통신시스템 기반의 무선 측위 기법 비교, 연구

Localization Algorithms Using Wireless Communication Systems

최진원 · 성유석 · 강준성 · 김성철
Jinwon Choi · Yu-Suk Sung · Jun-Sung Kang · Seong-Cheol Kim

사용자의 위치를 고려한 맞춤형 위치기반서비스 제공을 위해서는 사용자의 정확한 위치를 추정하는 기법 개발이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 무선 통신시스템을 기반으로 사용자의 위치를 추적하는 기법에 대한 연구동향을 살펴보고 초광대역 통신시스템에서 지연변수를 이용한 복합형 무선 측위 기법을 제시한다. 먼저, 무선 측위를 위한 초광대역 통신의 장, 단점을 다른 통신시스템과 비교한 후 무선 측위에 사용되는 측위 파라미터에 따른 기법들을 소개하며 현재 진행되고 있는 복합형 무선 측위 기법의 연구동향을 살펴본다. 모의 실험을 통해 얻어진 성능분석결과를 이용하여 지연변수 값으로부터 가시경로의 존재 유, 무를 판단하고 그에 따라 거리 추정값을 선택하는 복합형 측위 기법을 제시한다.

주제어: 위치기반서비스(LBS, Location Based Service), 무선 측위 기법, 초광대역 통신(UWB, Ultra-WideBand), 광대역 채널(Wideband Channel), CRLB(Cramer-Rao Lower Bound)

For efficient Localization Based Services, development of accurate localization algorithm has to be preceded. In this paper, research trend of localization algorithm using Ultra WideBand (UWB) radio is reported and hybrid localization algorithm using delay parameters is proposed. As communication for localization, the UWB is compared with other systems. After introducing localization algorithms using UWB, proposed hybrid algorithms are presented. In our proposed hybrid algorithm, anchor nodes determined the existence of line-of-sight path from measured delay parameters. Then, using time of arrival and received signal strength information, calculated range estimation results are sent to the central processor. The performance of our algorithm is compared to existing algorithms using simulation and it is confirmed that about 20% of localization error of conventional localization algorithm using TOA is reduced in localization algorithm with three base stations.

Keywords : Location Based Service, Localization algorithm, Ultra WideBand, Wideband channel characteristics, and CRLB (Cramer-Rao Lower Bound)

I. 서 론

휴대전화, 무선랜, 와이브로 등 사용자가 이동하는 상황에서 정보를 주고 받을 수 있는 무선통신시스템이 발전하면서 사용자의 위치를 정확하게 파악하여 그에 맞는 서비스를 제공하는 위치기반서비스(LBS: Location Based Service)의 개발이 활발하게 논의되고 있다. 이러한 위치기반서비스는 기존에 제공되는 길안내, 미아 추적 등의 서비스는 물론, 수m 내의 정확도로 사용자의 위치를 파악하여 그 위치에 따라 상업적 정보를 제공하거나 위급상황에 대한 긴급구호서비스를 제공하는 서비스까지 그 영역을 확대하고 있다. 하지만 기

최진원, 성유석, 강준성, 김성철: 서울대학교

표 1. 무선 측위에 사용되는 통신 시스템별 특징

	장점	단점	오차	커버리지
UWB	간단한 구조의 저가단말기 제작가능, 정확도가 매우 우수	기존 시스템과의 간섭 문제 해결 필요	~수m	10~60m
GPS	전세계에서 가능	실내환경에서 사용불가	13~20m	-
이동전화(Cellular)	단말기의 추가 제작 불필요	정밀한 측위 불가	100m~	0.5~2km
무선랜	안정적인 시스템 존재	반응이 늦고 전파간섭 심함	2~10m	100m
블루투스	설치비용 적음	복잡한 환경에서 정확도가 현저히 떨어짐	2~10m	10m/20m/100m
RFID	저가의 단말기 가능	가시경로 존재하는 근거리에서만 가능	5cm~5m	~20m

커버리지: 한 고정국의 서비스 범위

존 이동통신망의 경우 고정국의 넓은 적용 범위로 인하여 낮은 측위 정밀도를 갖기 때문에 정확한 위치정보를 활용한 서비스를 제공하기 어렵다. 또한 추가로 고정국을 설치하는 문제 역시 비계획적이었던 기존 고정국의 분포와 추가 설치 비용 등의 이유로 쉽지 않다. 그에 따른 대안으로는 기존의 통신시스템에 비하여 커버리지는 작지만 저가의 센서형태로 단말기가 제작될 수 있는 무선센서네트워크가 주목받고 있으며 그 중에서도 초광대역(UWB: Ultra WideBand) 통신을 기반으로 하는 측위 기법에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[1]~[3]. 중심 주파수의 20%이상 또는 500MHz이상의 주파수 대역폭을 사용하는 모든 통신시스템을 의미하는 초광대역 통신의 경우 좁은 시간 폭의 펄스를 사용하기 때문에 복잡한 다중환경에 강하며 송, 수신기의 간단한 구조로 인해 개발단가가 낮은 장점을 가지고 있다. 초광대역 통신시스템은 초기에는 10m 이내의 근거리에서 초고속 데이터통신을 목표로 연구되었지만 수십m 거리에서 좀 더 낮은 데이터 전송속도와 함께 거리추정 기능을 추가하는 연구가 병행되면서 위치기반서비스로의 적용 가능성을 높이고 있다.

본 논문에서는 초광대역 통신시스템 기반의 무선측위 기법에 대한 연구 동향을 살펴보고 지연변수 값을 이용한 복합형 측위 기법을 제시한다. 초광대역 통신시스템이 기존의 무선랜, 블루투스, RFID 등에 비하여 위치기반서비스를 위한 무선 측위에서 가지는 장, 단점을 논의한 후 초광대역 통신 무선 측위 기법들을 설명한다. 무선 측위 시스템에서 무선 측위 기법들은 도래각(AOA: Angle Of Arrival)을 측정하여 신호의 방향을 찾아내는 방법, 전파도달시간(TOA: Time Of Arrival) 또는 상대적 전파도달시간(TDOA: Time Difference Of Arrival)을 측정하여 고정국과 사용자 사이의 거리를 파악하는 시간영역 파라미터 기반 방법, 그리고 수신신호의 세기를 기반으로 거리를 결정하는 수신신호세기(RSS: Received Signal Strength) 기반 방법이 있다. 하나의 채널 파라미터를 이용한 무선 측위 기법들의 비교가 이루어진 후 복합형 기법(Hybrid Algorithm)들의 연구동향을 서술한다. 복합형 기법의 경우 하나의 채널 파라미터를 이용해서 거리를 파악하는 기법들에 비하여 계산량은 많지만 여러 개의 파라미터들로부터 무선 측위가 이루어지기 때문에 좀 더 정확한 측위 성능을 보장할 수 있다. 현재 연구되고 있는 초광대역 통신 기반 복합형 기법들의 구조와 성능을 분석한 후 이러한 기법들보다 간단한 구조를 가지면서 유사한 성능을 발휘할 수 있는 새로운 복합형 기법을 제시한다. 이 기법에서는 시간영역에서의 대표적 채널 특성 파라미터인 지연변수(Delay Parameter)를 이용하여 가시경로(LOS: Line Of Sight)의 존재 유무를 판단하고 그에 따라 전파도달시간과 수신신호의 세기를 바탕으로 최종 사용자의 위치를 파악한다.

