

## LED의 조도를 기반으로 삼각측량법을 사용한 물체 위치 계측 시스템

사공병일<sup>1</sup> · 김남호<sup>2\*</sup>

### Object Position Measuring System using Trilateration Method based on Illuminance of LED

Byung-Il Sagong<sup>1</sup> · Nam-Ho Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. student, Department of Intelligent Robot Eng., Pukyong National University, Busan, 48513 Korea

<sup>2\*</sup>Professor, School of Electrical Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513 Korea

#### 요 약

본 논문에서는 발광 다이오드(LED)의 조도를 기반으로 삼각측량법을 사용한 위치 계측 시스템을 제안한다. 세 개의 LED는 가상공간의 천장에 위치하고 각각의 고정 좌표는 모니터링 프로그램에 입력하여, 조도 값과 길이의 관계식을 통해 각각 LED로부터 조도 센서까지의 길이를 도출하였다. 도출된 길이를 바탕으로 삼각측량법을 사용해 가상공간의 물체 위치 정보를 검출하였다. 삼각측량법으로 도출된 길이의 오차를 최소화하기 위해 최소자승법을 이용하여 오차를 최대한으로 줄였다. 기존의 가시광통신(VLC)을 이용한 실내 위치 측정시스템과는 달리, 제안된 시스템은 송신기와 수신기 사이의 동기화가 필요치 않으므로 시스템을 간결하게 구성할 수 있다.

#### ABSTRACT

In this paper, we propose a position measuring system using trilateration based on the illuminance of a light-emitting diode (LED). Three LEDs are located on the ceiling of the virtual space, and each fixed coordinate is inputted to the monitoring program, and Length to the illuminance sensor is drawn through the relational expression of the length and illuminance value from the respective LED. Based on the derived length, the trilateration method is used to find object location information in virtual space. By using the least square equation to minimize the error of the length drawn to trilateration, the error is reduced to the utmost. Unlike the existing indoor positioning system using visible light communication (VLC), the proposed system does not require synchronization between the transmitter and the receiver, so the system can be configured simply.

**키워드** : LED, VLC, 삼각측량법, 최소자승법, 위치 계측 시스템

**Keywords** : LED, VLC, Trilateration, Least square method, Position measuring system

Received 26 November 2021, Revised 4 January 2022, Accepted 21 February 2022

\* Corresponding Author Nam-Ho Kim(E-mail:nhk@pknu.ac.kr, Tel:+82-51-629-6328)

Professor, School of Electrical Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.3.449>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

위치 계측 시스템에는 초음파 시스템, 적외선 시스템 또는 비디오 기반 위치 확인 시스템 등이 있다. 이들 대부분은 위치 추적의 정확도 향상, 시스템 인프라 설치의 추가비용 및 서비스 영역 확장 등이 필요하다. 그러므로 이들 요구 사항을 충족시키는 새로운 위치 추적시스템이 병원, 비행기, 원자력 발전소 등 다양한 방면에서 활용되기 위해 연구가 진행되고 있다. 특히, 친환경 분야인 LED 조명과 무선기술의 융합으로 새로운 서비스를 개선하기 위한 가시광 통신에 관한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다[1-2]. 종래의 위치 추적시스템은 위치 추정의 오류, 고비용 인프라 또는 제한된 서비스 영역과 같은 문제점이 있다[3-4].

평면상에서 이동하는 개체의 실시간 위치를 파악하는 가장 보편적인 방법으로는 삼각측량법이 있다. 삼각측량법은 세 개의 기준점으로부터의 거리를 측정하여 대상 위치를 파악한다. 이는 광신호의 도착 시간(TOA: time of arrival), 도착 시간차(TDOA: time difference of arrival) 및 광 전력 수신 신호강도(RSS: received signal strength)를 통해 위치를 측정한다[5-7]. 이러한 거리측정법 중 도착 시간(TOA) 또는 도착시간차(TDOA)는 수신기와 송신기 사이에 엄격한 동기화 클럭 주기를 필요로 한다[8-9]. 또한, 인접한 LED에서 오는 신호의 간섭을 완화하기 위해 캐리어 할당, 시간 할당, 또는 파장 할당 기술 등이 사용되고 있다[10-12]. 또한, 가시광통신(VLC)의 경우, 송신기에서 전송된 LED로부터의 광도(luminous intensity)는 거리가 증가함에 따라 감소된다. 포토다이오드(PD)에 전송된 광전류도 광도에 비례한다. 따라서 임의 개체  $S_e(x_e, y_e, z_e)$ 의 위치측정은 수신된 광도와 기준 LED 광도를 비교함으로써 측정할 수 있다[13].

