

UWB 시스템에서의 MHP 펄스를 이용한 ToA와 TDoA의 Hybrid 방식

The Hybrid Method of ToA and TDoA Using MHP Pulse in UWB System

| | | |
|------------------|----------------|-----------------|
| 황 대 근* | 황 재 호** | 김 재 명*** |
| (Dae-Geun Hwang) | (Jac-Ho Hwang) | (Jac-Moung Kim) |

요 약

현재 목표기기(target node)의 위치를 측정하는 기술 중에 가장 정확도가 높다고 평가되는 방법은 ToA(Time of Arrival) 거리 측정(Ranging) 기술과 TDoA(Time Difference of Arrival) 거리 측정 기술을 이용한 위치 측정 방법이다. ToA와 TDoA는 시간을 기반으로 하는 거리 측정 기술이기 때문에 여러 개의 참조기기(Reference node)와 목표기기 사이의 시간 동기화와 오프셋이 중요시 된다. 참조기기와 목표기기 사이의 시간 동기화가 정확하게 이루어지지 않거나 참조기기 간 시간 오프셋이 발생할 경우 정확한 시점에서 신호를 검출할 수 없게 되어 거리오차가 발생하게 되고, 이러한 거리오차를 일반적인 위치 측정 알고리즘에 적용하게 되면 목표 기기의 정확한 위치를 측정할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 참조기기와 목표기기 사이에 시간 동기화가 맞지 않을 경우와 참조기기와 참조기기 사이의 시간 오프셋이 발생할 경우에 위치 측정의 오차를 줄이는 ToA와 TDoA의 Hybrid 방식을 제안한다. 각각의 펄스가 직교성을 갖는 특징을 지닌 MHP(Modified Hermite Polynomial) 펄스를 이용하여 참조기들이 각기 다른 MHP 펄스를 송수신하도록 하고 이를 통해 한 번의 MHP 펄스 송수신만으로 TDoA와 ToA 두 가지 방법을 모두 이용하여 각각의 거리를 측정하고 위치 계산을 할 수 있도록 한다. Hybrid 방식은 TDoA와 ToA 방법을 이용한 거리 측정을 반복적인 계산을 통해 실제 거리 오차가 적은 방법을 선택하여 목표기기의 위치를 좀 더 정확하게 측정할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 보였다.

Abstract

Recently, ToA and TDoA estimation are favorable among all of estimation techniques because they have the best accuracy in estimating position. ToA and TDoA estimation are typical techniques based on time. So, it is important to have the time synchronization and offset between a target node and several reference nodes. If they don't have the time synchronization between a reference node and target node or have a time offset among reference nodes, the positioning error will increase due to the ranging error. The conventional positioning algorithm does not have an accurate device's position because ranging error is added to the calculation of the position. In this paper, we propose a hybrid method of ToA and TDoA to increase accuracy. We use MHP pulse that has orthogonal pulse instead of the existing pulse to transmit and receive pulses between a target node and reference nodes. We can estimate the target node's position by ToA and TDoA estimation to transmit and receive MHP pulses only once. When the proposed Hybrid method iteratively calculates the distance, we can select the ranging technique to have more accurate position. The simulation results confirm the enhancement of the Hybrid method.

Key words : Hybrid method, UWB(UltraWide Band), MHP pulse, Ranging, ToA, TDoA

† 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0008000).
 † 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IPA-2011-C1090-1011-0007).
 * 주저자 및 교신저자 : 인하대학교 정보통신대학원 석사과정
 ** 공저자 : 인하대학교 정보통신대학원 박사과정
 *** 공저자 : 인하대학교 정보통신대학원 교수
 † 논문접수일 : 2010년 11월 23일
 † 논문심사일 : 2011년 1월 16일
 † 게재확정일 : 2011년 1월 19일

I. 서 론

최근 몇 년 사이에 위치 기반 서비스는 센서 네트워크를 중심으로 홈 자동화 등 개인 사용자에게 다양한 서비스를 제공하는 부분에서 급속한 발전을 이루고 있으며 사용자의 안전과 대상의 이동경로 파악이 중요한 기능으로 대두되는 유비쿼터스 환경이 이슈가 되며 위치 인식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

목표기기의 정확한 위치 정보를 파악하는 위치 측정의 기반 기술인 거리 측정은 참조기기와 목표기기 간의 거리 정보를 추정하는 기술로 시스템의 시간 동기화 유무에 따라서 단방향 송신(One Way Ranging)을 통한 거리 측정과 양방향 송신(Two Way Ranging)을 통한 거리 측정 기술로 분류할 수 있다[2]. 이러한 거리 측정 기술은 수신된 신호의 각을 기반으로 한 AoA(Angle of Arrival), 수신된 신호의 감도를 이용한 RSSI(Received Signal Strength Indicator), 시간을 기반으로 한 ToA와 TDoA 등이 있다. AoA는 목표기기가 보낸 신호의 방향각을 이용하여 각을 측정하고 각 참조기기와 목표기기 사이의 방향각의 교차점을 계산하여 목표기기의 위치를 측정하는 알고리즘이며 RSSI는 미리 정의된 다양한 지점에서의 신호 세기들을 표본 수집을 통해 측정하고, 목표기기의 송신 신호를 각 참조기기가 수신할 때 발생하는 신호의 감쇠 정도를 측정하여 확률적 방법을 통해 표본과 맵핑하여 위치를 측정하는 방법이다[3, 4]. ToA와 TDoA는 시간에 기반을 둔 방법으로 ToA는 양방향 송신을 통한 거리 측정 기술로 신호를 보내고 다시 돌려받음으로 송수신에 걸린 시간을 이용하여 거리를 계산하여 목표기기의 위치를 측정하는 기술이고, TDoA는 신호의 도달 시간만을 측정하는 단방향 송신을 통한 거리 측정 기술로 각 참조기기에 신호가 도달한 시간차를 이용하여 목표기기의 위치를 측정하는 기술이다[5].