본 논문의 구조는 다음과 같다. II장에서 무선 측위를 위해 초광대역 통신이 가지는 장, 단점을 기술한 후 III장에서 초광대역 통신시스템을 이용한 무선 측위 기법들을 설명한다. 이어 여러 개의 채널 특성 파라미터들을 이용하는 복합형 측위 기법들의 연구현황을 IV장에서 기술한다. V장에서 모의실험결과를 통하여 제시되는 지연변수를 이용한 전파도달시간 및 수신신호기반의 복합형 측위 기법을 제시한 후 VI장에 결론을 서술하였다.

II. 무선 측위를 위한 초광대역 통신

표 1에 대표적으로 사용되고 있는 무선통신시스템들의 무선 측위를 위한 특징들을 정리하였다[4]~[6]. 현재 가장 대표적으로 무선 측위에 사용되는 기술에는 GPS와 이동전화가 있다. GPS의 경우 위성에서 들어오는 신호를 GPS 단말기가 판단하여 위치를 파악하며 이동전화의 경우 통신을 하고 있는 네트워크의 기지국 위치를 기준으로 사용자의 위치를 판단한다. 하지만 GPS의 경우 실내환경에서 서비스를 전혀 제공할 수 없으며 단말기에서 소비하는 전력소모량이 커 휴대하며 서비스를 제공하는 단말기에 적용하기 위해서는 소비전

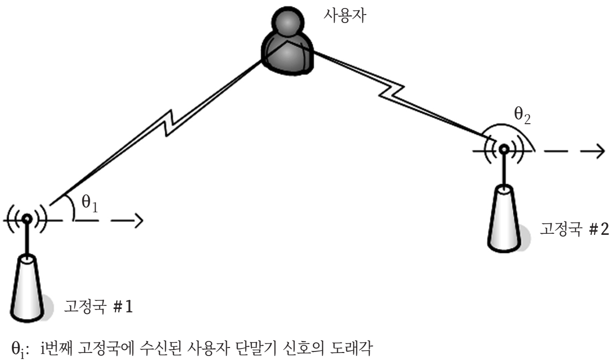


그림 1. AOA 측위법

표 2. 측위 기법별 특징 및 오차 요인

	특징	주 오차원인
AOA	2개의 고정국으로 위치 추정 가능	다중경로
TOA	가시경로가 존재할 경우 정확도 우수	다중경로
RSS	경로감쇄모델 기반	부정확한 경로감쇄모델

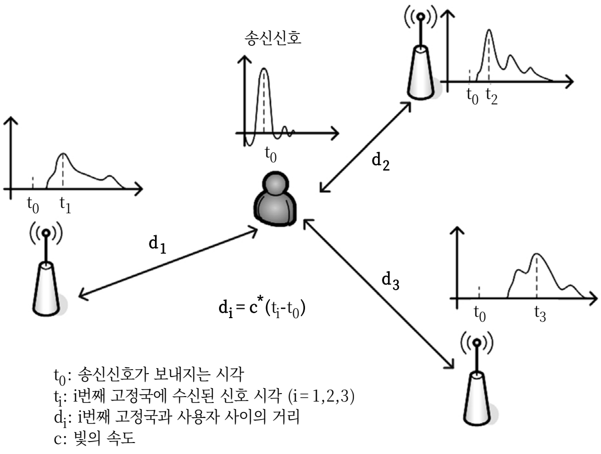
력 문제를 극복해야 한다. 이동전화에 의한 무선 측위의 경우 현재 일반적으로 보급되어 있는 휴대폰을 통해 서비스를 할 수 있으나 측위 오차가 커 정밀한 위치기반 서비스를 제공하기에는 어려움이 많다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 초광대역 통신, 무선랜, 블루투스 그리고 RFID 등을 기반으로 하는 무선측위 시스템들이 개발되고 있다. 이들 중 무선랜의 경우 반응이 늦어 동적 환경에 적합하지 않다는 단점이 있으며 블루투스와 RFID의 경우 가시경로가 확보되지 않은 복잡한 실내환경의 경우 측위 오차가 급격하게 증가하는 단점을 지니고 있다. 이에 비하여 초광대역 통신의 경우 짧은 폭의 펄스를 사용함으로 인해 다중경로환경에 강하고 간단한 구조와 저전력의 특성으로 저가의 단말기 제작이 가능하다. 하지만 광대역 사용으로 인한 기존 통신과의 간섭문제와 부품개발들의 문제 등은 해결되어야 하는 과제이다.

III. 초광대역 통신의 무선 측위 기법

네트워크 상에서 단말기를 지닌 사용자의 위치를 파악하는 방법은 정해진 위치에 놓여진 고정국의 신호를 받아 단말기에서 위치를 판단하는 단말기반의 측위 기법과 고정국이 단말기와 신호를 주고받음으로써 네트워크의 중앙 처리장치에서 단말기의 위치를 파악하여 위치정보를 다시 주고 받는 네트워크 기반의 측위 기법이 있다. 길안내 용도로 주로 사용되는 GPS의 경우에는 위성에서 들어오는 신호를 바탕으로 단말기에서 자신의 위치를 파악하는 단말기반의 측위 기법을 사용하고 있으며 이러한 측위 기법은 단말기에서 위치를 쉽게 판단할 수 있다는 장점이 있으나 단말기 내부에서 측위 뿐 아니라 서비스까지 제공해야 하기 때문에 단말기가 복잡해져 배터리의 수명도 짧으며 추후 다른 서비스로의 확장이 어려운 점이 있다. 초광대역 통신의 경우 긴 배터리 수명을 갖는 작은 사이즈의 단말기를 통해 다양한 위치정보서비스를 제공하는 것을 목적으로 하기 때문에 주로 네트워크 기반의 측위 기법을 사용한다. 이 같은 네트워크 기반의 측위 기법에서 각각의 고정국은 사용자의 단말기까지의 거리를 추정하고 중앙 처리장치에서 그 추정결과들을 넘겨받아 사용자의 최종 위치를 결정하는 역할을 하고 있다. 초광대역 통신 기반의 네트워크 기반 무선 측위 기법은 다음과 같으며[1], 표 2에 각 측위 기법의 특징 및 주요 오차 요인이 정리되어 있다.

