

실내 VLC 통신에서 다중수신기를 이용한 RSS/AOA 위치 추적 기법

김재현*, 임재성°, 백호기*

RSS/AOA Positioning Scheme Using Multiple Receivers in Indoor VLC Communications

Jaehyeon Kim*, Jaesung Lim°, Hoki Baek*

요약

GPS는 터널이나 실내 환경에서 사용 불가능하기에 다양한 실내 측위 방식 중 하나로 LED를 이용한 시스템이 주목받고 있다. 최근 단일 LED 환경에서 다수의 가시광 센서로 구성된 수신기를 이용하여 RSS(Received Signal Strength) 기반의 실내 측위 기법이 제안되었다. 그러나 이 기법은 입사각의 정확한 값을 아는 것으로 가정하기 때문에 실제 환경에서 운용 불가능하다는 문제점이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 단일 LED 송신기와 4개의 광센서로 구성된 수신기 환경에서 RSS와 AOA(Angle Of Arrival)를 결합한 실내 측위 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 수신기의 각 광센서에 투영된 이미지를 기반으로 입사각을 측정하여 LED와 각 센서 간 의사거리를 추정하고 LSM(Least Square Method) 알고리즘으로 수신기의 위치를 결정한다. 실내 시뮬레이션 환경에서 입사각 변화에 따른 위치 추정 성능 검증을 통해 제안하는 기법의 활용 가능성을 입증하였다.

Key Words : Indoor positioning, VLC, RSSI, AOA, Multiple receivers

ABSTRACT

Since GPS is not available in tunnels or indoor environments, the systems using LEDs are drawing attention as one of the various indoor positioning methods. Recently, an indoor positioning technique based on RSS(Received Signal Strength) has been proposed using a receiver consisting of multiple visible light sensors in a single LED environment. However, there is a problem that this technique cannot be operated in a real environment because the angle of incidence is assumed to be an accurate value. Therefore, in this paper we propose an indoor positioning technique that combines RSS and AOA (Angle of Arrival) in a receiver environment consisting of a single LED transmitter and a receiver consisting of four optical sensors. In the proposed technique, the angle of incidence is measured based on the image projected from each optical sensor of the receiver to estimate the distance between the LED and each sensor and determine the location of the receiver with the LSM (Least Square Method) algorithm. The validity of the proposed technique was proved through location estimation performance verification according to the change in the angle of incidence in the indoor simulation environment.

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었음 (UD190033ED).

• First Author : Ajou University Department of Military Digital Convergence, kjae0525@naver.com, 정회원

° Corresponding Author : Ajou University Department of Military Digital Convergence, jaslim@ajou.ac.kr, 종신회원

* Kyungpook National University School of Computer Science and Engineering, neloyou@knu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202204-058-B-RE, Received April 21, 2022; Revised June 13, 2022; Accepted July 6, 2022

I. 서 론

UAV(Unmanned Aerial Vehicle)는 뛰어난 기동성과 작은 크기, 저렴한 가격으로 인해 많은 관심을 받고 있다. 특히 소형 UAV는 실내에서 운용될 수 있을 정도로 작은 크기이기 때문에 실내 환경 조사 및 측량, 감시 및 정찰, 물품 관리 등 다양한 서비스에 적용하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다^[1]. 이러한 서비스를 수행하기 위해서는 UAV의 위치정보를 정확하게 파악할 필요가 있지만, UAV의 위치정보는 GPS(Global Positioning System)와 같은 위성항법시스템에 의존하고 있다.

그러나 GPS 신호는 장애물이 존재하는 환경에서는 위치정확도가 떨어지고, 특히 신호가 차단되는 터널이나 건물 내부에서는 정확한 위치 정보를 얻는 것이 불가능하다. 이를 해결하기 위하여 RFID, Infrared, Ultrasonic 그리고 WLAN과 같은 다양한 방식의 실내 측위 시스템이 연구되고 있지만, 추가적인 인프라, 큰 측정 오류, 좁은 추적 범위, 전자기 간섭, 낮은 보안, 긴 응답 시간 및 낮은 확장성 등의 제한점이 있다^[2-5].

