



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

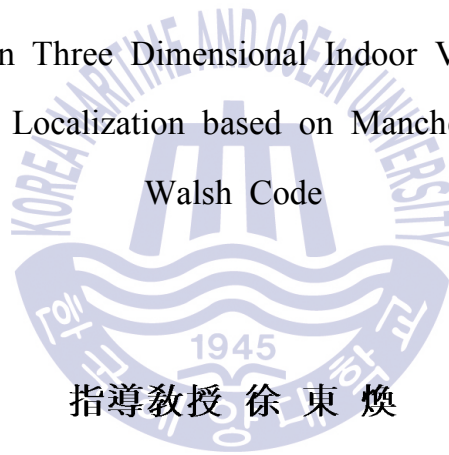
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

**Walsh code를 이용한  
Manchester code 기반 가시광 통신  
3차원 실내 위치인식에 관한 연구**

A Study on Three Dimensional Indoor Visible Light  
Communication Localization based on Manchester Code using  
Walsh Code



指導教授 徐 東 煥

2016年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

金 圓 烈

本 論 文 을 金 圓 烈 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

委 員 長 : 工 學 博 士 李 成 根 ㉠

委 員 : 工 學 博 士 徐 東 煥 ㉠

委 員 : 工 學 博 士 朱 良 翊 ㉠



2016年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

金 圓 烈

# 목 차

목 차 .....	i
그림 및 표 목차 .....	ii
Abstract .....	iv
제 1 장 서 론 .....	01
제 2 장 관련이론 .....	04
2.1 가시광 통신의 채널 모델 .....	04
2.2 삼변측량법 .....	07
2.3 Manchester code .....	09
2.4 Walsh code .....	10
제 3 장 제안한 실내 위치 인식 방법 .....	11
3.1 시스템 구조 .....	12
3.2 송신 신호 생성 방법 .....	13
3.3 수신 신호 복원 방법 .....	14
3.4 거리 계산 방법 .....	15
3.5 3차원 위치 측위 방법 .....	19
제 4 장 실험 및 결과 .....	21
4.1 실험 환경 .....	21
4.2 실험 결과 분석 .....	24
제 5 장 결 론 .....	33
참 고 문 헌 .....	34

## 그림 및 표 목차

### <그림목차>

그림 2.1	가시광 통신 채널 모델	4
그림 2.2	삼변 측량법	7
그림 3.1	실내 측위 시스템	12
그림 3.2	제안한 실내 위치 인식의 블록 다이어그램 (1)	17
그림 3.3	제안한 실내 위치 인식의 블록 다이어그램 (2)	18
그림 4.1	수평 거리 $r$ 에 따른 수신 전력 $P_{Rx}$ 의 특성 분포	25
그림 4.2	외부 빛의 영향에 따른 수신 전력 $P_{Rx}$ 의 특성 관계	26
그림 4.3	수평거리 $r$ 에 따른 수신 전력 $P_{Rx}$ 의 특성 관계	27
그림 4.4	실제 수평거리에 대한 측정된 수평거리	29
그림 4.5	제안한 실내 위치 인식의 측위 오차 결과	30
그림 4.6	제안한 3차원 실내 위치 인식의 측위 오차 결과	31
그림 4.7	제안한 3차원 실내 위치 인식의 측위 오차 결과	32

<표 목 차>

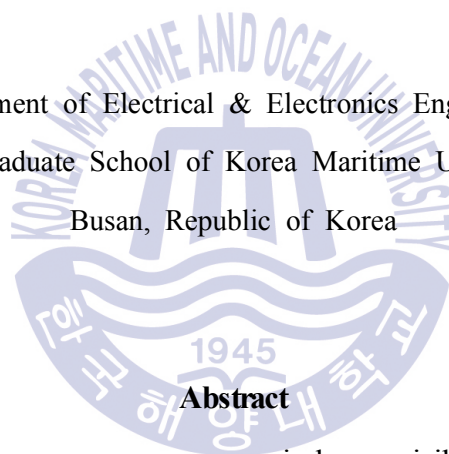
표 4.1 시뮬레이션의 파라미터 ..... 23



A Study on Three Dimensional Indoor Visible Light Communication  
Localization based on Manchester Code using Walsh Code

*by Won-Yeol, Kim*

Department of Electrical & Electronics Engineering  
The Graduate School of Korea Maritime University  
Busan, Republic of Korea



**Abstract**

In this paper, we propose an indoor visible light communication(VLC) localization using Walsh code which can distinguish overlapped transmitted-signals as each of transmitted signal with different LED source at the receiver and using Manchester code which can eliminate the flicker of LED light. The proposed system can estimate the relative three dimensional position of the receiver by using Lambertian radiation properties and trilateration method that are applied to the location information of fixed LED sources and the received

signals from them. In order to verify the feasibility of the proposed system, we carried out the simulation in an indoor space with  $6 \times 6 \times 3$  m<sup>3</sup> installed 16 LED lamps. The simulation result shows that the proposed method achieves an average positioning error of 0.0536 m and a maximum positioning error of 0.2977 m.





## 제 1 장 서 론

최근 주거 및 생활공간이 육상뿐만 아니라 플로팅 건축물과 선박 등의 해상 구조물로 확대되고 그에 따른 다양한 형태의 재난 사고에 대한 대처 방안 연구가 진행되고 있으며 아울러 사용자들의 안전성과 편의성을 제공하기 위한 위치 기반 서비스(LBS: Location based service)와 같은 다양한 애플리케이션이 요구되고 있다[1-10]. 이러한 LBS는 실내·외의 위치 측위가 필수적이이지만 측위 방식에 대한 표준이 없어 다양한 통신이 활용되고 있다.

실외 위치측위는 위성기반 항법 장치인 GPS(Global Positioning System) 또는 이동통신 기지국 등을 이용하여 연구가 되어 왔다. 그러나 실내 위치 측위는 고층건물 및 시설물들이 위성 신호에 영향을 주게 되고 오차범위가 커지게 되어 새로운 기술 개발 및 연구가 필요하다.

실내 측위에 사용되는 기술은 RFID[11], UWB(Ultra-wide band)[12], CSS(Chirp Spread Spectrum), Bluetooth[13], WLAN(Wireless Local Area Network)[14]와 같은 근거리 무선 통신 인프라를 이용한 방법이 있다 [15-23]. 이러한 근거리 무선 통신 기술을 이용한 측위 방법은 보안성, 다른 전자파들의 간섭으로 인한 오차 및 주파수 용량의 한계 등 문제점이 있다.

이를 보완하기 위하여 LED 조명을 이용한 가시광 통신기반 실내 위치 인식 기술이 새로운 해결책으로 각광 받고 있다[24-28]. 가시광 통신기반 실내 위치인식 기술은 가시광 대역의 주파수를 사용하기 때문에 큰 용량을 가지고 있으며, 벽이나 외부의 물체에 인한 물리적인 보완이 가능하며,

실내 공간에서 외부 신호와 차단되어 방과 방의 사이, 층간 구분에 있어 적합하다. 가시광 통신은 실내 위치추위 기술은 AoA(Angle of Arrival), ToA(Time of Arrival)[29], TDoA(Time Difference of Arrival)[30], RSSI(Received signal strength indication)[31] 등의 원리를 이용한 방법이 있다. AoA는 각도를 유입각을 이용한 방법으로 추가적인 설치가 필요하고, ToA는 전송시간을 이용하기 때문에 송·수신부에 동기화가 필요하여 가격이 비싸다. RSSI는 송신된 신호의 세기를 이용하는 기법으로 LED 조명들의 신호의 식별이 필요하다.

최근 RSSI 기반 가시광 통신 실내 위치 인식에서 신호의 식별은 Overlapped RSSI[32], DTMF(Dual-tone multi-frequency)[33], OOC(Optical orthogonal code)[34] 등의 원리를 이용한 여러 방법이 제안 되었다. Overlapped RSSI를 이용한 방법은 R-D 특성 곡선을 이용한 가상 가시광 중첩 방식의 RSSI 측위 방법으로 외부 빛(햇빛, VLC가 되지 않는 조명 등)의 간섭에 영향을 많이 받는다. DTMF를 이용한 방법은 각각의 신호마다 저주파수와 고주파수의 ID를 가지고 있는 LED 조명에서 DFT(discrete-time Fourier transform)을 통하여 주파수 별로의 세기를 측정하여 측위하는 방법으로 많은 연산량을 가지고 있다. OOC를 이용한 방법은 신호가 직교성을 가지고 있어 측위가 가능하지만 코드의 길이가 길다.