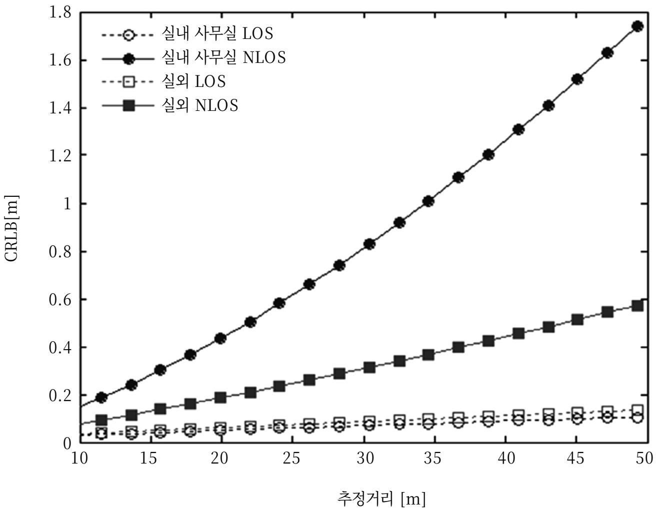
1. AOA(도래각 측위법)

AOA 방식은 위치를 알고 있는 고정국에서 사용자의 단말기로부터 들어오는 신호의 도래각을 바탕으로 사용자의 위치를 판단한다. 다른 기법들과 달리 고정국 2개의 위치만으로도 사용자의 위치를 판단할 수 있다는 강점을 가지나 정확한 도래각의 측정을 위해서는 송, 수신기 측에 여러 개의 안테나가 달린 시스템이 필요하여 단말기나 고정국 설계 등의 시스템 구축 비용에 부담이 된다는 단점이 있다(그림 1 참조).



t_0: 송신신호가 보내지는 시각
t_i: i번째 고정국에 수신된 신호 시각 (i = 1,2,3)
d_i: i번째 고정국과 사용자 사이의 거리
c: 빛의 속도

그림 2. TOA 측위법

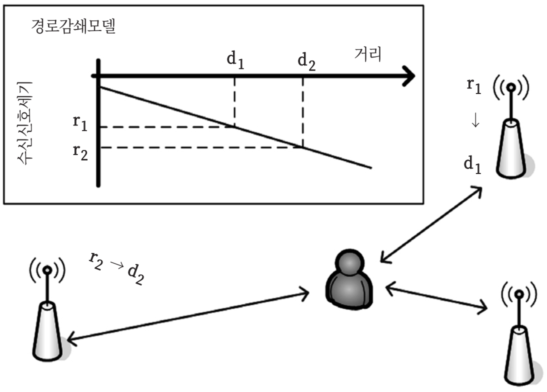


LOS: 가시경로 존재, NLOS: 가시경로 차단

그림 3. TOA 측위의 추정거리에 따른 CRLB값

2. TOA & TDOA(전파도달시간 측위법, 상대적 전파도달시간 측위법)

TOA 또는 TDOA 방식은 전파가 전송되는 시간에 따라 거리를 측정하는 방식이다. 송신기에서 일정한 간격으로 신호를 보내면 수신기에서 신호를 받아 전파시간으로부터 거리를 계산해 낸다. 모든 고정국과 사용자의 단말기가 절대적인 시간을 갖는 공통의 시계로부터 시간차이를 계산하는 방식이 TOA 기법이라면 TDOA 기법은 측위가 일어나는 시점에서 하나의 신호를 기준으로 그 신호로부터의 상대적인 시간차이로 고정국과 단말기의 거리를 추정하는 방식이다(그림 2 참조). 이러한 전송시간 기반의 측위법들은 가시경로가 확보되어서 처음에 도달하는 신호가 최대 크기를 가지는 경우에는 정확한 거리가 추정되나 다중경로에 의해 가시경로가 최대 크기를 가지지 못할 경우 거리 추정값이 실제 거리보다 크게 추정되는 단점이 있다. TOA/TDOA 기반의 기법을 사용하여 하나의 고정국에서 사용자의 단말기까지의 거리 추정의 정확도가 그림 3에 나타나 있다. 거리 추정의 오차를 나타내는 대표값으로는 Cramer-Rao Lower Bound(CRLB)가 사용되었다. 이 CRLB 값은 추정값의 최소 표준편차를 의미하며,



r_i: 사용자의 단말기에 수신된 i번째 고정국의 신호세기
d_i: 사용자와 i번째 고정국 사이의 거리

그림 4. RSS 측위법

표 3. 실내 사무실 환경과 실외 환경의 IEEE 802.15.4a 표준 채널 파라미터

	가시경로	경로 감쇄 지수, n	쉐도잉팩터, σ_s[dB]
실내	LOS	1.63	1.9
	NLOS	3.07	3.9
실외	LOS	1.76	0.83
	NLOS	2.5	2

Gaussian 잡음 환경에서 TOA 기법의 CRLB값은 다음과 같이 주어진다 (1, 7, 부록 1).

$$\sqrt{\mathrm{var}(\hat{d})} \geq \frac{c}{2\sqrt{2}\pi\sqrt{SNR}\beta} \tag{1}$$

여기서 $\hat{d}$는 추정거리, c는 3×10^8m/s의 빛의 속도, SNR은 수신단에서 신호 대 잡음 비 그리고 β는 주파수대역폭을 각각 의미한다. 여기서 β는 초광대역 통신의 최소 주파수대역 500MHz로 SNR은 거리에 따라 감쇄하는 것으로 가정하였으며 거리에 따른 감쇄비율은 IEEE 802.15.4a 표준 채널 모델의 값을 사용하였다 [8]. 실내 환경과 실외 환경의 대표적 표준 채널 파라미터 값들이 표 3에 나타나 있다.

3. RSS(수신신호세기 측위법)

대표적인 채널 파라미터인 경로감쇄모델은 수신 신호의 세기를 거리에 따른 식으로 나타내며 모델의 변수값들은 가시경로의 존재 여부와 전파환경에 따라 결정된다.

이러한 경로감쇄모델을 바탕으로 송신전력과 수신 신호의 세기로부터 고정국과 사용자사이의 거리를 추정하는 방식이 RSS 측위법이다(그림 4 참조). 수신하는 입장에서 가장 간단하게 거리를 추정해낼 수 있으나 정확한 경로감쇄모델이 필요하며 페이딩 현상으로 설명되는 신호의 변화가 존재한다. RSS 측위 방식을 사용하였을 때 추정거리에 따른 CRLB 값은 식 (2)와 그림 5에 나타나있다(1, 부록 2).

$$\sqrt{\mathrm{var}(\hat{d})} \geq \frac{\ln 10}{10} \cdot \frac{\sigma_{sh}}{n} \cdot d \tag{2}$$

여기서 n은 경로손실지수, σ_{sh}은 쉐도잉 팩터, 그리고 d는 추정거리를 각각 의미한다. 그림 6은 도시환경에서 가시경로가 존재하지 않는 경우의 TOA 기법과 RSS 기법의 CRLB값을 비교하고 있다. 그림 6의 결과를 보면 건물들에 가로막혀 가시경로가 차단된 도시 실외 환경의 경우 추정거리가 40m이상인 경우 TOA 기법보다 RSS 기법의 CRLB 값이 커짐을 알 수 있다.