한편 백색 발광 다이오드(LED)는 수명이 길고 조명 효율성이 우수해서 최근 널리 사용되고 있다. 또한 LED는 반도체의 특성을 갖기 때문에 쉽게 변조할 수 있어서 통신시스템에 적합하다. LED VLC(Visible Light Communication)는 이러한 이점을 활용하여 나온 통신시스템으로 조명과 통신을 진행하기 때문에 전자기 간섭과 같은 문제를 발생시키지 않는다. 따라서 조명, 방송, 감지 네트워크 및 지능형 전송 시스템과 같은 다양한 분야에서 연구되어왔다^[6].

그중에서도 VLC 기반의 실내 측위 시스템 또한 많은 연구가 이루어지고 있고 최근에 RSS(Received Signal Strength) 기반의 단일 송신기와 다중 수신기를 사용하는 실내 측위 시스템이 제안되었다^[7]. LED의 좌표, 수신기 내 센서들의 배치정보를 알고 있을 때 센서에서 수신한 RSS를 활용하여 LED와 수신센서의 의사거리를 추정하여 수신기의 위치를 결정하는 방식이다. 하지만 해당 연구에서는 수신기 내 각 센서로 들어오는 입사각을 정확하게 알고 있다는 가정하에 위치를 추정하는 방식이다. 따라서 수신기 내 각 센서에서 입사각이 변하는 실제 환경에서는 입사각 추정이 불가능하여 운용이 제한된다.

따라서 본 논문에서는 단일 LED 송신기와 4개의 센서로 구성된 수신기 환경에서 RSS와 입사각 추정이 가능한 실내 측위 기법을 제안한다. 이를 위하여

제안 기법에서는 수신기 내 센서의 렌즈 중심을 통과한 광선이 투사되는 이미지 평면에서 수신좌표를 측정하여 센서의 입사각을 계산한다. 이렇게 각 센서에서 측정된 입사각을 기반으로 LED와 각 센서 간의 사거리를 추정한다. 수신기는 4개의 센서에서 측정된 입사각과 의사거리를 기반으로 LSM(Least Square Method) 알고리즘을 수행하여 위치 좌표를 결정한다. 따라서 제안하는 측위 시스템은 입사각과 의사거리를 실측하여 결정할 수 있기에 이동하는 환경에서도 효과적으로 운용될 수 있다. 제안하는 모델의 성능을 분석하기 위해 시뮬레이션 환경을 구성하였다. LED와 수신기 사이의 거리 및 입사각 변화에 따른 위치 추정 성능 검증을 통해 제안하는 기법의 타당성을 입증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 LED를 이용한 VLC의 특성 및 VLC 측위 시스템에 대한 설명을 제시하고, 3장에서는 제안하는 기법의 알고리즘을 설명한다. 4장에서는 성능 분석 환경을 제시하고 시뮬레이션을 통해 제안한 기법의 성능을 분석한다. 마지막으로, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

2.1 LED를 이용한 VLC의 특성

최근에 가시광선 신호를 활용하는 LED 기반 통신 시스템이 주목받고 있다. LED를 빠르게 끄고 켜는 동작으로 “1”과 “0”의 정보를 전송할 수 있고 이를 이용하여 통신하는 시스템이 VLC 시스템이다. 이렇게 응용 시스템으로 발전할 수 있는 이유는 LED에 다양한 장점이 있기 때문이며 이러한 기능은 다음과 같다. 고속 무선 데이터 전송을 위한 고대역폭(100MHz) 환경에서 통신이 진행되며 광검출기의 샘플링 속도는 최대 수십 MHz에 이를 수 있다. 빛은 불투명한 장애물을 통과할 수 없기에 VLC 시스템은 공간에 따라서 독립적으로 운용 가능하며 보안성 또한 높다^[8].

VLC 시스템은 크게 송신기와 수신기 부분으로 나누어진다. 송신기의 경우 디지털 신호를 아날로그 신호로 변조하기 위해 변환기가 장치되어야 하고 해당 신호를 LED를 통해 방사하기 위해서는 OOK(On-Off Keying)와 같은 변조 방식이 적용되어야 한다. 추가로 인간의 눈에 안전한 색온도와 밝기를 지녀야 하고 본 논문에서는 이러한 조건을 만족하는 CL-1W-UWB LED를 사용한다. 수신기의 경우 입력받은 광신호의 세기가 센서와 LED 사이의 거리 제곱에 비례하기 때문에 안정적인 통신을 위해서는 충분한 수준의 감도

를 지닌 장치가 필요하다. 또한 센서가 입력받을 수 있는 광학 스펙트럼이 정해져 있기에 LED의 신호를 받기 위해서는 가시광선 영역의 스펙트럼을 감지할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 이러한 조건을 만족하는 Hamamatsu S6801 PD를 사용한다⁹⁾.

