

# 광선 추적법에 의한 초광대역 실내 위치인식의 성능 개선 방법

준희원 조영훈\*\*, 정희원 이준용\*, 학생회원 하동헌\*, 학생회원 강신후\*

## Accuracy Enhancement for UWB Indoor Positioning Using Ray Tracing

Yung-Hoon Jo\*\* *Associate Member*, Joon-Yong Lee\* *Regular Member*,  
Dong-Heon Ha\*, Shin-Hoo Kang\* *Student Members*

### 요 약

초광대역(UWB) 시스템은 높은 시간분해능으로 인해 복잡한 다중경로 환경에서도 정밀한 위치추적을 가능하게 한다. 그러나 송수신 채널에 존재할 수 있는 장애물로 인해서 정밀한 위치추적 성능이 저하될 수 있다. 첫째로 장애물은 다중경로의 구조를 복잡하게 만들어 직선경로 신호 성분의 도착시간 추정을 어렵게 만든다. 둘째로, 전파 시간에 초과시간지연을 초래하여 거리추정의 정확도를 저하시킬 수 있다. 본 논문에서는 광선추적법을 사용하여 두번째 원인에 의해 발생하는 거리추정 오차를 줄이는 기법을 소개한다. 이를 위하여 통계적인 접근방식과 지도를 이용한 위치인식기법을 사용하였다. 통계적인 접근방식에서는 매질에 의해서 발생하는 초과시간지연들의 분포를 광선추적법을 사용하여 구하고, 이에 근거하여 오차의 하계를 구하였다. 또한 건물의 도면을 이용한 위치인식 방법에도 광선추적법을 사용하였으며, 그 성능을 사무실 환경에서 측정된 데이터를 사용하여 검증하였다.

**Key Words :** Ultra-wideband(UWB), Ranging, Ray-tracing, Delay Estimation, Multipath Channel

### ABSTRACT

The presence of a line-of-sight(LoS) blockage can degrade the UWB positioning accuracy for two reasons. Firstly, it makes estimation of the time of arrival(ToA) of the direct path signal difficult by complicating the multipath structure of the propagation channel. Secondly, the higher dielectric constant of the LoS blocking material than that of free space introduces excess propagation delay which will bias the range estimation. In this paper, methods based on ray tracing to reduce the ranging error resulting from the second reason are posed. We take two different approaches; a statistical approach and a map-aided method. In the statistical approach, we establish a conditional distribution of the excess propagation delay caused by LoS blockages using a ray tracing technique. The lower bound of the ranging performance based on this model is estimated. The ray tracing method is also used for the map-aided ToA positioning approach. UWB propagation measurement data taken in an office environment is used to examine the performance of this method.

### I. 서 론

초광대역(ultra-wideband, UWB) 신호는 정밀한

위치추적분야에 있어서 전망이 밝은 기술로 거론되고 있다. UWB 거리추정 및 위치인식에 관한 기술적 문제들은 관련 자료에 제시되어 있다<sup>[1-6]</sup>. 이

※ 이 논문은 2005년 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (R05-2004-000-12640-0).

\*\* 코아로직 (yunghoonjo@naver.com)

\* 한동대학교 전산전자공학부 (joonlee@handong.edu, cannoner@hanmail.net, pepc@nate.com)

논문번호 : KICS2006-06-266, 접수일자 : 2006년 6월 9일, 최종논문접수일자 : 2006년 9월 28일

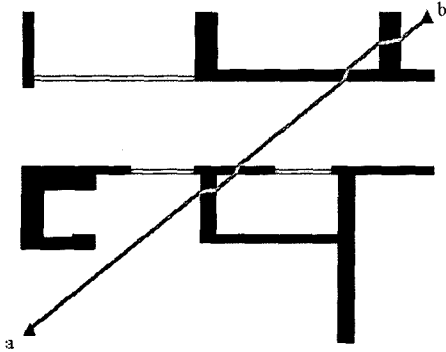


그림 1. 광선추적에 의해 찾아진 노드 a와 노드 b 간의 가장 짧은 전파 경로

제까지의 대부분의 연구는 정밀한 거리측정의 핵심 기술인 직선경로 신호(direct path signal)의 도착시간(time of arrival, ToA)을 추정하는데 초점을 맞추고 있다. 이와 더불어 또다른 기술적 문제는 논문(1),(7),(14)에 제시된 바와 같이 직선경로 상에 장애물이 존재하는 비가시적(non-line-of sight, non-LoS) 환경에서 발생한다. 이 경우 장애물에 의해 신호가 굴절되어 송수신기간의 가장 짧은 경로가 직선경로를 벗어나게 된다. 뿐만 아니라 손실성 매질내부에서의 신호의 전달속도는 자유공간에서보다 느리므로 추가적인 시간지연(excess propagation delay)가 발생한다.