기존의 포토다이오드를 이용하는 경우 실제 수신기에서 입력 신호를 측정할 때에는 수신 신호의 신호 대 잡음 비(SNR: signal to noise ratio)에 의해 발생하는 오차, 수신기의 양자화에 따른 오차 등 송수신기 사이에 엄격한 동기화 클럭 주기를 필요로 하므로 입력 신호 측정에 어려움이 있다. 데이터 전송 거리 면에서도 VLC의 전송 거리(약 10m)가 주위 환경의 제약에 크게 영향을 받을 뿐만 아니라 Wi-Fi(약 32m)에 비해 짧은 점 등 상용화 측면에서 해결해야 할 과제가 많다. 이러한에도

수신 신호강도 알고리즘이 거리 감쇄 인자와 관련되므로 LED의 광 전력 수신 강도가 다른 방법보다 더 나은 정확도를 얻는 것으로 밝혀지고 있다[14].

신호 대 잡음 비(SNR)에 의해 발생하는 오차, 수신기 양자화에 따른 오차, 송수신기 사이에 엄격한 동기화 클럭 주기가 필요하기 때문에 입력 신호 측정 등의 문제점을 개선하고자 LED 광 전력 소광비의 패턴이 LED 조도(illuminance)의 변화와 유사한 점에 착안하여 수신기의 광 전력 신호강도를 사용하는 대신, 위치 추정지점에서의 LED 광원에 대한 조사 강도(irradiation intensity)를 이용하였다[15]. 즉, LED 빛을 조도센서로 조도 값을 측정함으로써 수신기로서의 기능을 대신하고자 하였다.

가상공간의 천장에 부착된 세 개의 발광 다이오드(LED)의 좌표 정보를 모니터링 시스템에 입력하였다. 그리고 임의 위치에서의 LED 조도 값을 측정 및 수집하였다. 이들 정보를 바탕으로 조도 값의 변동에 따른 환산된 거리를 삼각측량법을 이용해 실내공간에서 정확한 위치 정보를 찾아내는 것이 본 연구의 목적이다.

## II. 위치 측정

### 2.1. 삼각측량법

일반적으로 실시간 위치 측정시스템(real time location system)에서 평면상에 이동하는 개체의 실시간 위치를 측정하는 가장 보편적인 방법은 삼각측량법이다[16]. 위치 측정을 위해선 최소 세 개 이상의 기준점이 필요하다. 그림 1에서  $P_1, P_2, P_3$ 는 고정 좌표를 의미하고 본 논문에서는  $L_1, L_2, L_3$ 에 해당한다. 또한, 임의좌표는  $P_s(x_s, y_s)$ 로 표현되었고, 본 논문에서는  $S_e(A_e, B_e)$ 에 해당한다.

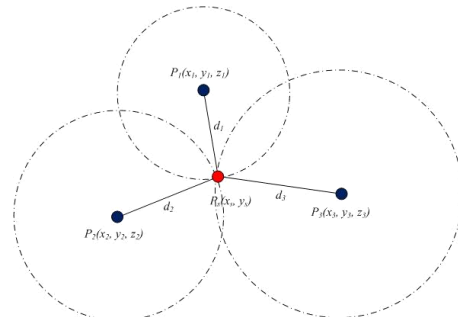


Fig. 1 Conceptual diagram of trilateration method

본 논문의 물체 위치 계측 시스템에서 LED의 위치가 기준좌표가 된다. 각각의 LED가 가지는 좌표를  $L_1 = (x_1, y_1, z_1)$ ,  $L_2 = (x_2, y_2, z_2)$ , 그리고  $L_3 = (x_3, y_3, z_3)$  라고 정의한다. 물체의 위치는  $S_e = (A_e, B_e)$  이다.  $S_e$  로 부터 각 LED 간의 거리를  $d_1, d_2, d_3$  라고 정의한다. 다음 식 (1) ~ (3)은  $d_1, d_2, d_3$  를 나타낸다.