2.2 VLC 기반의 실내 측위 시스템

VLC 기반의 실내 측위 시스템은 실내에 설치된 조명을 이용하여 수신기의 위치를 보다 정확하게 찾을 수 있는 유망한 기술이다. RSS를 기반으로 단일 센서가 다중 LED와의 거리를 추정하고 삼변 측량을 이용해 수신기의 위치를 찾는 기법은 단순성 때문에 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 시스템의 경우 LED 사이의 간섭 현상을 극복해야 하기에 측정 시간이 지연되거나 측정 정확도가 떨어진다는 문제점이 있다.

이러한 문제점을 고려하여 기존 연구²⁾에서는 LOS(Line-Of-Sight) 환경에서 RSS 기반의 단일 송신기와 다중 센서를 사용하는 실내 측위 시스템을 제안한다. 단일 LED를 사용함으로써 다른 LED와의 간섭을 근본적으로 제거하고 정확도를 향상했다. LED와 센서 사이의 전송 거리는 수신된 신호 세기에 의해 결정된다. 수신기는 측정한 전송 거리와 기준에 알고 있던 LED의 좌표, 광수신기의 배열을 이용하여 수신기의 위치를 찾을 수 있다. 여기서 센서가 측정하는 광신호의 세기는 LED가 방사하는 빛의 각도와 광수신기가 빛을 수신하는 각도에 따라 그 값이 달라지는데 해당 연구에서는 이를 측정할 방법이 없어 정확한 값을 알고 있다고 가정하였다. 따라서 본 논문에서는 이 문제를 해결하고자 각 광센서에서 개별적으로 측정된 입사각을 반영할 수 있는 측위 시스템을 제안하고자 한다.

III. 제안 기법

그림 1은 제안하는 VLC 측위 시스템 모델이다. 송신기는 단일 LED이며 수신기는 4개의 광센서로 구성된다. 수신기의 위치 정보는 4개 광센서의 중앙값으로 정의한다. 4개의 센서는 각각 $Rx_i(i = 1, 2, 3, 4)$ 라고 정의하고 각 수신기에 대하여 측정되는 조사각(radiation angle) α_i 와 입사각(incidence angle) β_i , 거리 d_i 라고 정의한다. 각 센서는 수신기 내에 균일하게 위치하며 각 센서 사이의 거리는 s 로 가정한다. 또한 수신기는 기울어지지 않고 항상 지면과 수평을 이루는 환경에서 측정하였다.

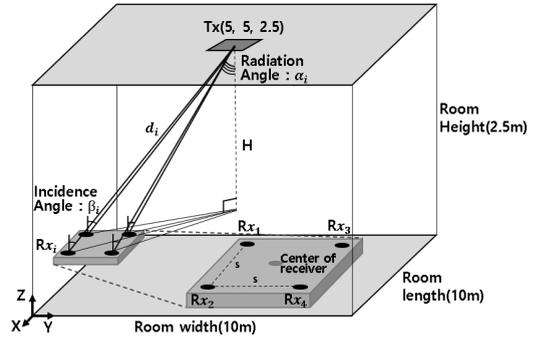


그림 1. 제안하는 VLC 측위 시스템 모델
Fig. 1. Proposed VLC positioning system model

3.1 수신 신호 세기 모델링

수신기의 i 번째 센서에서 수신된 광 전력은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_r = (P_t / d_i^2) R_0(\alpha_i) A_{eff}(\beta_i) \quad (1)$$

여기서 P_r 은 LOS를 통해 수신된 광학 전력이며 P_t 는 평균 광 전력, d_i 는 송신기와 수신기의 광센서 i 사이의 전파 거리를 나타낸다. $R_0(\alpha_i)$ 는 조사각 α_i 에 의한 전송 복사강도(radiant intensity)를 나타내며 $A_{eff}(\beta_i)$ 는 입사각 β_i 에 의한 유효 수신 면적(effective received area)을 나타낸다.

