

# 구배값을 이용한 스테레오 열감지 센서 시스템

## Gradient based Stereo Temperature Sensor System

이수용<sup>†</sup>

Sooyong Lee<sup>†</sup>

**Abstract:** Some animals have special sensing functions in order to find foods, home and mates. Instead of passively sensing, they discharge signals and then extract necessary information from the response. More importantly, they utilize the gradients of the sensed signal in order to find the destination or objects. In this paper this special strategy is formulated mathematically, i.e., the perturbation and the correlation based gradient estimation is developed. A stereo sensor system using temperature sensors mounted on motors is developed for verification. The proposed method can estimate the gradient of the measured value accurately. Using this method, the direction in the maximum measured value can be estimated accurately, and the position of the heat source can be estimated from the intersection of the directions estimated from both sensors.

**Keywords:** Stereo Sensing, Gradient Estimation, Correlation/perturbation

### 1. 서 론

센서의 목적은 물리량을 원하는 신호로 변환하는 것이며, 다양한 물리량에 대하여 많은 종류의 센서가 있고 그 출력 형태 또한 다양하며 물리량 변환의 정확도 및 정밀도를 높이는 것이 주 연구 목적이었다. 센서 자체의 개발뿐 아니라 센서 값의 해석 또한 매우 중요하며 생물체의 감지 기능에 기반한 측정 방법에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 일부 생물체는 고유의 감지 방법을 갖고 있으며 초음파를 발사하여 반사파가 도달할 때까지의 시간을 측정하여 거리를 추정하는 것이 그 예이다. 이와 유사하게 돌고래, 범고래도 음향 반사를 이용하여 주변 환경을 인지한다. 자신이 주변 환경에 신호를 가한 후 이에 대한 반응에 기초하여 원하는 값을 얻는 방법이다.

또 다른 특징적인 방법은 순간의 측정 값뿐만 아니라 센서 값의 시간/공간 구배값을 활용하는 것이다. 예를 들어 별코 두더지(star nosed mole)는 단순히 냄새를 맡는 것이 아니라 이의 구배값을 이용하여 먹이를 찾는다<sup>[1]</sup>. 특히 두 개의 스테레오 기관을

사용하여 냄새의 근원지를 찾는다. 오리너구리는 전기량을 측정할 수 있는 센서가 머리에 달려 있으며, 이를 계속 흔들며 주변 생물체에서 발생하는 미세 전기 신호를 감지하여 이들의 위치를 추정한다고 알려졌다<sup>[2]</sup>. 제왕나비는 장거리 이동시 두 개의 더듬이 감지 신호의 차이로부터 태양의 위치를 추정하여 이로부터 목적하는 방향을 찾는다<sup>[3]</sup>. 이와 유사한 원리로 초파리는 양 더듬이의 냄새 감지값의 차이로 냄새 근원지의 방향을 추정한다<sup>[4]</sup>. 벌은 주변의 꽃에서 발생하는 미세 전기장을 감지하고, 이의 구배값을 활용하여 꽃을 향한다고 연구되었다<sup>[5]</sup>.

본 논문에서는 능동적인 신호를 가하여 이에 대한 반응의 변화를 활용하며, 또한 공간 구배값을 구할 수 있는 섭동/상관 관계기반의 구배값 추정 방법<sup>[6]</sup>을 사용하였다. 일반적으로 구배값은 연속한 측정값들의 차이로부터 계산할 수 있으나, 각종 잡음으로 인하여 신뢰도가 낮아진다. 제안하는 방법은 적분 형태의 수식으로부터 구배값을 추정하므로 이러한 문제점을 해결할 수 있다. 또한 두 개 센서로 구성된 스테레오 시스템으로 신호원의 위치 추정이 가능하다. 본 논문에서는 비접촉 온도 측정이 가능한 복사열 측정방식의 온도 센서를 사용하여 열원의 방향을 추정하며, 두 온도 센서의 추정 방향의 교점에 그 열원이 위치함을 예측할 수 있다. 즉, 함수 입력의 구배값이 가용하면 함수값을 최대화하는 입력값을 찾을 수 있으므로, 이 방법으로 전체 환경을 스캔하지 않더라도 상대적으로 짧은 시간 동안 신호원의 위치를 탐지할 수 있고, 이는 시간에 따라 변화하는