이는 RSS의 CRLB 값이 식 (2)와 같이 추정거리 d에 비례하여 증가하는데 반해, TOA의 CRLB값은 식 (1)의 SNR을 결정짓는 수신신호의 세기가 식 (3)에서처럼 추정거리 지수형태로 줄어들기 때문에 CRLB 값

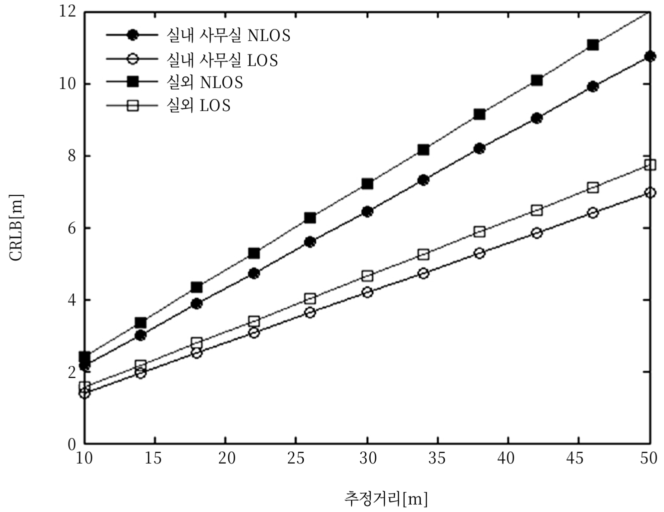


그림 5. RSS 위치 측위의 추정거리에 따른 CRLB 값

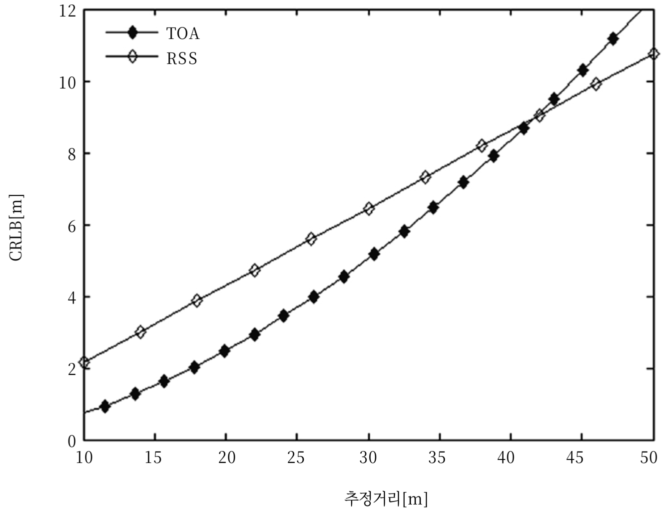


그림 6. 추정 거리에 따른 TOA와 RSS 기법의 CRLB 값 비교

이 추정거리에 따라 급격히 증가하게 된다.

$$SNR \propto d^{-n} \tag{3}$$

IV. 복합형 측위 기법

기존의 무선 측위 기법들이 하나의 채널 파라미터를 선택하여 사용자와 고정국 사이의 거리를 추정하는데 반하여 AOA, TOA, RSS 등의 기법에 사용된 채널 파라미터들을 복합적으로 이용해 사용자의 위치를 추정하는 복합형 측위 기법에 대한 연구가 현재 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 복합형 측위 기법들은 하나의 파라미터만을 이용하는 측위 기법에 비하여 좀 더 정확한 측위가 가능하여 안정적인 위치기반서비스를 제공할 수 있다는 장점이 있으나 계산량의 증가로 인해 시스템의 복잡성과 추정시간의 증가라는 단점 역시 지니고 있다. 복합형 기법을 결정하는 구성 요소는 크게 2가지로 하나는 어떠한 채널 파라미터들을 측위에 사용하는 가이며 다른 하나는 선택된 파라미터들을 어떠한 방식으로 활용하는가이다. 현재까지 연구된 대표적인 초광대역

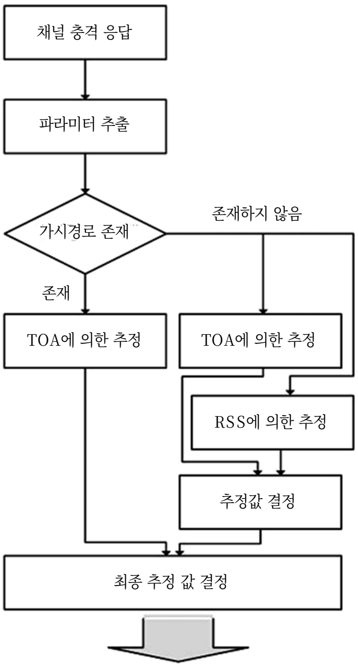


그림 7. 지연변수 기반 복합형 측위 기법

표 4. 초광대역통신 기반의 복합형 위치측위 기법

	요약	장점	단점
TOA/AOA[9]	TOA를 통해 사용자까지의 거리를 추정하고 AOA를 통해 정확한 위치를 결정	하나의 고정국에서도 위치 추정 가능 TOA와 AOA 사이의 연관도가 적음	가시경로가 차단될 경우 AOA의 정확도가 떨어짐 안테나 배열이 필요
RSS/TOA[10]	RSS를 통해 가시경로의 존재를 판단, 그에 따른 가중치를 부여하여 RSS와 TOA 정보 바탕으로 거리추정	송, 수신 안테나의 개수가 1개씩만 필요	추정오차가 큰 RSS 기반으로 인하여 불필요한 과정을 거칠 수 있음

통신 기반의 복합형 측위 기법을 표 4에 정리하였다[9],[10].