(1)에서 $R_0(\alpha_i)$ 와 $A_{eff}(\beta_i)$ 는 LED와 광수신기의 렌즈 모양에 따른 이득값으로 정의할 수 있다. 따라서 (1)은 다음과 같이 변경된다.

$$P_r = (P_t / d_i^2) C_{opt} G_t(\alpha_i) G_r(\beta_i) \quad (2)$$

여기서 C_{opt} 는 복사되는 광선이 수신기의 표면을 투과하는 강도를 나타내는 광 전력 상수이다. $G_t(\alpha_i)$ 는 조사각 α_i 에 따른 송신 이득값이며 $G_r(\beta_i)$ 는 입사각 β_i 에 따른 수신 이득값이다. 이득값은 Lambertian order 모델에 따라 결정되지만, 정확도를 높이기 위해 본 논문에서는 다음식으로 주어지는 지수형태(exponential) 모델을 이용한다²⁾.

$$G_t(\alpha_i) = \exp(-\alpha_i^S / k_t), G_r(\beta_i) = \exp(-\beta_i^S / k_r) \quad (3)$$

위 식에서 S_t 와 S_r 은 수신기와 송신기의 렌즈 형태에 의해 결정되는 기울기 상수이다. k_t 와 k_r 은 조사각

α_i 와 입사각 β_i 의 반각(semi-angles)인 $\alpha_{1/2}$ 와 $\beta_{1/2}$ 에 표현되며 모든 센서에 일정하게 다음식과 같이 나타낼 수 있다²⁾.

$$k_t = (\alpha_{1/2})^S / \ln(1/2), k_r = (\beta_{1/2})^S / \ln(1/2) \quad (4)$$

송신기는 항상 하향으로 광선을 조사하며 수신기 또한 기울어지지 않고 지면과 수평을 이루는 것으로 가정하기에 조사각 α_i 와 입사각 β_i 의 크기는 항상 일정하게 표현된다^{2),10)}.

3.2 수신 센서에서의 입사각 추정

카메라에 초점이 맞춰져 있는 경우 LED에서 방사된 빛은 카메라 이미지 평면에 픽셀의 형태로 투영된다. Z_f 는 렌즈의 중심으로부터 이미지 평면까지의 거리를 나타낸다. 양면 볼록렌즈의 경우 렌즈를 통과하더라도 추가적인 굴절이 일어나지 않아 그림 2와 같이 표현할 수 있다.

광선이 입사하는 각도를 측정하는 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_i = \arctan\left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{Z_f}\right) \quad (5)$$

LED로부터 렌즈 중심을 통과한 광선이 이미지 평면에 도달한 좌표를 $i_1(a, b, Z_f)$ 이라고 했을 때 입사각 β_i 는 (5)와 같이 구할 수 있다. 이는 수신기가 항상 수직으로 고정되어 있다는 것을 고려하면 입사각 β_i 는 항상 조사각 α_i 와 값이 같음을 알 수 있다⁷⁾.

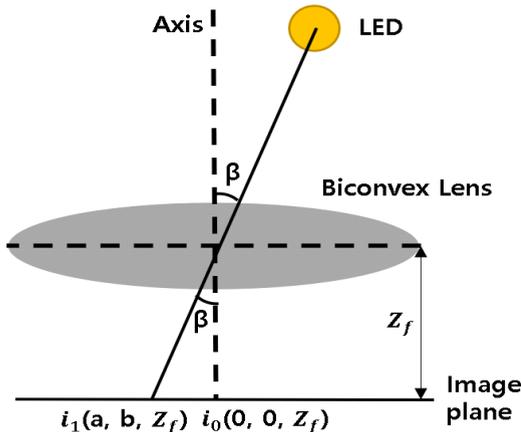


그림 2. 입사각 측정 모델
Fig. 2. Incident angle measurement model

3.3 LSM 기반 3차원 위치 좌표 추정

수신기의 정밀한 위치 추적을 위해 LED와 센서들 사이의 거리를 이용하여 LSM을 수행한다. 센서 i 의 좌표와 LED의 좌표가 각각 $Rx_i(x_i, y_i, z_i)$, (L_x, L_y, L_z) 라고 할 때 LED로부터 센서 i 까지의 거리는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d_i = \sqrt{(L_x - x_i)^2 + (L_y - y_i)^2 + (L_z - z_i)^2} \quad (6)$$

d_i 와 d_j 의 차이를 P_{ij} 라고 할 때 다음과 같이 표현할 수 있다($i \neq j \neq k$).