Received : Sep. 8. 2019; Revised : Oct. 5. 2019; Accepted : Oct. 13. 2019

※ This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2017S1A5A2A03068271)

† Professor, Corresponding author: Dept. of Mechanical Design and System Engineering, Hongik University, 94, Wausan-ro, Mapo-gu, Seoul, Korea (sooyong@hongik.ac.kr)

환경내에서도 유효한 방법이다. 제한하는 방법은 자율주행 로봇 분야 및 센서네트워크의 센서노드 위치 배치에 적용 가능하다.

다음 장에서 섭동/상관관계 기반의 공간 구배값 추정에 대한 이론을 기술하였으며, 스테레오 온도 측정 시스템 실험을 위한 장치 구성과 실험결과를 3장에 포함하였다.

## 2. 섭동/상관관계 기반 공간 구배값 추정

측정값의 구배값은 인접한 측정값들의 차이로부터 구할 수 있으나 다양한 이유로 인한 잡음 등, 오차가 포함되어 있는 경우에는 이러한 방법을 사용하면 신뢰도가 낮아진다. 본 논문에서는 섭동/상관관계 기반의 구배값 추정 방법을 사용한다.

단일 입력 변수  $\phi$ 의 함수  $S(\phi)$ 의 경우, 입력 변수 값이  $\phi = \phi_0$ 일 때의 구배값  $\frac{\partial S(\phi)}{\partial \phi} \Big|_{\phi=\phi_0}$ 을 구하려면 다음과 같이 진폭  $\epsilon$ 의 총  $2n$ 개로 이루어진 한 주기 섭동 신호를 입력 변수에 추가한다.

$$\phi_i = \phi_0 + \epsilon \sin\left(\frac{\pi}{n} i\right) \quad (1)$$

여기서  $i = 1, \dots, 2n$ 이다.  $\phi = \phi_0$ 일 때 함수값을 선형화하여  $a_0 + a_1\phi$ 의 식으로 표현하여 선형회귀 방법을 적용하여  $a_1$  값을 구하면 이것이 구배값이다. 선형회귀 이론에 따르면, 일차 함수  $a_0 + a_1\phi$ 로 선형화한 함수값과 원 함수값  $S(\phi)$  차이의 제곱을 총  $2n$ 개 샘플의 총합을 다음과 같은 식으로 정의하고,

$$\Pi = \sum_{i=1}^{2n} [S(\phi_i) - (a_0 + a_1\phi_i)]^2 \quad (2)$$

이를 각각  $a_0, a_1$ 에 대하여 미분한 값이 0인 다음 두 식으로 구성된 연립방정식과

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^{2n} [S(\phi_i) - (a_0 + a_1\phi_i)] = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^{2n} [\phi_i S(\phi_i) - (a_0\phi_i + a_1\phi_i^2)] = 0 \quad (4)$$

다음 관계들을 이용하여,

$$\sum_{i=1}^{2n} \phi_i = \sum_{i=1}^{2n} \left[ \phi_0 + \epsilon \sin\left(\frac{\pi}{n} i\right) \right] = 2n\phi_0 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{2n} \phi_i^2 = \sum_{i=1}^{2n} \left[ \phi_0 + \epsilon \sin\left(\frac{\pi}{n} i\right) \right]^2 = 2n\phi_0^2 + n\epsilon^2 \quad (6)$$

