

실내 환경에서 가시광을 이용한 로봇의 위치 인식

Positioning of Robot using Visible Light in Indoor Environment

강인성¹, 민세웅², 남해운⁺

Insung Kang¹, Sewoong Min², Haewoon Nam⁺

Abstract In this paper, we propose a new method for improving the accuracy of localizing a robot to find the position of a robot in indoor environment. The proposed method uses visible light for indoor localization with a reference receiver to estimate optical power of individual LED in order to reduce localization errors which are caused by aging of LED components and different optical power for each individual LED, etc. We evaluate the performance of the proposed method by comparing it with the performance of traditional model. In several simulations, probability density functions and cumulative distribution functions of localization errors are also obtained. Results indicate that the proposed method is able to reduce localization errors from 7.3 cm to 1.6 cm with a precision of 95%.

Keywords Positioning, Localization Error, Reference Receiver, Visible Light

1. 서론

로봇을 자동으로 제어하기 위해서는 그 주변의 환경 정보를 얻고 유지하여 로봇의 위치를 알 수 있어야 한다. 위치를 추정하기 위하여 대표적으로 사용되는 것은 범지구 측위 시스템(global positioning system, GPS)이다. 다만 범지구 측위 시스템의 경우 실외에서는 아주 잘 동작하지만, 실내에서는 인공위성으로부터 오는 신호가 벽을 잘 통과하지 못하므로, 측위 오차가 발생한다^{1,2)}. 따라서 범지구 측위 시스템의 대안으로, 실내에서 사용할 수 있는 측위 시스템으로 가시광, Wi-Fi, 적외선(infrared,

IR), 초음파, 이미지를 이용한 연구가 진행되고 있다. 라디오 주파수를 이용한 방법이 가장 대중적이거나, 주파수 혼선 등의 문제와 환경적인 영향을 많이 받는 문제로 인해 측위 오차가 크게 발생할 수 있다. 이미지를 이용한 방법은 영상데이터를 분석하여 주위 환경을 3차원 공간에 그릴 수도 있지만, 많은 연산량이 요구된다는 단점이 있다. 가시광 통신을 이용하면 전자파 간섭 문제가 없고, 해당 라디오 주파수를 사용하지 못하는 환경에서도 적용할 수 있다³⁻⁵⁾. 무엇보다 실내에 구축되어 있는 LED 조명을 사용하여 약간의 추가 장치만으로도 위치 인식 시스템을 적용할 수 있다.

LED 조명 기반의 위치를 추정하는 기법들로는 LED-ID (Identification), RSS (Received Signal Strength), TOA (Time Of Arrival), AOA (Angle of Arrival), TDOA (Time Difference Of Arrival) 등이 있다^{4,6)}. 위치를 추정하기 위해 본 논문에서 제안하는 방법은 RSS기반의 추정 기법을 사용한다. RSS 방식을 이용할 경우 LED 조명의 빛의 세기를 이용하여 위치를 계산하게 되는데, LED조명의 경우 오

Received : Oct. 19. 2015; Revised : Nov.18. 2015; Accepted : Dec. 31. 2015

※The research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning (2014R1A1A2057210).

⁺Corresponding author: Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Sa3-Dong, Sangnok-Gu, Ansan, Korea (hnam@hanyang.ac.kr)

¹Department of Electronics and Communication, Hanyang University (kangis@hanyang.ac.kr)

²Department of Electronics and Communication, Hanyang University (sewoong@hanyang.ac.kr)

랜 시간 동안 사용하게 되면 광 출력은 낮아진다. 기존 시스템의 경우 이러한 변화량을 알지 못하기 때문에, 시간이 흐르면 흐를수록 측위 오차는 점점 커진다.

