

BLE 무선통신을 이용한 OWPT 시스템의 자동위치인식 알고리즘 구현

*최성수, 허두창, 이상화

한국전기연구원

sschoi@keri.re.kr

An Implementation of an Automatic Positioning Algorithm Using Wireless BLE Communication for OWPT Systems

*Sungsoo Choi, Duchang Heo, and Sang-Hwa Yi

Korea Electrotechnology Research Institute

요 약

본 논문은 BLE 무선통신 프로토콜을 사용하여 임의의 위치에 위치한 원격센서 디바이스들을 탐색하여 전력을 공급할 수 있는 광 무선전력전송(OWPT) 시스템을 소개한다. 구현된 시제품은 약 808nm의 파장을 갖는 레이저 광원을 이용하여 1~4 Watt 가변 무선전력전송 가능하다. 원격센서 디바이스의 공간좌표를 제안된 격자 탐색법인 비조밀 및 조밀 위치탐색방법을 적용할 경우, 10m 이내 무선환경에서 총 4개의 원격센서 디바이스들의 위치를 약 1분 63초 시간 안에 탐지할 수 있다.

1. 서 론

최근, 광 무선전력전송(OWPT) 시스템 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 808nm 레이저 광원은 직진성과 전송효율 측면에서 매우 유리하여 OWPT 시스템의 단말 또는 센서 전원공급 활용에 용이하다.[1,2,3]. 본 연구에서는 4W의 레이저 빔을 갈바노미터 (Galvanometer), GVS002(Thorlabs)을 사용해 0.15 mm (15 μ rad) 정밀도로 10 m 거리 내 PV셀을 조향하여 송출한다. x-y 평면 공간에 위치해 있는 원격센서 디바이스들의 위치를 인식하기 위해서 OWPT 내 BLE 무선통신 프로토콜과 시스템이 내장되어 수신상태 및 센서 측정정보들을 수집 및 분석할 수 있다 [2,3,4]. 특히, 위치탐색을 위한 수신세기 및 배터리 충전 상태정보 데이터 교환은 BLE 무선통신의 전송속도 및 프로세싱 시간 지연과 배터리방전과 같은 회로설계 및 동작 성능에 의존한다. 구현된 OWPT시스템은 상태정보를 통하여 본 시스템을 구성하고 있는 수신 세기가 가장 큰 4곳의 위치 좌표를 알아내고 저장된 위치 좌표를 향해 주기적 또는 비주기적으로 전원을 필요로 하는 원격센서장치에 레이저 빔을 송출하여 배터리를 무선충전한다.

II. 본 론

1. BLE 통신 SoC(System on a Chip)

저전력 Bluetooth(BLE) SoC로, 고성능과 저전력 특성을 갖춘 BLE SoC를 내장한다. ARM Cortex-M4 프로세서를 탑재하여 BLE 4.2/5.0 표준을 지원하며, 최대 512kB의 플래시 메모리와 64kB의 RAM을 제공한다. 2.4GHz 대역에서 BLE와 ANT, 2.4GHz 무선 통신을 지원하며, 저전력 설계로 송신 시 평균 5.3mA, 대기 시 약 0.3 μ A의 전류를 소비한다.

2. BLE 무선통신을 사용한 자동위치탐색법

본 절에서는 OWPT 자동위치탐색법으로 격자 탐색법, 기울기 하강법, 및 단면 스캐닝법 등의 세 가지 방법을 소개한 뒤, 짧은 탐색시간 성능이 월등한 비조밀 및 조밀 (Coarse&Fine) 위치 탐색 알고리즘과 해당 시스템에 대한 설계방법을 제안하고 성능결과를 비교한다.

가. 격자 탐색법

x축과 y축을 일정 간격으로 스캔하여 모든 격자점에서 수신 세기를 계산한 뒤, 가장 높은 값 4개를 탐지한다.