TOA 정보와 AOA 정보를 동시에 사용하여 사용자의 위치를 추정하는 기법은 일반적인 네트워크 기반의 추정기법들이 고정국으로부터 들어오는 추정결과를 바탕으로 중앙 처리장치에서 사용자의 최종 위치를 결정하는 것과는 달리 하나의 고정국에서도 사용자의 위치를 추정해 낼 수 있다. TOA 정보를 통해 사용자와 고정국 사이의 거리를 추정하고 AOA 정보를 통해 상대적인 위치를 결정하는 방식으로 이 기법을 적용할 경우 고정국마다 사용자의 위치를 결정할 수 있게 되어 별도의 중앙 처리장치가 필요하지 않아 개별적인 추정 네트워크가 구성될 수 있으며 TOA와 AOA 정보 사이의 연관도가 적기 때문에 일정한 수준 이상의 정확도를 확보할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 AOA의 단점인 다중 안테나배열이 필요하여 네트워크 구성이 힘들다는 점과 가시경로가 존재하지 않을 경우 정확도가 떨어진다는 점이 극복되지 못하기 때문에 실제 시스템 구현으로 이어지기는 쉽지 않다. 이에 반하여 RSS/TOA 기법의 경우, 실제 설계가 용이한 기법들을 사용하고 가시경로가 존재하지 않을 경우에도 상대적으로 안정적인 RSS기법을 통해 성능을 보장할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

일반적으로 RSS 기법의 정확성은 고정국의 커버리지가 커짐에 따라 줄어드는데 초광대역 시스템이 이용되는 환경은 센서 사이의 거리가 최대 수십 미터 이내이므로 RSS를 이용하더라도 상대적으로 작은 측위 오차를 갖게 된다. 따라서 가시경로가 확보되는 경우 매우 정확한 측위 성능을 보이는 TOA 방식과 결합하여 측위

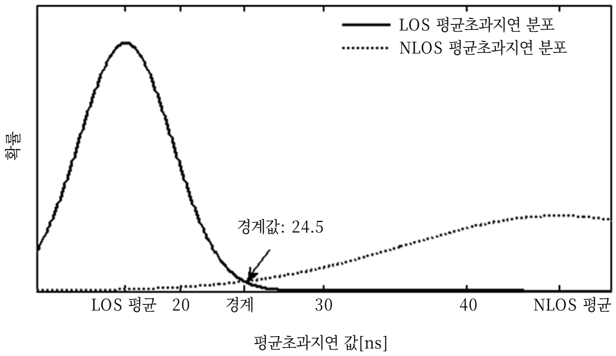


그림 8. 평균초과지연 값 확률분포와 경계 값

표 5. IEEE 표준 채널 모델의 환경별 평균초과지연 값

	가시경로	평균[ns]	표준편차 [ns]
실내 환경	LOS	16.2	4.6
	NLOS	46.4	15.2
실외 환경	LOS	32.1	9.1
	NLOS	175.2	28.4

LOS: 가시경로가 존재하는 경우
NLOS: 가시경로가 존재하지 않는 경우

성능을 향상시킬 수 있다. 이 기법에서는 RSS 신호를 바탕으로 경로손실모델을 이용해 가시경로의 존재 유, 무를 판단하고 그에 따라 RSS에 의한 추정결과와 TOA에 의한 추정결과에 가중치를 부여하여 최종 추정값을 결정하는 방식이다. 하지만 이 기법은 경로감쇄 모델이 부정확할 경우 추정오차가 급격히 증가하는 RSS 방식을 기반으로 가시경로의 존재 여부를 판단하고 추정하기 때문에 불필요한 과정을 거칠 확률이 높다는 단점이 있다. 그러므로 RSS와 TOA 정보를 사용하면서 채널 파라미터들을 다른 방식으로 접목시킬 수 있는 복합형 기법의 개발이 필요한 실정이다.

V. 지연변수 기반의 복합형 측위 기법

기존의 RSS/TOA 기법에서 가시경로의 존재를 수신신호의 세기로 결정하는 것과 달리, 여기서 제안하는 지연변수 기반의 복합형 측위 기법은 지연변수 값을 기준으로 가시경로 존재여부를 판단한다. 그림 7에 기법의 순서도를 나타내었다. 이 복합형 측위 기술에서 가시경로의 존재를 판단하는 기준이 되는 지연변수 (Delay parameter) 는 단말기에서 보낸 신호의 고정국에서 수신된 채널충격응답에서 결정된다.

지연변수 중에서는 평균초과지연 값(MED: Mean Excess Delay) 과 평균지연분산 값(RMS delay spread)이 복합적으로 사용되었다. 지연변수에 따라 가시경로의 존재를 판단하여 가시경로가 존재 하는 경우에는 작은 CRLB값을 가지는 TOA 기법 결과로만 추정값을 결정하고 가시 경로가 존재하지 않는 경우에는 TOA값과 RSS값 모두를 고려하여 추정값을 결정한다. 안정적인 측위 성능을 보장하기 위해 가시경로가 존재하지 않는 경우의 최종 추정값 결정은 TOA에 의한 추정값과 RSS에 의한 추정값의 평균으로 결정하였다. 다음 절들에 자세한 알고리즘의 구성을 서술하였다.

1. 지연변수를 이용한 가시경로 판단

광대역 채널 특성을 나타내는 요소 중 지연변수들은 서로 다른 다중경로환경을 비교하거나 무선통신시스템의 설계 가이드라인으로 이용되는 채널 파라미터이다. 초광대역 통신의 경우는 짧은 시간 폭의 신호를 이용하여 통신을 하기 때문에 지연변수의 정확도가 다른 통신시스템에 비하여 정확하며 TOA 기법에서 최대 신호 수신시간을 찾는 과정에서 채널충격응답을 얻기 쉽기 때문에 간단한 메모리의 부착만으로 손쉽게 계산될 수 있다. 대표적인 지연변수 값들로는 평균초과지연 값과 평균지연분산 값 그리고 최대초과지연 값(Maximum Excess Delay)이 있다. 본 기법에서는 가장 늦게 들어온 신호에 의해 채널상태를 나타내는 최대초과지연 값이 아닌 평균초과지연 값과 평균지연분산 값을 이용하

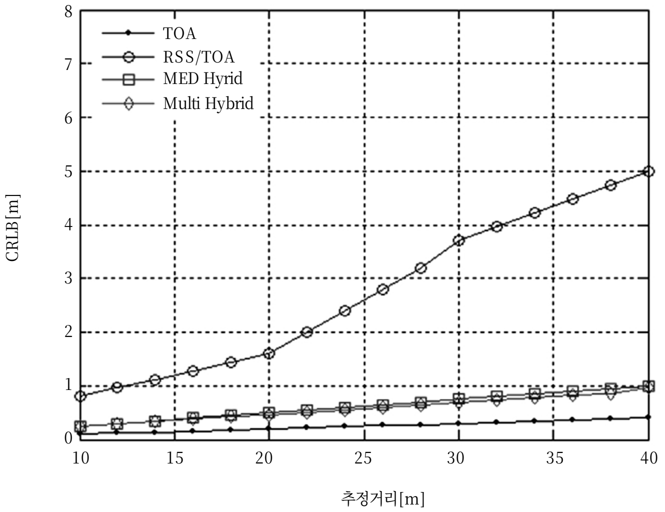


그림 9. 가시경로가 존재하는 경우 CRLB 비교

표 6. MED 경계 값과 가시경로 판단 정확도

	가시경로	MED		RMS	MED+RMS
		경계	정확도	정확도	정확도
실내환경	LOS	24.5	83.1	80.9	89.7
	NLOS		80.7	78.4	84.2
실외환경	LOS	66.8	88.2	83.2	91.2
	NLOS		81.8	80.4	84.7