이와 같은 거리 측정 기술을 사용하는 실내에서의 여러 위치 측정 시스템 중에서 UWB(UltraWide Band) 시스템은 초광대역 특성으로 인해 큰 채널

용량을 제공하므로 매우 낮은 전송 전력에도 불구하고 기존 시스템들보다 훨씬 방대한 데이터 처리량을 제공하여 스트리밍 서비스 등에 요구되는 높은 데이터 전송률을 지원하고 있다. 또한 기존의 무선 시스템과는 달리 기저대역에서 통신이 이루어지므로 송수신기의 구조가 간단해지기 때문에 적은 비용으로 송수신기 제작이 가능하다는 큰 장점을 지닌다[6]. 그리고 대부분의 무선 기술들이 무선 주파수 반송파를 이용하여 정보를 전달하는데 비해 UWB시스템은 일정한 주기와 파형을 가지는 전기적 신호인 임펄스 신호를 $1ns$ 보다 짧은 시간 간격으로 전송하기 때문에 거리 측정에 있어서 보다 좋은 정밀도를 갖게 되어 실내에서의 거리 측정 및 위치 측정의 시스템 구축을 위한 유력한 핵심 기술로 평가받고 있다[7, 8].

시간을 기반으로 한 ToA와 TDoA는 참조기기와 목표기기 사이의 시간 동기화가 이루어지고 참조기기들간의 시간 오프셋이 발생하지 않는다면 목표기기의 위치를 찾는 데 오차가 적게 발생하지만 그렇지 않은 경우에는 거리 오차가 위치 측정 계산에 포함되어 목표기기의 정확한 위치를 측정할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 시간 동기화가 정확하게 이루어지고 오프셋이 발생하지 않은 경우와 그렇지 않은 경우의 특징을 분석하고, 시간 동기화에 오류가 있는 경우, 오프셋이 발생하였을 경우에 구할 수 있는 거리 측정 정보가 위치 측정에 미치는 영향을 줄이기 위해 ToA와 TDoA의 Hybrid 방식을 제안한다. 제안한 Hybrid 방식은 MHP 펄스를 사용하는 방식으로 시간 동기화가 이루어지지 않은 경우, 또는 오프셋이 발생했을 경우에 ToA와 TDoA를 선택적으로 사용할 수 있는 방식이다.

본 논문은 II장에서는 기존의 거리 측정 기술을 이용한 위치 측정 방법에 대하여 설명하고 III장에서는 시간 동기화가 이루어지지 않을 경우와 시간 오프셋이 발생한 경우의 특징과 그 경우에 나타나는 ToA와 TDoA의 성능을 비교하고 Hybrid 방식에 대하여 설명한다. IV장에서 제안한 방법과 기존의 방법의 성능을 시뮬레이션을 통하여 비교하여 설명하고 V장에서는 결론을 맺는다.

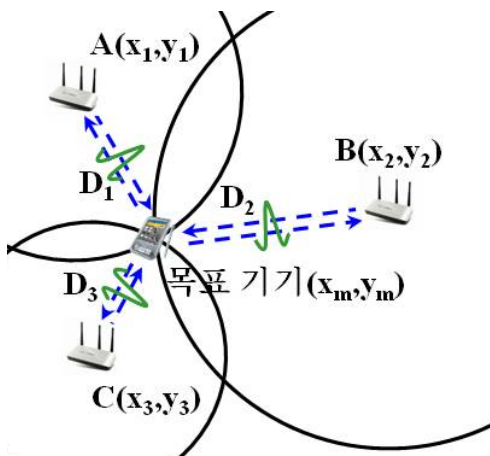
II. 기존의 위치 측정 방법

1. ToA 거리 측정 기술

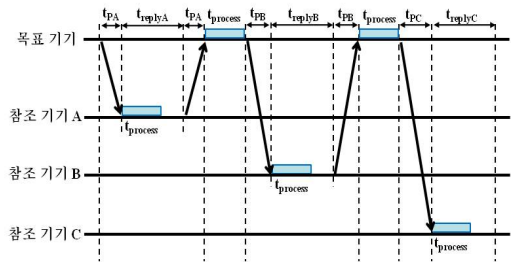
ToA는 위치가 알려진 각 참조기기들과 위치를 측정할 목표인 목표기기 사이의 신호가 전송된 시간을 측정하여 목표기기의 위치를 계산하는 삼각측량법을 이용한다. 참조기기에서 목표기기까지의 거리는 신호의 왕복에 걸리는 시간을 이용하여 측정할 수 있으며 참조기기와 목표기기 사이의 거리를 반경으로 하는 원들의 교점이 목표기기의 위치가 된다.

ToA 거리 측정 방법은 <그림 1>에서 볼 수 있듯이 A, B, C는 위치가 고정되어 있고 알려져 있는 참조기기를 나타내고 목표기기는 움직이는 물체를 나타낸다. 참조기기 A, B, C의 좌표 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 와 목표기기와의 거리를 나타내는 D_1, D_2, D_3 를 이용하여 목표기기의 좌표 (x_m, y_m) 을 구해낼 수 있다.

<그림 2>는 ToA의 신호 송수신 방법을 보여준다. 목표기기에서 송신된 펄스는 t_{PA} 라는 시간 동안에 참조기기 A에 도착하고 참조기기는 t_{replyA} 의 시간 뒤에 목표기기로 펄스를 다시 송신하게 된다. $t_{process}$ 는 참조기기와 목표기기에서의 신호 처리 시간을 나타내고, 두 번째 t_{PB}, t_{PB}, t_{PC} 는 목표기기와 참조기기까



<그림 1> ToA 거리 측정 기술의 삼각측량법
<Fig. 1> Triangulation method of the ToA ranging technique



<그림 2> ToA에서의 신호 송수신 방법
<Fig. 2> Transmission and reception process of ToA ranging technique

지 펄스가 도달하는 시간과 반대로 참조기기에서 목표기기까지 펄스가 되돌아오는 시간을 나타낸다. $t_{replyA}, t_{replyB}, t_{replyC}$ 는 각 참조기기 A, B, C에서 받은 신호를 처리하고 다시 펄스를 송신할 때까지의 시간을 말한다. t_{PA} 를 이용하여 참조기기 A와 목표기기 사이의 거리를 구할 수 있고 t_{PB} 는 참조기기 B와의 거리, t_{PC} 는 참조기기 C와의 거리를 구해낼 수 있다. 식 (1)은 ToA가 거리측정을 하는데 걸리는 시간을 보여 주며, 응답시간인 $t_{replyA}, t_{replyB}, t_{replyC}$ 는 같으므로 $3t_{reply(i)}$ 로 나타낼 수 있다.