이러한 문제점들을 보완하기 위하여 본 논문에서는 Walsh code를 이용하여 중첩된 Light emitting diode(LED) 송신신호들을 수신부에서 각각의 LED 송신신호로 식별하고 조명의 깜박임 현상을 제거할 수 있는 Manchester code 기반 가시광 통신 실내 위치인식 시스템을 제안한다. 제안한 시스템은 고정된 LED 광원의 위치정보들과 수신부에서 그들로부터 수신된 신호들을 램버시안 방사 특성과 삼변 측량법을 이용하여 수신부의 상대적인 위치를 추정할 수 있다. 제안한 논문의 타당성을 검증하기 위하

여 16개의 LED 조명을 설치한  $6 \times 6 \times 3 \text{ m}^3$ 의 실내 공간에서 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 중첩된 송신신호들은 수신부에서 분리가 가능하고 측위 오차는 최대 0.2977 m, 평균 오차 0.0536 m로 정밀한 위치 인식이 가능하였다.



## 제 2 장 관 련 이 론

### 2.1 가시광 통신의 채널 모델

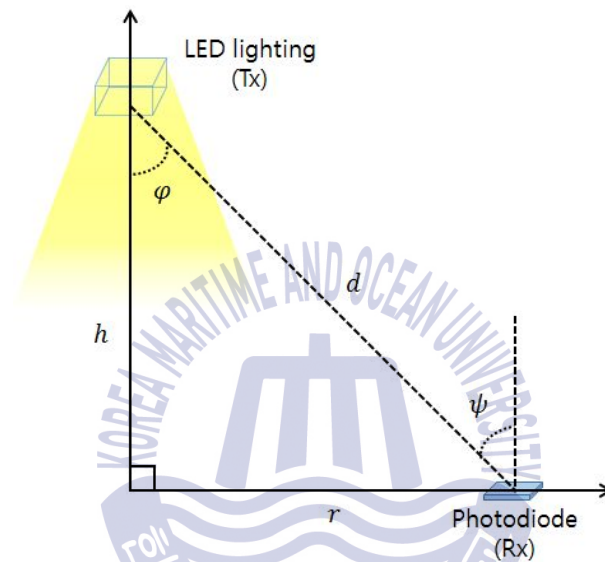


그림 2.1 가시광 통신 채널 모델

Fig. 2.1 Visible light communication channel model

그림 2.1은 자유 공간에서  $(0, h)$ 에 VLC 송신 기능이 있는 LED 조명이 설치되어 있고,  $(r_1, 0)$ 에 PD(Photodiode)가 있다. LED 조명에서 PD에 도달하는 신호는 식 (2.1)과 같이 표현한다.

$$Rx(t) = P \times Tx(t) \otimes h(t) + N(t) \quad (2.1)$$

여기에서  $Rx(t)$ 는 PD에서 수신된 신호가 전기적 출력으로 변환된 것

이며,  $T_x(t)$ 는 LED에서 방사한 신호,  $N(t)$ 은 잡음(noise)이고,  $h(t)$ 는 채널의 전달 함수이다.  $P$ 는 전송된 광 전력 계수를 나타낸다. 자유공간에서는 간접파를 제외한 직접파의 영향만 받기 때문에 식 (2.2)와 같이 표현되며,

$$h(t) = h_{LOS}(t) \quad (2.2)$$

와 같이 표현이 가능하다. 채널 이득(channel DC gain)은  $h(t)$ 의 푸리에 변환으로 식 (2.3)과 같다.

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (2.3)$$

$$= \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases}$$

여기에서,  $A$ 는 PD의 물리적 검출 영역이고,  $d$ 는 송신기와 수신기의 거리,  $\psi$ 는 입사각,  $\phi$ 는 방사각,  $T_s(\psi)$ 는 광학 필터의 이득,  $g(\psi)$ 는 광학 집중도의 이득을 표현한다.  $\Psi_c$ 는 수신기의 FOV(Field of view)를 나타낸다.  $m$ 은 LED의 방사의 반각으로  $m = \ln 2 / \ln(\cos \Phi_{1/2})$ 로 나타낼 수 있다. 예를 들어  $\Phi_{1/2} = 60^\circ$ 일 경우  $m = 1$ 이다. 광학 집중도  $g(\psi)$ 는 식 (2.4)와 같다.

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \Psi_c, \\ 0, & 0 \geq \Psi_c, \end{cases} \quad (2.4)$$

여기에서,  $n$ 은 반사 계수이다. 식 (2.3)에서 수신기와 LED가 수평을 이루고, 천장에서 높이를  $h$ 라고 했을 때,  $\cos(\phi) = \cos(\psi) = h/d$ 가 된다. 다시 식을 정리하면

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)Ah^{m+1}}{2\pi(h^2+r^2)^{(m+3)/2}}, & 0 \leq \psi \leq \Psi_c, \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases}, \quad (2.5)$$

식 (2.5)와 같다. 수신된 광 전력  $P_{Rx}$ 은 송신된 광 전력  $P_{Tx}$ 과  $H(0)$ 의 관계는

$$P_{Rx} = H(0) \times P_{Tx} \quad (2.6)$$

식(2.6)과 같다.

## 2.2 삼변 측량법

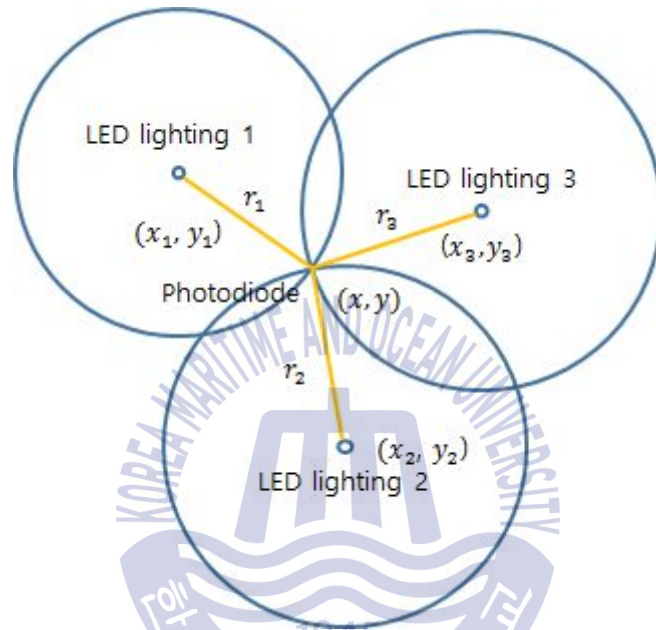


그림 2.2 삼변 측량법  
Fig. 2.2 Trilateration method

삼변측량은 삼각형 기하학을 사용하여 물체의 상대적인 위치를 구하는 방법이다. 3개 이상의 LED 조명과 PD간의 거리를 알고 있지만 PD의 위치가 불분명할 때, 그림 2.2와 같이 LED 조명들의 위치를 이용하여 PD의 상대적인 위치를 알 수 있다. 다시 말해 LED 조명과 PD와의 거리를 알고 있지만, 방향을 알 수 없기 때문에 일정한 원이 생성되며 3개의 원의 방정식으로 표현이 가능하다. 식 (2.6)과 같이 3개의 LED 조명의 좌표는  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ 이며, 각각의 측정된 거리는  $r_1, r_2, r_3$ 로 표현 하였다.

$$\begin{aligned}
 (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 &= r_1^2 \\
 (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 &= r_2^2 \\
 (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 &= r_3^2
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

식 (2.6)은 행렬 형식으로 표현이 가능하며,

$$\begin{aligned}
 AX &= B, \text{ where} \\
 A &= \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{bmatrix} \\
 B &= \begin{bmatrix} \frac{(r_1^2 - r_2^2 + x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2)}{2} \\ \frac{(r_1^2 - r_3^2 + x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2)}{2} \end{bmatrix} \\
 X &= \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

식 (2.7)과 같이 표현되며,  $X = (A^T A)^{-1} A^T B$  로 선형 LSM(Least square method)을 이용하여 식(2.6)을 풀 수 있다. 그러므로 세 개의 LED 조명의 위치와 PD와의 거리를 구할 수 있다면, PD의 상대적인 위치가 계산이 가능하다.



## 2.3 Manchester code

Manchester code는 NRZ로 만들어진 신호와 Clock 신호를 XOR연산하여 만든다. 식은

$$Clk(t) = \sum_{n=0}^{\infty} u(t-2nT_0) - u(t-(2n+1)T_0) \quad (2.8)$$

$$NRZ(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \begin{cases} u(t-2nT_0) - u(t-(2n+2)T_0), & (\text{If } bit_n = 1) \\ 0, & (2nT_0 < t < (2n+2)T_0), \quad (\text{Elseif } bit_n = 0) \end{cases} \quad (2.9)$$

$$M(t) = Clk(t) \oplus NRZ(t) \quad (2.10)$$

와 같이 정리되며, 식 (2.10)에서 ‘ $\oplus$ ’는 XOR 연산을 의미한다.  $T_0$ 는 비트의 주기를 나타내며, 결과적으로  $bit_n = 0$ 일 때, High-Low로 표현되고,  $bit_n = 1$ 일 때, Low-High로 표현되는 신호가 만들어진다. 하나의 데이터 심벌 안에서 ‘0’과 ‘1’의 비율이 같으므로 조명의 밝기를 일정하게 해주며, 조명의 flicker 현상을 방지할 수 있는 변조 방식이다. NRZ(Non return to zero) 방식에 비해 대역폭을 2배 사용하지만 매 비트마다 펄스의 변화가 있어 수신기에서 동기 타이밍을 쉽게 찾을 수 있다.

