

LED-ID 없이 실내 위치 추정이 가능한 개선된 VLC-TDoA 알고리즘

트링 홉 도*, 황 준 호*, 유명 식*

Enhanced VLC-TDoA Algorithm for Indoor Positioning Without LED-ID

Trong-Hop Do*, Junho Hwang*, Myungsik Yoo*

요 약

LED 기술의 급속한 발전으로 LED를 이용한 다양한 응용서비스 연구가 진행되고 있는데, 그 중 실내 측위 기술은 최근 가장 많은 관심을 받고 있는 연구 분야이다. 특히 가시광 무선 통신 기반의 실내 측위 기법 연구는 삼각 측량 기술을 접목하여 높은 측위 정확도를 제시하였는데, 기존 연구의 경우 LED 패널의 ID를 고정적으로 운용하고, 파일럿 신호 전송 시 별도의 ID 정보를 송신하는 구조를 가지고 있다. 따라서 LED 조명 장치 설계 시 ID 정보를 고려한 배치가 요구되기 때문에 인프라 구축의 복잡성을 가중시킨다. 이에 본 논문에서는 별도의 ID 전송 없이 VLC-TDoA 기반 실내 측위가 가능한 개선된 측위 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘의 성능 평가를 위해 컴퓨터 모의실험을 수행하였고, 그 결과 $5 \times 5 \times 3m^3$ 의 실험 공간에서 약 3.6cm의 평균 측위 오차가 나타남을 확인하였다.

Key Words : visible light communication, light emitting diode, photo diode, Indoor Positioning, TDoA

ABSTRACT

In the recent year, along with the rapid development of LED technology, many applications using LEDs have been researched and indoor positioning is one of them. In particular, previous indoor positioning systems based on visible light communication combine triangulation manner such as AoA, ToA TDoA. But most of them needs transmitting unique ID of each LED panel. In this paper, we propose an non LED-ID based indoor positioning system in which the visible light radiated from LEDs is used to locate the position of receiver. Compared to current indoor positioning systems using LED light, our system has the advantages of simple implementation, low cost and high accuracy. Through the computer simulation, our system can achieve a high estimation accuracy of 3.6cm in average in the $5 \times 5 \times 3m^3$ room.

I. 서 론

최근 실내 측위 기술에 대한 관심과 연구가 매우 높

은 관심을 받고 있다. 이에 기존 실외 측위 기술인 GPS를 비롯하여 적외선 통신(Infrarad), RFID, 초음파(Ultrasound), 블루투스(Bluetooth), Wi-Fi와 같은

* 이 논문은 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정지원사업의 연구결과로 수행되었음” (NIPA-2013-H0401-13-1004)

◆ 주저자 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 통신망 설계 및 분석 연구실, dotronghop@gmail.com, 학생회원

◦ 교신저자 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 통신망 설계 및 분석 연구실, myoo@ssu.ac.kr, 종신회원

* 숭실대학교 정보통신전자공학부 통신망 설계 및 분석 연구실, jhwang@ssu.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2013-06-238, 접수일자 : 2013년 6월 12일, 최종논문접수일자 : 2013년 7월 31일

근거리 무선 통신 기술들이 강력한 후보 기술로 인식되고 있다^{1,2)}. 하지만 현재까지 측위 기술을 기반으로 활성화된 위치 기반 서비스는 GPS를 활용하는 실외 환경에 국한되어 있다. 물론 실내 측위를 기반으로 하는 실내 위치 기반 서비스가 시범적으로 운용되고 있으나 서비스 이익 창출을 위한 적극적 도입에는 아직 시기상조인 것으로 판단된다.

더욱 기존 근거리 무선 통신 기술의 경우 통신 특성에 따라 각각의 장단점이 뚜렷하기 때문에 적극적인 서비스 활용에 이용되지 못하고 있다. 먼저 RF 기반 측위 시스템은 병원, 공항, 공장 환경에서 사용하기에는 주파수 간섭으로 인해 안전성이 매우 떨어진다. 적외선 통신과 RFID 기술의 경우 측위의 목적 보다는 통신의 목적이 강하며, 위치 측위의 정확도를 확보하기 위해서는 추가적인 인프라 구축비용이 요구된다. 이러한 기존 근거리 무선 통신 기술이 실내 측위 기술로서 활용되지 못하는 문제를 해결하기 위해 가시광 무선 통신 기술의 등장과 함께 활용 분야로 실내 측위 기술이 관심 받고 있다.