$$t_{ToA} = t_{PA} + t_{replyA} + t_{PA} + t_{PB} + t_{replyB} + t_{PB} + t_{PC} + t_{replyC} + t_{PC} = 2(t_{PA} + t_{PB} + t_{PC}) + 3t_{reply(i)} \quad (1)$$

이러한 ToA 방식을 사용하는 위치 측정 기술의 알고리즘에는 원의 방정식을 직접적으로 계산하는 DM(Direct Method) 알고리즘과 LS(Least Square) 알고리즘, 그리고 SI(Spherical Interpolation) 알고리즘이 있다[9]. 본 논문에서는 LS 알고리즘을 이용하여 목표기기의 위치 측정을 한다.

$$\begin{aligned} D_1 &= \sqrt{(x_1 - x_m)^2 + (y_1 - y_m)^2} \\ D_2 &= \sqrt{(x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2} \\ D_3 &= \sqrt{(x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 양변을 제곱한 후, 세 번째 식을 빼주게 되면 식 (3)을 얻게 된다.

$$2\vec{A}\vec{p} = \vec{b} \quad (3)$$

where $\vec{A} = \begin{bmatrix} x_1 - x_3 & y_1 - y_3 \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 \end{bmatrix}$, $\hat{p} = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \end{bmatrix}$

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} D_1^2 - D_3^2 + (x_3^2 + y_3^2) - (x_1^2 + y_1^2) \\ D_2^2 - D_3^2 + (x_3^2 + y_3^2) - (x_2^2 + y_2^2) \end{bmatrix}$$

여기서 \hat{p} 이 찾고자 하는 목표기기의 좌표이다.
 식 (4)를 통해 목표기기의 좌표를 구할 수 있게 된다.

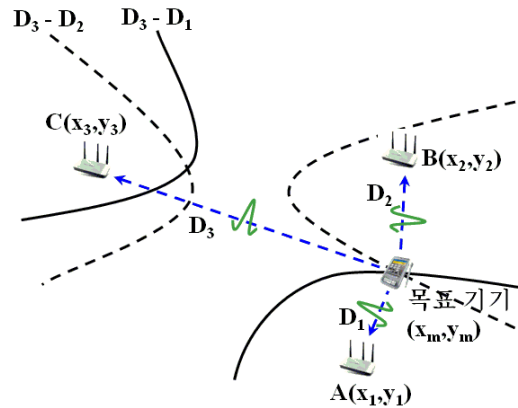
$$\hat{p} = \frac{1}{2}(\vec{A}^T \vec{A})^{-1} \vec{A}^T \vec{b} \quad (4)$$

ToA는 삼각측량법 중 가장 좋은 방법으로 평가 받는 위치 측정 기술로 별도의 고가 장비가 필요 없다는 장점이 있다. 또한 참조기기의 개수를 늘리면 보다 높은 정밀도를 얻을 수 있다. 하지만 ToA는 한 번에 하나의 참조기기와와의 통신만 하기 때문에 참조기기의 수가 증가할수록 처리 시간이 증가한다는 단점이 있다. 그리고 고정된 참조기기의 위치를 미리 알고 있어야 거리 측정이 가능하고 각 참조기기와 목표기기 사이의 시간 동기화가 꼭 필요하다[9].

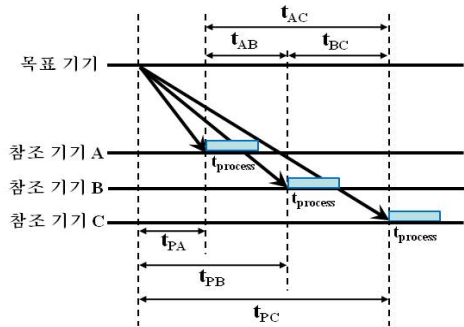
2. TDoA 거리 측정 기술

TDoA는 목표기기가 두 개 이상의 참조기기로 송신하는 신호의 도착 시간의 차이를 측정하여 참조기기를 초점으로 하는 쌍곡선 상에서 목표기기의 위치를 찾아내는 알고리즘이다. 3개의 참조기기가 존재할 경우 여기에서 얻어지는 2개의 쌍곡선을 이용하여 그 교점을 찾아냄으로써 목표기기의 2차원 위치를 찾을 수 있으며 4개 이상의 참조기기를 가질 경우 3차원 위치판별이 가능하다. <그림 3>은 TDoA의 동작 방식을 보여준다. 참조기기와 목표기기, 각 좌표들은 ToA의 설명과 같다.

TDoA는 <그림 4>와 같은 신호 송수신 방법을 갖는다. 목표기기에서 송신된 펄스는 각각 참조기기 A, B, C에 각기 다른 시각에 도착하고 각 참조기기에 도착한 시간의 차이를 계산한다. 즉, t_{AB} 는 참조기기 A와 참조기기 B에 신호가 도착한 시각의



<그림 3> 일반적인 TDoA 거리 측정 기술
 (Fig. 3) Conventional TDoA ranging technique



<그림 4> TDoA에서의 신호 송수신 방법
 (Fig. 4) Transmission and reception process of TDoA ranging technique

차이, t_{BC} 는 참조기기 B와 참조기기 C에 신호가 도착한 시각의 차이를 나타낸다. 이렇듯 TDoA는 펄스를 동시에 각 참조기기에 보내어 도착시간의 차이만을 알아내는 단방향 송신을 이용한 기술로 모든 참조기기 사이에 시간 오프셋이 발생하지 않아야 한다. 즉, 참조기기 A, B, C의 시간 오프셋이 발생한다면 t_{AB} , t_{BC} , t_{AC} 에 오프셋 만큼의 시간적 오차가 발생하여 정확한 거리 측정을 할 수 없다. TDoA가 거리측정을 한 번 끝낼 수 있는 시간은 식 (5)와 같다.

$$t_{TDoA} = \max(t_{PA}, t_{PB}, t_{PC}) + t_{process} \quad (5)$$

where $t_{AB} = t_{PB} - t_{PA}$
 $t_{BC} = t_{PC} - t_{PB}$
 $t_{AC} = t_{PC} - t_{PA}$

이러한 TDoA 방식을 사용하는 대표적인 알고리즘에는 Taylor 식을 이용한 Least Square 알고리즘과 Chan-Ho 알고리즘이 있다[10]. 본 논문에서는 Taylor 식을 이용한 Least Square 알고리즘을 이용한다.