## 2.4 Walsh code

Walsh code 생성법은 “Hadamard Matrix”에 의해 생성되며, 행렬은

$$H_{2^N} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

와 같이 정의 된다. 이때  $H_1$ 은 1이면,  $N$ 은 2의 거듭 제곱수를 의미한다. 예를 들어 Hadamard 행렬을 이용한  $4 \times 4$  행렬은



$$H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_0 \\ W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

와 같이 구현 되며, 이때 행이나 열로 순서대로  $W_0, W_1, W_2, W_3$ 정의 된다. Hadamard 행렬의 각 행은

$$\frac{1}{T_L} \sum [W_i \times W_j^T] = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (2.13)$$

의 특성을 갖는다. 이 때  $T_L$ 는 Hadamard 행렬의 행 크기이며,  $W_j^T$ 는  $W_j$ 의 전치 행렬을 나타낸다. 위 수식과 같이 4개의 Walsh code( $W_0, W_1, W_2, W_3$ )는 모두 직 교성의 특성을 가지고 있다.

### 3. 제안한 실내 위치 인식 방법

본 논문에서는 개별 신호 구분이 가능한 Walsh code를 이용한 조명들의 밝기를 일정하게 유지 시켜주는 Manchester code 기반 가시광 통신 실내위치 인식 알고리즘을 제안하였다. Manchester code 기반 가시광 통신은 하나의 데이터 심벌 안에서 '0'과 '1'의 비율이 같으므로 조명의 flicker 현상을 방지하고 조명의 일정한 밝기를 낼 수 있도록 도와주는 역할을 한다. 여러 LED 조명의 중첩된 신호에서 구분하기 위해 직교성을 가진 Walsh code를 사용하여 신호간의 간섭을 주지 않아 개별 신호를 구분할 수 있다. 따라서 수신기의 위치는 구분된 신호를 Lambertian 방사 특성을 이용하여 LED 조명과 수신기의 거리로 환산 가능하며, 삼변 측량법을 통하여 위치 인식이 가능하다. 시스템 구조와 송신 신호 생성, 수신 신호 복원 및 거리 계산 방법에 대하여 제시한다.

### 3.1 시스템 구조

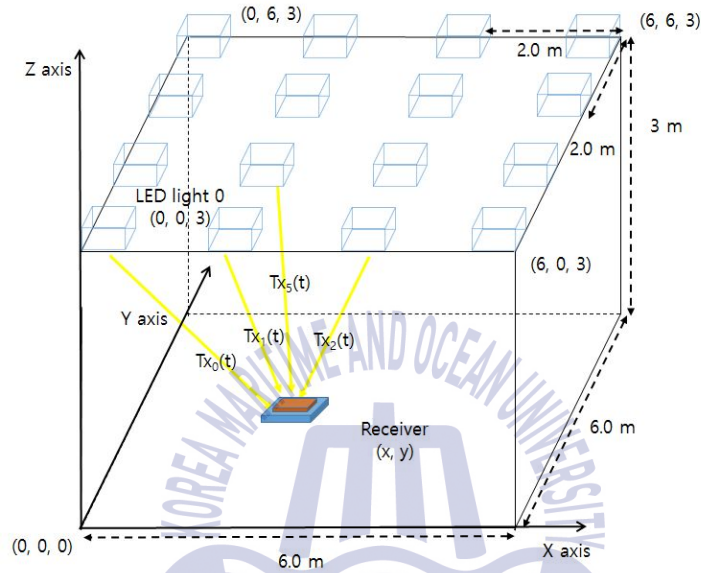


그림 3.1 실내 측위 시스템

Fig. 3.1 Indoor localization system

그림 3.1은 실내 측위 시스템을 표현한 것으로 자유 공간에서 가로 2 m 세로 2 m 간격으로 4 × 4 사각형 격자 패턴으로 높이 3 m에 설치된 VLC 송신 기능이 있는 LED 조명과 높이 1.5 m에 광 출력을 전력으로 변환 시켜주는 수신기(PD)가 있다. 각각의 LED 조명의 위치는 미리 알고 있다고 가정하고, 아래 왼쪽에서 오른쪽으로 LED-ID가 부여되며, ID는 “Hadamard matrix”에 의해 생성된 16 × 16 행렬에서 (0, 1)로 부호화 된  $W_0, W_1, W_2, \dots, W_{15}$  이다. 수신기에서 받는 신호는 중첩된 LED 조명의 신호가 들어온다. 신호를 생성하고 중첩된 신호를 복원하는 방법 및 수신기의 위치를 찾는 방법에 기술한다.

### 3.2 송신 신호 생성 방법

각 LED 조명의 송신 신호  $Tx_i(t)$ 는 식 (2.8)과 “Hadamard matrix”에 의해 생성된 행렬에서 (0, 1)로 부호화 된 Walsh code를 XOR 연산하여 생성된다. 그 식은

$$W_i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \begin{cases} u(t-2nT_0) - u(t-(2n+2)T_0), \\ \quad (If W_i \text{ bit}_{n \bmod T_L} = -1) \\ 0 \quad (2nT_0 < t < (2n+2)T_0), \\ \quad (Elseif W_i \text{ bit}_{n \bmod T_L} = 1) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$Tx_i(t) = P \times Clk(t) \oplus W_i(t) \quad (3.2)$$

로 표현되며,  $P$ 는 송신된 광 전력을 나타내고,  $T_0$ 는 bit 하나당의 시간 간격,  $i$ 는 LED 조명과 Walsh code의 행의 번호이고,  $n$ 은 bit의 번호,  $T_L$ 는 Walsh code에서 행의 개수를 나타낸다. 예를 들어 “Hadamard matrix”에 의해 생성된  $16 \times 16$  행렬에서  $I_W$ 는 ‘16’이다. ‘ $A \bmod B$ ’는  $A \div B$ 의 나머지를 나타낸다. ‘ $\oplus$ ’는 XOR 연산을 의미한다. 결과적으로, 송신 신호  $Tx_i(t)$ 는 광 전력  $P$ 를 가지는 ‘ $bit_n = 1$ ’일 때, High-Low 신호와, ‘ $bit_n = -1$ ’일 때, Low-High 신호로 표현되는 신호가 만들어진다.

### 3.3 수신 신호 복원 방법

PD로 수신된 신호  $Rx_{total}(t)$ 는 식 (3.3)와 같이 표현되며,

$$Rx_{total}(t) = \sum_{i=0}^{LED_N-1} (Tx_i(t) \otimes h_i(t) + n_i(t)) \quad (3.3)$$

LED 조명  $i$ 번째에서 송신된 신호  $Tx_i(t)$ 와 채널 임펄스 응답  $h_i(t)$ , 잡음  $n_i(t)$ 를 나타낸다. 기호 ‘ $\otimes$ ’는 Convolution을 의미하고,  $LED_N$ 은 LED 조명의 개수이다. 각 LED 조명으로부터 수신된 전력  $P_R^i$ 은

$$\begin{aligned} P_R^i &= H_i(0) \times P_T^i + N_i \\ &= \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0 T_L} Rx_{total}(t) \times S(t) \times W_i^b(t) dt \end{aligned} \quad (3.4)$$

같이 나타낼 수 있다. 식 (3.4)에서  $P_T^i$ 는  $i$ 번째 송신된 전력,  $H_i(0)$ 는  $i$ 번째 LED 조명에서 수신기까지의 Channel DC gain,  $N_i$ 는  $n_i(t)$ 의 전력 변환 잡음을 나타낸다.  $S(t)$ ,  $W_i^b(t)$ 는 식 (3.5)와 식 (3.6)으로 나타낼 수 있다. Walsh code의 직교성을 이용하여 중첩되어 있던 신호  $Rx_{total}(t)$ 는 각 LED 조명으로부터 수신된 전력  $P_R^i$ 를 “Hadamard matrix”에 의해 생성된 행렬을 이용하여 구할 수 있게 된다.

$$S(t) = \sum_{n=0}^{\infty} u(t-2nT_0) - 2u(t-(2n+1)T_0) + u(t-(2n+2)T_0) \quad (3.5)$$

$$W_i^b(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \begin{cases} u(t-2nT_0) - u(t-(2n+2)T_0), \\ \text{(If, } W_i \text{ bit}_{n \bmod T_L} = -1) \\ u(t-(2n+2)T_0) - u(t-2nT_0), \\ \text{(Elseif } W_i \text{ bit}_{n \bmod T_L} = 1) \end{cases} \quad (3.6)$$

$S(t)$ 는 짝수 번째 비트 주기에서 양의 부호 신호를 음의 부호 신호로 변환을 해 주고  $W_i^b(t)$ 는 LED 조명의 ID에 부합하는 (1, -1)로 이루어진 Walsh code 신호이다.