가시광 실내 측위 시스템은 LED(Light Emitting Diode)를 이용한 조명 시스템뿐만 아니라 측위 시스템까지 제공할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서 측위 프로토콜 추가를 통해 별도의 측위 시스템을 구성하기 위한 구축비용을 최소화할 수 있다. 하지만 가시광 무선 통신을 이용한 다양한 실내 측위 기술에 대한 연구³⁻⁹⁾가 활발히 진행되고 있지만, 측위 정확도와 구현 난이도를 모두 해결하기 위한 방법이 아직 부족한 실정이다.

기존 연구를 보다 자세히 살펴보면, AOA(Angle of Arrival), TDoA(Time difference of arrival) 등과 같은 기존 삼각 측량 측위 기법을 활용하거나 RSS 그리고 각 LED 패널 ID를 고려할 수 있다. 먼저 AOA 측위 방식은 이미지 센서(Sensor)를 통해 유입되는 빛의 각도를 통해 위치를 파악하는 것으로 높은 측위 성능을 보이나 이미지 센서의 배치에 대한 요구사항이 까다로우며, 다수의 이미지 센서나 PD(Photo Diode)를 사용하기 때문에 경제성이 떨어진다. 반면 신호 세기와 LED-ID를 이용할 경우 구현 난이도는 줄일 수 있으나, 신호세기의 경우 실내 통신의 특성상 NLOS(Non Line of Sight)의 영향으로 인해 벽 근처나 모서리 부근에서의 측위 정확도가 급격히 저하되는 문제를 안고 있으며, LED-ID의 경우 발광 범위가 측위 오차 범위로 설정되어 측위 정확도를 향상시킬 수 있는 방법이 매우 제한적이다.

이에 따라 LED 패널이 전송하는 신호의 수신 신호

의 시간 차를 이용해 삼각 측량을 수행하는 VLC-TDoA 측위 방식이 제안되었다^{7,9)}. VLC-TDoA 방식은 ToA와 달리 송신부와 수신부의 동기화가 요구되지 않으며, LED 패널간의 동기화는 근접해 있는 LED 패널을 중앙 관리 방식으로 관리할 수 있기 때문에 동기화에 대한 어려움이 없으며, 이미지 센서에 비해 저가의 PD를 사용할 수 있기 때문에 가시광 무선 통신을 이용한 실내 측위 기술로서 가장 적합한 기술로 고려되고 있다. 이에 [7]에서는 각 LED 패널의 신호 구분을 위해 사용하는 파일럿 신호(Pilot Signal)를 전송하기 위해 각 LED 패널의 코사인 파형 기반의 주파수 변화를 사용했다. 하지만 PD를 사용하기 때문에 혼합된 신호의 정확한 추출이 어려우며, 주파수 변화를 위해 LED 전력을 제어할 경우 빛의 깜빡임(Flickering) 문제를 야기할 수 있다. 반면, [9]에서는 LED 패널을 제어하여 전송 시간의 차이를 두어 파일럿 신호를 전송하였고, 수신 신호의 신호 판별 위치에 따른 측위 오차를 분석하였지만, 고정된 LED-ID를 사용하기 때문에 측위 시스템 인프라 구성 시 반드시 LED-ID의 배치를 고려해야한다는 복잡성을 가지고 있다.