본 논문에서는 가시광을 이용한 실내 환경에서 로봇의 위치를 추정하는 시스템에 대해 다룬다. 2장에서는 제안하는 가시광을 이용한 실내 환경에서의 로봇의 위치 추정 시스템을 소개하고 3장에서 그 알고리즘을 살펴본 후, 4장에서는 시스템의 일부를 실험하고 제안하는 시스템의 성능을 평가한다. 마지막 장은 간단한 결론에 대해 기술하였다.

2. 시스템 모델

가시광을 이용한 실내 환경에서 위치를 추정하는 요소로 많은 연구에서 사용된 수신되는 빛의 세기를 이용한다. LED 조명이 발광하는 지점에서의 빛의 세기를 알고 있고, 로봇 위치에서 그 빛의 세기가 변화한 양으로 LED 조명과 로봇 사이의 거리를 획득하고, 이를 이용하여 로봇의 위치를 계산할 수 있다. 수신하는 지점에서의 빛의 세기는 로봇에 위치한 가시광 센서를 이용하여 정확히 측정할 수 있지만, 발광하는 지점에서의 LED 조명의 빛의 세기는 로봇에서 직접적으로 측정할 수 없다. 만약, 발광하는 지점에서의 LED 조명의 빛의 세기를 정확히 알고 있다면 매우 정확하게 로봇의 위치를 판단할 수 있다. 하지만 각각의 LED 조명의 특성에 따라 빛의 세기가 결정되므로 발광 지점에서의 LED 조명의 빛의 세기는 예측하기가 어렵다. 예를 들어, 같은 종류의 LED 조명일지라도 각각의 LED 조명마다 빛의 세기가 다를 뿐만 아니라, 사용시간에 따라서도 빛의 세기가 다르다^[6].

본 논문에서는 이러한 빛의 세기를 측정하기 위하여 기준 수신기를 이용한다. 기준 수신기에서 측정한 빛의 세기를 이용하여 본래의 LED 조명의 발광하는 지점에서의 빛의 세기를 실시간으로 계산하여 사용시간에 따라 감소하는 빛의 세기를 따로 입력하지 않아도 된다. 또한, 기준 수신기로부터 계산된 발광 지점에서의 빛의 세기는 자연광이나 주변 조명으로부터의 영향을 줄여주는 효과를 낸다. Fig. 1은 제안하는 가시광을 이용한 로봇의 위치 추정 시스템 모델이다. 로봇과 기준 수신기에