### 3.4 거리 계산 방법

각 LED 조명의 송신된 광 출력이 PD에 수신이 되어 전력으로 나타내면 식 (2.6)과 같고, 식 (2.5)를 대입하여 다시 정리하면

$$P_R^i = \frac{(m+1)Ah^{m+1}}{2\pi(h^2+r^2)^{(m+3)/2}} \times P_T^i, \quad (0 \leq \psi \leq \Psi_c) \quad (3.7)$$

식 (3.7)과 같이 표현이 가능하다. 이 식을 이용하여 수평거리  $r$ 을 구할 수 있다. 식을 다시 정리하면

$$r = \sqrt{\left( \frac{(m+1) \times A \times h \times P_T^i}{2\pi P_R^i} \right)^{\frac{1}{m+3}} - h^2}, \quad (0 \leq \psi \leq \Psi_c) \quad (3.8)$$

식 (3.8)과 같이 LED 조명과 수신기의 수평거리  $r$ 을 구할 수 있다.  $r$ 을 구한 후 식 (3.8)을 이용하여 수신기의 위치 측위가 가능하다.

본 논문에서 제안한 알고리즘으로 그림 3.2는 LED 조명의 송신 신호 생성 및 중첩된 수신 광 출력까지 나타낸 것이고, 그림 3.3은 각각의 LED 조명의 수신 광 출력으로 복원하는 방법 및 수신된 광 출력을 거리로 복원하여 삼변측량 기법의 다이어그램으로 표현한 것이다.





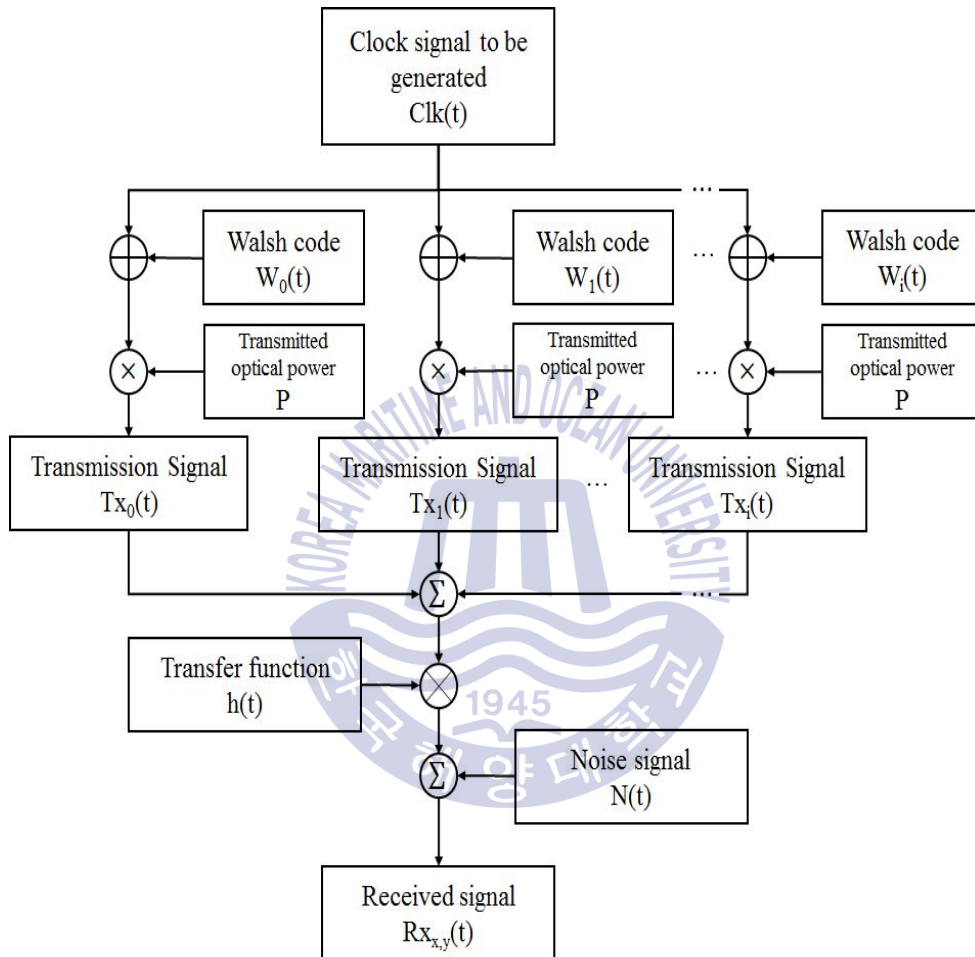


그림 3.2 제안한 실내 위치 인식의 블록 다이어그램 (1)

Fig. 3.2 The block diagram of proposed indoor localization (1)

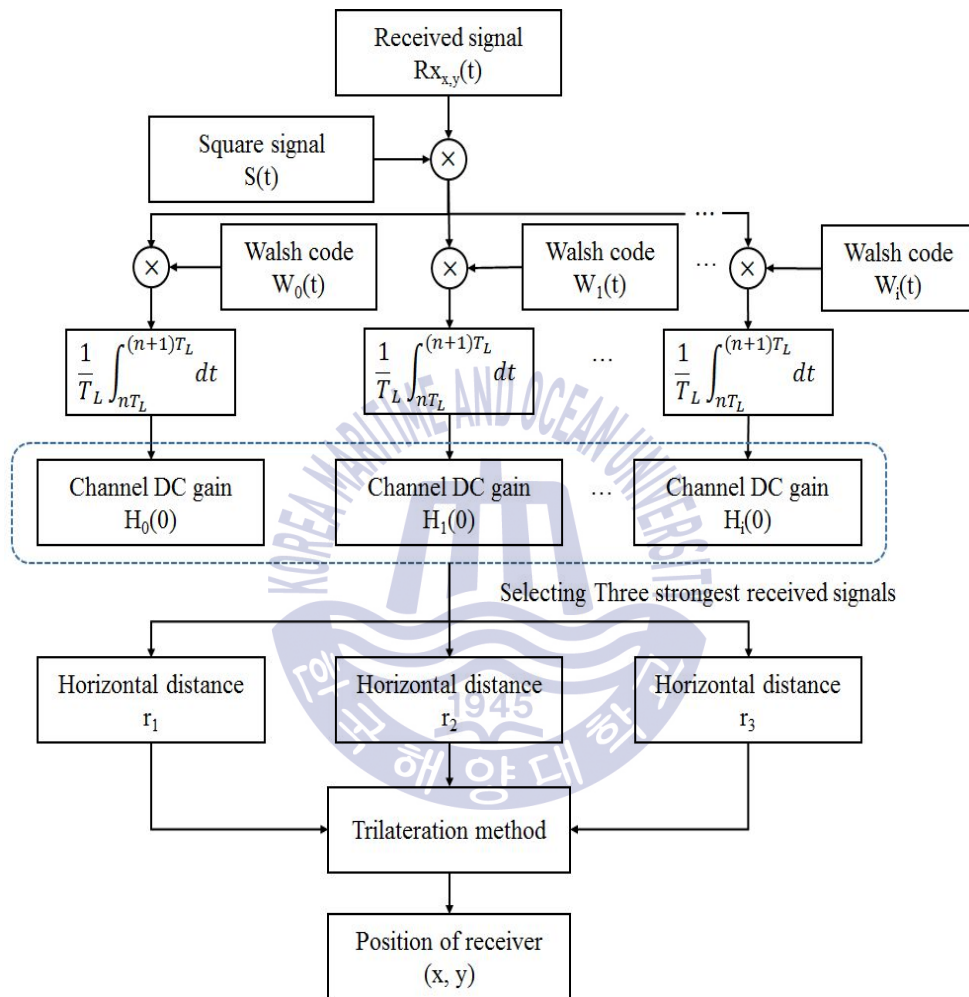


그림 3.3 제안한 실내 위치 인식의 블록 다이어그램 (2)

Fig. 3.3 The block diagram of proposed indoor localization (2)

### 3.5 3 차원 측위 방법

3 차원으로 측위하기 위해서는 삼변측량 기법을 변형하여 4 개 이상의 송신기를 이용하여 거리를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (h-z)^2 &= r_1^2 \\
 (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (h-z)^2 &= r_2^2 \\
 (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (h-z)^2 &= r_3^2 \\
 (x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (h-z)^2 &= r_4^2
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

식(3.9)는 3 차원 일 때 LED 조명들의 위치를 이용하여 PD의 상대적인 위치를 표현하였다. 식(3.10)을 이용하여  $r_i$ 를 식으로 표현할 수 있고,  $\Phi_{1/2} = 60^\circ$  일 경우  $m=1$ 이 되기 때문에 식(3.14)처럼 표현이 된다.