$$d_1 = \sqrt{(x_e - x_1)^2 + (y_e - y_1)^2 + (z_e - z_1)^2} \quad (1)$$

$$d_2 = \sqrt{(x_e - x_2)^2 + (y_e - y_2)^2 + (z_e - z_2)^2} \quad (2)$$

$$d_3 = \sqrt{(x_e - x_3)^2 + (y_e - y_3)^2 + (z_e - z_3)^2} \quad (3)$$

각 LED의 위치 좌표는 Li-Fi를 통해 전송된 각 LED ID에 해당하는 좌표 데이터를 PC에서 불러온다. 물체의 위치  $S_e$  를 찾기 위해 식 (1) ~ (3)의 연립방정식을 통해 선형 방정식을 구할 수 있다.  $L_1, L_2$  그리고  $L_3$ 의 높이는 모두 동일하고,  $z_e$ 의 값은 0 이므로 최종적으로 두 개의 선형 방정식으로 나타낼 수 있다. 두 개의 선형 방정식을 연립하여 각각  $A, B$  그리고  $S_e$ 의 행렬로 표현하고  $B = A \cdot S_e$ 으로 나타낼 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{bmatrix}, S_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{(d_1^2 - d_2^2 + x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2)}{2} \\ \frac{(d_1^2 - d_3^2 + x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2)}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

측정된 조도 값에 따른 거리( $d_1, d_2, d_3$ )와  $L_1, L_2, L_3$ 의 좌표 정보를 행렬  $A \cdot S_e = B$ 에 대입한다. 따라서 물체의 위치 좌표  $S_e$ 는 다음 식으로 표현되며 이를 이용해서 위치 좌표를 알 수 있다[17-18].

$$S_e = (A^T \cdot A)^{-1} A^T \cdot B \quad (6)$$

## 2.2. 비선형 최소자승법

물체의 위치에 대한 조도는  $L_1, L_2, L_3$ 의 방사각과 조도 센서의 입사각 및 송·수신 간의 거리 등이 조도 값에 영향을 미친다. 따라서 물체의 위치에 있어서 조도 값에 따른 거리 상관관계를 보여주는 특정식이 필요하다. 특

정식을 만들기 위해 조도 센서의 입사각이  $90^\circ$ 인 평면 상에서 지정한  $x-y$  평면의  $45^\circ$ 축 방향으로의 조도 값에 대한 거리 관계식이 만들어진다. 이때 측정오차를 줄이기 위해 비선형 최소 자승법을 이용한다[19].

$N$ 개의 측정점  $(A_1, B_1), (A_2, B_2), \dots, (A_e, B_e)$ 이 얻어질 때, 측정 데이터에 대한 상관관계를 가장 비슷하게 나타내는 식이 비선형이라면 다음 직선의 식  $y$ 로 나타낼 수 있다. 이때  $A$ 와  $B$ 는 각각  $x, y$ 축 좌표를 의미한다.

$$y = \frac{\alpha}{\beta + x} = \frac{\alpha}{\beta} - \frac{1}{\beta}xy = a + bu \quad (7)$$

$$a = \frac{\alpha}{\beta}, b = -\frac{1}{\beta}, u = xy \quad (8)$$

식 (7)은 직선의 방정식  $Ax = b$ 를 선형시스템으로 나타낸 것이다. 식 (8)은 식 (7)에 해당하는 변수를 나타낸 것이다. 측정된 값과 비선형식에서 얻어진 값과의 오차는 다음과 같다.

$$e_i = Y_i - y_i = Y_i - (a + bu_i) \quad (9)$$

$$S(a, b) = \left( \sum_{i=1}^N Y_i - (a + bu_i) \right)^2 \quad (10)$$

$e_i$ 의  $i$ 는 1부터  $N$ 까지의 상수이며, 최소자승오차  $S$ 는  $a$ 와  $b$ 에 관한 함수로 나타낼 수 있다. 이때, 최소자승오차  $S$ 가 너무 크면 최소자승식의 의미가 없어진다. 최소자승오차  $S$ 는  $a$ 와  $b$ 의 함수이므로  $S$ 가 최소가 되기 위한 조건은 변수  $a, b$ 에 대한  $S(a, b)$ 의 편미분 값이 모두 0일 때 이므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \sum_{i=1}^N Y_i - aN - b \sum_{i=1}^N u_i = 0 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N Y_i = aN + b \sum_{i=1}^N u_i \quad (12)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = \sum_{i=1}^N Y_i u_i - a \sum_{i=1}^N u_i - b \sum_{i=1}^N u_i^2 = 0 \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^N Y_i u_i = a \sum_{i=1}^N u_i + b \sum_{i=1}^N u_i^2 \quad (14)$$