이러한 원인으로 인해 발생하는 거리추정의 성능저하를 해결하기 위해 광선 추적법(ray-tracing method)을 사용하였다. 광선 추적법은 논문(8-10)에 나와 있듯이 실내 건물 내의 채널 모델링 및 위치 인식에도 널리 사용되어져 왔다. 먼저 송수신 지점 간의 가장 짧은 이동 경로를 추적하는 광선추적기(ray-tracer)를 제작하였다. 이를 활용하여 앞서 언급한 전파의 초과시간지연의 통계적인 모델을 얻었다. 또한 이를 도면을 이용한 위치추적법 (map-aided method)에도 활용하였다.

## II. 광선추적기의 개발

직선 경로상의 장애물로 인해 발생하는 시간지연 문제를 해결하기 위해 광선추적기를 개발하였다. 이 광선추적기는 송수신 노드간의 가장 짧은 가상의 방사경로(propagation path)를 추적하며, 이때 발생하는 초과시간지연을 계산한다. 추적 방식은 bisection 방식(11)을 활용한 polar search 방식을 활용하였다. 본

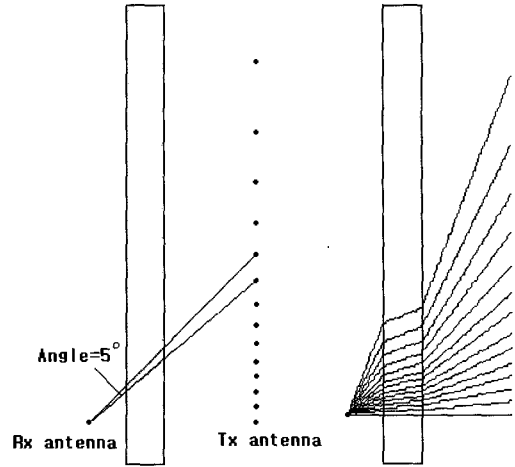


그림 2. 측정계획 (왼쪽)과 모의실험에 의해 찾아진 전파경로 (오른쪽)

광선추적기에는 유전상수, 전도율 등 매질의 특성 정보가 내장되어 있다. 그리고 모든 매질은 평면이라고 가정하였다.

신호가 서로 다른 매질에 투과할 경우, 굴절현상이 일어나며 입사각과 투과각은 다음과 같은 관계를 만족한다.(12)

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} \quad (1)$$

여기서 매질변수  $\theta_1$  과  $\theta_2$  는 입사각과 투과각을 나타내며,  $\epsilon_1$  과  $\epsilon_2$  는 매질1과 2의 유전상수를 나타낸다. 매질내부에서의 전파의 속도  $v$  는

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2)$$

를 만족한다. 여기서  $c$  는 빛의 속도이다. 또한 입사각이 다음의 조건을 만족할 때 발생하는 전반사를 고려하였다.

$$\epsilon_1 > \epsilon_2, \theta_1 > \sin^{-1} \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} \quad (3)$$

그림 1은 건물내의 신호 경로추적의 한 예를 보여준다. 노드 a에서 노드 b로 신호를 신호가 방사될 경우의 찾아진 가상의 방사 경로를 보여준다. 본 방