$$r_i = \sqrt{\sqrt{\frac{A \times h^2 \times P_T^i}{\pi P_R^i}} - h^2}, \quad (0 \leq \psi \leq \Psi_c) \tag{3.10}$$

행렬식으로 다시 정리하여 표현하면,

$$AX = B, \text{ where} \tag{3.11}$$

$$A = \begin{bmatrix} -2x_1 + 2x_2 - 2y_1 + 2y_2 - \sqrt{\frac{A}{\pi} \times \frac{P_{Tx}}{P_{Rx}^1}} + \sqrt{\frac{A}{\pi} \times \frac{P_{Tx}}{P_{Rx}^2}} \\ -2x_1 + 2x_3 - 2y_1 + 2y_3 - \sqrt{\frac{A}{\pi} \times \frac{P_{Tx}}{P_{Rx}^1}} + \sqrt{\frac{A}{\pi} \times \frac{P_{Tx}}{P_{Rx}^3}} \\ -2x_1 + 2x_4 - 2y_1 + 2y_4 - \sqrt{\frac{A}{\pi} \times \frac{P_{Tx}}{P_{Rx}^1}} + \sqrt{\frac{A}{\pi} \times \frac{P_{Tx}}{P_{Rx}^4}} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2 \\ -x_1^2 + x_3^2 - y_1^2 + y_3^2 \\ -x_1^2 + x_4^2 - y_1^2 + y_4^2 \end{bmatrix}$$

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B$$

식 (3.11)과 같이 표현되며,  $X = (A^T A)^{-1} A^T B$  로 선형 LSM(Least square method)을 이용하여 풀 수 있다. 그러므로 네 개의 LED 조명의 위치와 PD와의 거리를 구할 수 있다면, PD의 상대적인 위치가 3차원으로 계산이 가능하다.

## 제 4 장 실험 및 결과

### 4.1 실험 환경

본 논문에서는 앞서 가시광 통신으로 인한 백색 잡음에 대하여 설명하고, 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해 3 가지로 나누어 시뮬레이션을 수행하였다. 우선 VLC 채널에서 잡음  $P_N$  요인은 shot noise, thermal noise, inter-symbol interference이고 백색 잡음이다. 잡음 전력의 총합은

$$P_N = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2 + \gamma^2 P_{r,ISI}^2 \quad (4.1)$$

식 (4.1)과 같다. 식 (4.2)~식 (4.4)는 잡음을 식으로 표현한 것이다.

$$P_{r,ISI} = \frac{1}{T_0} \int_{T_0}^{\infty} Rx_{total}(t) dt \quad (4.2)$$

$$\sigma_{shot}^2 = 2q\gamma(P_r + P_{r,ISI})B + 2qI_b I_2 B, \quad (4.3)$$

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{8\pi k T_k}{G} \eta A I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k T_K \Gamma}{g_m} \eta^2 A^2 I_3 B^3 \quad (4.4)$$

식 (4.3)은 shot noise를 나타내고,  $q$ 는 전자 전하,  $B$ 는 등가 잡음 대역폭,  $I_b$ 는 배경 잡음 전력을 의미한다. 식 (4.4)은 thermal noise로 feedback-resistor noise와 FET channel noise의 합으로 나타나고,  $k$ 는 볼츠만 상수,  $T_K$ 는 절대온도,  $G$ 는 전압 이득,  $\eta$ 은 지역 단위당 PD의 고정된 정전 용량,  $\Gamma$ 은

FET 채널 잡음,  $g_m$ 은 FET 컨덕턴스,  $I_3 = 0.0868$ 을 나타낸다.

첫 번째 시뮬레이션은 2차원에서 한 개의 LED 조명과 수신기의 거리  $r$ 에 따른 이상적인 수신 광 전력  $P_{desired\_Rx}$ , 백색 잡음이 추가된 수신 광 전력  $P_{est\_Rx}$  및 복원된 광 전력  $P_{recoverd\_Rx}$ 의 특성 관계를 비교 및 분석하고, 외부 빛에 의한 광 전력의 영향을 미치는 경우를 실험 한다. 두 번째 시뮬레이션은 2차원에서 세 개의 1.5 m 간격으로 설치된 LED 조명과 수신기의 거리  $r$ 에 따른 이상적인 수신 광 전력  $P_{desired\_Rx}$ , 백색 잡음을 고려한 수신 광 전력  $P_{est\_Rx}$  및 복원된 광 전력  $P_{recoverd\_Rx}$ 를 비교 및 분석한다. 마지막으로 세 번째는 그림 3.1과 같은 3차원에서의 제안한 시스템을 이용한 위치 측위를 시뮬레이션 하여 실제 위치와 비교한다. 시뮬레이션의 파라미터는 표 4.1과 같다.



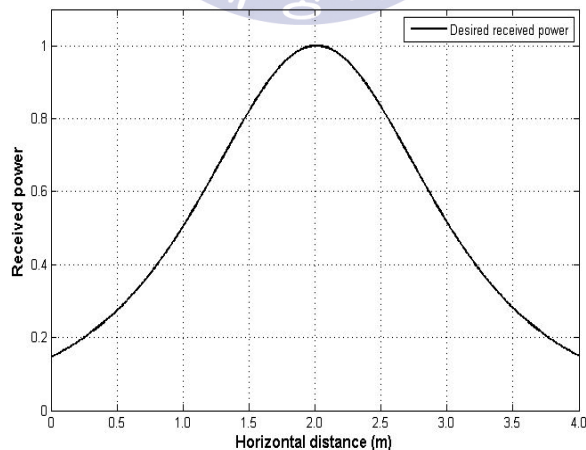
표 4.1 시뮬레이션의 파라미터  
Table 4.1 parameters of simulation

Parameter	Value
transmitted optical power	30 [W]
semi-angle at half power	60 [deg.]
FOV at a receiver	60 [deg.]
detector physical area of a PD	0.5 [cm <sup>2</sup> ]
gain of an optical filter	1.0
refractive index of a lens at a PD	1.5
O/E conversion efficiency	0.53 [A/W]
open-loop voltage gain	10
fixed capacitance	112 [pF/cm <sup>2</sup> ]
FET channel noise factor	1.5
FET transconductance	30 [mS]
absolute temperature	298 [K]
background light current	5100 [uA]
data rate	100.0 [Mb/s]

#### 4.1 실험 결과 분석

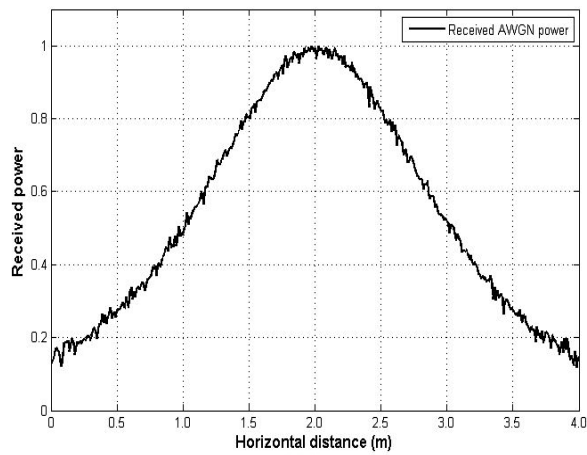
첫 번째 시뮬레이션 결과는 그림 4.1, 그림 4.2에 나타내었고, 그림 4.1(a)는 이상적인 수신 광 전력  $P_{desired\_Rx}$  특성 곡선, 그림 4.1(b)는 AWGN(Additive White Gaussian Noise)를 고려한 OOK 기반 수신 광 전력  $P_{est\_Rx}$  특성 곡선이고, 그림 4.1(c)는 복원된 광 전력  $P_{recovered\_Rx}$  특성 곡선을 나타낸다. 복원된 광 전력  $P_{recovered\_Rx}$  특성 곡선과 백색 잡음이 추가된 OOK 기반 수신 광 전력  $P_{est\_Rx}$  특성 곡선을 이상적인 수신 광 전력  $P_{desired\_Rx}$  특성 곡선과의 오차를 계산 해본결과는 약간의 차이는 보이나 흡사한 결과를 얻을 수 있었다.

신호에 외부 빛이 간섭이 생기게 될 경우 OOK 기반 수신된 광 전력은 급격하게 변화하게 되어 그림 4.2(a)와 같이 나타게 된다. 반면에 그림 4.2(b)는 제안하는 알고리즘의 수신된 광 전력을 나타내며 외부 빛의 영향을 받게 되더라도 강인한 모습을 보여준다.