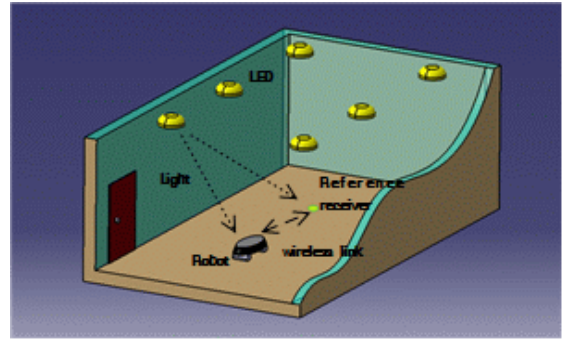


Fig. 1. Model of positioning robot using visible light

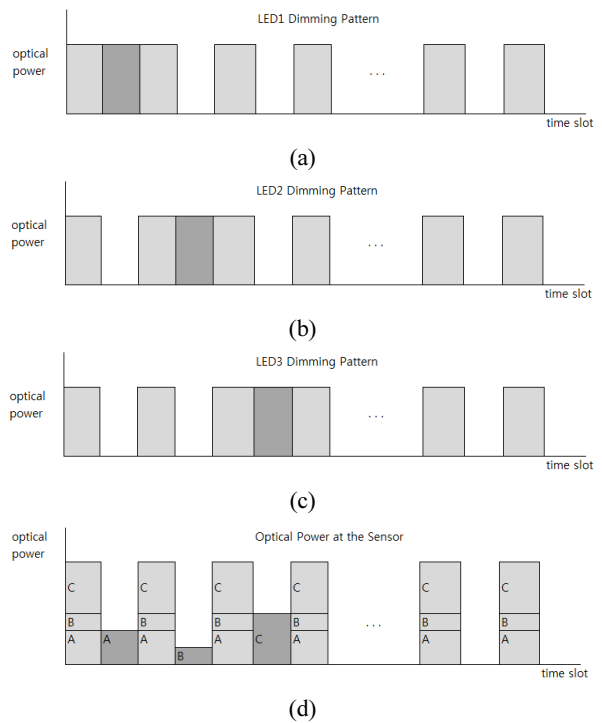


Fig. 2. Optical power pattern: (a) LED1 dimming pattern, (b) LED2 dimming pattern, (c) LED3 dimming pattern, (d) optical power at the Sensor

는 가시광 센서가 장착되어 있다. 기준 수신기와 LED 조명의 위치는 고정되어 있고, 각 LED 조명이 서로 동기화되어 있다고 가정한다면, 기준 수신기에서는 어느 빛이 어느 LED 조명으로부터 왔는지를 쉽게 구분할 수 있다. Fig. 2는 각 LED 조명이 자신의 위치 정보를 데이터화하여, 서로 다른 시간에 발광을 하는 방식의 예이다. LED 조명의 깜박임을 매우 빠르게 하면 인간의 눈으로는 감지할 수가 없으며, 각 LED가 일정한 밝기를 유지함과 동시에 가시광 센서는 시간에 따라 구분된 빛의 세기를

이용하여 각 LED 조명의 발광하는 지점에서의 빛의 세기를 계산할 수 있다. 한편, 로봇에서 수신되는 LED 조명들의 빛의 세기를 이용하여 최소 3개의 LED 조명과 로봇 사이의 거리를 구한다면, 로봇의 위치를 추측할 수 있다.

로봇의 위치 계산에서 필요한 LED 조명의 발광지점에서의 빛의 세기에 대한 정보는 기준 수신기가 항상 계산하여 가지고 있으므로, 기준 수신기와 로봇 사이에 추가적인 무선연결이 필요하다.

3. 시스템 알고리즘

3.1 가시광 성분의 직류 이득

빛은 가시선(line of sight, LOS) 성분이 강하다. 이러한 특성 덕분에 가시광을 사용하는 환경에서는 직류 이득(DC gain)을 계산하는 것이 중요하다. 가시광을 사용하는 환경에서의 직류 이득 $H(0)$ 은 식 (1)과 같다^[3,4,7].

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

m 은 Lamberian 차수로 $-\frac{\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})}$ 이고, d 는 LED 조명과 가시광 센서와의 거리, A 는 가시광 센서의 물리적 영역의 크기, ϕ 는 LED 조명으로부터의 빛의 방사각, ψ 는 가시광 센서로의 빛의 입사각, $\phi_{1/2}$ 는 LED 조명의 최대 빛의 세기가 $\frac{1}{2}$ 되는 지점에서의 각도인 반값각, ψ_c 는 LED 조명의 시각(field of view, FOV)의 반각, $g(\psi)$ 는 집광기의 이득, $T_s(\psi)$ 는 광 필터의 이득이다.

3.2 수신되는 빛의 세기

두 이득 상수 $T_s(\psi) \cdot g(\psi)$ 를 하나의 이득 상수 G 로 변환하고, $\cos^m(\psi)$, $\cos(\psi)$ 를 LED와 가시광 센서와의 거리에 대한 표현으로 바꾸면^[4], 가시광 센서에서 수신되는 빛의 세기 P_r 는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} P_r &= H(0) P_t = \frac{(m+1) P_t}{2\pi d^2} A \cos^m(\phi) G \cos(\psi) \\ &= \frac{(m+1) P_t}{2\pi d^2} A G \left(\frac{h}{d}\right)^{m+1} \end{aligned} \quad (2)$$

P_t 는 LED 조명의 발광지점에서의 빛의 세기, h 는 LED와 가시광 센서 사이의 수직 거리이다.