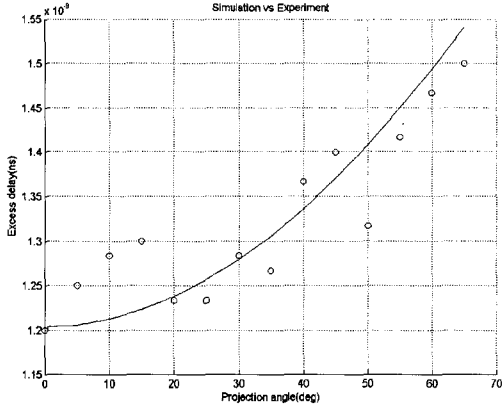


그림 3. 직선경로 신호의 도착시간의 측정치와 모의실험 결과 비교

사추적기에 사용된 알고리즘의 신뢰성을 검증하기 위해서 채널방사측정을 실시하였다. 측정에는 Anritsu 벡터네트워크분석기와 SkyCross사에서 제작된 2~8GHz의 통과대역(passband)를 갖는 초광대역 안테나가 사용되었다. 송수신 안테나는 네트워크 분석기의 포트 1과 포트 2에 연결되었으며, 안테나는 5피트 높이의 삼각대에 고정하였다. 이때 안테나 시스템의 전달함수를 나타내는  $S_{21}$  파라미터를 측정하였다. 그림 2는 안테나의 위치를 보여주는 도면이다. 수신 안테나를 고정시키고, 인접한 경로간의 각도가 5도가 되도록 송신 안테나를 직선경로를 따라 이동시켰다. 측정된 주파수 응답을 푸리에역변환(inverse Fourier transform)을 통해 시간 도메인으로 변환한 후, 가장 먼저 도착한 신호성분을 검출하였다. 광선추적기를 이용한 모의실험을 통해 얻어진 신호의 도착시간과 측정된 시간이 그림 3에 비교되어 있다.

### III. 통계적인 접근 방식

본 논문에서는 가장 먼저 도착한 신호성분의 도착시간을 정확하게 측정할 수 있는 방법이 존재한다고 가정하였다. 즉, 거리 측정의 오차는 장애물로 인한 초과시간지연에 의해서만 발생한다고 가정하였다. 거리  $r$ 만큼 떨어진 송수신기간의 전파시간(propagation time)  $\tau$ 는

$$\tau = \frac{r}{c} + \chi \quad (4)$$

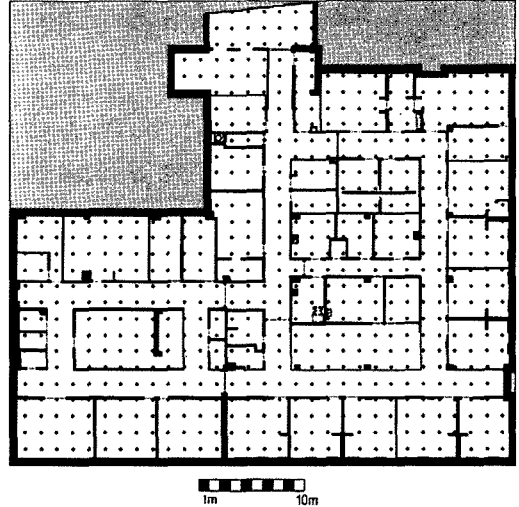


그림 4. 통계적모델링을 위해 사용된 Jesus Hospital의 도면. 그림에 나타난 점들은 가상의 송수신기의 위치를 나타낸다.

를 만족하며, 이때  $\chi$ 는 초과시간지연을 의미한다. 파라미터  $\chi$ 의 통계적인 정보를 획득하며, 여러 가지 추정방법을 적용할 수 있게 된다. 앞절에서 언급한 광선추적기를 활용하여  $\chi$ 의 분포를 구하였다. 다섯 개의 건물 도면을 이용하여 모의실험을 실시하였으며, 그림 4는 그 중 하나인 Jesus Hospital의 도면을 보여준다. 건물을 구성하고 있는 건축자재는 표 1에 나타난 매질들로 이루어져 있다고 가정하였다. 도면상에 표시된 점들은 가상의 송수신기의 위치를 나타내며 인접한 점들은 1.5m 간격으로 떨어져 있다. 도면 내에서 non-LoS 채널을 구성하는 모든 쌍의 점들의 최단 경로를 구하였다. 이때 거리가 30m를 초과하는 경우는 제외하였다. Polar search 방식을 통해 경로를 추적하였으며, 신호가 수신 노드의 5cm미만의 거리에 이르렀을 때, 탐색을 정지하였다. 전반사가 발생하는 경우는 제외하였다.