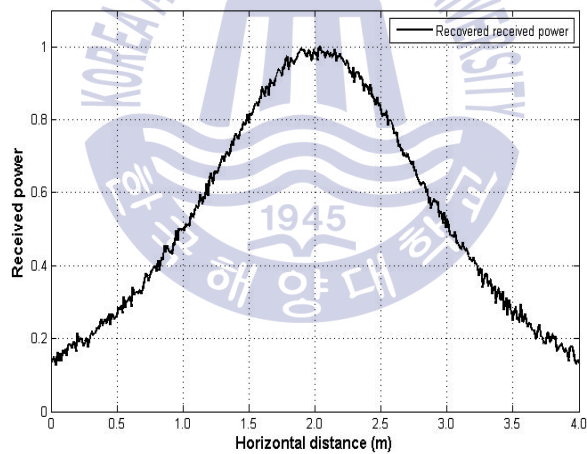


(a)





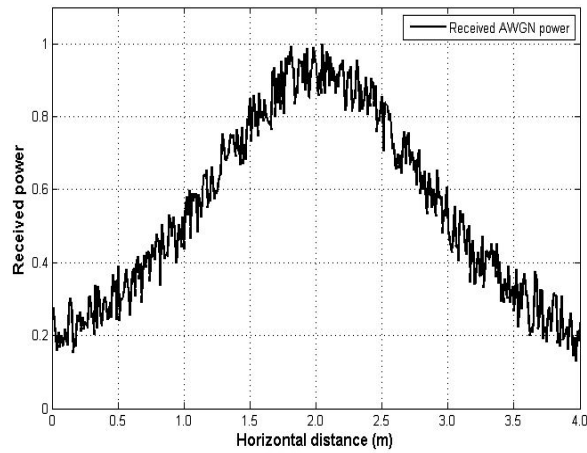
(b)



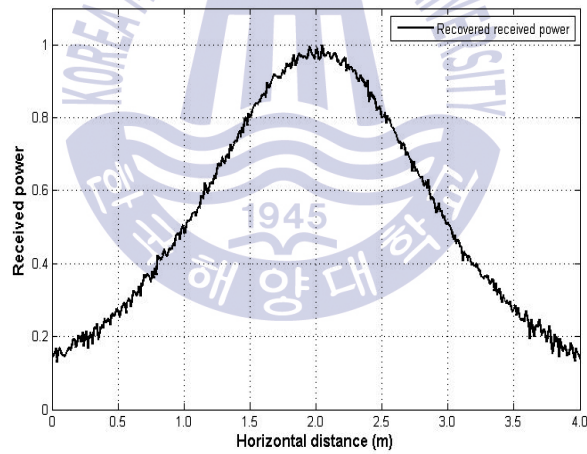
(c)

그림 4.1 수평 거리  $r$ 에 따른 수신 전력  $P_{Rx}$ 의 특성 분포: (a)  $P_{desired\_Rx}$  특성 곡선, (b)  $P_{est\_Rx}$  특성 곡선, (c)  $P_{recoverd\_Rx}$  특성 곡선

Fig. 4.1 Received power  $P_{Rx}$  distribution for horizontal distance  $r$ : (a)  $P_{desired\_Rx}$  characteristic curve, (b)  $P_{AWGN\_Rx}$  characteristic curve, (c)  $P_{recoverd\_Rx}$  characteristic curve



(a)



(b)

그림 4.2 외부 빛의 영향에 따른 수신 전력  $P_{Rx}$ 의 특성 관계:(a)  $P_{est\_Rx}$  특성 곡선, (b)  $P_{recoverd\_Rx}$  특성 곡선

Fig. 4.2 Received power  $P_{Rx}$  distribution for external light:(a)  $P_{AWGN\_Rx}$  characteristic curve, (b)  $P_{recoverd\_Rx}$  characteristic curve

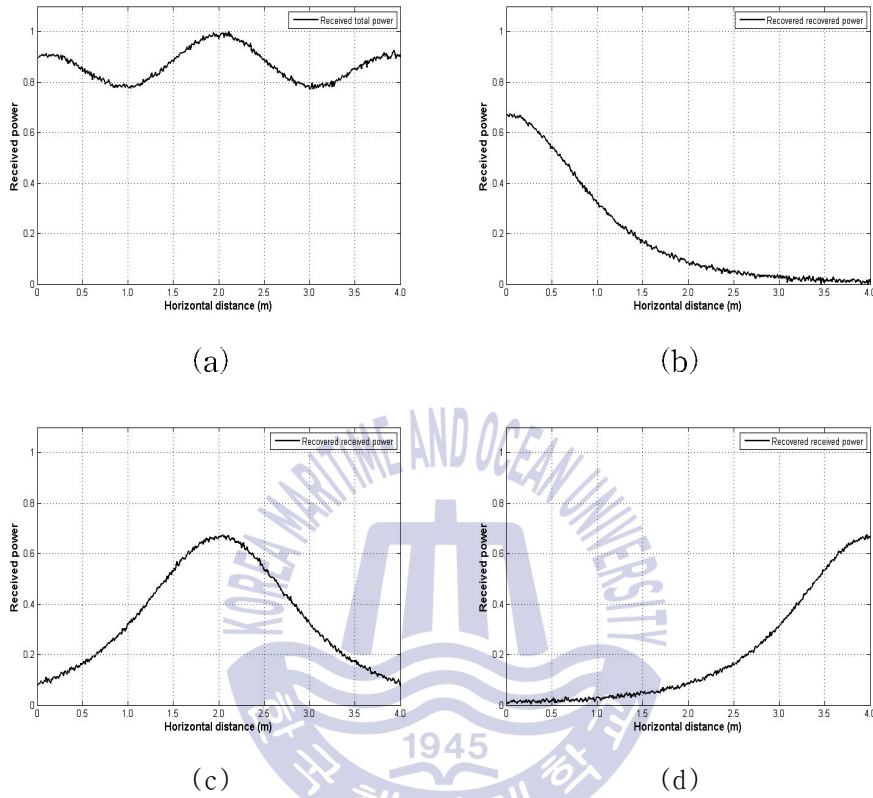
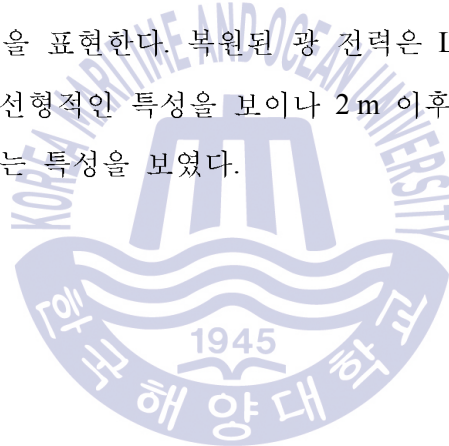


그림 4.3 수평거리  $r$ 에 따른 수신 전력  $P_{Rx}$ 의 특성 관계: (a) 수신 광 총 전력  $P_{total\_Rx}$  특성 곡선, (b) 광 전력  $P_{recoverd\_Rx}^1$  특성 곡선, (c) 복원된 광 전력  $P_{recovered\_Rx}^2$  특성 곡선, (d) 복원된 광 전력  $P_{recovered\_Rx}^3$  특성 곡선

Fig. 4.3 Received power  $P_{Rx}$  distribution for horizontal distance  $r$ : (a)  $P_{total\_Rx}$  characteristic curve, (b)  $P_{recoverd\_Rx}^1$  characteristic curve, (c)  $P_{recovered\_Rx}^2$  characteristic curve, (d)  $P_{recovered\_Rx}^3$  characteristic curve

두 번째 시뮬레이션 결과는 그림 4.3에 나타내었고 그림 4.3(a)는 측정된 수신 광 총 전력  $P_{total\_Rx}$  특성 곡선, 그림 4.3(b)는 복원된 광 전력  $P_{recoverd\_Rx}^1$  특성 곡선, 그림 4.3(c)는 복원된 광 전력  $P_{recovered\_Rx}^2$  특성 곡선이며, 그림 4.3(d) 복원된 광 전력  $P_{recoverd\_Rx}^3$  특성 곡선을 나타낸다.

그림 4.4는 각각의 복원된 수신 전력을 거리로 계산한 결과를 나타낸다. LED 1은 복원된 광 전력  $P_{recoverd\_Rx}^1$  에 따라 계산된 거리  $r_{calculated}^1$  의 특성 곡선, LED 2는 복원된 광 전력  $P_{recovered\_Rx}^2$  에 따라 계산된 거리  $r_{calculated}^2$  의 특성 곡선 및 LED 3은 복원된 광 전력  $P_{recoverd\_Rx}^3$  에 따라 계산된 거리  $r_{calculated}^3$  의 특성 곡선을 표현한다. 복원된 광 전력은 LED 조명과 수신기의 거리  $r$ 이 2 m 까지 선형적인 특성을 보이거나 2 m 이후 잡음에 의하여 측정 오차가 점차 심해지는 특성을 보였다.