TDoA에 의해 얻어지는 방정식은 비선형이기 때문에 ToA와 같이 DM 알고리즘을 사용하면 복잡도가 증가하게 된다. 따라서 비선형성의 문제를 해결하기 위해 식 (6)에 2차 Taylor 급수를 사용하여 선형화시킨다.

$$\begin{aligned} D_3 - D_1 &= \frac{\sqrt{(x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2} - \sqrt{(x_1 - x_m)^2 + (y_1 - y_m)^2}}{\sqrt{(x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2} - \sqrt{(x_1 - x_m)^2 + (y_1 - y_m)^2}} \\ D_3 - D_2 &= \frac{\sqrt{(x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2} - \sqrt{(x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2}}{\sqrt{(x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2} - \sqrt{(x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2}} \end{aligned} \quad (6)$$

처음 측정된 참조기기와 목표기기의 거리는 ρ 이고, 다음 측정에서의 참조기기와 목표기기의 거리는 $\hat{\rho}$ 로 나타낸다. 따라서 $\Delta\rho = \rho - \hat{\rho}$ 이며, 식 (6)을 선형화하면 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\rho_1 &= a_{x1}\Delta x_u + a_{y1}\Delta y_u - c\Delta t_u \\ \Delta\rho_2 &= a_{x2}\Delta x_u + a_{y2}\Delta y_u - c\Delta t_u \\ \Delta\rho_3 &= a_{x3}\Delta x_u + a_{y3}\Delta y_u - c\Delta t_u \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{where } a_{x1} = \frac{x_i - \hat{x}_u}{\hat{r}_i}, a_{y1} = \frac{y_i - \hat{y}_u}{\hat{r}_i}$$

그리고 좌표를 구하기 위해 식을 정렬하면 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\Delta X = A^{-1} \Delta \rho \quad (8)$$

$$\text{where } \Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x_u \\ \Delta y_u \\ c\Delta t_u \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & 1 \\ a_{x3} & a_{y3} & 1 \end{bmatrix}, \Delta \rho = \begin{bmatrix} \Delta \rho_1 \\ \Delta \rho_2 \\ \Delta \rho_3 \end{bmatrix}$$

따라서 식 (8)을 이용하여 목표기기의 위치를 계산할 수 있다. 이 방법은 처음 얻어진 하나의 해로 목표기기의 위치를 찾고 그 위치를 이용하여 다음 단계의 위치를 찾게 된다. 따라서 반복적으로 계산하여 하나의 값에 수렴하게 된다. 만약 참조기기가 4개가 있을 경우에는 식 (9)를 이용하여 목표기기의 위치를 측정하게 된다.

$$\Delta X = (A^T A)^{-1} A^T \Delta \rho \quad (9)$$

$$\text{where } \Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x_u \\ \Delta y_u \\ c\Delta t_u \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & 1 \\ a_{x3} & a_{y3} & 1 \\ a_{x4} & a_{y4} & 1 \end{bmatrix}, \Delta \rho = \begin{bmatrix} \Delta \rho_1 \\ \Delta \rho_2 \\ \Delta \rho_3 \\ \Delta \rho_4 \end{bmatrix}$$

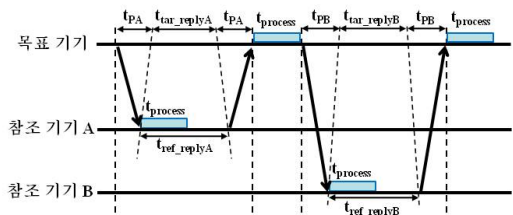
TDoA 방식은 참조기기와 목표기기 사이의 시간 동기화가 필요하지 않기 때문에 알고리즘 구현이 간단하다. 하지만 신호 도달 시간의 정밀함이 요구되기 때문에 각 참조기기 사이의 시간 오프셋, 다중 경로 페이딩, 비가시선 효과로 인한 신호 전달의 지연 문제가 발생하는 단점이 있다.

III. MHP 펄스를 이용한 Hybrid 방식

1. 시간 동기화와 시간 오프셋

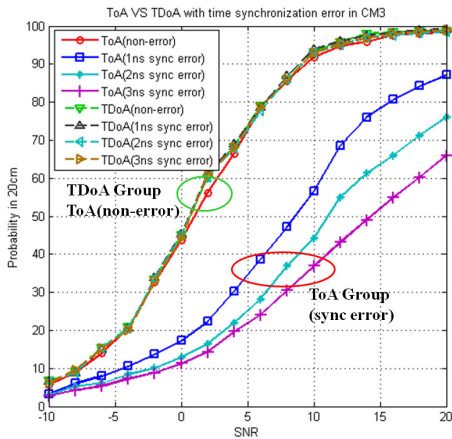
1) 시간 동기화 오류가 있을 경우

참조기기와 목표기기의 시간 동기화가 이루어지지 않을 경우에는 단방향 송신인 TDoA에서는 동기화 오류에 의한 거리 오차가 발생하지 않지만, 양방향 송신인 ToA는 거리 오차가 발생하게 된다. 따라서 ToA는 <그림 2>와 같이 보여 지던 신호 인식이 동기화 오류가 있을 경우에 <그림 5>와 같은 신호 인식을 보인다. t_{tar_replyA} 와 t_{ref_replyA} , t_{tar_replyB} 와 t_{ref_replyB} 와 t_{ref_replyC} 가 서로 다른 시간을 나타냄으로써 $t_{p(i)}$ 는 식 (10)과 같이 실제 도달시간에 $|t_{tar_reply(i)} - t_{ref_reply(i)}|/2$ 의 오차가 더해진 값이 되고, 이를 이용하여 거리를 측정하게 된다.