레이저 빔의 수신 세기, $I(x,y)$ 는 다음과 같다.

$$I(x,y) = \frac{P}{A} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 - (y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

여기서 P는 레이저 빔 출력(=4W), A는 PV셀 면적(=0.0582m²), (x_0, y_0) 는 레이저 중심 좌표, σ 는 레이저 빔의 표준편차 (빔 확산)이다.

x-y 평면에서 격자 탐색절차는 먼저, 모든 격자 점에서 $I(x,y)$ 를 계산한 후, 상위 4개의 (x_i, y_i) 위치를 탐지한다.

$$\operatorname{argmax}_{(x,y)} I(x,y), \text{ for } i = 1, 2, 3, 4. \quad (2)$$

나. 기울기 하강법

임의의 초기 좌표에서 시작하여 수신 세기가 증가하는 방향으로 이동하며 $I(x,y)$ 의 최대값을 탐지한다. 이 때 4개의 서로 다른 초기 좌표를 사용하여 다음과 같은 절차로 최대값 탐지를 수행한다. 먼저 수신 세기의 기울기를 계산한다.

$$\nabla I(x,y) = \left(\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y} \right), \quad (3)$$

여기서

$$\frac{\partial I}{\partial x} = \frac{P}{A} \left(-\frac{2(x-x_0)}{2\sigma^2} \right) \exp \left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2} \right),$$

$$\frac{\partial I}{\partial y} = \frac{P}{A} \left(-\frac{2(y-y_0)}{2\sigma^2} \right) \exp \left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2} \right).$$

다음으로 기울기 하강법으로 갱신한다.

$$(x_{n+1}, y_{n+1}) = (x_n, y_n) + \alpha \cdot \nabla I(x_n, y_n), \quad (4)$$

여기서 α 는 학습률이다. 마지막으로 4개의 초기 좌표에서 시작하여 각각 (x_i, y_i) 의 최대값을 탐지한다.

다. 단면 스캐닝법

x축 또는 y축을 따라 단면적으로 탐색하여, 각 단면에서 수신 세기가 가장 큰 위치를 찾은 뒤 이를 바탕으로 원격센서 디바이스의 위치를 계산한다. x축 방향으로 탐색을 위해서 $I(x, y)$ 를 고정된 $y = y_k$ 에서 계산한다.

$$I(x, y_k) = \frac{P}{A} \exp \left(-\frac{(x-x_0)^2 - (y-y_0)^2}{2\sigma^2} \right), \quad (5)$$

여기서 최대값 위치는 다음과 같이 계산한다.

$$x_k = \operatorname{argmax}_x I(x, y_k). \quad (6)$$

다음으로 y축 방향으로 탐색을 수행한다. $I(x, y)$ 를 고정된 $x = x_k$ 에서 계산하면,

$$I(x_k, y) = \frac{P}{A} \exp \left(-\frac{(x-x_0)^2 - (y-y_0)^2}{2\sigma^2} \right), \quad (7)$$

여기서 최대값 위치는 다음과 같이 계산한다.

$$y_k = \operatorname{argmax}_y I(x_k, y). \quad (8)$$

최종적으로 탐지된 위치는 다음과 같다.

$$(x_i, y_i) \text{ for } i=1,2,3,4. \quad (9)$$

라. 비조밀 및 조밀 (CAF) 위치탐색법

격자탐색방법은 작은 격자 크기를 사용할수록 정확도가 향상될 수 있으나, 계산 비용, $O(N^2)$ 이 매우 크다. 경사하강법은 속도가 빠르지만 초기 좌표와 학습률에 민감하며, 지역 최대값에 빠질 가능성이 있다. 단면스캐닝 탐색방법은 간단하면서도 계산 효율적이며, 초기 탐지에 적합하다. 격자탐색법의 위치탐색시간을 줄이기 위해 조밀하지 않은 격자를 사용하여 대략적인 위치를 탐색한 후, 해당 위치 주변을 조밀한 격자로 정밀하게 탐색하는 CAF (Coarse and Fine) 알고리즘을 제안한다. 먼저, Coarse Grid 탐색을 위해 전체 $x-y$ 평면을 큰 간격($\Delta x, \Delta y$)으로 분할하여 초기 탐색을 수행한다. 격자포인트는 다음과 같다.

$$x_i = x_{\min} + i \cdot \Delta x, \quad y_i = y_{\min} + j \cdot \Delta y, \quad (10)$$

여기서 $i=0,1,\dots,N_x, j=0,1,\dots,N_y$ 이고, $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ 는 평면범위, $\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{N_x}, \Delta y = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{N_y}$ 는 격자간격이다. 이 단계에서 각 격자점에서 수신세기를 계산한다.

$$I(x_i, y_j) = \frac{P}{A} \exp \left(-\frac{(x_i - x_0)^2 - (y_j - y_0)^2}{2\sigma^2} \right). \quad (11)$$

수신 세기가 가장 큰 몇 개의 위치를 찾기위해 상위 M개의 후보 위치를 선택한 후 최대값을 탐색한다.