그림 5는 모의 실험된 초과 지연시간의 표준화된 도수분포표를 나타내며 이는 로그노멀(lognormal) 함수로 다음과 같이 모델링 될 수 있다.

$$f_{\chi|r}(\chi|r) = \frac{1}{\sigma(r)\sqrt{2\pi}\chi} e^{-\frac{(\ln\chi - \mu(r))^2}{2\sigma^2(r)}} \quad (5)$$

표 1. 건물 매질의 유전 상수

매질	유리	나무	벽
유전 상수	8.50	4.09	6.89

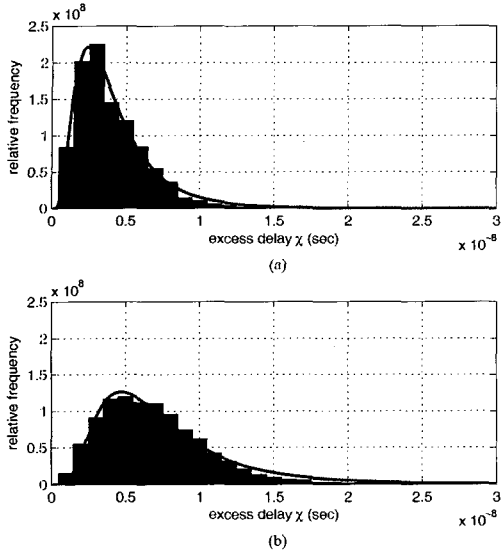


그림 5. 초과시간지연의 표준화된 도수분포표와 lognormal 함수를 이용한 근사방법. (a)  $r \in [8, 10]$  (b)  $r \in [14, 16]$

여기서 파라미터  $\sigma(r)$  과  $\mu(r)$  은

$$\sigma(r) = a_1 r + b_1, \tag{6}$$

$$\mu(r) = a_2 \ln r + b_2, \tag{7}$$

로 모델링하였으며,  $a_1 = -0.0062$ ,  $b_1 = 0.68$ ,  $a_2 = 1.17$ , and  $b_2 = -22.10$  이다. 초과시간지연이 거리추정 오차를 발생시키는 유일한 요소라고 가정했을 때의, 오차의 분산의 Cramer-Rao lower bound (CRLB)는

$$\sigma_r^2 \geq \frac{1}{E\left\{\left[\frac{\partial}{\partial r} \ln f_{\pi r}(\pi r)\right]^2\right\}}, \tag{8}$$

로 구해지며, 여기서

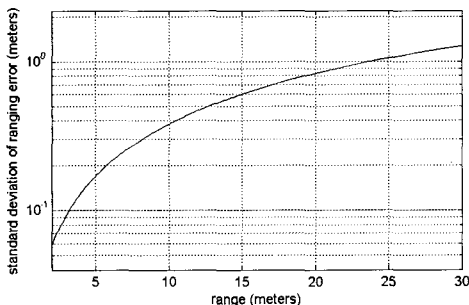


그림 6. 거리추정 오차의 편차의 CRLB.

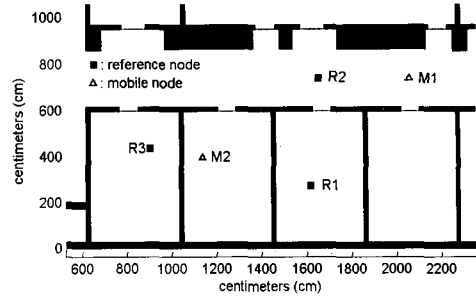


그림 7. 측정이 이루어진 건물의 도면.

$$f_{\pi r}(\pi r) = f_{\chi_{lr}}\left(\pi - \frac{r}{c}\right), \tag{9}$$

가 만족된다.

송신 안테나는 모바일 노드에, 그리고 수신안테나는 기준노드에 위치시켰다. 거리추정 오차의 표준편차의 CRLB는 그림 6에 나타나 있다.

#### IV. 지도를 이용한 위치인식 방식

II절에서 소개된 광선추적기는 지도를 이용한 위치인식 방식에도 활용될 수 있으며 이를 채널측정 데이터를 이용하여 테스트해보았다. 실험 II장에 소개된 바와 같은 주파수도메인 측정으로 시행되었으며 그림 7은 실험이 실시된 한동대학교 전산전자공학부 건물 3층의 도면이다. 수신 안테나는 2개의 위치를, 송신 안테나는 3개의 위치를 옮겨가며 측정하였다. 수신 안테나의 위치는 위치 추적 시, 모바일 노드의 위치라고 가정하였으며, 송신 안테나의 위치는 기준(reference) 노드의 위치로 가정하였다. 신호의 전파시간을 측정하기 위하여, LoS 환경에서 2m의 거리로 측정한 채널응답을 사용하였다. 모바일노드의 위치는 ToA 방식의 위치인식 알고리즘을 사용하여 추정하였다. 그림 8과 그림 9는 두 개의 다른 위치에서의 위치 추정 결과를 보여준다. 신호의 전파시간에 근거하여 얻어진 궤적을 나타내고 있으며, 장애물로 인한 전파효과를 고려하지 않고 일반적인 최소제곱오차(least square error, LSE) 방식을 사용한 경우와, ray-tracing을 사용한 경우를 비교하고 있다. 그림에서 광선추적기법을 적용한 경우 위치인식오차가 현저히 줄어든 것을 볼 수 있다.