이에 본 논문에서는 각각의 LED 패널이 별도의 ID를 전송하지 않아도 TDoA 기반의 삼각 측량을 통해 수신기의 위치를 판단할 수 있는 개선된 VLC-TDoA 알고리즘을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 VLC-TDoA 알고리즘 개발을 위한 통신 환경 및 신호 특성을 설명하고, 3장에서는 제안된 VLC-TDoA 알고리즘에 대한 파일럿 신호 생성 및 위치 추정 알고리즘을 설명한다. 이어 4장에서는 모의실험 환경 및 성능 분석 결과를 서술하고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. VLC-TDoA 통신 환경

2.1. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 VLC-TDoA 시스템 통신 환경은 그림 1과 같이 5x5x3m³ 규격의 방이다. 이때 조명용 LED 패널은 3x3의 격자형으로 천장의 중심부에 정사각형으로 설치되어 있으며, LED 패널은 천장에서 아래로 0.5m 떨어져서 배치된다고 가정하였다. 수신기의 경우 바닥면에서 0.8m 떨어졌다고 고려하였다.

2.2. 채널 모델

VLC-TDoA 시스템에서 LED 패널로부터 발광된

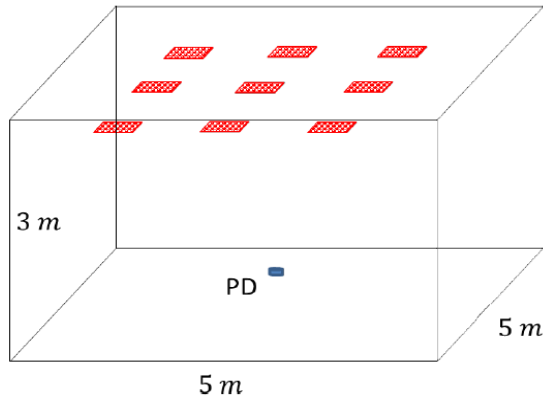


그림 1. VLC-TDoA 시스템 통신 모델
Fig. 1. Communication Model of VLC-TDoA System

는 빛은 조명과 측위 신호의 두 가지 기능을 모두 제공하는데, 측위 신호에 대한 성분은 다음과 같은 특징을 고려하여야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 [10]를 참고하여 모의실험 내 채널 모델 환경을 구성하였다.

2.2.1. 임펄스 응답

본 시스템에서 PD는 LED 조명들로부터 방출되는 TDoA 파일럿 신호를 수신한다. 하지만 파일럿 신호 정보를 포함하는 빛은 LOS와 NLOS 환경을 모두 포함한다. 즉, 그림 2와 같이 방의 가운데에서는 직접 수신되는 빛이 다중으로 벽에 반사되는 빛 보다 영향이 크다. 반면, 수신기의 위치가 벽의 근접한 경우 벽에 반사되는 빛이 측위 성능에 큰 영향을 미친다. [8]에 따르면 방의 모서리에서 측정한 수신 빛의 구성은 LOS와 NLOS로 구분되며, 각각 95.16%와 4.84%를 가지는 것으로 나타났다. 이에 본 논문에서는 모의실험의 정확한 결과를 위해 한번 반사되는 빛의 영향도 고려하였다. 이를 보다 상세히 살펴보면, 광무선 채널은 수식 1과 같이 모델화하였다.

$$Y(t) = \gamma X(t) \otimes h(t) + N(t) \quad (1)$$

이때 $Y(t)$ 는 출력 신호, $X(t)$ 는 입력신호, $N(t)$ 는 추가된 잡음, γ 는 수신 응답, \otimes 는 컨볼루션을 나타내는 것 이고, $h(t)$ 는 임펄스 응답이다. LED로부터 방출되는 빛과 벽에 반사되는 빛은 Lambertian Radiation 패턴과 같이 나타나고, 수신단에서 LED로부터의 직접적으로 수신되는 빛과 반사되는 임펄스 응답은 수식 2와 같다.

$$h(t) = h^{(0)}(t) + \int_{walls} h^{(1)}(t) \quad (2)$$

이때 $h^{(0)}(t)$ 는 수식 3을 통해 유도된 직접적으로 수신된 임펄스 응답이고, $h^{(1)}(t)$ 은 수식 4를 통해 유도된 첫 번째 반사에 의한 임펄스 응답이다.