해를 구하면,

$$a_0 = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \phi_i - \frac{\phi_0}{n\epsilon} \sum_{i=1}^{2n} \left[ S(\phi_i) \sin\left(\frac{\pi}{n} i\right) \right] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{\sum_{i=1}^{2n} [\phi_i S(\phi_i)] - \phi_0 \sum_{i=1}^{2n} S(\phi_i)}{n\epsilon^2} \quad (8) \\ &= \frac{\sum_{i=1}^{2n} [S(\phi_i)(\phi_i - \phi_0)]}{n\epsilon^2} = \frac{\sum_{i=1}^{2n} \left[ S(\phi_i) \epsilon \sin\left(\frac{\pi}{n} i\right) \right]}{n\epsilon^2} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^{2n} \left[ S(\phi_i) \sin\left(\frac{\pi}{n} i\right) \right]}{n\epsilon} \end{aligned}$$

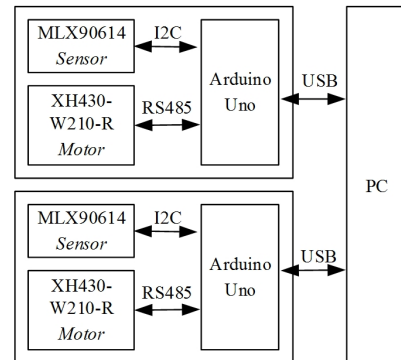
와 같다. 따라서  $\phi = \phi_0$ 일 때 함수  $S(\phi)$ 의 구배값은

$$\frac{\partial S}{\partial \phi} \Big|_{\phi_0} = a_1 = \frac{\sum_{i=1}^{2n} \left[ S(\phi_i) \sin\left(\frac{\pi}{n} i\right) \right]}{n\epsilon} \quad (9)$$

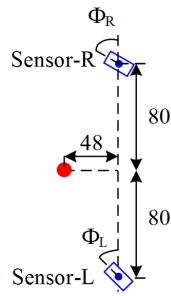
의 식으로부터 구한다. 구배값을 인접한 함수값의 차이를 사용하지 않고 적분 형식으로 구한 것이 특징이다. 본 논문에서 함수  $S(\phi)$ 는 센서 측정값이며,  $\phi$ 는 센서의 각도이다.

## 3. 스테레오 센싱

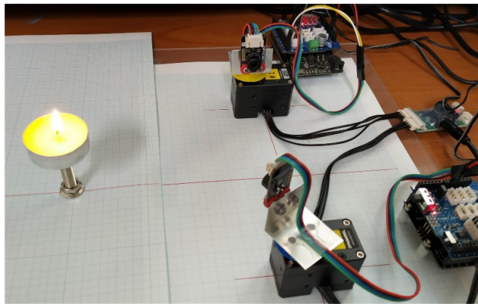
본 연구에서 사용한 온도센서는 MLX90614-BBC를 이용한 적외선 복사열 측정 방식이며 온도 측정범위는  $-70^{\circ}\text{C} \sim 382^{\circ}\text{C}$ , 분해능은  $0.01^{\circ}\text{C}$ , settling time은 내부 디지털 필터 설정을 통하여 변경할 수 있으며 0.14초로 설정하여 사용하였다. 센서의 FOV (Field of View)는  $35^{\circ}$ 이다. 모터는 (주)로보티즈의 Dynamixel XH430-W210-R을 사용하였고 Arduino Uno가 각 모터의 위치 제어와 센서 인터페이스를 담당하고 PC에서 센서 측정값 해석 및 모터



[Fig. 1] Stereo sensor system of sensors, motors, Arduino Unos and a PC



[Fig. 2] Workspace: stereo sensor system and a heat source



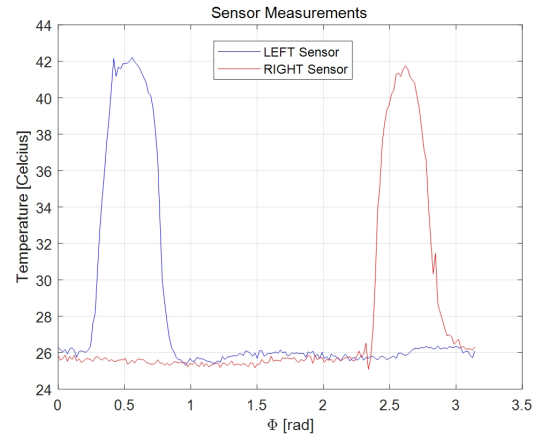
[Fig. 3] Photo of workspace: stereo sensor system and a heat source