3.3 LED 조명의 빛의 세기 추정

수신하는 지점이 기준 수신기라면, LED 조명의 발광 지점에서의 빛의 세기 \hat{P}_t 를 추정한다. 식 (2)로부터 식 (3)으로 도출 할 수 있다.

$$\hat{P}_t = \frac{2\pi d^2 P_r}{(m+1) A \cdot G} \left(\frac{d}{h}\right)^{m+1} \quad (3)$$

d 는 $\sqrt{d_{xy,ref}^2 + h^2}$ 로 간단히 변환이 가능하므로, 식 (3)은 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$\hat{P}_t = \frac{2\pi d^2 P_r}{(m+1) A \cdot G} \left(\frac{\sqrt{d_{xy,ref}^2 + h^2}}{h}\right)^{m+1} \quad (4)$$

$d_{xy,ref}$ 는 LED 조명과 기준 수신기 사이의 수평거리이다. 그러므로 LED 조명의 위치와 기준 수신기의 위치를 알고 있다고 한다면 LED 조명의 발광하는 지점에서의 추정된 빛의 세기 \hat{P}_t 를 구할 수 있다.

3.4 로봇의 위치 추정

수신하는 지점이 위치를 알고 싶은 로봇이라면 삼변 측량술을 적용하여, 3개의 LED 조명과 로봇 사이의 거리를 알 수 있다면 로봇의 위치를 추정할 수 있다.

3.4.1 LED 조명과 로봇 사이의 거리

LED 조명과 로봇 사이의 거리를 계산해야 한다. 식 (2)로부터 식 (5)가 도출된다.

$$d_{xy} = \sqrt[m+3]{\frac{(m+1) \hat{P}_t \cdot A \cdot G \cdot h^{m+1}}{2\pi P_r}} \quad (5)$$

d_{xy} 는 LED 조명과 로봇 사이의 수평 거리이고, 기준 수신기로부터 추정된 \hat{P}_t 는 로봇과 기준 수신기와의 별도의 무선 연결을 통하여 획득할 수 있다.

3.4.2 로봇의 위치 추정

삼변 측량술에 따라 식 (5)를 이용하여 LED 조명과 로봇 사이의 거리를 3개 이상 알 수 있다면, 로봇의 위치를 가늠할 수 있다. 로봇의 위치는 식 (6)을 이용하여 추정할 수 있다.^[3,4,8,9]

$$\begin{cases} 2x(x_1 - x_3) + x_3^2 - x_1^2 + 2y(y_1 - y_3) + y_3^2 - y_1^2 \\ \quad = d_{xy3}^2 - d_{xy1}^2 \\ 2x(x_2 - x_3) + x_3^2 - x_2^2 + 2y(y_2 - y_3) + y_3^2 - y_2^2 \\ \quad = d_{xy3}^2 - d_{xy2}^2 \end{cases} \quad (6)$$

식 (6)을 풀면 식 (7)이 된다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{d_{xy1}^2 - d_{xy2}^2 + x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2}{2} \\ \frac{d_{xy1}^2 - d_{xy3}^2 + x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

x_i, y_i 는 각각 i 번째 LED 조명의 위치를 $x-y$ 좌표계에 적용했을 때의 x, y 좌표이고, d_{xyi} 는 i 번째 LED 조명과 로봇과의 거리이다.

4. 위치 정보 전송 구현 및 시스템 성능 평가

4.1 위치 정보 전송

Fig. 3은 가시광을 이용하여 위치 정보를 전송하는 실험을 위하여 제작한 장비이다. Fig. 4를 보면 송신 데이터(위)와 수신 데이터(아래)를 비교하였을 때, 올바르게 전송되었다는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 LED 조명에 데이터를 실을 수 있으며 각 LED 조명마다 서로 다른 시간에 자신의 위치정보에 관한 데이터를 빛으로 바꾸어서 발광한다면, 이 빛을 가시광 센서가 감지하여 어느 LED로부터 왔는지를 판단한다. 이와 함께 각 LED 조명이 차지하고 있는 시간마다 빛의 세기를 측정하여 LED 조명과 로봇과의 거리를 알아내는 작업을 동시에 진행하여야 한다.