$$h^{(0)}(t) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi \\ \times \sigma(t - \frac{d}{c}), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \phi > \Psi_c \end{cases} \quad (3)$$

$$h^{(1)}(t) = \begin{cases} \frac{(m+1)A\rho dA}{2\pi^2 d_1^2 d_2^2} \cos^m(\phi) \cos(\alpha) \cos(\beta) T_s(\psi) \\ \times \delta(\psi) \cos(\psi) \delta(t - \frac{d_1 + d_2}{c}), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (4)$$

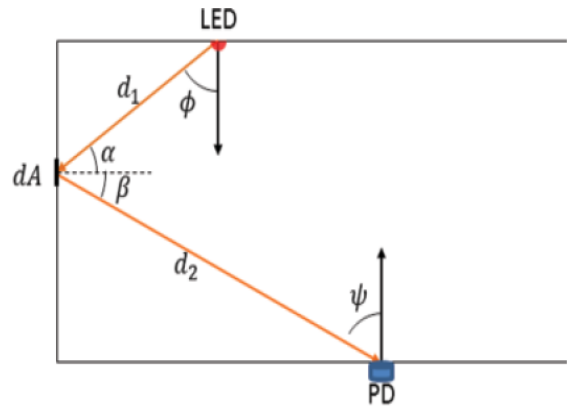


그림 2. 확산 링크 모델
Fig. 2. Model of Diffused Link

이때 ϕ 는 LED의 방사각, ψ 는 PD에서의 입사각, d 는 LED와 PD사이의 거리, A 는 PD의 물리적인 수신 영역, $T_s(\psi)$ 는 광학 필터의 이득, $g(\psi)$ 는 광학 필터의 효과, Ψ_c PD의 수신 각도, d 는 S와 R의 거리, c 는 광속, δ 는 Dirac delta function의 지연, ρ 는 벽에서의 반사, dA 는 벽에서의 반사되는 작은 범위, d_1 은 LED와 반사되는 지점의 거리, d_2 는 반사되는 지점과 수신부의 거리, α 는 LED로부터 벽에 수신되는 빛의 입사각, β 는 LED로부터 벽에 방사되는 조도각, 그리고 m 은 Lambertian Emission의 차수를 의미한다. 이때 m 은 수식 5를 통해 획득한다.

$$m = -\ln 2 / \ln(\cos(\Phi_{1/2})) \quad (5)$$

2.2.2. 잡음

LED 패널의 잡음 특성 또한 신호원 전송의 품질을 결정하는 주요 요인이다. [9]에 의하면, LED 소자는

산탄 잡음(Shot Noise)의 분산과 열잡음(Thermal Noise)의 영향을 받으며, 이를 각각 수식 6과 수식 7로 표현가능하며, 표 1의 각 변수의 설정값을 나타낸다.

$$\sigma_{shot}^2 = 2q\gamma(P_{rsignal} + P_{rISI})B + 2qI_{bg}I_2B \quad (6)$$

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{8\pi kT_k}{G}\eta AI_2B^2 + \frac{16\pi^2 kT_k\Gamma}{g_m}\eta^2 A^2 I_3B^3 \quad (7)$$

표 1. 잡음 변수들의 설정값
Table 1. Specific value of Noise Parameters

| Parameters | Value |
|--------------------------|------------------------|
| Detector responsivity | $\gamma = 0.54[A/W]$ |
| Electronic charge | $q = 1.602e-10[C]$ |
| Boltzman's constant | $k = 1.38066e-23$ |
| Absolute temperature | $T_k = 295[K]$ |
| Open-loop voltage gain | $G = 10$ |
| FET channel noise factor | $\tau = 1.5$ |
| Fixed capacitance | $\eta = 122[pF/cm^2]$ |
| Background light current | $I_{bg} = 5100[\mu A]$ |
| Data rate | $B = 100[Mbps]$ |
| Noise bandwidth factor | $I_2 = 0.562$ |
| Noise bandwidth factor | $I_3 = 0.0868$ |
| FET transconductance | $g_m = 30$ |

III. 제안 VLC-TDoA 알고리즘

본 논문에서 제안하는 개선된 VLC-TDoA 시스템은 파일럿 신호를 전송하는 LED AP가 별도의 ID 전송 없이 수신부에서의 ID 추측을 통해 정확한 위치를 파악하는 것을 특징으로 한다. 이러한 제안 VLC-TDoA 알고리즘을 설명하기 위해 파일럿 신호 생성 및 검출 방법과 ID 부여가 없는 상태에서 수신기의 위치를 추정하는 방법을 설명한다.