<그림 5> 참조기기와 목표기기 간 시간 동기화 오류가 있을 경우 ToA에서의 신호 인식

<Fig. 5> Signal recognition with time synchronization error between reference node and target node in ToA ranging technique



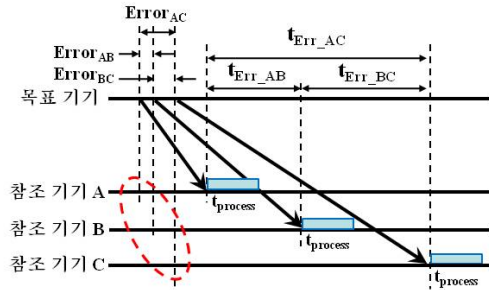
〈그림 6〉 참조기기와 목표기기 간 시간 동기화 오류가 있을 경우 ToA와 TDoA의 성능비교
 〈Fig. 6〉 Performance of ToA and TDoA with a time synchronization error between reference node and target node

$$\begin{aligned} t_{PA} &= t_{PA_real} + |t_{tar_replyA} - t_{ref_replyA}| / 2 \\ t_{PB} &= t_{PB_real} + |t_{tar_replyB} - t_{ref_replyB}| / 2 \\ t_{PC} &= t_{PC_real} + |t_{tar_replyC} - t_{ref_replyC}| / 2 \end{aligned} \quad (10)$$

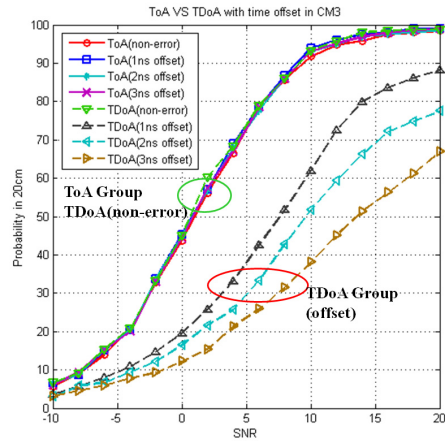
〈그림 6〉은 참조기기와 목표기기의 시간 동기화 오류가 있을 상황에서의 ToA와 TDoA의 성능을 보여준다. 시뮬레이션 환경은 IV장에 밝힌 파라미터들과 같다. 참조기기의 응답시간, 즉 t_{ref_replyA} , t_{ref_replyB} , t_{ref_replyC} 가 목표기기의 응답시간인 t_{tar_replyA} , t_{tar_replyB} , t_{tar_replyC} 보다 각각 최소 1ns, 2ns, 3ns의 동기화 오류를 가질 경우에 오차가 커짐에 따라 성능에 변화가 거의 없는 TDoA에 비해 ToA는 20cm 이내의 오차를 가질 확률이 점차 낮아지는 것을 알 수 있다.

2) 시간 오프셋이 발생할 경우

참조기기 사이에 시간 오프셋이 발생했을 경우에는 단방향 송신인 TDoA에서 〈그림 7〉의 점선의 원과 같은 시간적 오차가 발생한다. 목표기기에서는 동시에 펄스를 보내지만 시간 오프셋이 발생하면 참조기기는 $Error_{AB}$, $Error_{BC}$, $Error_{AC}$ 와 같이 시간 오차를 포함한 t_{Err_AB} , t_{Err_BC} , t_{Err_AC} 를 이용하여 거리 측정을 하게 되며 참조기기 간 시간 오프셋이 발생



〈그림 7〉 참조기기 간 시간 오프셋이 발생하였을 경우 TDoA에서의 신호 인식
 〈Fig. 7〉 Signal recognition with a time offset error among reference nodes in TDoA ranging technique



〈그림 8〉 참조기기 간 시간 오프셋이 발생했을 경우 ToA와 TDoA의 성능비교
 〈Fig. 8〉 Performance of ToA and TDoA with a time offset error among reference nodes

한 경우의 TDoA가 거리측정을 해낼 수 있는 시간은 다음과 같다.

$$t_{TDoA_nonsync} = \max(t_{PA}, t_{PB}, t_{PC}) + t_{process} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} t_{AB} &= t_{PB} - t_{PA} + Error_{AB} \\ t_{BC} &= t_{PC} - t_{PB} + Error_{BC} \\ t_{AC} &= t_{PC} - t_{PA} + Error_{AC} \end{aligned} \quad \text{where}$$

〈그림 8〉은 참조기기 A와 B, B와 C 사이의 시간 오프셋이 최소 1ns, 2ns, 3ns로 증가함에 따른 ToA와 TDoA의 성능을 비교하여 보여준다. 오프셋이

증가함에 따라 <그림 6>과는 역으로 ToA는 일정한 결과를 보이고 TDoA는 위치 측정 성능이 점점 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

2. Hybrid 방식을 이용한 위치 측정 방법

UWB 시스템에 사용되는 다양한 펄스들은 송신 안테나의 특성을 고려하여 DC성분이 없도록 모형화(modeling)되며, 그 중의 가장 많이 사용되고 있는 펄스는 가우시안 모노펄스이다[11]. 가우시안 모노펄스를 이용하여 거리 측정을 할 경우 단방향 송신인 TDoA와 양방향 송신인 ToA를 동시에 이용할 수 없다. ToA는 양방향 송신을 이용한 거리 측정 기술이기 때문에 목표기기가 송신하는 펄스가 어느 참조기기와의 거리 측정을 위한 것인지를 구분하는 것이 중요하다. 따라서 각 차수 간 직교성을 가지는 MHP 펄스를 사용하여 참조기기가 수신하는 펄스를 구분하기로 한다.

1) MHP(Modified Hermite Polynomial) 펄스

Hermite 변조는 영상처리에서 시공간상의 연관 관계를 밝히는데 사용되었으며, Hermite 미분방정식의 근으로 수학과 물리학 분야에서 널리 사용되고 있다.

$$h_{e_n}(t) = (-\tau)^n \exp\left(\frac{t^2}{2\tau^2}\right) \frac{d^n}{dt^n} \left[\exp\left(-\frac{t^2}{2\tau^2}\right) \right] \quad (12)$$

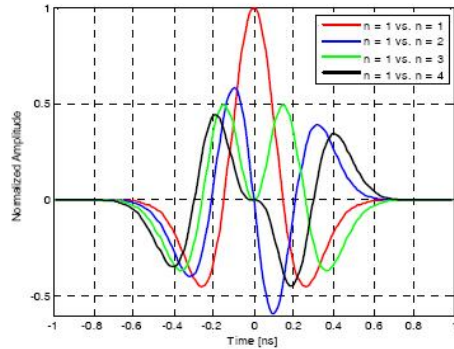
where $n = 1, 2, \dots$ and $-\infty < t < \infty$

위의 식 (12)는 Hermite polynomial을 나타낸다. Hermite polynomial은 각 차수 간에 직교성을 갖지 않으므로, 각 차수 간에 직교성을 가지도록 변형한 것이 MHP이며, 다음 식과 같이 정의한다[12, 13].

$$H_n(t) = (-1)^n \exp\left(\frac{t^2}{4}\right) \frac{d^n}{dt^n} \left[\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \right] \quad (13)$$

여기서 n 은 펄스 차수이다.