최소자승오차를 최소로 만드는  $a, b$ 의 값은 식 (12), (14)를 이용하여 구한다. 식 (8)에  $a, b$ 의 값을 대입하면  $\alpha, \beta$ 의 값을 알 수 있다. 이들  $\alpha, \beta$  값을 다시 식 (7)에 대

입하면 비선형 방정식  $y = \alpha / (\beta + x)$ 가 만들어진다. 이 때, 비선형 방정식에 조도 값을 대입하면 길이를 도출할 수 있다.

### III. 실험 내용

#### 3.1. 실험방법

본 논문의 위치 계측 시스템은 크게 세 가지로 구성되어 있다. LED는 백색광 파장을 가지며 각각의 위치는 위치 계측 시스템에서 기준좌표가 된다. 조도센서는 LED의 조도 값을 측정하기 위해 사용된다. 조도 값을 측정하기 위해 하나의 LED만 켜진 상태에서 진행한다. 각 LED는 기준 좌표에 고정되어 있기 때문에 세 개의 LED를 특정하지 않아도 구분이 가능하다. Arduino는 LED와 조도센서를 제어하는 역할을 한다.

조도값을 측정하기 위해서는 가로, 세로, 높이 50cm의 정육면체 가상 공간이 필요하다. LED는 가상공간의 천장에 부착되어 기준 좌표가 된다. LED의 위치들을 이어보면 정삼각형이 되는데, 이는 정확한 실험을 위해서이다.

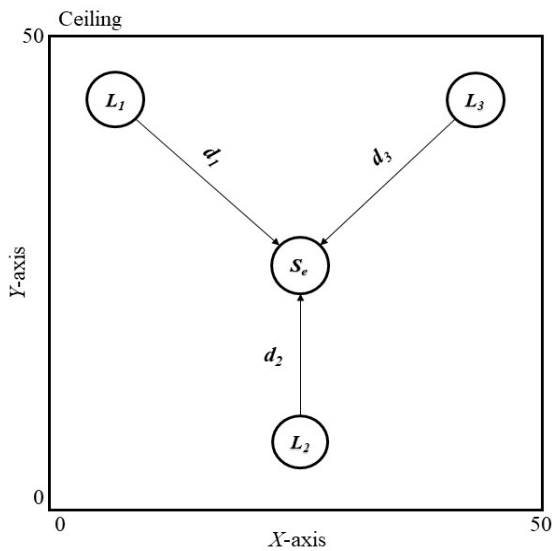


Fig. 2 Layout of positioning system

$L_1 = (5, 40, 50)$ ,  $L_2 = (45, 40, 50)$ ,  $L_3 = (25, 5.359, 50)$ 에 각각 위치하고 있다. 임의 위치  $S_e$ 의  $z$ 축은 0 이므로 생략 가능하다.

비선형 최소 자승식에 의해 산출된 값  $d_1, d_2, d_3$ 를 PC에 전송하고, 전송된 값으로부터 삼각측량법을 이용해서 좌표를 산출하고, 산출된 좌표를 PC 화면에  $x, y$  좌표로 표시하였다. PC 화면에는 Arduino로부터 전달 받은 정보가 나타나며, 데이터는  $L_1, L_2, L_3$ 의 좌표와 그로부터의 길이  $d_1, d_2, d_3$ 를 나타내었다. 산출된 좌표 값을 모니터링의 이미지로 표현하여 이동한 위치에 대한 좌표 변화를 관찰하였다. 실험은 각각의 LED  $L_1, L_2, L_3$ 로부터 측정점  $S_{e(e=1, \dots, 9)}$ 까지 측정하였다.