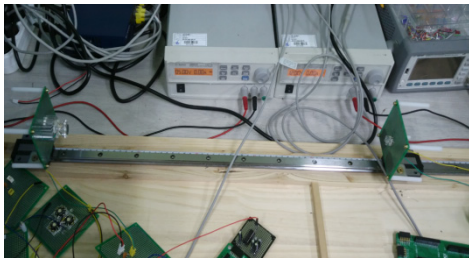


Fig. 3. Experimental setup for data transfer using visible light

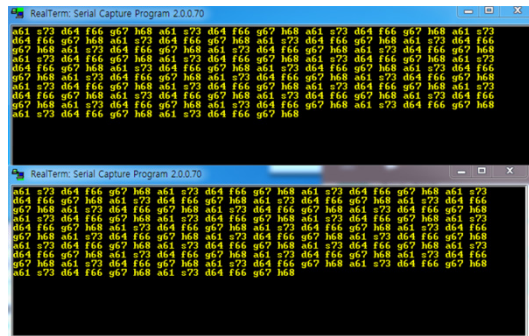


Fig. 4. Experimental result for data transfer using visible light

터(위)와 수신 데이터(아래)를 비교하였을 때, 올바르게 전송되었다는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 LED 조명에 데이터를 실을 수 있으며 각 LED 조명마다 서로 다른 시간에 자신의 위치정보에 관한 데이터를 빛으로 바꾸어서 발광한다면, 이 빛을 가시광 센서가 감지하여 어느 LED로부터 왔는지를 판단한다. 이와 함께 각 LED 조명이 차지하고 있는 시간마다 빛의 세기를 측정하여 LED 조명과 로봇과의 거리를 알아내는 작업을 동시에 진행하여야 한다.

4.2 시스템 성능 평가

시스템 성능 분석을 위하여 가시광 센서에서 발생할 수 있는 잡음 또한 고려하였다. 센서가 LED 조명으로부터의 빛의 세기를 측정할 때, 산탄잡음(shot noise)과 열잡음(thermal noise)이 추가된다^[4,7,10]. Fig. 5는 시스템 성능 평가를 위한 시뮬레이션 모델이고 Table 1에 있는 값들은 시뮬레이션에 사용된 환경 변수들이다. 5 cm의 간격으로 로봇을 이동시켜 가면서 추정된 로봇의 위치와 실제 로봇의 위치와의 오차를 계산하였고, LED 조명은 수명 등의 문제로 광 출력이 감소하여 발광하는 빛의

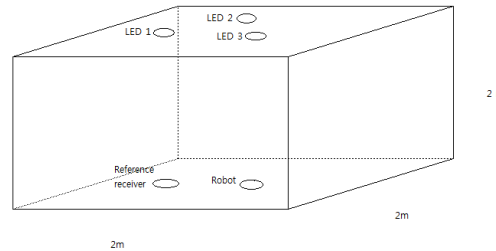


Fig. 5. Simulation model

Table 1. Condition of simulation variables

	Value
Room Size	
LED's Optical power (Real Optical power)	1 W (0.9W)
Position of LED	LED1 (0.5, 0.7, 2) LED2 (1.5, 0.7, 2) LED3 (1, 1.3, 2)
Bandwidth of Data Transfer	640 kHz
Position of Reference Receiver	(1,1,0)
Gain Constant - G	2.54
Sensor Responsivity	0.54 (A/W)

세기가 1 W에서 0.1 W 감소했다고 가정하였다. 각 LED 조명에서는 최대 광 출력을 사용한다고 가정한다.