3.1. 파일럿 신호 생성 및 검출 방법

VLC-TDoA 기반의 실내 측위 알고리즘 운영을 위해 중앙 서버는 각 LED 패널의 파일럿 신호 전송을 할당한다. 이때 각 LED 패널이 전송하는 파일럿 신호는 동일한 펄스폭을 가지며, 보호 시간(Guard Time) 후 순차적으로 전송된다. 이러한 파일럿 신호의 전송은 동일한 주기(Period)를 가지고 있으며, 모든 LED 패널이 한 번의 파일럿 신호를 전송하는 것을 한 주기라 가정한다. 그림 3은 수신기에서 한 주기 동안 수집한 파일럿 신호의 결과를 도시하고 있다. 이때 파일럿

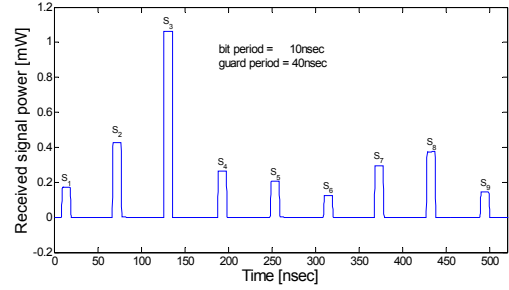


그림 3. 한주기 동안 수신된 파일럿 신호
Fig. 3. Received Pilot Signals During a Sample Period

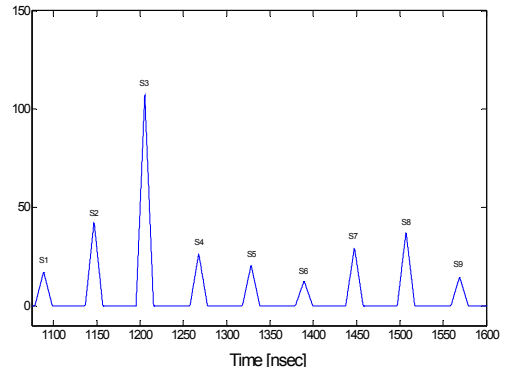


그림 4. 교차상관을 이용한 파일럿 신호 검출방법
Fig. 4. Pilot Signal Detection Using Cross-correlation

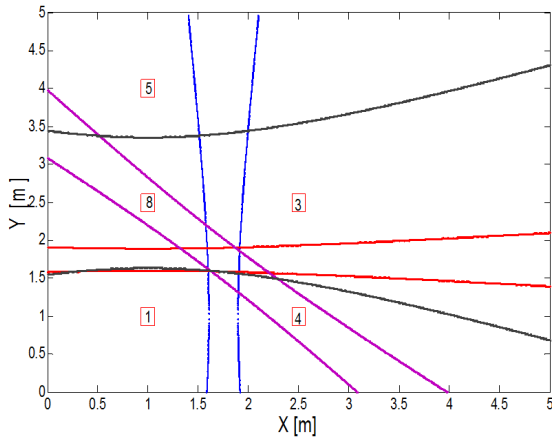
신호 사이에 존재하는 보호 시간은 파일럿 신호 간 간섭을 방지하기 위해 사용된다^[6].

이후 수신기에서는 연속적으로 수신된 파일럿 신호에서 그림 4와 같이 원 신호와 샘플 신호(Sample Signal)를 교차상관(Cross-Correlation)하여 수신된 각 파일럿 신호의 최대 전력 위치를 산출한다. 이를 통해 각 수신 파일럿 신호 내에서 유일한 측위 지점을 산출할 수 있다.