#### 3.2.1. LED

본 논문에서 사용된 LED는 3.6[W]의 고출력 광원으로 광도는 29.5[cd]이며, 색 온도 4000K, 백색광 파장 가진 LED를 사용했다. 표 1은 LED의 제품 사양이다.

Table. 1 Photo resistor specifications

| OSRAM golden dragon series LED |                 |
|--------------------------------|-----------------|
| Forward voltage[V]             | 3.7             |
| Luminous intensity[cd]         | 29.5            |
| Luminous flux[lm]              | 52 - 97         |
| Dimensions[mm]                 | 7.2 × 6.2 × 1.9 |
| Colour temperature[K]          | 4000            |
| Forward current[mA]            | 1000            |
| Viewing angle[°]               | 120             |

#### 3.2.2. 조도센서(IC2 VEML7700)

조도센서가 부착된 Arduino Uno를 통해  $x-y$ 평면의 45° 축 방향으로 조도값을 수집하는데 16bit 측정용 조도센서가 사용되며, 그 사양은 표 2와 같다.

Table. 2 Photo resistor specifications

| IC2 VEML7700 Photo resistor (0~120 Klx) |         |
|---|---------|
| Supply voltage[V]                       | 3.3 - 5 |
| Working current[μA]                     | 45      |
| Accuracy[lx/ct]                         | 0.0036  |
| Dimensions[mm]                          | 30 × 22 |
| Measuring range[Klx]                    | 0 - 120 |
| Wide range[Klx]                         | 0 - 167 |
| Shutdown mode[μA]                       | 0.5     |

#### IV. 실험 결과

그림 3은 실제값과 환산값의  $x-y$  평면상의 위치 및 위치좌표를 나타내고 있다. 실제값은  $x-y$  평면상의 위치좌표를 나타내었고, 환산값은 조도 변화에 따른 거리의 환산치를 삼각측량법을 통해 얻어진 물체의 위치좌표이다.

표 3은 LED에서 측정점까지의 실제거리와 조도변화에 의해 환산된 거리의 오차율 중 일부를 나타내고 있다. 오차율은 측정점까지의 실제거리와 조도변화에 의해 환산된 거리 두 결과에 대한 상대 오차이다. 그리고 표에서 거리를 약 50~69cm로 제한한 이유는 모든 길이가 50cm인 직육면체의 가상공간에서 최대 측정할 수 있는 범위이기 때문이다.

표 4는 그림 3의 실제 위치와 환산값에 의한 위치를 정확한 수치로 나타낸 것이다.

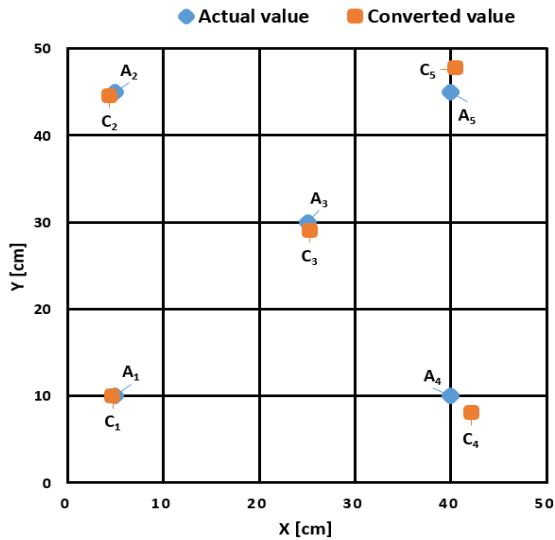


Fig. 3 Points of actual value and converted value

실험을 통해 거리에 따른 조도값은 하락한다는 것을 알 수 있었다. LED의 방사각과 조도 센서에 대한 입사각 등 고려해야 할 외부 요인들이 많이 포함되어 있기 때문에 외부 환경 조건들을 최대한 배제하고 정확한 측정을 위한 실험을 진행하였다. 피타고라스의 정의에 의해 LED로부터 측정점까지의 길이를 알아내기 위해서  $x-y$  평면의  $45^\circ$  축 방향으로 측정하였다. 또한, 측정된 조도값은 10회 반복 측정된 값의 평균값이다. 위 실험을

통해 조도 센서를 활용한 새로운 측위 시스템 기법이 더욱 간편하고 양호한 위치 측정 시스템으로서 응용가능성이 있음을 발견하였다.