위치명령을 생성한다. [Fig. 1]과 같이 스테레오 센싱을 위하여 동일한 두 개의 센서/모터 모듈을 PC에 연결하였다.

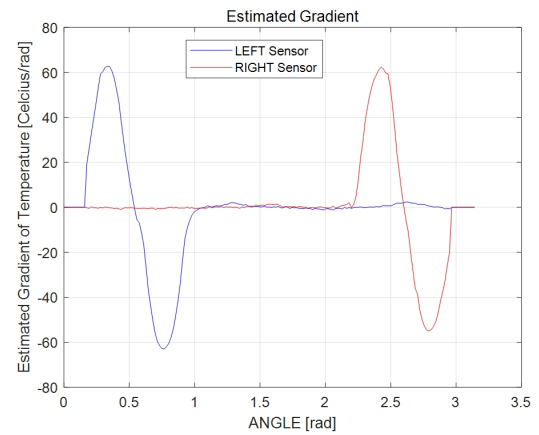
온도센서는 모터축에 브라켓을 사용하여 고정되며, 모터의 위치제어 분해능은 이론적으로  $360^\circ/4096=0.0889^\circ$  이나 실제 제어성능은 측정 결과 약  $0.9^\circ$  의 분해능을 갖는다. [Fig. 2]와 같이 시계 반대방향의 회전을 양의 방향으로 정의하였고, 두 개의 회전축은 Y축 방향으로 원점에서 각각 80 mm 떨어져 있고, 첫 번째 실험의 열원(heat source)은 원점에서 X축 방향으로 -48 mm인 곳에 위치한다. 열원은 촛불을 사용하였고, 실내 공기의 흐름에 따라 약간의 흔들림이 존재한다. 실제 실험 장면은 [Fig. 3]과 같다.

모터를 반 바퀴 회전하는 동안  $1^\circ$  변화 마다 센서 값을 측정하여 [Fig. 4]에 나타내었다. 열원의 위치가 두 센서의 중앙 앞쪽이므로 왼쪽, 오른쪽 센서 값은 대칭형태이다.

온도센서는 복사열 측정 방식이므로 열원으로부터 거리에 따라 측정 값이 감소하고 열원의 온도 및 거리를 모르므로 어느 한쪽의 센서 값으로는 그 열원의 방향은 알 수 있으나 위치를 추정할 수는 없다. 만약 전방  $180^\circ$ , 또는  $360^\circ$  전 방향 회전 후 국소 최대 값을 찾았다면 열원의 방향을 찾을 수 있다. 그러나 전체 소요 시간이 무시 못할 정도로 크며, 특히 센서 시스템이 이동체에 고정되어 있다면 회전하는 동안 센서 중심의 위치가 변하는 문제가 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 섭동/상관관계 기반의 구배값을 상대적으로 매우 짧은 시간 내에 추정하고, 이를 기반으로 센서의 방향을 갱신하여 최대 온도 측



[Fig. 4] Sensor measurements of left and right sensors with half turn

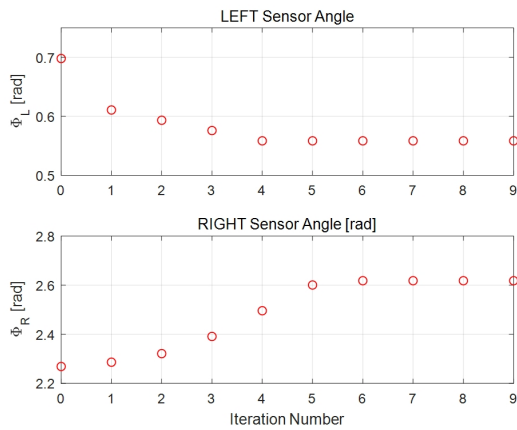


[Fig. 5] Estimated gradients of each temperature sensor measurement from perturbation/correlation