MED: 평균초과지연값, RMS : 평균지연분산값

여 가시경로의 존재여부를 판단한다. 평균초과지연 값, $\overline{\tau}$ 및 평균지연분산, $\overline{\tau}_{RMS}$은 다음과 같이 주어진다.

$$\overline{\tau} = \frac{\int_0^\infty \tau P(\tau)d\tau}{\int_0^\infty P(\tau)d\tau} \tag{4}$$

$$\overline{\tau}^2_{RMS} = \frac{\int_0^\infty (\tau-\overline{\tau})^2 P(\tau)d\tau}{\int_0^\infty P(\tau)d\tau} \tag{5}$$

여기서 τ는 지연시간을 의미하며 $P(\tau)$는 시간 τ에서 수신된 신호의 세기함수를 나타낸다. IEEE 표준 채널 모델을 이용하여 얻어진 실내, 외 환경에서 가시경로의 유, 무에 따른 평균초과지연 값은 표 5와 같다. 이 통계학적 모델을 바탕으로 Gaussian 확률 분포를 가지는 평균초과지연 값 모델을 LOS와 NLOS에 따라 비교하여 경계 값을 정한다.

그림 8에 실내환경에서의 확률 분포모델과 결정된 경계 값이 나타나있다. 여기서 결정된 경계 값을 가지고, 어느 지점에서 들어온 신호의 평균초과지연 값이 경계 값보다 작은 경우에는 가시경로가 존재하는 것으로 그렇지 않은 경우에는 가시경로가 존재하지 않는 것으로 판단하였으며 그 경계 값과 정확도가 표 6에 나타나 있다. 같은 방법으로 평균지연분산 값을 기준으로 한 가설검사 결과와 두 지연변수 모두를 기준으로 하는 가설검사 결과가 같이 나타나 있다. 두 지연변수를 모두 고려하는 경우에서 두 지연변수에 의한 각각의 판단결과가 다르면 $\left(\frac{|\text{측정값} - \text{경계값}|}{\text{경계값}}\right)$가 큰 쪽의 결과로 판단한다.

실내환경에서 가시경로가 존재할 경우 가시경로가 존재한다고 판단할 확률은 83.1%였다. 평균초과지연 값을 이용한 판단과 평균지연분산 값을 이용한 판단 모두 가시경로가 존재하는 경우를 제대로 판단하는 확률이 그렇지 않은 경우에 비하여 높았으며 실내환경보다 실외환경에서의 판단이 정확하였다. 두 지연변수 모두를 기준으로 하여 가시경로의 존재를 판단하는 경우 실

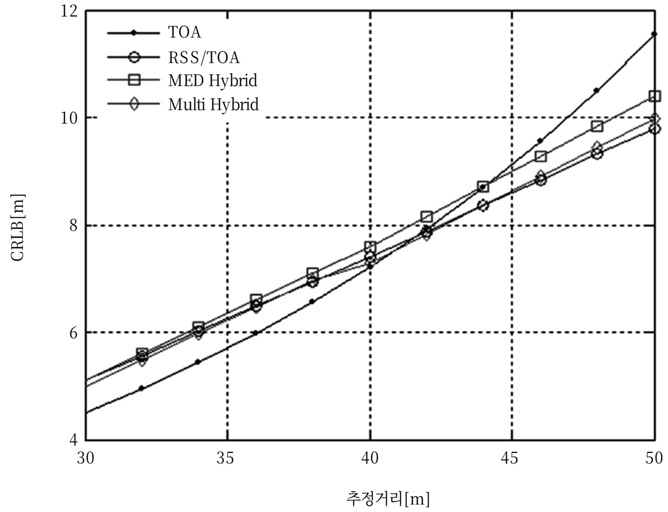


그림 10. 가시경로가 존재하지 않는 경우 CRLB 비교

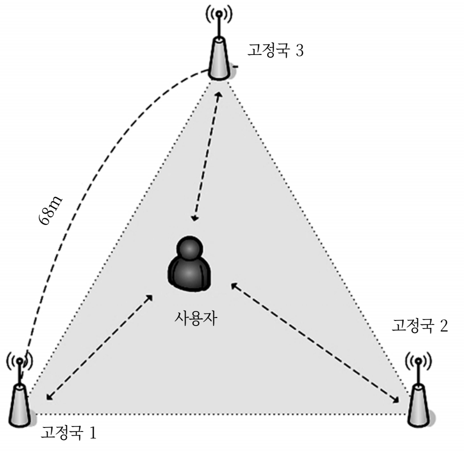


그림11. 3개의 고정국이 존재하는 가상환경

외환경에서의 정확도는 가시경로의 존재를 정확하게 판단하는 확률이 91.2%까지 올라갔다.

2. 복합형 기법의 정확도

그림 9와 그림 10은 가시경로가 있는 경우와 없는 경우, 하나의 고정국에서 추정하는 사용자까지의 거리 추정값의 CRLB 변화를 추정거리에 따라 각각 나타내고 있다. 비교대상 기법들은 TOA 기법과 이미 제시된 RSS/TOA 기법이다[10]. 본 논문에서 제시하는 복합형 기법은 평균초과지연 값만을 기준으로 하였을 경우 MED Hybrid, 평균초과지연 값과 평균지연분산 값을 모두 기준으로 하는 경우 Multi Hybrid로 각각 표시되어 있다. 그림 9에 나타났듯이 가시경로가 존재하는 경우에는 RSS/TOA 기법의 추정오차가 가장 크고 TOA 기법이 가장 좋은 성능을 나타내었다. 제안하는 복합형 기법의 TOA 기법에 비한 성능열화는 가시경로 존재여부에 대한 가설검사가 완벽하게 이루어지지 않은 것에서 기인하나 그 열화 정도는 CRLB값이 40m에서 1m 이내로 매우 작은 것으로 나타났다. 그림 10은 가시경로가 존재하지 않는 경우 추정거리에 따른 CRLB의 변화를 나타낸 것이다. 모든 기법 중 TOA 기법의 CRLB 값이 지수형태로 증가하여 추정의 정확도가 떨어짐을 알 수 있었다.