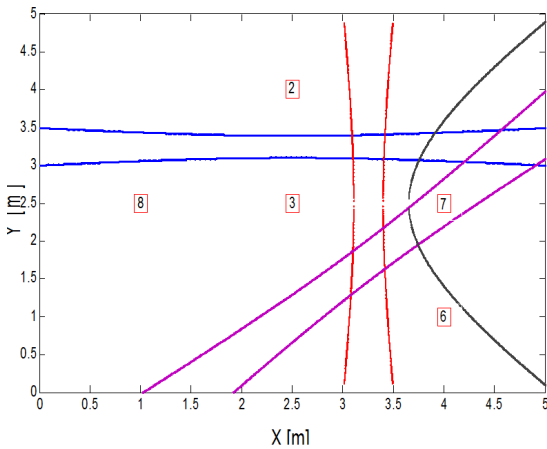
3.2. 수신기 위치 추정 알고리즘

앞서 수신된 파일럿 신호의 유일 지점을 산출하였더라도 TDoA 기법 적용을 위해서는 각 LED 패널의 ID 비교를 통해 시간 차 정보를 산출하여야 한다. 하지만 각 신호의 ID가 없는 상태에서는 시간차를 통해 위치 추정이 불가능하기 때문에 본 논문에서는 ID 없이 수신기의 위치를 추정할 수 있는 새로운 산출 방법을 제안한다. 이를 자세히 살펴보면 다음과 같다.

수신기가 수집한 파일럿 신호는 서로 다른 LED 패널에서 순차적으로 전송된 것이다. 따라서 n개의 LED 패널을 사용할 경우 추측할 수 있는 ID는 총 n개의 조합이 된다. 이와 더불어 n개의 LED 패널로부터 k개



(a) 정확한 LED ID 추정 예
(a) Right Guessing of LED IDs



(b) 부정확한 LED ID 추정 예
(b) Wrong guessing of LED IDs

그림 5. LED ID 추측에 따른 교차점 산출 예
Fig. 5. Calculation Example of Intersection with Guessing of LED ID

의 파일럿 신호를 받았다면, 시간 차 정보는 $k-1$ 개가 생성되고, $k-1$ 개의 조합을 통한 쌍곡선을 통해 수신기의 위치 추정 값을 산출할 수 있다. 이때 모든 쌍곡선의 교차점이 이상적으로 한 개만 산출된다면, 해당 위치가 정확한 수신기의 위치로 인식될 수 있으나 일반적으로 신호의 간섭 및 잡음으로 인해 한 개 이상의 교차점이 발생한다. 따라서 교차점은 최대 $\binom{k-1}{2}$ 개까지 나타날 수 있다. 이때 산출되는 교차점의 분포가 일정 범위에 집중(Converge)된다면, 해당 ID 추측 조합이 정확하게 추정되었음을 알 수 있고, 반대로 교차점의 위치가 퍼져(Divergent) 있다면, 해당 ID 추측 조합은 잘못되었다고 할 수 있다. 그림 5은 모의실험 결과를 통해 LED ID를 올바르게 추정했을 경우(a)와 잘못 추정했을 경우(b)의 측정 결과의 예를 도시하고

있다. 그림에서 보는 바와 같이 LED ID 추측이 정확할 경우 교차점들의 분포가 집중되어있는 것을 볼 수 있으며, 반면 LED ID가 틀린 경우 교차점의 분포가 분산되어 있는 것을 볼 수 있다.

이와 같은 별도의 LED-ID 정보 없이 TDoA 삼각 측량을 통한 위치 추정 기법을 통해 산출하기 위해 n 번의 LED ID 조합을 반복 수행하면, 교차점의 집중도가 가장 높은 조합이 산출되고 해당 LED ID 배치와 신호원 선택을 통해 정밀한 실내 위치 추정이 가능하다.