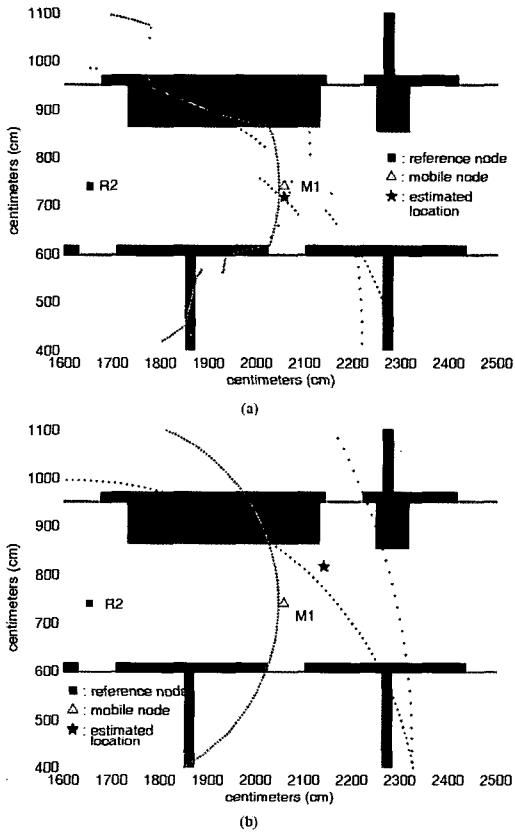


그림 8. 모바일노드 1의 위치추정. Non-LoS 전파효과를 고려한 경우 (상)와 고려하지 않은 경우 (하).

### V. 결론

III절에서 얻은 CRLB는 초과 지연시간이 거리측정의 정확도에 미치는 영향을 보여준다. 초광대역 신호의 거리해상도의 고려할 때, 이는 거리추정 및 위치추정에 중대한 영향을 미치는 요소가 됨을 알 수 있다. 장애물로 인한 초과시간지연의 통계적 모델은 모의 실험 결과에 기반한 것으로, 측정데이터를 사용한다면 더욱 정확한 모델의 수립이 가능할 것이다. 도면을 이용한 위치인식 방식은, 실험 결과 매우 현저한 성능 개선의 가능성을 보여주었다. 평면이 아닌 매질에서의 전파 효과를 고려한다면, 더욱 정확한 광선추적이 가능할 것이다.

### 참고 문헌

[1] Joon-Yong Lee and Robert A. Scholtz, "Ranging in dense multipath environments using an UWB

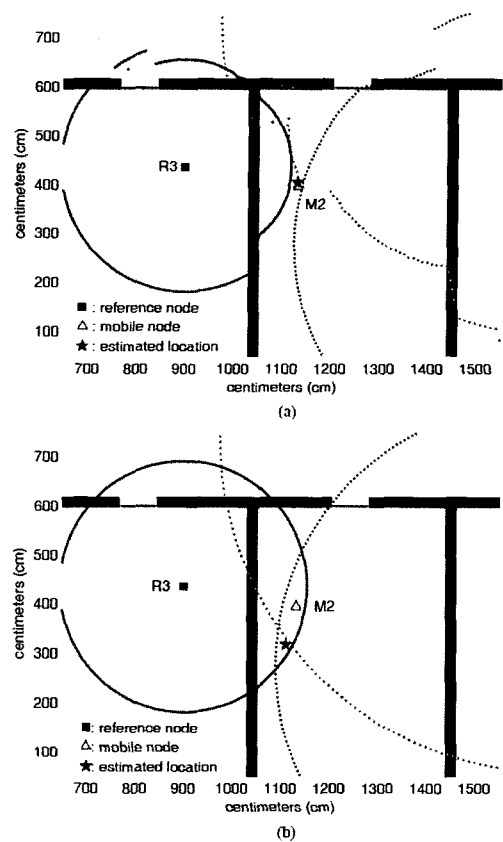


그림 9. 모바일노드 2의 위치추정. Non-LoS 전파효과를 고려한 경우 (상)와 고려하지 않은 경우 (하).

radio link," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 9, pp. 1677-1683, Dec. 2002.