반면에 복합형 기법들의 경우에는 증가하는 비율이 상대적으로 작게 나타났다. 이와 같은 CRLB값을 바탕

표 7. 그림 11 환경에서의 기법 별 평균 측위 오차(단위: m)

가시경로 개수	TOA	RSS/TOA	MED Hybrid	Multi Hybrid
3	0.28	4.15	0.88	0.78
2	1.37	5.14	1.55	1.53
1	3.74	6.23	4.49	4.31
0	8.93	7.71	7.54	7.21

으로 각각의 기법별 실제 측위 오차를 가상의 시나리오를 통해 비교해 보았다. 시나리오는 세 개의 고정국이 존재하는 가상의 환경으로 고정국 사이의 거리는 68m이다. 그림 11에 시나리오가 나타나있고 사용자는 각 가시경로의 개수마다 무작위로 300번 배치되어 그 평균 최종 측위 오차 값이 표 7에 나타나있다. 가시경로가 1 또는 2개인 경우 가시경로가 확보된 고정국 역시 무작위로 정해졌다. TOA 기법은 모든 고정국에서 가시경로가 확보되었을 때 제일 작은 측위 오차 값을 가졌으나 가시경로의 개수가 줄어듦에 따라 오차가 급격하게 늘어났다. 이에 비해 제안하는 복합형 기법은 가시경로가 모든 고정국에서 확보된 경우에는 TOA 기법보다 성능이 나빴으나 그 차이는 크지 않았고 가시경로가 차단됨에 따라 TOA 기법보다 나은 성능을 나타내어 가시경로가 존재하지 않을 때는 타 기법보다 1m이상 작은 오차 값을 나타냈다. MED와 RMS를 동시에 사용하여 측위할 경우 MED를 사용하는 경우보다 성능이 나았으나 그 차이는 5% 내외로 크지 않았다.

RSS/TOA 기법의 경우 가시경로 수에 의한 변화의 정도는 작았지만 모든 고정국에서 가시경로를 확보한 경우에도 측위 오차가 큰 것으로 나타났다.

VI. 결 론

본 논문에서는 위치기반서비스 제공을 위한 초광대역 통신 무선 측위 기법을 소개하고 지연변수 값을 활용한 복합형 측위 기법을 제시한다. 초광대역 통신은 간단한 구조로 저가의 단말기 설계가 가능할 뿐 아니라 다중경로에 강한 특성으로 타 시스템에 비해 정확한 측위 성능을 나타내어 위치기반서비스에 적합하다 할 수 있다. 기존의 측위 기법들이 하나의 채널 파라미터를 이용하여 사용자의 위치를 추정하였으나 좀 더 안정적인 측위 성능을 보장하기 위해서 여러 파라미터들을 복합적으로 사용해 측위하는 복합형 기법의 개발이 진행되고 있다. 본 논문에서는 기존의 측위 기법에 비하여 높은 정확도를 가지면서 계산량이 적은 기법으로 광대역 채널 파라미터인 지연변수기반의 복합형 기법을 제시하였다. 이 기법은 가시경로의 존재 유무를 시간영역의 채널충격응답 기반으로 판단하여 TOA 정보와 RSS 정보를 바탕으로 고정국과 사용자 사이의 거리를 추정하는 방식으로 모의실험을 통한 성능분석결과 기존의 TOA 기법에 비하여 가시경로가 없는 환경에서 성능이 우수하며 이미 제시된 복합형 기법에 비해서는 가시경로가 있는 환경에서의 측위 오차가 작게 나타났다. 하지만 가시경로의 존재여부를 판단하기 위해서는 지연변수 값의 계산과정이 필요하다는 점은 개선되어야 할 것이다.

부록

1. TOA를 이용한 거리추정의 CRLB 유도

AWGN에서의 수신신호는 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$x[n] = s[n;\theta] + w[n], \qquad n = 0, 1, \ldots, N-1$$

$x[n]$은 수신 신호 샘플, $s[n]$은 송신 신호 샘플, $w[n]$은 $N(0, \sigma^2)$을 따르는 잡음 샘플, θ는 추정하고자 하는 파라미터로 그에 따라 Log-likelihood function, $f(x, \theta)$은 다음과 같다.

$$f(x, \theta) = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}\sum_{n=0}^{N-1}(x[n]-s[n;\theta])^2\right\}}{(2\pi\sigma^2)}$$

이로부터 Fisher Information, $I(\theta)$은 다음과 같이 구해진다.

$$I(\theta) = -E\left[\frac{\partial^2 \ln f(x;\theta)}{\partial\theta^2}\right] = \frac{1}{\sigma^2}\sum_{n=0}^{N-1}\left(\frac{\partial s[n;\theta]}{\partial\theta}\right)^2$$

$$(\because E[x[n]-s[n;\theta]] = E[w[n]] = 0)$$

을 이용한 최종 CRLB는 다음과 같다.

$$\because \mathrm{var}(\hat{\theta}) \geq \frac{1}{I(\theta)} = \frac{\sigma^2}{\sum_{n=0}^{N-1}\left(\frac{\partial s[n;\theta]}{\partial\theta}\right)^2} : \mathrm{CRLB}$$

TOA로부터 거리를 추정하는 경우 다음과 같은 신호모델을 생각할 수 있다.

$$x(t) = s(t-\tau_0) + w(t), \qquad 0 \leq t \leq T$$

여기서 $s(t)$는 펄스 폭 T_s를 갖는 송신신호, $w(t)$는 AWGN, $x(t)$는 수신신호이고 r_0가 추정해야 할 TOA를 나타낸다. T는 샘플링주기로 이로 표현된 시퀀스는 다음과 같다.

$$x(n\Delta) = s(n\Delta-\tau_0) + w(n\Delta)$$

$$\Leftrightarrow x[n] = s(n-\tau_0) + w[n]$$

여기서 신호의 대역폭을 B라고 가정하면 Nyquist sampling rate $\Delta = \frac{1}{2B}$가 된다. 잡음 샘플 $w[n]$은 $\sigma^2 = N_0 B$인 분산을 갖는다. 수신신호는 $\tau_0 \leq t \leq \tau_0 + T_s$인 범위에서 0이 아닌 값을 갖게 되므로 샘플 범위에 따라 다음과 같은 값을 갖는다.

$$x[n] = \begin{cases} w[n], & 0 \leq n \leq n_0 - 1 \\ s(n\Delta-\tau_0) + w[n], & n_0 \leq n \leq n_0 + M - 1 \\ w[n] & n_0 + M \leq n \leq N-1 \end{cases}$$

여기서 M은 샘플링된 송신신호의 길이이고 $n_0 = \frac{\tau_0}{\Delta}$는 propagation delay를 나타내는 샘플 개수이다. 추정하고자 하는 파라미터 $\theta = \tau_0$에 대해서 앞의 결과로부터 CRLB를 구하면

$$\mathrm{var}(\hat{\tau}_0) \geq \frac{\sigma^2}{\sum_{n=0}^{N-1}\left(\frac{\partial s[n;\tau_0]}{\partial\tau_0}\right)^2} = \frac{\sigma^2}{\sum_{n=0}^{M-1}\left(\left.\frac{ds(t)}{dt}\right|_{t=n\Delta_0}\right)^2}$$