4.2.1 수신되는 광 출력의 계산

일반적으로 측정되는 광 출력은 LED의 광 출력 외에 다른 잡음 이 포함되며, 식 (8)로 표현할 수 있다.

$$P_{r,total} = H(0)P_t + N \quad (8)$$

추가되는 잡음은 산탄잡음 분산과 열 잡음 분산의 합으로 표현할 수 있으며, 식 (9)과 같다.

$$N = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2 \quad (9)$$

산탄잡음 분산은 식 (10)으로 표현된다.

$$\sigma_{shot}^2 = 2q\gamma(P_{rec})B + 2qI_{bg}I_2B \quad (10)$$

q 는 전자의 전하량이고, γ 는 센서의 반응도로 0.54 A/W로 설정하였다. P_{rec} 는 잡음을 제외한 수신기에서의 각 LED 조명으로 부터의 수신되는 광 파워 값들의 합이다. B 는 변조 대역폭으로 640 kHz로 설정하였고, I_{bg} 는 백그라운드 전류로, 가시광 센서가 햇빛에 직접적으로 노출된 환경에서는 5100 μ A가 가시광 센서가 햇빛에 간접적으로 740 μ A으로 설정하였다. I_2 는 백그라운드 전류가 대역폭의 영향에 얼마나 따르게 되는지의 요소

로, 0.562로 설정하였다.

열 잡음 분산은 식 (11)으로 표현된다.

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{8\pi k T_K}{G_o} \eta A I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k T_K \Gamma}{g_m} \eta^2 A^2 I_3 B^3 \quad (11)$$

k 는 Boltzmann 상수이고, T_K 는 절대온도로 295 K, η 는 가시광 센서의 단위영역당 고정 커패시턴스 값으로 112 pF/cm², A 는 가시광 센서의 물리적 영역의 크기로 1 cm², Γ 는 FET (p-i-n/field-effect transistor) 채널의 잡음 상수로 1.5, I_3 는 FET에서 대역폭에 의한 백그라운드에 의해 얼마나 열 잡음이 생성되는지의 요소로 0.0868으로 설정하였다.

4.2.2 확률 밀도 함수로 위치 추정 오차 비교

산탄 잡음과 열 잡음이 포함된 측정된 광 출력을 이용하여, 로봇의 위치를 추정하고 이를 실제 로봇의 위치와 비교하여 얼마만큼의 오차가 발생하는 지를 시뮬레이션을 해본다. 먼저 추정 오차의 구간 범위를 나누고, 시뮬레이션을 1000번을 반복하면서 오차가 발생한 구간의 오차 수를 카운트했으며, 이를 이용하여 확률 밀도 함수를 나타내었다. 각 추정 오차의 구간 범위는 0.025 cm로 설정하였다.

기준 수신기가 없을 경우 LED 조명의 광 출력 변화 사실을 모르기 때문에, 로봇의 위치 추정 시 실제 위치와의 오차는 커질 수 밖에 없다. Fig. 6은 가시광을 이용한 시스템에서 기준 수신기가 없을 때 위치 추정 오차를 확률 밀도 함수(PDF: probability density function)로 나타내었고, Fig. 7은 가시광을 이용한 시스템에서 기준

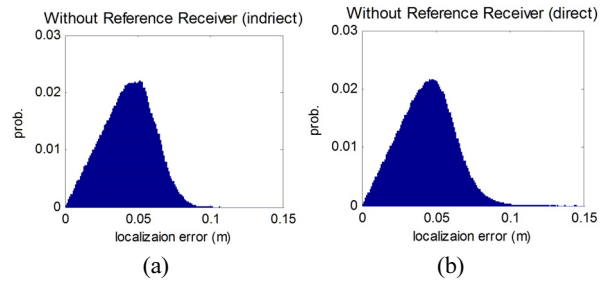


Fig. 6. PDF of localization errors without reference receiver: (a) indirect sunlight exposure, (b) direct sunlight exposure

