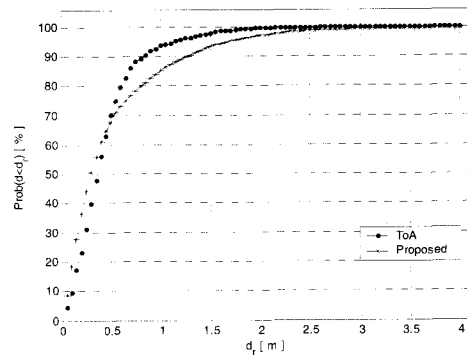


그림 9. Residual Test를 적용한 제안된 기법과 일반적인 ToA 기법의 무선측위 성능 비교
Fig. 9. Comparison of positioning performance between the proposed scheme and the conventional ToA scheme, when applying residual test

VI. 결 론

본 논문에서는 낮은 복잡도와 전력 소모로 정밀한 무선측위 성능을 제공할 수 있는 고속 비동기식 UWB 무선측위 기법을 제안하였고, NLoS 특성이 강한 다중경로 채널 환경에서 무선측위 성능을 향상시키기 위한 Residual Test를 소개하였다. 비콘 수만큼의 송수신이 요구되는 일반적인 ToA 무선측위 기법과 비교하여, 제안된 UWB 무선측위 기법은 단일 송수신 과정만 필요하므로 소모 전력 및 처리 시간 등을 효과적으로 감소시킬 수 있다. 또한 엄격한 시각 동기화가 요구되는 일반적인 TDoA 무선측위 기법과 비교하면, 비동기식 기반의 제안된 기법은 시스템 복잡도가 매우 낮은 특성을 보유하고 있다. LoS 채널 모델에서의 모의실험 결과, 제안된 기법은 매우 낮은 시스템 복잡도와 전력 소모 등을 요구하지만 일반적인 ToA 및 TDoA 무선측위 기법들과 거의 동등한 정밀도의 무선측위 성능을 제공하는 것을 확인하였다. 이와 더불어, NLoS 특성이 강한 다중경로 채널 환경에서도 제안된 기법은 Residual Test를 이용하여 일반적인 기법들과 근접한 정밀도의 무선측위 성능을 달성하는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's rules regarding ultra-wideband transmission," ET Docket 98-153, April 2002.

[2] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html>

[3] K. Siwiak and D. McKeown, *Ultra-Wideband Radio Technology*, John Wiley & Sons, 2004.

[4] Z. Sahinoglu, S. Gezici, and I. Guvenc, *Ultra-wideband Positioning Systems*, Cambridge University Press, 2008.

[5] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Impulse radio: How it works," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 2, no. 2, pp. 36-38, February 1998.

[6] S. Gezici, Z. Tian, G. B. Giannakis, H. Kobayashi, A. F. Molisch, H. V. Poor, and Z. Sahinoglu, "Localization via ultra-wideband radios: A look at positioning aspects for future sensor networks," *IEEE Signal Proc. Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 70-84, July 2005.

[7] A. H. Sayed, A. Tarighat, and N. Khajehnouri, "Network-based wireless location: Challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information," *IEEE Signal Proc. Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 24-40, July 2005.

[8] J. J. Caffery and G. L. Stuber, "Overview of radio-location in CDMA cellular systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, no. 4, pp. 38-45, April 1998.

[9] K. C. Ho and Y. T. Chan, "Solution and performance analysis of geolocation by TDOA," *IEEE Trans. Aerospace & Electr. Syst.*, vol. 29, no. 4, pp. 1311-1322, October 1993.

[10] IEEE 802.15.4a Channel Modeling Subcommittee, "IEEE 802.15.4a channel model - final report," available at <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html>

[11] A. Saleh and R. A. Valenzuela, "A statistical model for indoor multipath propagation," *IEEE Jour. Selected Areas in Commun.*, vol. 5, no. 1, pp. 138-137, February 1987.

[12] M. Nakagami, "The m-distribution, a general formula of intensity distribution of rapid fading," in *Statistical Methods in Radio Wave Propagation (W. G. Hoffman, Ed.)*, Pergamon, 1960.

[13] Y. Chan and W. Tsui, "Time-of-arrival based localization under NLoS conditions," *IEEE Trans. Vehicular Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 17-23, January 2006.

[14] Y. Chan, H. Y. C. Hang, and P. Ching, "Exact and approximate maximum likelihood localization algorithms," *IEEE Trans. Vehicular Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 10-16, January 2006.

김재운 (Jaewoon Kim) 정회원
한국통신학회논문지 Vol. 34, No. 1 참조

박영진 (Youngjin Park) 정회원
한국통신학회논문지 Vol. 30, No. 12 참조

이순우 (Soonwoo Lee) 정회원
한국통신학회논문지 Vol. 34, No. 10 참조

신요안 (Yoan Shin) 종신회원
한국통신학회논문지 Vol. 34, No. 1 참조