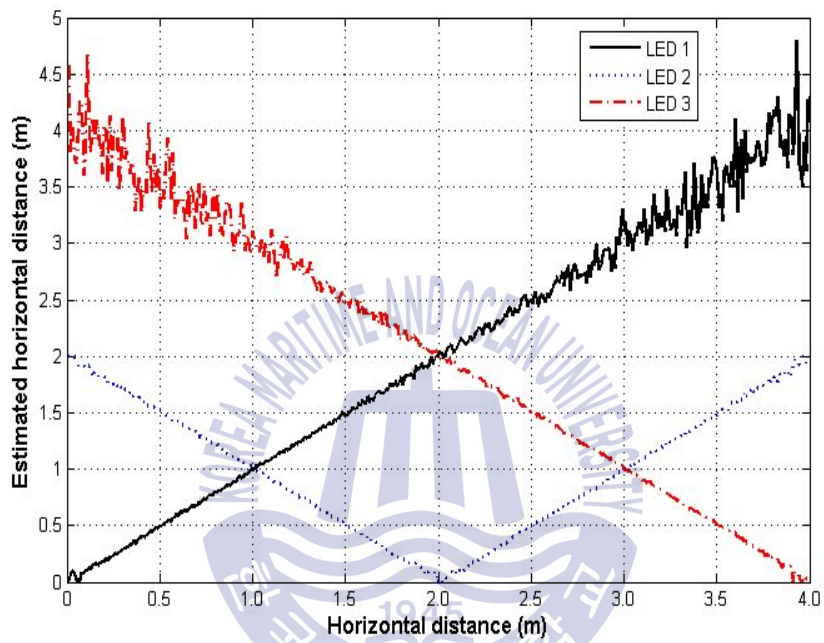


그림 4.4 실제 수평거리에 대한 측정된 수평거리

Fig. 4.4 Estimated horizontal distance for real horizontal distance

마지막으로, 세 번째 시뮬레이션 결과는 그림 4.5에 나타난다. 제안한 알고리즘의 실내 위치 인식의 측위 오차 결과는 최대 오차 0.2977 m, 평균 0.0536 m로 높은 측위 정밀도를 보인다. LED 조명과 수신기 사이의 거리가 멀어지게 되면 수신된 신호의 세기가 약해져서 신호대비 잡음비가 커지게 되어 오차가 발생한다.

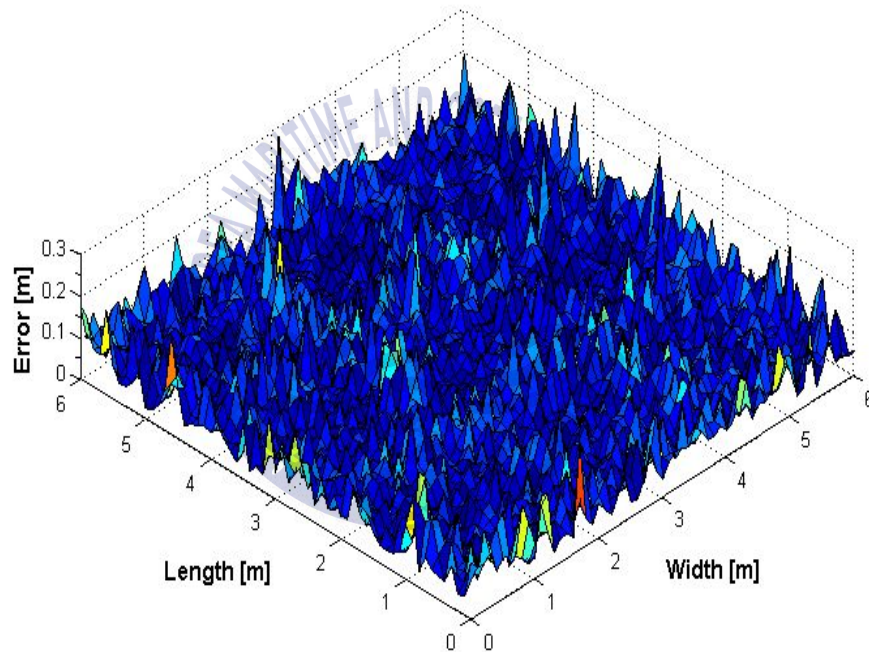


그림 4.5 제안한 실내 위치 인식의 측위 오차 결과

Fig. 4.5 Result of proposed indoor localization error

3차원일 경우 제안한 방식을 이용하여 일정한 신호 세기일 때의 높이 별로 측정을 하게 되면 그림 4.6과 같이 표현된다. 수신기의 실제 위치는 (2, 2, 1.5)이며, 측정된 위치는 (2.0263, 2.5094, 1.5018)라는 결과가 나왔다. MSE(Mean Squared Error)는 0.0279 m 정도로 높은 측위 정밀도를 보였다.

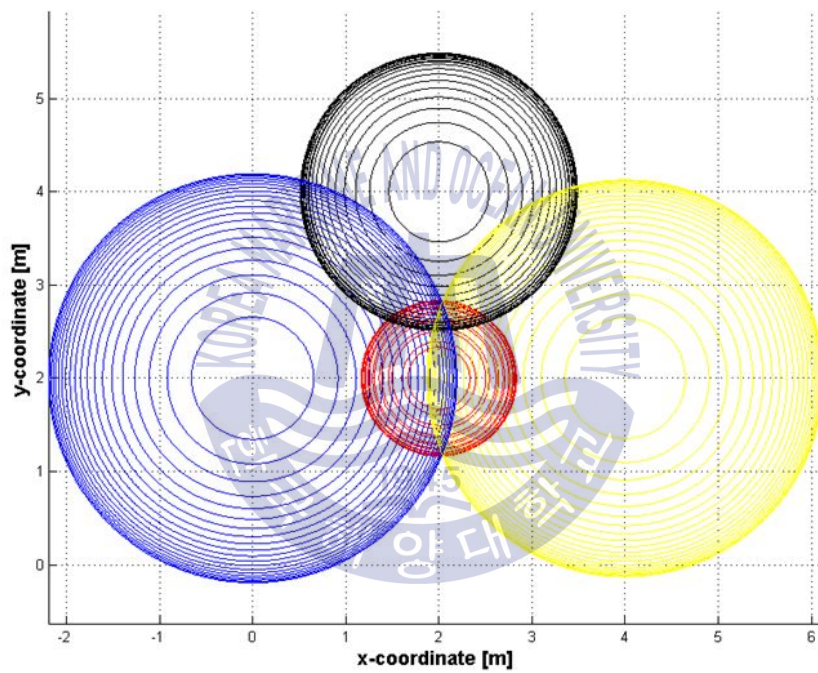


그림 4.6 제안한 3차원 실내 위치 인식의 측위 오차 결과

Fig. 4.6 Result of proposed three dimensional indoor localization error

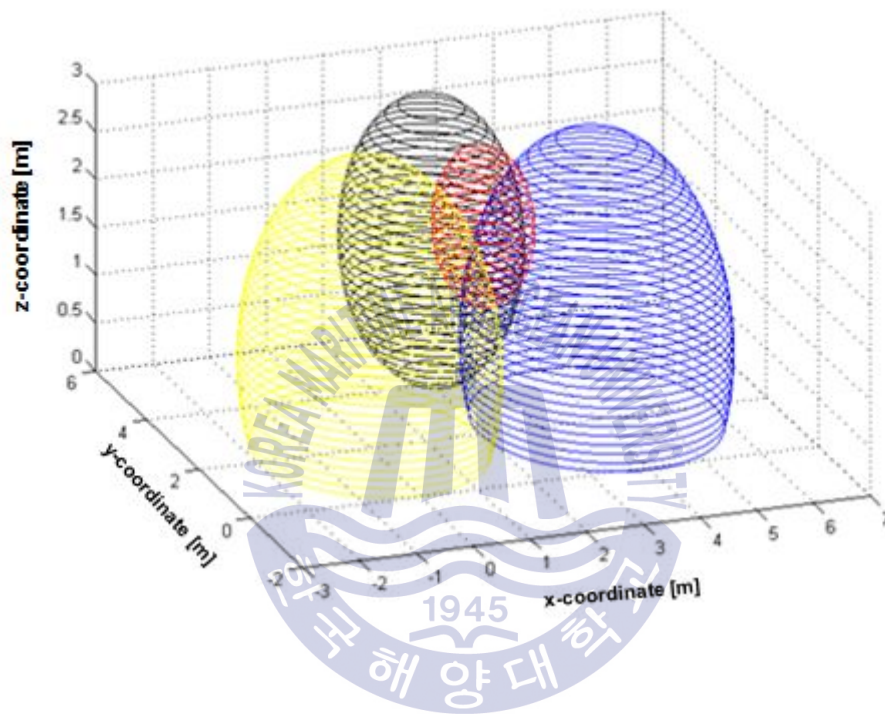


그림 4.7 제안한 3차원 실내 위치인식의 측위 오차 결과

Fig. 4.7 Result of proposed three dimensional indoor localization error



## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 Walsh code를 이용한 Manchester code 기반 가시광 통신 실내 위치인식하는 시스템을 제안하였다. 시뮬레이션을 통하여 LED 조명의 송신 신호 생성, 각각의 LED 조명의 수신 광 출력으로 복원하는 방법 및 수신된 광 출력을 거리로 복원하여 삼변측량 기법을 이용하여 위치 측위 가능하였다.