IV. 모의실험 결과 및 논의사항

4.1. 모의실험 환경

본 논문에서는 제안하는 개선된 VLC-TDoA 알고리즘의 성능 평가를 위해 Matlab 기반의 실내 측위를 위한 통신 환경 구성하고, 총 62,500개의 지점에서 측위 오차를 분석하였다. 표 2는 모의실험에서 설정한 파라미터의 종류와 설정값을 나타내고 있다. 먼저, LED 패널의 전송 전력은 20mW를 가정하였으며, 수신수의

표 2. 모의실험 변수
Table 2. Simulation Parameters

| Parameters | Value |
|--|---------|
| Transmitted optical power [mW] | 20 |
| Semi-angle at half power [deg] | 70 |
| Refractive index | 1.5 |
| FOV at a receiver [deg] | 60 |
| Gain of an optical filter | 1.0 |
| Detector area in PD [cm ²] | 1.0 |
| Wall reflectance | 0.54 |
| Area of each small region in the walls [m ²] | 0.2×0.2 |
| Number of simulated points in the room | 62500 |
| Interval between two simulated points [m] | 0.02 |
| Number of LED panels | 9 |
| Interval between LEDs [m] | 0.01 |
| Number of LEDs in each panel | 1600 |
| Bit period of pilot signal [nsec] | 10 |
| Guard period [nsec] | 40 |
| Number of LED panel | 9(3×3) |
| LED panel to nearest walls distance [m] | 1 |
| Clock precision [nsec] | 1 |

FoV(Field of View)는 60도, PD의 크기는 1cm 그리고 벽의 반사계수인 0.54를 설정하였다. 실내 구조 관점에서 사용되는 벽의 반사 점위는 0.2m²를 가정하였

V. 결 론

본 논문에서는 LED조명 기기를 이용한 TDoA기반의 실내 측위 시스템을 제안하였다. 제안 실내 측위 시스템의 중요 특징은 별도의 ID 정보를 전송하지 않고 고도 삼각 측량을 통해 수신기의 위치를 정확히 추정할 수 있다는 것이다. 이를 입증하기 위해 모의실험을 수행하였고, 그 결과 기존 실내 측위 기법보다 우수한 측위 정확도를 확보할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 가시광 무선 통신 기반의 측위 기법은 향후 위치 기반 서비스 환경에 적극 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

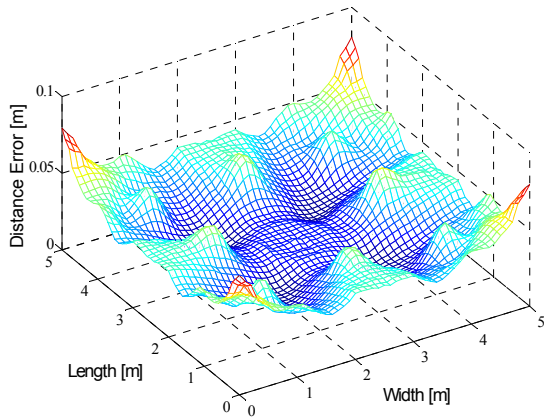


그림 6. 각 측위 지점에서의 측위 오차 분포
Fig. 6. Distribution of estimation distance error of each point

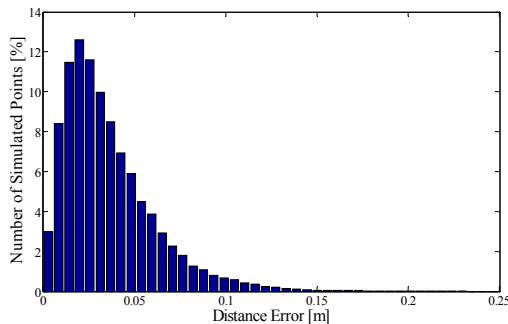


그림 7. 측위 오차별 히스토그램
Fig. 7. Histogram of Estimation Distance Error

고, 두 측위 지점간의 거리는 2cm 그리고 총 9개의 LED 패널과 각 패널은 1600개의 LED 소자를 고려하였다. 마지막으로 파일럿 신호의 펄스폭은 10ns이며, 보호 시간의 펄스폭은 40ns로 설정하였다.