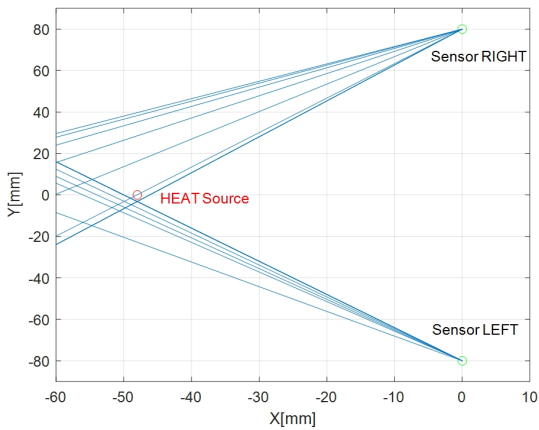
정값을 얻는 방향을 추정하는 방법을 사용한다. 제안한 방법의 검증은 위하여  $1^\circ$ 씩 회전 후, 그 각도에서의 구배값을 추정하기 위하여 먼저 식 (1)에서  $\epsilon = 0.1 [rad]$ ,  $n = 20$ 의 섭동값을 가하고, 한 주기 동안 측정 값들을 식 (10)에 따라 구배값을 추정하였다. 그 결과는 [Fig. 5]와 같다. 이는 제안한 방법의 검증에 위함이다. 센서의 settling time을 고려하여 0.2초마다 온도를 측정하였으며 총 20번의 측정이 한 주기 동안 이루어지므로 매 4초마다 측정값들을 사용하여 구배값을 계산한다. 이 경과 시간은 전적으로 사용한 온도 센서의 특성 값(settling time)에 영향을 받았으며, 모터 구동 속도 및 통신 속도는 매우 높으므로 이 두 가지 요소로 인한 시간 지연은 무시할 수 있을 정도로 작다.

열원의 방향을 찾는다는 것은 측정값  $S(\phi)$ 를 최대로 하는 입력 변수  $\phi$ 의 값을 찾는 최적화 과정이므로 다음 식을 사용하여 입력 변수 값을 갱신한다.

$$\phi_{new} = \phi_{old} + \eta \frac{\partial S}{\partial \phi} \tag{10}$$



[Fig. 6] Angle updates of each sensor to find the maximum temperature, i.e. direction of heat source



[Fig. 7] Sensor direction movements in each iteration: workspace view

이 식에서 구배값은 섭동/상관관계로부터 구하며, 실험에서 사용한 비례 상수  $\eta$ 의 값은 0.1을 사용하였다. 이에 따른 왼쪽, 오른쪽 센서의 각도 변화는 [Fig. 6]와 같이 수렴하여 최대 측정 값에 해당하는 센서 방향을 찾게 된다.

센서의 방향을 직선으로 표현하여 수렴해 가는 과정을 실험 환경에 나타내면 [Fig. 7]과 같다. 최종 수렴한 두 센서의 방향을 나타내는 직선의 교점이 열원의 추정 위치이다. 이 과정에서 발생하는 오차의 원인은 열원으로 사용한 촛불의 흔들림 뿐만 아니라, 한 주기 섭동 동안의 모터 위치 명령이  $\sin$ 함수에 따라 변화되는데, 계산상의 명령 값과 실제 모터의 정확도가 보장되는 명령 값이 최소 움직임 한계값(threshold)의 영향을 받기 때문이다.