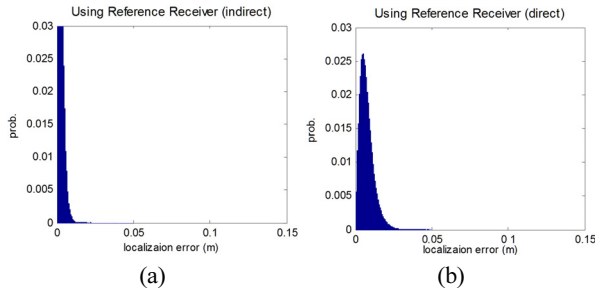


Fig. 7. PDF of localization errors using reference receiver: (a) indirect sunlight exposure, (b) direct sunlight exposure

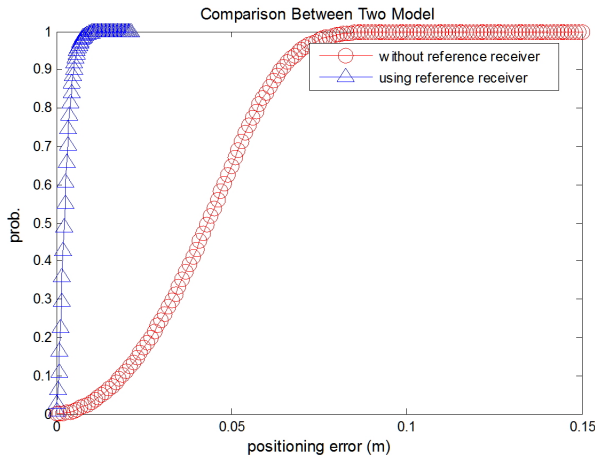


Fig. 8. CDF of localization errors on indirect sunlight exposure: (circle) without reference receiver, (triangle) using reference receiver

수신기가 있을 때 위치 추정 오차를 확률 밀도 함수로 나타내었다. 또한 로봇이 실내에 위치해 있어도 가시광 센서가 햇빛에 직접적으로 노출되었을 경우와 간접적으로 노출되었을 경우를 비교할 시 생기는 잡음이 다르기 때문에, 두 경우 모두 고려하였다.

가시광 센서가 햇빛에 간접적으로 노출된 환경에 비교하여, 직접적으로 노출된 환경에서 위치 추정 오차가 더 크게 발생하고 있으며, 가시광 센서가 햇빛에 간접적으로 노출된 환경에서 기준 수신기를 사용하였을 경우 위치 추정 오차의 뚜렷한 성능 향상을 보여주고 있다

4.2.3 누적 분포 함수로 위치 추정 오차 비교

위치추정오차의 신뢰도 계산을 위해서는 앞에서 구한 확률 밀도 함수를 이용하여 누적 분포 함수(CDF: cumulative distribution function)를 구해야 한다. Fig. 8은 가시광 센

서가 햇빛에 간접적으로 노출된 환경에서 로봇의 위치 추정 오차에 대한 누적 분포 함수를 기준 수신기의 유무에 따라 비교한 것이다. 1 W LED의 광 출력이 10% 감소했을 때, 기준 수신기가 없는 기존 시스템의 경우 95%의 신뢰도로 위치 추정 오차는 7.3 cm 이하이다. 제안하는 기준 수신기가 있는 시스템의 경우 95%의 신뢰도로 위치 추정 오차는 1.6 cm 이하로, 위치 추정 오차를 5.7 cm 만큼 줄일 수 있다. 현실에서 LED의 광 출력은 고정적인 것이 아닌 사용시간에 따라 광 출력이 감소한다. 시뮬레이션에서 설정한 LED의 광 출력이 10% 감소하기까지는 약 7000 시간 정도^[11] 걸린다.