[2] R. A. Scholtz and Joon-Yong Lee, "Problems in modeling UWB channels," in *Proc. 36th Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers*, Nov.2002, pp.706-711.

[3] Joon-Yong Lee and Sungyul Yoo, "Large error performance of UWB ranging in multipath and multiuser environments," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Apr. 2006, to be published.

[4] Sinan Gezici, Zhi Tian, Georgios B. Giannakis, Hisashi Kobayashi, Andreas F. Molisch, H. Vincent Poor, and Zafer Sahinoglu, "Localization via ultra-wideband radios," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no.4, pp.70-84, Jul. 2005.

- [5] Christian Mazzucco, Umberto Spagnolini, and Giorgio Mulas, "A ranging technique for UWB indoor channel based on power delay profile analysis," in *Proc. VTC-2004-Spring*, May 2004, pp. 2595-2599.
- [6] Ismail Guvenc and Zafer Sahinoglu, "Threshold-based TOA estimation for impulse radio UWB systems," in *Proc. ICU 2005*, 2005, vol.3, pp.1619-1623.
- [7] Damien B. Jourdan, John J. Deyst, Jr., Moe Z. Win, and Nicholas Roy, "Monte Carlo localization in dense multipath environments using UWB ranging," in *Proc. ICU 2005*, Sep. 2005, pp. 314-319.
- [8] Jacques Beneat and Nathan Bailey, "Optimization of building material properties for accurate indoor ray tracing models," Nov. 2004, vol. 2, pp. 1010-1014.
- [9] Scott Y. Seidel and Theodore S. Rappaport, "A ray tracing technique to predict path loss and delay spread inside buildings," in *Proc. GLOBECOM '92*, Dec. 1994, vol. 2, pp. 649-623.
- [10] T. Zwick, C. Fischer, and W. Wiesbeck, "A stochastic multipath channel model including path directions for indoor environments," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 6, pp. 1178-1192, Aug. 2002.
- [11] Kendall Atkinson, *An Introduction to Numerical Analysis*, Wiley, 2nd edition, 1989.
- [12] William H. Hayt, *Engineering Electromagnetics*, McGraw-Hill Science/Engineering/Math, New York, 7th edition, 2005.
- [13] Fawwaz T. Ulaby, *Fundamentals of Applied Electromagnetics*, Prentice Hall, 2004 media edition, 2003.
- [14] Yung-Hoon Jo, Joon-Yong Lee, Dong-Heon Ha and Shin-Hoo Kang, "Accuracy Enhancement for UWB Indoor Positioning Using Ray-Tracing," *IEEE Position Location and Navigation Symposium 2006*, Apr. 2006.

조 영 훈 (Yung-Hoon Jo)

준회원



2004년 2월 한동대학교 전산전  
자공학부 (공학사)  
2006년 2월 한동대학교 정보통  
신공학과 (공학석사)  
2006년 3월~현재 코아로직 BB  
팀 연구원  
<관심분야> UWB ranging in

non-LoS channel

이 준 용 (Joon-Yong Lee)

정회원



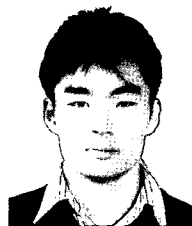
1993년 2월 홍익대학교 전기공  
학과 (공학사)  
1997년 5월 University of South-  
ern California(공학석사)  
2002년 5월 University of Sou-  
thern California(공학박사)  
2002년 9월~현재 한동대학교전

산전자공학부 조교수

<관심분야> UWB 위치인식 시스템, UWB 채널모델링

하 동 현 (Dong-Heon Ha)

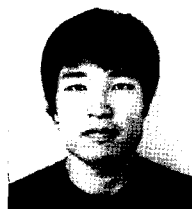
학생회원



2001년 3월~현재 한동대학교 전  
산전자공학부  
<관심분야> UWB 신호의 투과특  
성, UWB 위치인식 성능개선

강 신 후 (Shin-Hoo Kang)

학생회원



1999년 3월~현재 한동대학교 전  
산전자공학부  
<관심분야> UWB 위치인식 성능  
개선, UWB 채널특성