와 같이 된다. 연속 신호의 형태로 표현하기 위해 Δ가 아주 작다고 가정하면, 합을 적분으로 표현할 수 있고, $\Delta = \frac{1}{2B}$와 $\sigma^2 = N_0 B$를이용하면

$$\mathrm{var}(\hat{\tau}_0) \geq \frac{\sigma^2}{\frac{1}{\Delta}\int_0^{T_s}\left(\frac{ds(t)}{dt}\right)^2 dt} = \frac{N_0/2}{\int_0^{T_s}\left(\frac{ds(t)}{dt}\right)^2 dt}$$

이와 같이 시간영역에서 표현된 식을 푸리에 변환과 Parseval의 원리를 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\mathrm{var}(\hat{\tau}_0) \geq \frac{N_0/2}{\int_{-\infty}^{\infty}(2\pi f)^2 |S(f)|^2 df}$$

$$= \frac{N_0}{8\pi^2\beta^2\varepsilon} = \frac{1}{8\pi^2 \cdot SNR \cdot \beta^2}$$

여기서 유효신호대역폭, β은 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 |S(f)|^2 df}}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df}} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 |S(f)|^2 df}{\varepsilon}}$$

TOA와 전송거리와의 관계 $\hat{d} = c \cdot \hat{\tau}_0$로부터 최종적으로 TOA를 이용한 거리추정의 CRLB를 얻는다.

$$\because = \sqrt{\mathrm{var}(\hat{d})} \geq \frac{c}{2\sqrt{2}\pi\sqrt{SNR}\,\beta} \tag{1}$$

2. RSS를 이용한 거리추정의 CRLB 유도

일반적으로 거리에 따른 경로손실은 다음과 같이 주어진다.

$$PL = 10n\log_{10} d + X_\sigma$$

$$X_\sigma \sim N(0, \sigma_{sh}^2)$$

이로부터 다음과 같은 $f(PL;d)$을 얻는다.

$$f(PL;d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{sh}^2}}\exp\left\{-\frac{(PL-10n\log_{10}d)^2}{2\sigma_{sh}^2}\right\}$$

이의 Fisher information은 다음과 같다.

$$I(d) = -E\left[\frac{\partial^2 \ln f(PL;d)}{\partial d^2}\right] = \left(\frac{10}{\ln 10}\right)^2 \cdot \left(\frac{n}{\sigma_{sh}}\right)^2 \cdot \frac{1}{d^2}$$

따라서 CRLB는 다음과 같이 정리된다.

$$\because = \sqrt{\mathrm{var}(\hat{d})} \geq \sqrt{\frac{1}{I(d)}} = \frac{\ln 10}{10} \cdot \frac{\sigma_{sh}}{n} \cdot d \qquad (2)$$

감사의 글

본 연구는 부분적으로 SK텔레콤과 서울시 산학연 협력사업(10544)의 지원을 받았음

[참고문헌]

[1] S. Gezici et al., "Localization via Ultra-Wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks," *IEEE signal processing magazine*, Vol. 12, Issue 5, Jul. 2005, pp. 70-84.

[2] B. Alavi, and K. Pahlavan, "Modeling of the TOA-based distance measurement error using UWB indoor radio measurements," *IEEE communication letters*, Vol. 10, Issue 4, Apr. 2006, pp. 275-277

[3] I. Oppermann et al.,"UWB wireless sensor networks: UWEN - a practical example," *IEEE communication magazine*, Vol. 42, Issue 12, Dec. 2004, pp. S27-S32.

[4] 조영수 외,“ 실내외 연속측위 기술 동향 ”, *전자통신동향분석*, 제22권, 제3호, 6월 2007년, pp. 20-28.

[5] 이성호 외,“ 부상하는 위치기반 서비스(LBS) ”, *삼성경제연구소*, 제615호, 8월 2007년.

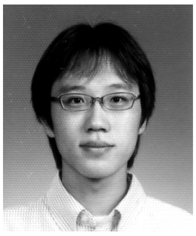
[6] 김학용,“ 무선랜 기반 위치정보 서비스, ” *SKtelecommunication Review*, 제16권, 제2호, 2006년, pp. 188-202.

[7] S. M. Kay, "*Fundamentals of statistical signal processing: Estimation Theory*," Prentice Hall PTR, pp. 27-82

[8] A. F. Molisch *et al.*, IEEE 802.15.4a channel Model-Final report Tech. Rep. Doc. IEEE 802.15-04-0662-02-004a, 2005.

[9] A. Mallat *et al.*, "UWB based positioning in multipath channels: CRBs for AOA and for hybrid TOA-AOA based methods," *proc. of ICC2007*, Jun., 2007, pp. 5775-5780.

[10] Chin-Der Wann and Hao-Chun Chin, "Hybrid TOA/RSSI wireless location with unconstrained nonlinear optimization for indoor UWB channels," *proc. of WCNC20*, Mar. 2007, pp. 3940-3945.



최 진 원
(Jinwon Choi)

1998 ~ 2002: 서울대학교 전기공학부 학사
2002 ~ 현재: 서울대학교 전기,컴퓨터공학부 석,박사통합과정
관심분야: UWB, WPAN, Channel modeling, and WSN
E-mail: caesar@maxwell.snu.ac.kr
Tel: +82-2-880-8481
Fax: +82-2-888-3633

강 준 성
(Jun-Sung Kang)

2000 ~ 2006: 서울대학교 전기공학부 학사
2007 ~ 현재: 서울대학교 전기,컴퓨터공학부 석사
관심분야: MIMO channel modeling, WSN and VSB
E-mail: jskang@maxwell.snu.ac.kr
Tel: +82-2-880-8481
Fax: +82-2-888-3633

성 유 석
(Yu-Suk Sung)

1999 ~ 2003: 서울대학교 전기공학부 학사
2004 ~ 현재: 서울대학교 전기,컴퓨터공학부 석박사통합과정
관심분야: Wireless Systems Engineering, LBS, and WSN.
E-mail: sfamily@maxwell.snu.ac.kr
Tel: +82-2-880-8481
Fax: +82-2-888-3633

김 성 철
(Seong-Cheol Kim)

1980 ~ 1984 : 서울대학교 전기공학과 학사
1987: 서울대학교 전기공학과 석사
1995: 미국 폴리테크닉 대학교 박사
1995 ~ 1999: AT&T Bell lab. Member of Technical Staff
1999 ~ 2003: 서울대학교 전기,컴퓨터공학부 조교수
2003 ~ 현재: 서울대학교 전기,컴퓨터공학부 부교수
관심분야: Wireless Communication Systems Engineering, Channel Modeling, Communication algorithms Development, and MIMO-OFDM
E-mail: sckim@maxwell.snu.ac.kr
Tel: +82-2-880-1822
Fax: +82-2-888-3633