<그림 9>는 1차 MHP 펄스와 1~4차 MHP 펄스의

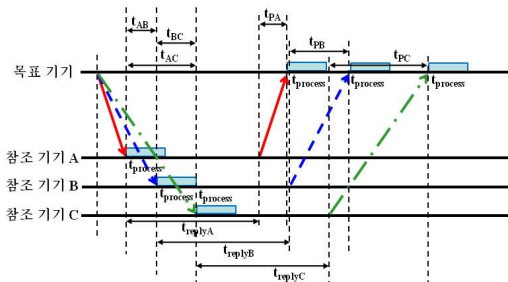


<그림 9> 1차 MHP 펄스와 1~4차 펄스간의 상호상관 특성 (Fig. 9) Cross correlation between MHP pulse order 1 and order 1~4

상호상관특성을 보여주는 것으로 차수가 다른 펄스는 직교하며 다른 펄스에게 영향을 끼치지 못한다는 것을 보여주고 있다.

2) MHP 펄스를 이용한 Hybrid 거리 측정 방법

차수가 다른 펄스끼리 직교하는 성질을 가진 MHP 펄스를 거리 측정에 이용하게 되면 한 번의 펄스 송수신으로 ToA와 TDoA를 이용한 거리 측정을 동시에 해낼 수 있다. <그림 10>은 MHP 펄스를 이용한 Hybrid 방식의 펄스 송수신 방법을 보여주고 있다. 목표기기는 직교성을 갖는 차수가 다른 세 개의 MHP 펄스를 각 참조기기로 송신하고, 참조기기는 자신이 받아야할 정해져 있는 차수의 MHP 펄



<그림 10> MHP 펄스를 이용한 Hybrid 방식의 신호 송수신 방법

(Fig. 10) Transmission and reception process in Hybrid Method using MHP pulse

스를 수신한다. 각기 다른 차수의 MHP 펄스를 받은 참조기기는 펄스를 받은 시간의 차이를 계산함으로써 TDoA 거리 측정을 완료한다. 그 후 참조기기는 t_{replyA} , t_{replyB} , t_{replyC} 의 일정 응답시간이 지난 후에 자신이 받았던 차수의 MHP 펄스를 목표기기로 송신하고, 목표기기는 각기 다른 차수의 펄스를 받아 어느 참조기에서 송신되어 온 펄스인지를 구분하여 참조기기의 응답시간을 제외한 $2t_{PA}$, $2t_{PB}$, $2t_{PC}$ 의 시간을 이용하여 ToA의 거리 측정을 한다. 이와 같이 MHP 펄스를 이용하면 한 번의 펄스 송수신으로 TDoA와 ToA 거리 측정을 모두 마칠 수 있다. 이 Hybrid 방식의 거리 측정 기술을 이용하여 참조기기와 목표기기 사이의 시간 동기화가 맞지 않을 경우와 참조기들 사이에 시간 오프셋이 발생할 경우에 나타날 수 있는 거리 오차들을 줄이는 방법을 제안한다.

3) Hybrid 방식의 위치 측정

참조기기와 목표기기 간의 시간 동기화가 이루어지지 않을 경우에 생길 수 있는 오차는 <그림 5>와 식 (10)을 통하여, 참조기들 간의 시간 오프셋이 발생하였을 경우는 <그림 7>과 식 (11)을 통하여 설명하였다. 또한 이와 같은 상황에서 나타나는 ToA와 TDoA의 성능저하를 <그림 6>과 <그림 8>을 통하여 보였다. 이러한 성능 저하를 줄이기 위하여 Hybrid 방식을 이용하여 거리 측정을 시작한다. 참조기기와 목표기기의 시간 동기화 오류인지 참조기들 간의 시간 오프셋인지를 모르는 경우에 Hybrid 방식을 통하여 거리 측정을 실시한 후에 그에 따른 목표기기의 위치 값을 계산한다.

제안하는 Hybrid 방식은 거리 측정을 통한 위치 계산의 반복을 통해 구한 n개의 위치 값으로 서로의 거리를 구하여 ToA와 TDoA 중 한 가지 방법을 선택하는 것이다. n회 반복을 통하여 위치 값을 계산하면 ToA에 의한 위치 값 ToA_1 , ToA_2 , ToA_3 , ..., ToA_n 과 TDoA에 의한 위치 값 $TDoA_1$, $TDoA_2$, $TDoA_3$, ..., $TDoA_n$ 을 구해낼 수 있다. ToA와 TDoA를 이용하여 구해낸 각각 n개의 위치 값들을 이용하여 서로의 거리를 계산하면 위치 값 ToA_1 은 ToA_2 , ToA_3 , ..., ToA_n 까지의 거리 값을 갖는 것과 같이

각각의 위치 값들은 n-1개의 거리 값들을 갖게 되고 총 n(n-1)개의 거리 값이 구해진다. 이 거리 값들의 평균을 구하게 되면 ToA를 이용한 거리 측정에서의 거리 평균값과 TDoA를 이용한 방법에서의 평균값을 알 수 있고 평균값을 비교하여 작은 값이 분포가 더 조밀하다는 것을 알 수 있다. 참조기기와 목표기기 사이에 시간 동기화 오류가 있다면 TDoA에 의해 구해진 거리 평균값이 ToA에 의해 구해진 값보다 작게 되고 반대로 참조기들 간에 시간 오프셋이 발생하였다면 ToA에 의해 구해진 평균값이 TDoA의 평균값보다 작게 된다. 분포가 조밀하다는 것은 더욱 정확한 위치 측정을 실시했다는 것을 나타내므로 거리 평균값이 작은 거리 측정 기술을 선택하여 사용하면 참조기기와 목표기기 사이에 시간 동기화 오류, 참조기들 사이의 시간 오프셋 발생에 상관없이 정확한 거리 측정을 실시하고 보다 정확한 위치 측정을 마칠 수 있다.