Table. 3 Error rate between actual value and converted value

| Actual value[cm] | Converted value[cm] | Error rate[%] |
|------------------|---------------------|---------------|
| 50.37            | 50.51               | 0.28          |
| 50.71            | 51.26               | 1.07          |
| 51.01            | 50.84               | 0.33          |
| 58.33            | 54.46               | 7.11          |
| 60.79            | 60.18               | 1.01          |
| 61.13            | 62.00               | 1.40          |
| 64.59            | 65.40               | 1.24          |
| 64.62            | 64.27               | 0.54          |
| 68.97            | 67.52               | 2.15          |

Table. 4 Coordinate of actual value and converted value

| Actual value     | Converted value        |
|------------------|------------------------|
| $A_1 = (5, 10)$  | $C_1 = (4.80, 9.88)$   |
| $A_2 = (5, 45)$  | $C_2 = (4.48, 44.43)$  |
| $A_3 = (25, 30)$ | $C_3 = (25.38, 28.92)$ |
| $A_4 = (40, 10)$ | $C_4 = (42.14, 8.04)$  |
| $A_5 = (40, 45)$ | $C_5 = (40.55, 47.72)$ |

그러나 설치에 용이하고 비용 절감에 효과적이라는 장점 외에 송신기와 수신기 사이의 동기화가 필요하지 않는 대신에 LED의 방사각과 조도 센서의 입사각, 외부 물체 또는 그림자에 의한 빛 차단으로 조도 측정 불가 등의 단점들에 대한 고려해야 할 사항들이 많다.

#### V. 결론

기존의 가시광 통신을 이용하는 실내 측위 시스템은 Wi-Fi, BLE beacon등을 이용하는 연구들이 있다. 이러한 신호를 이용한 방식은 세 가지 문제점이 있다[20]. 첫째, 인접한 장소에 있는 신호가 서로 뒤바뀌는 현상이 발생할 수 있다. 둘째, 인식 위치의 환경에 따른 다양한 위치 오차범위가 달라질 수 있다. 셋째, 주변 장애물이 신호의 왜곡을 일으키기 때문에 정확도가 떨어질 수 있다. 하지만, 제안된 시스템은 송신기와 수신기 사이의 동기화가 필요하지 않으면서 신호를 이용하는 것이 아

닌 빛의 파장을 이용하기 때문에 기존의 방식들 보다 정확도가 높다.

이로부터 수신기의 광 전력 신호강도(RSS)를 사용하는 대신, LED의 조도 값을 활용하는 새로운 위치 측정 시스템 기법이 기존의 VLC보다 위치 추적시스템에 응용 시 더욱 간편한 방법임을 확인하였다. 하지만 여전히 고려해야 할 사항들이 많이 있기 때문에 완전히 기존의 가시광 통신을 대체하기엔 어려움이 있다.

이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 LED 광원에 대한 재현성을 높이는 데에 초점을 둔 연구가 선행되어야 한다. 이러한 문제들이 해결되면 이동 물체에 대한 위치 측정 시스템에 응용될 수 있으리라 생각된다.