제안한 시스템은 Flicker, Dimming 현상에 대해 고려하여 Manchester code를 사용하여 제어가 가능하였다. 특히, Walsh code를 이용하여 LED 조명들의 중첩되어 있는 신호 구간에서도 직교성을 이용하여 수신된 광 출력은 개별적인 LED 조명의 광 출력을 수신 할 수 있었다. 아울러 외부 빛에 대한 간섭으로 인한 영향에서도 기존의 방식보다 제안한 시스템이 강인한 모습을 보여주었다. 제안한 알고리즘의 실내 위치 인식의 측위 오차 결과는 최대 오차 0.2977 m, 평균 0.0536 m로 높은 측위 정밀도를 확인하였다. 또한 기존의 높이의 정보를 알고 있어야 하지만 제안한 방식은 3차원 위치인식으로 높이까지 측정이 가능하였다.

이 연구를 통하여 건물, 공장과 공공장소 등의 실내에서도 LED 조명 인프라만 구축 되어 있다면 향후 정밀한 위치 인식이 가능하여 LBS (Location based service)에 적용에 유용하게 쓰일 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. H. Koo and K. I. Hwang, "A Koreans' consciousness survey on the onboard safety of domestic passenger ship," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 38, no. 4, pp. 495-501, 2014 (in Korean).
- [2] K. I. Hwang, "Comparative study on predictions of passengers' evacuation performances before and after the remodelling of MV SEWOL," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no.1, pp. 105-114, 2014 (in Korean).
- [3] W. O. Kim, J. S. Kim, and W. C. Park, "Improvement of citadel structure on board ship using FDS," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 3, pp. 306-311, 2015 (in Korean).
- [4] W. O. Kim, J. S. Kim, and W. C. Park, "A study on the improvement of survival rate of the passengers and crews according to FDS Analysis," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 3, pp. 312-317, 2015 (in Korean).
- [5] H. J. Kwon, H. S. Yang, and S. G. LEE, "Site monitoring of crews and passengers on board by the BLE and PLM combination," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 4, pp. 463-467, 2015 (in Korean).
- [6] G. W. Yim, S. H. Lee, S. Y. Kim, and N. S. Kang, "Development of unified communication for marine VoIP service," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 7, pp. 744-753, 2015 (in Korean).
- [7] H. J. Kwon, M. G. Kim, Y. S. Kim, and S. G. Lee, "Lifetime test of batteries for BLE modules for site identification of vessel's crews and passengers (SIVCP)," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 7, pp. 754-759, 2015 (in Korean).
- [8] F. Donovan, "Indoor location market to reach \$4 billion in 2018," Online. FierceMobileIT. [Online]. Available:

- <http://www.fiercemobileit.com/story/indoor-location-market-reach-4-billion-2018-predicts-abi/2013-10-18>, Accessed November 28, 2013.
- [9] P. Harrop, Online. IDTechEx. [Online]. Available: <http://www.idtechex.com/research/articles/mobile-phone-indoor-positioning-systems-create-10bn-market-00006207.asp>, Accessed September 15, 2014.
- [10] Daryl C. Plummer, Top 10 Strategic Predictions for 20 15 and Beyond Digital Business Is Driving ‘Big Change, Gartner [Online]. Available: <https://www.gartner.com/doc/2864817?ref=unauthreader&srcId=1-3478922254>, Accessed October 16, 2015.
- [11] H. Koyuncu and S. H. Yang, “A survey of indoor positioning and object locating systems,” *International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 10, no. 5, pp. 121-128, 2010.
- [12] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, “Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, 2007.
- [13] I. Bisio, F. Lavagetto, M. Marchese, and A. Sciarrone, “Performance comparison of a probabilistic fingerprint-based indoor positioning system over different smartphones,” *International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS)*, pp. 161-166, 2013.
- [14] L. Pei, R. Chen, J. Liu, T. Tenhunen, H. Kuusniemi, and Y. Chen, “Inquiry-based bluetooth indoor positioning via rssi probability distributions,” *Second IEEE International Conference on Advances in Satellite and Space Communications (SPACOMM)*, pp. 151-156, 2010.
- [15] J. H. Seong, T. W. Lim, J. S. Kim, S. G. Park, and D. H. Seo, “An improvement algorithm for localization using adjacent node and distance variation analysis techniques in a ship,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 2, pp. 213-219, 2013 (in Korean).
- [16] J. H. Kim, S. G. Lee, J. S. Kim, J. W. Kim, and D. H. Seo, “A study

- on indoor navigation system using localization based on wireless communication,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 1, pp. 114-120, 2013 (in Korean).
- [17] J. H. Seong, J. S. Park, S. H. Lee, and D. H. Seo, “Indoor localization algorithm based on WLAN using modified database and selective operation,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 8, pp. 932-938, 2013 (in Korean).
- [18] H. J. Cho, J. S. Kim, S. G. Lee, J. W. Kim, and D. H. Seo, “Fixed node reduction technique using relative coordinate estimation algorithm,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 2, pp. 220-226, 2013 (in Korean).
- [19] J. H. Kim, H. J. Kim, J. S. Kim, S. G. Lee, and D. H. Seo, “An indoor localization approach using RSSI and LQI based on IEEE 802.15.4,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 38, no. 1, pp. 92-98, 2014 (in Korean).
- [20] J. H. Kim, H. J. Kim, J. S. Kim, S. G. Lee, and D. H. Seo, “Relative azimuth estimation algorithm using rotational displacement,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 188-194, 2014.
- [21] H. J. Cho, S. G. Lee, W. H. Cho, D. S. Noh, and D. H. Seo, “Self-positioning fusion system based on estimation of relative coordinates,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 38, no. 5, pp. 566-572, 2014.
- [22] J. H. Kim, J. H. Sung, Y. S. Ha, and D. H. Seo, “Improved Adaptive Smoothing Filter for Indoor Localization Using RSSI,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 2, pp. 179-186, 2015.
- [23] H. J. Cho, W. Y. Kim, Y. I. Joo, and D. H. Seo, “Robust Relative Localization Using a Novel Modified Rounding Estimation Technique,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 2, pp. 187-194, 2015.

- [24] K. R. Sohn, "A study on the short-range underwater communication using visible LEDs," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 4, pp. 425-430, 2013 (in Korean).
- [25] K. R. Sohn, "Performance analysis of the visible light communication in seawater channel," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 5, pp. 527-532, 2013 (in Korean).
- [26] M. S. Kim and K. R. Sohn, "Implementation of underwater visible light communication system interlinked with bluetooth," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 38, no. 7, pp. 923-928, 2014 (in Korean).
- [27] M. S. Kim and K. R. Sohn, "Performance Investigation of Visible Light Communication Using Super Bright White LED and Fresnel Lens," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 63-67, 2015 (in Korean).
- [28] K. R. Sohn, "Implementation of the Equalization Circuits for High Bandwidth Visible Light Communications Using Phosphorescent White LED," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 4, pp. 473-477, 2015 (in Korean).
- [29] K. Pahlavan, X. Li, and J. P. Makela, "Indoor geolocation science and technology," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 2, pp. 112-118, 2002.
- [30] T. H. Do and M. Yoo, "TDOA-based indoor positioning using visible light," *Photonic Network Communications*, vol. 27, no. 2, pp. 80-88, 2014.
- [31] S. H. Yang, D. R. Kim, H. S. Kim, Y. H. Son, and S. K. Han, "Visible light based high accuracy indoor localization using the extinction ratio distributions of light signals," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 55, no. 6, pp. 1385-1389, 2013.
- [32] D. Y. Kim and K. Y. Yi, "RSSI-Based Indoor Localization Method Using Virtually Overlapped Visible Light," *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers* vol. 63, no. 12, pp. 697-1703,

2014 (in Korean).

- [33] P. Luo, Z. Ghassemlooy, H. L. Minh, A. Khalighi, X. Zhang, M. Zhang, and Y. Changyuan, "Experimental demonstration of an indoor visible light communication positioning system using dual-tone multi-frequency technique," 3rd IEEE International Workshop in Optical Wireless Communications (IWOW), pp. 55-59, 2014.
- [34] S. Yamaguchi, V. V. Mai, T. C. Thang, and A. T. Pham, "Design and performance evaluation of VLC indoor positioning system using optical orthogonal codes," 5th IEEE International Conference on Communications and Electronics (ICCE), pp. 54-59, 2014.
- [35] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using led lights," IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 50, no. 1, pp. 100-107, 2004.
- [36] TIA/EIA/IS-95 Interim Standard, "Mobile station-base station compatibility standard for dual-mode wide-band spread-spectrum cellular system," Telecommunications Industry Association, 1993.
- [37] H. J. Kim, D. H. Seo, K. I. Hwang, and T. W. Lim, "Hierarchical security system using real-valued data and orthogonal code in Fourier domain," Optics communications, vol. 313, pp. 15-21, 2014.