4.2. 성능 평가

그림 6은 개선된 VLC-TDoA 기법을 이용하여 $5 \times 5 \times 3m^3$ 환경에서 62,500개 지점에서 측정한 측위 오차를 도시하고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 방의 중심부의 경우 낮은 측위 오차가 형성되는 것을 볼 수 있으나 모서리 또는 벽으로 가까워질수록 측위 오차의 증가가 발생한다. 그리고 아무런 물건이 없는 정사각형의 빈 방을 고려하였기 때문에 모든 측위 오차 분포는 좌우대칭의 형태를 가지고 있다. 그림 7은 각 지점의 측위 오차의 분포에 따른 히스토그램을 산출한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전체 측위 오차 결과 중 약 80%가 5cm 이내의 측위 오차를 나타내었으며, 각 측위 결과의 평균 측위 오차는 3.59cm로 나타났다.

References

- [1] Y. Gu and A. Lo, "A survey of indoor positioning system for wireless personal network," *IEEE Commun. Surveys Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13-32, First Quarter, 2009.
- [2] M. S. Rahman, Md. M. Haque, and K.-D. Kim, "Indoor positioning by LED visible light communication and image sensors," *Int. J. Elect. Comput. Eng. (IJECE)*, vol. 1, no. 2, pp. 161-170, Dec. 2011.
- [3] W. Zhang and M. Kavehrad, "A 2-D indoor localization system based on visible light LED," in *Proc. IEEE Photonics Soc. Summer Topical Meeting Series*, pp. 80-81, Seattle, U.S.A., July 2012.
- [4] M. Yoshino, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "High accuracy Positioning System using visible LED light and image sensor," in *Proc. IEEE Radio Wireless Symp.*, pp. 439-442, Orlando, U.S.A., Jan. 2008.
- [5] A. M. Vegni and M. Biagi, "An indoor localization algorithm in a small-cell LED-based lighting system," in *Proc. Int. Conf. Indoor Positioning Indoor Navigation (IPIN 2012)*, pp. 1-7, Sydney, Australia, Nov. 2012.
- [6] H. Nishikata, H. Makino, K. Nishimori, T. Kaneda, X. Liu, M. Kobayashi, and D. Wakatsuki, "Basis research of indoor positioning method using visible light communication and dead reckoning," in *Proc. Int. Conf. Indoor Positioning Indoor*

Navigation (IPIN 2011), Guimaraes, Portugal, Sep. 2011.

- [7] S. Y. Jung, S. Hann, and C. S. Park, "TDOA-based optical wireless indoor localization using LED ceiling lamps," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 57, no. 4, pp. 1592-1597, Nov. 2011.
- [8] Y. U. Lee and M. Kavehrad, "Long-range indoor hybrid localization system design with visible light communication and wireless network," in *Proc. IEEE Photonics Soc. Summer Topical Meeting Series*, pp. 82-83, Seattle, U.S.A., July 2012.
- [9] J. Hwang and M. Yoo, "The analysis on positioning error of recognition schemes of pilot signal in indoor TDoA positioning system using visible light communication," *J. Korean Inst. Commun. Sci. (KICS)*, vol. 37, no. 9, pp. 787-794, Sep. 2012.
- [10] 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, Feb. 2004.

트 령 홉 도 (Trong-Hop Do)



2009년 University of Science Ho Chi Minh City 학사
 2009년 3월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 석박통합 과정
 <관심분야> Optical Access Network, Wireless MAC Protocol, Visible Light Communication, Social Network Services

황 준 호 (Junho Hwang)



2004년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사
 2006년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사
 2013년 8월 숭실대학교 정보통신전자공학부 박사
 <관심분야> Optical Access Network, Wireless MAC Protocol, RFID/USN, Visible Light Communication

유 명 식 (Myungsik Yoo)



1989년 2월 고려대학교 전자공학과 학사
 1991년 2월 고려대학교 전자공학과 석사
 2000년 6월 SUNY at Buffalo Dept. of EE 박사
 2000년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수
 <관심분야> Optical Network, OBS, EPON, QoS, Wireless MAC Protocol, MANET, RFID/USN, CR, Visible Light Communication