$$P_{ij} = d_i - d_j \quad (7)$$

LSM을 이용하여 좌표를 추정하기 위해서는 2개 이상의 선형 방정식이 필요하기에 다음과 같이 식을 전개하여 선형 방정식을 만든다.

$$\begin{aligned} P_{ij}^2 - P_{ik}^2 &= d_i^2 + d_j^2 - 2d_i d_j - d_i^2 - d_k^2 - 2d_i d_k \\ &= (L_x^2 + x_j^2 - 2L_x x_j) + (L_y^2 + y_j^2 - 2L_y y_j) \\ &\quad - (L_x^2 + x_k^2 - 2L_x x_k) - (L_y^2 + y_k^2 - 2L_y y_k) \\ &\quad + (L_z - z_j)^2 - (L_z - z_k)^2 - 2d_i P_{jk} \end{aligned} \quad (8)$$

상수로 주어진 항들은 좌변으로, 미지수가 포함되어 있는 항들은 우변으로 이항시킨다.

$$\begin{aligned} &\frac{P_{ij}^2 - P_{ik}^2 - (L_z - z_j)^2 + (L_z - z_k)^2}{2P_{jk}} \\ &= \frac{x_j^2 - x_k^2 + y_j^2 - y_k^2}{2P_{jk}} \\ &\quad - \frac{2L_x(x_j - x_k) + 2L_y(y_j - y_k)}{2P_{jk}} - d_i \end{aligned} \quad (9)$$

그림 1과 같이 센서가 분포되어 있을 때 센서의 위치는 수신기의 중심(C_x, C_y, C_z)과 센서 간 거리 s 로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_i &= C_x + \frac{\cos\left(\frac{(2i-1)\pi}{4}\right)}{\sqrt{2}} s \\ y_i &= C_x + \frac{\sin\left(\frac{(2i-1)\pi}{4}\right)}{\sqrt{2}} s \end{aligned} \quad (10)$$

위의 식을 (9)에 대입하면 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{P_{ij}^2 - P_{ik}^2 - (L_z - z_j)^2 + (L_z - z_k)^2 + 4L_y s}{2P_{jk}} = \frac{4C_y s}{2P_{jk}} - d_i = b_{jk} \quad (11)$$

예측하고자 하는 수신기의 중심 좌표를 행렬식, $\bar{X} = \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix}$ 라고 할 때 다음과 같은 선형 식으로 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} b_{ij} - b_{ik} &= \frac{2s}{P_{ij}} C_x + \frac{2s}{P_{ik}} C_y \\ &= \left[\frac{2S}{P_{ij}} \quad \frac{2S}{P_{ik}} \right] \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} \\ &= [a_{ij} \ a_{ik}] \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{12} - b_{13} \\ b_{12} - b_{23} \\ b_{12} - b_{14} \\ b_{12} - b_{24} \\ b_{13} - b_{14} \\ b_{13} - b_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{23} \\ a_{12} & a_{14} \\ a_{12} & a_{24} \\ a_{13} & a_{14} \\ a_{13} & a_{34} \end{bmatrix} \bar{X} = A \bar{X} \quad (13)$$

위의 식에서 \bar{X} 는 의사역행렬을 통해 구할 수 있다.

$$\bar{X} = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (14)$$

위와 같이 LSM을 통해 수신기의 위치정확도를 정밀하게 계산할 수 있다^[11].

IV. 성능 분석

4.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션 환경은 시스템 모델인 그림 1과 같이 구성되어 있으며 광 전력과 LED 좌표를 포함하는 신호를 방 전체에 방사하고 있다. 방의 크기는 가로 5m, 세로 5m, 높이 2.5m이며 수신기는 가로 0.4m, 세로 0.4m의 정사각형 모양이다. 본 시뮬레이션에 사용한 LED 및 PD의 파라미터는 표 1과 같다²⁾.

또한 LED와 수신기의 중심 사이 거리를 d, LED와 수신기 중심 사이의 각도를 α 로 정의한다. 시뮬레이

표 1. LED 및 PD의 파라미터
Table 1. Parameters of LED and PD

Parameter	Value
Room Size (m^3)	5 x 5 x 2.5
LED model	CL-1W-UWB LED
$P_t C_{opt}$ ($cm^4 \cdot mW$)	7.8×10^3
$\alpha_{1/2}$ (deg)	55
S_t	1.6
PD model	Hamamatsu S6801
Area of PD (mm^2)	1.0
$\beta_{1/2}$ (deg)	22
S_r	2.3

션에서 수신기 내 각 센서의 입사각 β_i ($i = 1, 2, 3, 4$)는 제안하는 방식으로 측정된 추정값이 이용되었다. 성능평가를 위한 시뮬레이션 파라미터는 표 2와 같다. 모든 시뮬레이션 결과는 30회 반복하여 평균한 것이며 LOS 환경만을 가정하였다.