만약 두 개 이상의 열원이 존재한다면 국소 최대 값을 찾아 수렴 값을 찾은 이후에 다시 주변의 국소 최대 값이 존재하는지 탐색하여야 한다. 이를 위한 방법은 다음 두 가지를 제안한다.

- 국소 최대 값을 찾은 후 갱신식 (10)을 다음과 같이 수정하여,

$$\Phi_{new} = \Phi_{old} - \eta \frac{\partial S}{\partial \Phi} \tag{11}$$

국소 최소 값을 찾은 후, 이때까지의 증가/감소 방향을 지속하며, 즉 국소 최소 값을 지나 다시 갱신식 (10)을 사용하는 방법 - 국소 최대 값을 찾은 후, 다음 식 (12)와 같이 이 때까지의 증가/감소 방향으로 설정 값  $\nabla$ 만큼 더하거나/빼 값을 사용하여 국소 최대 값 부근을 벗어나는 것이다.

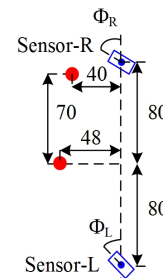
$$\Phi_{new} = \Phi_{old} + \nabla \text{sign}\left(\frac{\partial S^*}{\partial \Phi}\right) \tag{12}$$

단 이 방법은 열원들의 배치에 따라 다음 국소 최대 값을 찾지 못하고 지나치는 경우가 발생할 수 있다.

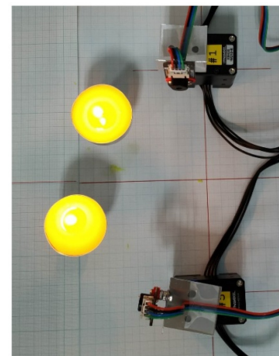
다음으로 두 개의 열원이 존재하는 경우에 대하여 앞선 방법을 적용하였고, 열원의 위치는 [Fig. 8] 및 [Fig. 9]과 같다.

실제 제안한 방법을 사용시에는 필요 없는 과정이나, 앞의 경우와 마찬가지로 검증을 위하여 모터를 반 바퀴 회전하며 1° 변화 마다 센서 값을 측정 한 결과를 [Fig. 10]에 나타내었다.

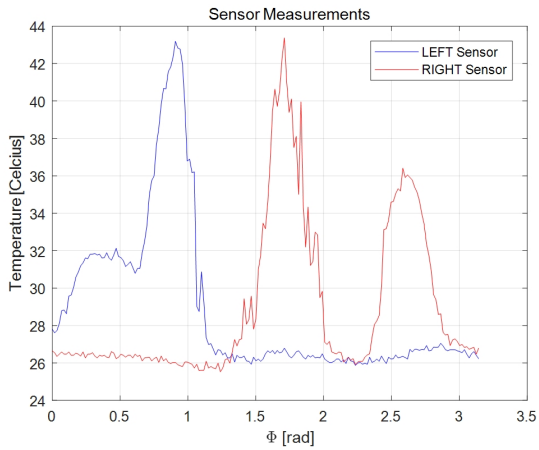
제안한 방법의 실효성을 검증하기 위하여 일반적인 차분 형태의 구배값 추정 결과와 본 논문에서 제안한 방법을 사용한 결과를 비교하였다. 이를 위하여 [Fig. 10]에 나타낸 실험 결과 중 상대적으로 잡음 정도가 심한 우측 센서 측정값의 일부를 검증용 샘플로 사용하였고 이는 [Fig. 11]과 같다.