## REFERENCES

- [ 1 ] S. I. Eom, J. S. Ko, K. Shin, and B. An, "Machine Learning-based Text Error Correction System for Multicast Visible Lighting Communication," *The Institute of Electronics and Information Engineers*, pp. 3-16, Nov. 2020.
- [ 2 ] H. S. Kim and J. Ryeom, "Visible Light Communication System with LEDs using Digital Dimming Scheme," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, no. 10, pp. 1230-1235, Oct. 2019.
- [ 3 ] J. Cho, "A Position Tracking System Using Pattern Matching and Regression Curve," *Journal of Digital Convergence*, vol. 17, no. 12, pp. 211-217, Dec. 2019.
- [ 4 ] J. S. Kin, Y. K. Kim, and G. C. Hoang, "A Study on Indoor Position-Tracking System Using RSSI Characteristics of Beacon," *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, vol. 17, no. 5, pp. 85-90, Oct. 2017.
- [ 5 ] H. J. Mun, H. Y. Jeong, and K. H. Han, "Improved Trilateration Method on USN for reducing the Error of a Moving Node Position Measurement," *Journal of Digital Convergence*, vol. 15, no. 5, pp. 301-307, May. 2016.
- [ 6 ] K. Lee and J. Lim, "A Positioning Algorithm Using Virtual Reference for Accuracy Improvement in Relay-Based Navigation System," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 40, no. 10, pp. 2102-2112, Oct. 2015.
- [ 7 ] J. Parras, S. Zazo, I. A. Perez-Alvares, and J. L. S. Gonzales, "Model Free Localization with Deep Neural Architectures by Means of an Underwater WSN," *Sensors*, 2019.
- [ 8 ] S. H. Oh and J. G. Kim, "WiFi Positioning Based on PSO in 3GPP Indoor Environments," *Korea Institute Of Communication Sciences*, vol. 46, no. 9, pp. 1440-1448, Sep. 2021.
- [ 9 ] W. Y. Kim, H. C. Zin, J. C. Kim, D. S. Noh, and D. H. Seo, "A study on 3-D indoor localization based on visible-light communication considering the inclination and azimuth of the receiver," *The Korean Society of Marine Engineering*, vol. 40, no. 7, pp. 647-654, Sep. 2016
- [10] K. J. Choi, K. J. Kim, and K. S. Kim, "Joint Spatial Division and Reuse for Maximizing Network Throughput in Densely-Deployed Massive MIMO WLANs," *Korea Institute Of Communication Sciences*, vol. 40, no. 3, pp. 469-477, Mar. 2015
- [11] S. J. Jung and S. C. Chang, "A variable TTI allocation scheme for control overhead reduction," *Korea Institute Of Communication Sciences*, pp. 1245-1246, 2016.
- [12] Y. M. Hong, J. H. Lee, and T. H. Han, "WDM/TDM-Based Channel Allocation Methodology in Optical Network-on-Chip," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 52, no. 7, pp. 40-48, Jul. 2015.
- [13] O. Yazar and S. Gezici, "Optimal pulse design for visible light positioning systems," *Signal Processing*, vol.191, Feb, 2022.
- [14] R. Niwareeba, M. A. Cox, and L. Cheng, "PAPR Reduction in Optical OFDM Using Lexicographical Permutations With Low Complexity," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 1706-1713, 2022.
- [15] S. H. Kim, "4th Industry and Li-Fi Technology Trend," *Korea Institute of Information Technology Magazine*, vol. 15, no. 2, pp. 1-13, Dec. 2017.
- [16] B. S. Lee and S. W. Kim "A Study on Self-Localization of Home Wellness Robot Using Collaboration of Trilateration and Triangulation," *Institute of Korean Electrical and Electronics Engineers*, vol. 18, no. 1, pp. 57-63, 2014.
- [17] J. Li, X. Yue, J. Chen, and F. Deng, "A Novel Robust Trilateration Method Applied to Ultra-Wide Bandwidth Location Systems," *Sensors*, vol. 17, no. 4, 2017.
- [18] L. Cheng, Y. Li, M. Xue, and Y. Wang, "An Indoor Localization Algorithm Based on Modified Joint Probabilistic Data Association for Wireless Sensor Network," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*, vol. 17, no. 1, pp. 63-72, Jan. 2021.
- [19] J. W. Chang, T. S. Kim, and S. J. Lee, "Performance Analysis of TDOA-based Multilateration System with Linear Least Square Method," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 43, no. 01, Jan. 2018.
- [20] D. J. Kim, C. G. Hwang, and C. P. Yoon, "Learning data

preprocessing technique for improving indoor positioning performance based on machine learning,” *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 24, No. 11, pp. 1528-2533, Nov. 2020.



**사공병일(Byung-Il Sagong)**

2019년 8월 부산대학교 기계공학부 제어자동화시스템전공 공학석사  
2021년 3월~현재 부경대학교 대학원 지능로봇공학과 박사과정  
※관심분야: 영상처리(로봇), 통신시스템, IoT 융합



**김남호(Nam-Ho Kim)**

제11권 1제호 참조  
1992년 3월~현재 부경대학교 공과대학 전기공학부 교수  
※관심분야: 영상처리, 통신시스템, 적응필터와 웨이브렛을 이용한 잡음제거 및 신호복원