IV. 시뮬레이션 환경 설정 및 성능 분석

제안된 기법에 대한 성능을 검증하기 위해서 본 논문에서 사용한 채널 모델은 IEEE 802.15.4a TG에서 제시한 UWB 채널을 사용하였으며, 각 채널의 특성은 <표 1>과 같다. 4a 채널 환경 중 실내 환경과 사무실 환경을 사용하였고, 각 채널 환경은 LOS (Line of Sight)와 NLOS(Non-Line of Sight)로 나뉘어 CM1에서 CM4로 구분된다[14]. 시뮬레이션 공간은

<표 1> UWB 채널 모델
<Table 1> UWB channel model

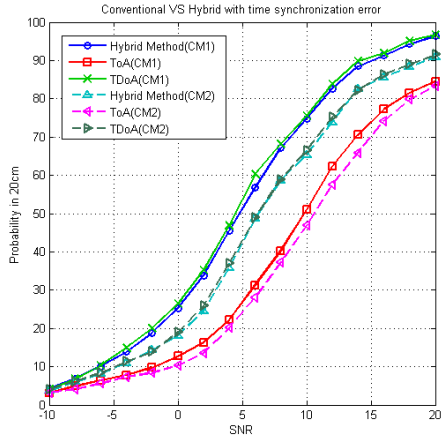
| | CM1 | CM2 | CM3 | CM4 |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Environment | Indoor | Indoor | Office | Office |
| Condition | LOS | NLOS | LOS | NLOS |
| valid Range of d(m) | 7~20 | 7~20 | 3~28 | 3~28 |
| Path gain(dB) | -43.9 | -48.7 | -35.4 | -59.9 |
| Pathloss exponent | 1.79 | 4.58 | 1.63 | 3.07 |
| mean # cluster | 3 | 3.5 | 5.4 | 1 |
| inter cluster decay constant | 22.61 | 26.27 | 14.6 | NA |

가로, 세로 15m의 크기로 가정하고, 참조기기 3개의 위치를 고정시킨 후 목표기기의 위치를 무작위로 선택한다. Hybrid 방식에서의 반복횟수 n 은 50회로 하고 시간 동기화 오차는 참조기기가 목표기기보다 최소 1ns 이상의 무작위의 시간 오차, 시간 오프셋

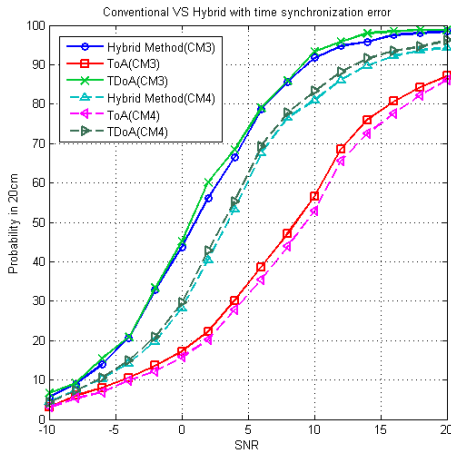
은 참조기기A와 B 사이에는 최소 1ns, A와 C는 최소 2ns, B와 C는 최소 1ns 이상의 오차를 가지도록 하여 위치를 측정하는 방식으로 성능을 검증하였다.

<그림 11>은 실내 환경(CM1, CM2)에서 참조기기와 목표기기 간에 시간 동기화가 이루어지지 않은 경우에 기존의 ToA와 TDoA 그리고 Hybrid 방식을 비교한 것이다. 참조기기의 응답시간, 즉 t_{ref_replyA} , t_{ref_replyB} , t_{ref_replyC} 가 목표기기의 응답시간인 t_{tar_replyA} , t_{tar_replyB} , t_{tar_replyC} 보다 1%(1ns) 이상의 더 긴 시간을 가질 경우의 결과를 보여준다. CM1은 LOS 상황으로 직접 패스가 존재하는 환경이며 CM2는 NLOS 상황으로 직접 패스가 존재하지 않는 경우이다. 시간 동기화가 이루어지지 않은 상황에서 기존의 ToA는 TDoA에 비하여 20~25%의 낮은 확률로 20cm 이내의 정확한 위치 측정을 하는 것을 알 수 있다. 하지만 Hybrid 방식은 TDoA와 거의 비슷한 위치 측정 결과를 나타내는 것을 볼 수 있다.

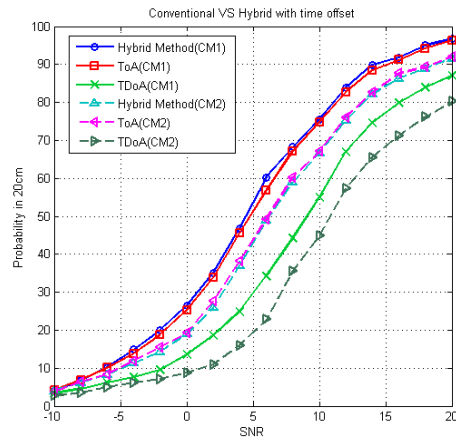
<그림 12>는 사무실 환경(CM3, CM4)에서 참조기기와 목표기기 간에 시간 동기화가 이루어지지 않은 경우의 성능 비교이다. <그림 11>과 마찬가지로 ToA는 위치 측정결과가 20~25% 가량 낮아짐을 확인할 수 있고 Hybrid 방식은 그를 보완할 수 있음



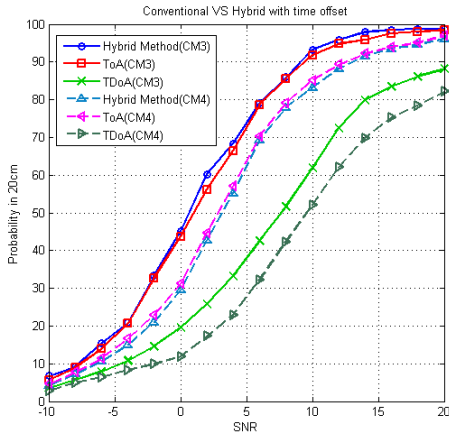
<그림 11> 시간 동기화가 이루어지지 않았을 경우 실내 환경(CM1, CM2)에서 SNR에 따라 위치 오차가 20cm 이하일 확률
<Fig. 11> Positioning Error Probability under 20cm for ranging SNR with time synchronization error in an indoor environment(CM1, CM2)



<그림 12> 시간 동기화가 이루어지지 않았을 경우 사무실 환경(CM3, CM4)에서 SNR에 따라 위치 오차가 20cm 이하일 확률
<Fig. 12> Positioning Error Probability under 20cm for ranging SNR with time synchronization error in an office environment(CM3, CM4)



<그림 13> 시간 오프셋이 발생하였을 경우 실내 환경 (CM1, CM2)에서 SNR에 따라 위치오차가 20cm 이하일 확률
<Fig. 13> Positioning Error Probability under 20cm for ranging SNR with time offset in an indoor environment (CM1, CM2)



<그림 14> 시간 오프셋이 발생하였을 경우 사무실 환경 (CM3, CM4)에서 SNR에 따라 위치오차가 20cm 이하일 확률
 <Fig. 14> Positioning Error Probability under 20cm for ranging SNR with time offset in an office environment (CM3, CM4)

을 보여주고 있다.