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters

Parameter	Value
d (m)	(0.5, 1.5, 2.5)
α (m)	(0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80)
s (m)	(0.05, 0.10, 0.15, 0.20)
H (m)	2

4.2 시뮬레이션 결과 분석

그림 3은 α 의 변화에 따른 위치오차 결과이다. 수신기의 중심과 LED의 거리를 0.5m, 1.5m, 2.5m로 변경할 때 수신기 중심과 LED 사이의 각도를 α 로 정의하고 이 값을 변경하며 위치오차를 측정하였다. 수신기와 광원 사이의 거리는 오차의 크기에 크게 영향을 끼치지 못하지만 α 가 커짐에 따라 오차의 크기가 지속적으로 증가함을 확인할 수 있다. 또한 거리에 따른 오차의 크기는 α 가 커짐에 따라 증가함을 확인할 수 있다.

한편 수신기의 회전에 따른 성능평가를 위하여 회전 각도차를 ψ 로 정의하면 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4는 센서와 LED 사이의 거리를 1.5m로 고정하고 ψ 를 변경하며 측정된 위치오차를 보인다. α 가 0°인 경우, 즉 수신기 중심이 LED 바로 아래 위치하면 ψ 의 변화에 무관하고 α 의 증가에 따라 조금의 변화

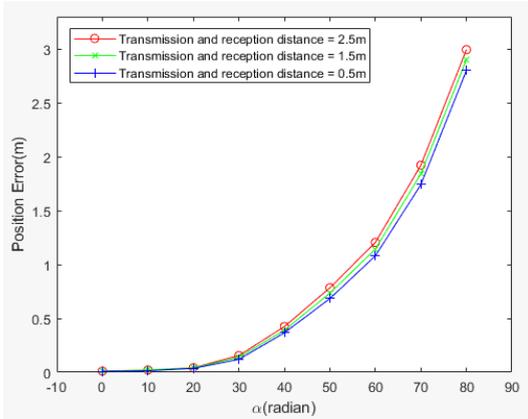


그림 3. 송수신거리 관점에서 α 의 변화에 따른 위치오차
Fig. 3. Position error according to change of α in terms of transmission and reception distance

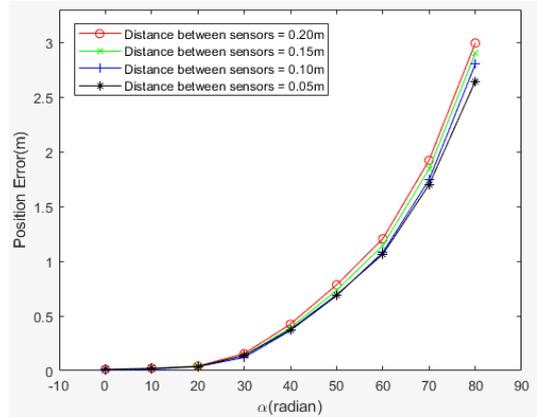


그림 5. 센서 사이의 거리 관점에서 α 의 변화에 따른 위치 오차
Fig. 5. Position error according to change of α in terms of distance between sensors

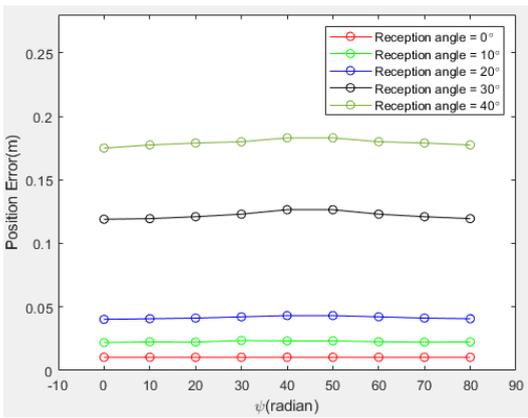


그림 4. 수신 각도 관점에서 ψ 의 변화에 따른 위치오차
Fig. 4. Position error according to change of ψ in terms of reception angle

는 있지만 ψ 의 변화에 따라 위치오차의 변화는 무시할 만큼 작다는 것을 확인하였다.