$$(x_i, y_j)_{\text{coarse}} = \operatorname{argmax}_{(x_i, y_j)} I(x_i, y_j), \text{ for } M \text{ points}. \quad (12)$$

Coarse Grid 탐색에서 탐지된 상위 M개의 후보위치를 중심으

로 작은 간격($\delta x, \delta y$)의 정밀격자를 생성하여 다시 탐색한다. 후보 위치 $(x_{\text{coarse}}, y_{\text{coarse}})$ 주변에 정밀 격자를 생성하면 $x_{i,\text{fine}} = x_{\text{coarse}} - r + i \cdot \delta x, \quad y_{i,\text{fine}} = y_{\text{coarse}} - r + i \cdot \delta y$, 여기서 $i=0,1,\dots,N_f, j=0,1,\dots,N_f$, r 은 탐색반경이다. 각 위치에서 더 높은 해상도로 수신 세기를 계산하면

$$I(x_{i,\text{fine}}, y_{j,\text{fine}}) = \frac{P}{A} \exp \left(-\frac{(x_{i,\text{fine}} - x_0)^2 - (y_{j,\text{fine}} - y_0)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (13)$$

최종적으로 정밀격자에서 최대값 위치를 탐지한다.

$$(x^*, y^*) = \operatorname{argmax}_{(x_{i,\text{fine}}, y_{j,\text{fine}})} I(x_{i,\text{fine}}, y_{j,\text{fine}}). \quad (14)$$

위 탐색방법에 대한 시간복잡도 성능비교결과는 격자탐색법의 경우는 격자크기가 50 이상부터 지수함수적으로 증가되며, 단면스캐닝법은 $O(M \cdot N^2)$, 기울기하강법은 $O(N_{\text{iter}})$ 시간복잡도를 갖는다. 반면에 CAF법의 시간복잡도는 $O(N_{\text{coarse}} + M \cdot N_{\text{fine}})$ 이며, 격자크기 N을 10,000까지 확장에도 불구하고 그리드 크기에 관계없이 $N_{\text{coarse}} = 2500, N_{\text{fine}} = 144$ 로 수렴한다.

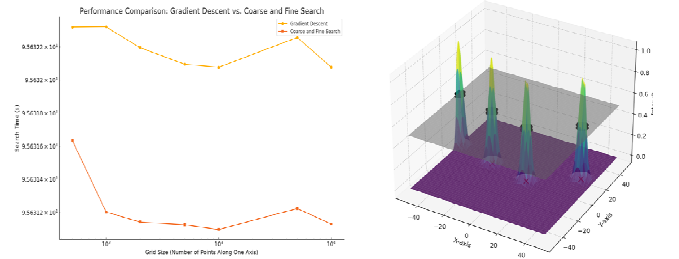


그림1 OWPT시스템 자동위치탐지 결과 (좌측) 자동위치탐색알고리즘 성능비교 그래프, (우측) 총 4개의 원격센서디바이스들의 탐지결과 레이저빔 프로파일 (직경= 500mm, 최대세기= 4.2W/m²@10m)

III. 결론

본 논문에서는 808nm 파장을 갖는 레이저기반 OWPT 시스템 위치탐지 알고리즘을 분석하고 위치탐색 시간복잡도 성능을 비교하였다. BLE 무선통신을 이용한 수전 상태정보를 기반으로 평면 공간상의 4개의 원격센서디바이스를 탐지하는데 CAF알고리즘이 비교우위의 성능결과를 얻었으며, 소요시간은 약 1분 63초이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술위원회 지원의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 박사업임 (No. 25A01022)

참고 문헌

- [1] Matthew J. Chabalko, et. al., "Quasistatic Cavity Resonance for Ubiquitous Wireless Power Transfer", *PLOS ONE*, Feb. 2017.
- [2] 최성수 외, "비파괴검사를 위한 자동위치탐색 및 자율형 안전제어기능을 갖는 OWPT시스템 설계 및 구현 연구", *한국통신학회 2024동계학술대회*, 2024.2.
- [3] D. Heo et.al., "Optical Wireless Power Transfer Network System for AE Sensor Using 808nm Laser Diode," 2024 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo 2024, May 2024.
- [4] Gomez, et. al., "Overview and evaluation of Bluetooth Low Energy: an emerging low-power wireless technology". *Sensors*, Aug. 2012.