참조기자들 간의 시간 오프셋이 발생하였을 경우에 기존의 ToA와 TDoA 그리고 Hybrid 방식을 비교한 성능은 <그림 13>과 <그림 14>를 통해 확인할 수 있다. <그림 11>, <그림 12>와 마찬가지로 CM1, CM3는 LOS환경이며 CM2, CM4는 NLOS환경이다. 참조기자들 간의 시간 오프셋의 발생으로 인해 TDoA의 성능이 ToA에 비하여 급격히 떨어진 것을 확인할 수 있고, Hybrid 방식은 ToA와 같이 보다 정확한 위치 측정 결과를 갖는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 UWB 시스템내에서 MHP 펄스를 이용하여 ToA와 TDoA를 선택적으로 사용할 수 있는 Hybrid 방식을 이용한 위치 측정 기술을 제안하였다. 위치 측정을 위한 거리 측정 기술은 ToA, TDoA, AoA, RSSI 등의 기술 중에 시간을 기반으로 한 ToA와 TDoA가 많이 사용되지만 참조기기와 목표기기 사이에 필요한 시간동기화가 제대로 이루어지지 않을 경우, 참조기기와 참조기기 사이에 시간 오프셋이 발생할 경우에 거리 오차가 발생하여 정

확한 위치 측정을 할 수 없다. 이를 해결하기 위한 방법으로 MHP 펄스를 이용한 Hybrid 방식으로 거리 오차가 개선됨에 따라 정확한 위치 측정을 할 수 있다는 것을 보였다. 또한 시뮬레이션을 통하여 실내 환경(CM1, CM2)과 사무실 환경(CM3, CM4)에서 시간 동기화가 맞지 않을 경우와 시간 오프셋이 나타났을 경우로 나누어 기존의 거리 측정 기술인 ToA, TDoA와 성능을 비교함으로써 제안된 방법으로 시간 동기화 오류와 시간 오프셋으로 인한 거리 오차를 없앨 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] J. Y. Lee and R.A. Scholtz, "Ranging in a dense multipath environment using an UWB radio link," *Proc. IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.20, no.9, pp.1677~1683, December 2002.
- [2] R. J. Fontana and S. J. Gunderson, "Ultra-wideband precision asset location system," *Proc. IEEE Conference on UWB Systems and Technologies (UWBST)*, pp.147~150, May 2002.
- [3] D. Niculescu and N. Badri, "Ad hoc positioning system (APS) using AOA," *Proc. 22th Joint IEEE Computer Communications Soc. (INFOCOM' 03)*, vol. 3, pp.1734~1743, March 2003.
- [4] K. Pahlaven and X. Li, "Indoor geolocation science and technology," *IEEE Commun. Mag.* vol. 40, no. 2, pp.112~118, February 2002.
- [5] IEEE 802.15-TG4a, Precision Ranging Subcommittee, "Ranging subcommittee final report," available at <http://ieee802.org/15/pub/TG4a.html>
- [6] 강지명, 이순우, 김용화, 박영진, 김관호, "무선 동기화를 이용한 IR-UWB 무선 측위 알고리즘," *전자공학회 논문지 CI* 권, 제45권, 제6호, pp.27~32, 2008. 11.
- [7] 공형민, 성태경, 권영미, "UWB 실내 측위를 위한 TDoA 위치결정기법," *전자공학회 논문지 TC* 권, 제42권, 제1호, pp.9~15, 2005. 1.
- [8] J. Foerster, E. Green, S. Somayazulu and D.Leeper,

- “Ultra-wideband technology for short or medium range wireless communications,” *Intel Technology Journal*, pp.1~11, 2001.
- [9] 장성진, 황재호, 최낙현, 김재명, “Iterative calculation을 이용한 UWB 위치측정에서의 오차 감소 기법,” *전자공학회 논문지 TC편*, 제45권, 제12호, pp.105~113, 2008. 12.
- [10] Mohamed Laaraiedh, Stephane Avrillon, Bernard Uguen, “Overcoming singularities In TDoA based location estimation using total least square,” *2009 International Conference on Signals, Circuits and Systems*, pp.1~4, 2009.
- [11] Geoffrey Werner-Allen, Geetika Tewari, “Firefly-inspired sensor network synchronicity with realistic radio effects,” *In Proc. ACM SenSys*, November 2005.
- [12] H. Zhang and T. A. Gulliver, “Biorthogonal pulse position modulation for time hopping multiple-access UWB communications,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.4, no.3, pp.1154~1162, May 2005.
- [13] M. Ghavami, L. B. Michael and R. Kohno “Hermite function based orthogonal pulse for UWB communications,” *Proc. Wireless Personal Multimedia Conference*, Aalborg, Denmark, pp.437~440, September 2001.
- [14] A. F. Molisch et al., “IEEE 802.15.4a channel model-final report,” *IEEE 802.15.4a subgroup*, Feb. 2005.

저자소개



황 대 근 (Hwang, Dae-Geun)

2009년 2월 : 인하대학교 전자공학과 학사

2009년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 정보통신대학원 석사과정



황 재 호 (Hwang, Jae-Ho)

2006년 2월 : 인하대학교 전자공학과 학사

2008년 2월 : 인하대학교 정보통신대학원 석사

2008년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 정보통신대학원 박사과정



김 재 명 (Kim, Jae-Moung)

1974년 2월 : 한양대학교 전자공학과 공학사

1981년 8월 : 미국 남가주대학교(USC) 전기공학과 석사

1987년 8월 : 연세대학교 전자공학과 박사

1974년 3월 ~ 1979년 6월 : 한국과학기술연구소, 한국통신기술연구소 근무

1982년 9월 ~ 2003년 3월 : 한국전자통신연구원 위성통신연구단장/무선방송연구소 소장 역임

2003년 4월 ~ 현재 : 인하대학교 정보통신대학원 원장/교수

현재 통신위성우주산업연구회 회장 외 기술자문으로 다수 활동 중