그림 5는 수신기와 광원 사이의 거리를 1.5m로 고정 한 후 α 를 변경하면서 얻은 위치오차 결과이다. 센서 사이의 거리 s 를 달리하면서 오차를 측정하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 센서 사이의 거리 s 가 작아짐에 따라 오차의 크기가 작아짐을 확인할 수 있다. 이는 센서마다 측정되는 입사각의 차이가 줄어들기 때문에 나타나는 결과이다.

그림 6은 H 를 1.5m로 고정하고 XY 평면에서 수신기의 위치를 달리하면서 얻은 위치오차 결과이다. XY 평면 좌표가 (1, 1)인 지점부터 (9, 9)를 총 81개의 지점으로 세분하여 오차를 측정하였다. 81개 전체 지점의 평균 위치오차는 0.3866m이다. 그림에서 보듯이

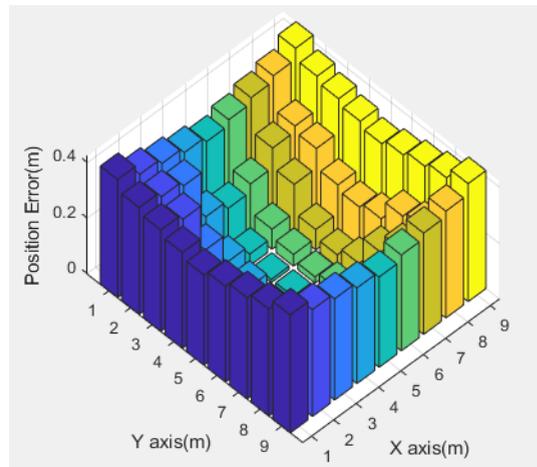


그림 6. 수신기의 높이를 고정했을 때 평면에서 위치오차
Fig. 6. Position error in the plane when the height of the receiver is fixed

수신기의 위치를 LED의 중앙에서 밖으로 이동하면 위치오차 값이 급속하게 증가한다. 만약 α 를 45° 이내로 제한한 위치에서 측정하면 평균 위치오차는 0.0542m로 cm 단위의 위치 추정 정확도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문은 단일 LED 송신기와 다중 센서로 구성된 수신기를 이용하는 실내 위치추정기법을 제안하였다. 수신기 내부 4개의 광센서에서 측정된 입사각과 LED와 각 센서 간 의사거리를 활용하여 LSM 기반으로

수신기의 위치를 추정한다. 실내공간 $5 \times 5 \times 2.5(m^3)$ 시뮬레이션 환경에서 LED와 수신기 사이의 거리 및 입사각 변화에 따른 위치오차 도출하여 추정 정확도를 평가하였다. 특히 입사각이 45° 이내에서는 cm 단위의 높은 정확도를 나타내는 것을 확인하였다.

VLC 통신 기반 측위 기법은 광센서의 물리적 특성에 따라 영향이 크기 때문에 향후 실제 구현을 통한 제한 알고리즘의 실증 및 광신호의 잡음 및 왜곡 등을 고려한 광통신 모델링 및 통계적 신호 분석 연구가 필요하다.