5. 결 론

본 논문에서는 실내 환경에서의 로봇의 위치를 추정하기 위하여 가시광을 이용하였고, 예측하기 힘든 LED의 광 출력에 추정하기 위해 기준 수신기가 적용된 시스템을 제안하였다. 제안하는 방법으로는 기준 수신기에서 LED 조명의 발광 지점에서의 빛의 세기를 계산하고, 이 정보를 로봇으로 전송한다. 전달받은 빛의 세기정보와 로봇에서 수신되는 빛의 세기를 이용하여 로봇의 위치를 계산한다. 시뮬레이션 결과상으로, 1W LED의 광 출력 오차가 10%가 발생하였을 경우를 가정한다면, 95%의 신뢰도로 약 1.6 cm 이하의 위치 추정 오차를 도출할 수 있고 기존의 가시광을 이용한 시스템과 비교한다면 제안 시스템은 약 5.7 cm의 위치 추정 오차를 줄일 수 있다.

References

- [1] D.I. Kim, J.B. Song, and J.H. Choi, "Improvement of Localization Accuracy with COAG Features and Candidate Selection based on Shape of Sensor Data," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 9, no. 2, pp. 117-123, 2014.
- [2] S.S. Huh, S.W. Cho, and H.C. Shim, "3-D Indoor Navigation and Autonomous Flight of a Micro Aerial Vehicle using a Low-cost LIDAR," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 9, no. 3, pp. 154-159, 2014.

- [3] M. Yasir, H. Siu-Wai, and B.N. Vellambi, "Indoor Positioning System Using Visible Light and Accelerometer," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, pp. 3306-3316, 2014.
- [4] W.Z. Zhang, M.I.S. Chowdhury, and M. Kavehrad, "Asynchronous indoor positioning system based on visible light communications," *Optical Engineering*, vol. 53, April, 2014.
- [5] M. Yoshino, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "High-accuracy positioning system using visible LED lights and image sensor," in *Radio and Wireless Symposium*, 2008 IEEE, pp. 439-442, Jan., 2008.
- [6] J. Armstrong, Y.A. Sekercioglu, and A. Neild, "Visible Light Positioning: A Roadmap for International Standardization," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, pp. 68-73, Dec., 2013.
- [7] T. Komine and M. Nakagawa, "Integrated system of whiteLED visible-light communication and power-line communication," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 49, pp. 71-79, Feb., 2003.
- [8] F. Reichenbach, A. Born, D. Timmermann, and R. Bill, "A Distributed Linear Least Squares Method for Precise Localization with Low Complexity in Wireless Sensor Networks," *Second IEEE International Conference, DCOSS 2006, San Francisco, CA, USA*, vol. 4026, pp. 514-528, June 18-20, 2006.
- [9] H.S. Kim, D.R. Kim, S.H. Yang, Y.H. Son, and S.K. Han, "An Indoor Visible Light Communication Positioning System Using a RF Carrier Allocation Technique," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, pp. 134-144, Jan. 1, 2013.
- [10] J.M. Kahn and J.R. Barry, "Wireless infrared communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, pp. 265-298, 1997.
- [11] M.R. Yenchek and J.J. Sammarco, "The potential impact of light emitting diode lighting on reducing mining injuries during operation and maintenance of lighting systems," *Safety Science*, vol. 48, pp. 1380-1386, Dec., 2010.



강인성

2013 한양대학교 전자 및 통신공학 전공 (공학사)

2013 ~ 현재 한양대학교 대학원 전자통신공학과 석·박사과정

관심분야: 가시광통신, Positioning, 임베디드 시스템



민세웅

2015 한양대학교 전자통신공학전공(공학사)

2015 ~ 현재 한양대학교 대학원 전자통신공학과 석·박사과정

관심분야: 가시광통신, 임베디드 시스템, 드론



남해운

1997 한양대학교 전자통신공학과(공학사)

1999 서울대학교 전기공학부(공학석사)

2006 University of Texas at Austin 전기컴퓨터공학과(공학박사)

2006 ~ 2010 Motorola Inc., Senior Staff Engineer

2010 ~ 2011 Apple Inc., Principal Engineer

2011 ~ 현재 한양대학교 전자공학부 교수

관심분야: 이동통신, 통신시스템설계, 임베디드 시스템