References

- [1] B. R. Stojkoska, J. Palikrushev, K. Trivodaliev, and S. Kalajdziski, "Indoor localization of unmanned aerial vehicles based on RSSI," *IEEE EUROCON 2017 - 17th Int. Conf. Smart Technol.*, pp. 120-125, Aug. 2017.
(<https://doi.org/10.1109/EUROCON.2017.8011089>)
- [2] S. Yang, E. Jung, and S. Han, "Indoor location estimation based on LED visible light communication using multiple optical receivers," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 9, pp. 1834-1837, Sep. 2013.
(<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2013.070913.131120>)
- [3] H. Sugiyama, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Brightness control methods for illumination and visible-light communication systems," *ICWMC'07*, pp. 78-78, Mar. 2007.
(<https://doi.org/10.1109/ICWMC.2007.26>)
- [4] T. J. Gallagher, B. Li, A. G. Dempster, and C. Rizos, "A sector-based campus-wide indoor positioning system," *2010 Int. Conf. Indoor Positioning and Indoor Navig.*, pp. 1-8, Nov. 2010.
(<https://doi.org/10.1109/IPIN.2010.5648250>)
- [5] R. F. Brena, J. P. García-Vázquez, and C. E. Galván-Tejada, "Evolution of indoor positioning technologies: A survey," *J. Sensors*, vol. 2017, Mar. 2017.
(<https://doi.org/10.1155/2017/2630413>)
- [6] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible light communication system using LED lights," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 50, no. 1, pp. 100-107, Mar. 2004.
(<https://doi.org/10.1109/TCE.2004.1277847>)
- [7] Y.-S. Kuo, P. Pannuto, K.-J. Hsiao, and P. Dutta, "Luxapose: Indoor positioning with mobile phones and visible light," in *Proc. 20th Annu. Int. Conf. Mobile Comput. and Netw.*, pp. 447-458, Sep. 2014.
(<https://doi.org/10.1145/2639108.2639109>)
- [8] Y. Zhuang, et al., "A survey of positioning systems using visible LED lights," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 20, no. 3, pp. 1963-1988, Feb. 2018.
(<https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2806558>)
- [9] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen, "What is LiFi?," *J. Lightwave Technol.*, vol. 34, no. 6, pp. 1533-1544, Mar. 2016.
(<https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2510021>)
- [10] H. Kim, D. Kim, S. Yang, Y. Son, and S. Han, "An indoor visible light communication positioning system using a RF carrier allocation technique," *J. Lightwave Technol.*, vol. 31, no. 1, pp. 134-144, Oct. 2013.
(<https://doi.org/10.1109/JLT.2012.2225826>)
- [11] H. Lee, J. Park, and J. Lim, "Estimation of surveillance radar location based on TDOA using a single UAV," *J. KICS*, vol. 46, no. 7, pp. 1120-1130, Jul. 2021.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.7.1120>)
- [12] M. S. Rahman, M. M. Haque, and K.-D. Kim, "High precision indoor positioning using lighting LED and image sensor," *14th ICCIT 2011*, pp. 309-314, Dec. 2011.
(<https://doi.org/10.1109/ICCITechn.2011.6164805>)
- [13] J. Luo, L. Fan, and H. Li, "Indoor positioning systems based on visible light communication: State of the art," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 19, no. 4, pp. 2871-2893, Aug. 2017.
(<https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2743228>)
- [14] W. Xu, J. Wang, H. Shen, H. Zhang, and X. You, "Indoor positioning for multiphotodiode

device using visible-light communications,” *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 1, pp. 1-11, Feb. 2016.

(<https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2513198>)

- [15] M. Yoshino, S. Haruyama, and M. Nakagawa, “High-accuracy positioning system using visible LED lights and image sensor,” *IEEE RWS '08*, Mar. 2008. (<https://doi.org/10.1109/RWS.2008.4463523>)

김 재 현 (Jaehyeon Kim)



2022년 2월 : 아주대학교 국방
디지털융합학과 학사
2022년 6월~현재 : 공군
<관심분야> 항법 및 측위, 무
선네트워크
[ORCID:0000-0002-4024-2675]

임 재 성 (Jaesung Lim)



1983년 2월 : 아주대학교 전자
공학 학사
1985년 2월 : KAIST 영상통신
석사
1994년 8월 : KAIST 디지털통
신 박사
1995년 9월~1998년 2월 : SK
텔레콤 중앙연구원 책임연구원
1998년 3월~현재 : 아주대학교 국방디지털융합학과
정교수
2006년 8월~현재 : 아주대학교 국방전술네트워크 연
구센터장
<관심분야> 이동 및 위성통신, 무선네트워크, 국방
전술통신
[ORCID:0000-0003-0080-9398]

백 호 기 (Hoki Baek)



2006년 2월 : 아주대학교 정보
컴퓨터공학 학사
2008년 2월 : 아주대학교 정보
통신공학 석사
2014년 2월 : 아주대학교 컴퓨
터공학 박사
2014년 3월~2015년 2월 : 아주
대학교 장위국방연구소 전임연구원
2015년 3월~2021년 2월 : 아주대학교 국방디지털융
합학과 강의교수
2021년 3월~현재 : 경북대학교 컴퓨터학부 조교수
<관심분야> 5G/6G, UAV 네트워크, V2X 통신,
IoT, 국방전술네트워크, 시간동기, 위치인식
[ORCID:0000-0001-9213-7845]