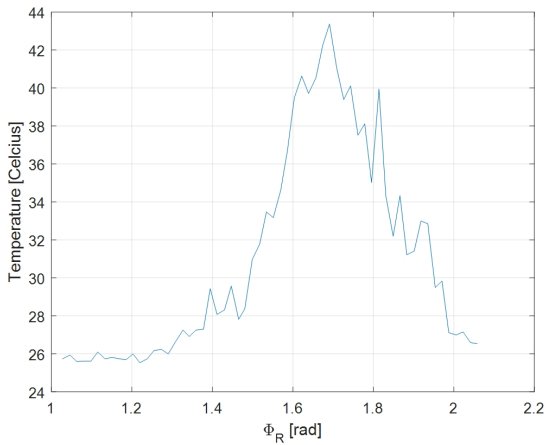
[Fig. 8] Workspace: stereo sensor system and two heat sources



[Fig. 9] Photo of workspace: stereo sensor system and two heat sources



[Fig. 10] Sensor measurements of left and right sensors with half turn: two heat sources



[Fig. 11] Sensor measurements of left and right sensors with half turn: two heat sources

일반적인 구배값 추정은 전향차분(forward difference)의 경우 다음과 같은 식을 사용하거나

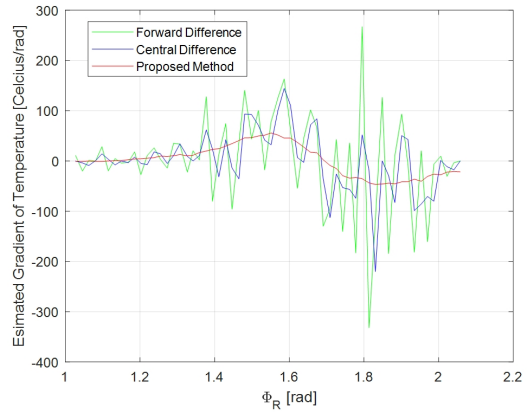
$$\frac{\partial S}{\partial \Phi} \Big|_{\Phi_i} = \frac{S(\Phi_{i+1}) - S(\Phi_i)}{\Phi_{i+1} - \Phi_i} \quad (13)$$

다음 식과 같은 중앙차분 (central difference)법을 사용한다.

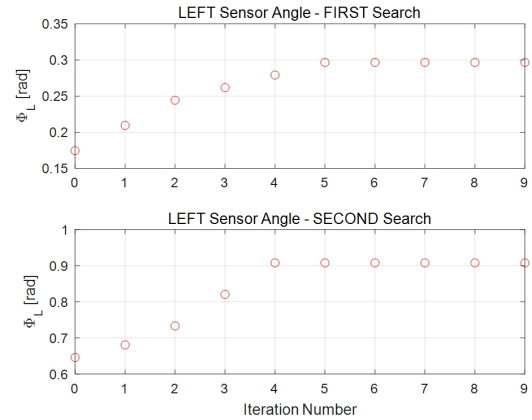
$$\frac{\partial S}{\partial \Phi} \Big|_{\Phi_i} = \frac{S(\Phi_{i+1}) - S(\Phi_{i-1})}{\Phi_{i+1} - \Phi_{i-1}} \quad (14)$$

이와 같은 두 가지 차분형태의 구배값 추정 방법과 제안한 방법을 동일한 실험데이터를 이용하여 구배값을 추정한 결과는 [Fig. 12]와 같으며, 특히 잡음이 심한 경우에 제안한 방법의 효율성을 보여준다.

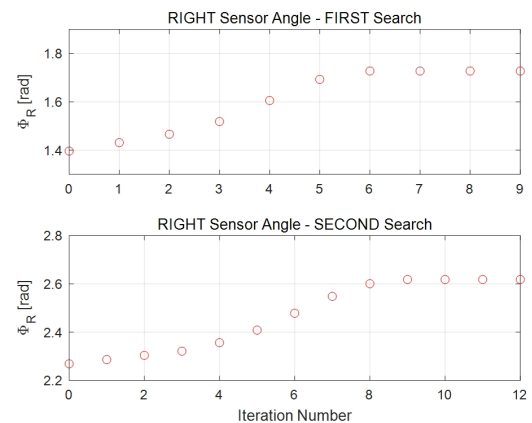
센서 값의 국소 최대 값을 찾기 위한 탐색은 앞의 경우와 마



[Fig. 12] Sensor measurements of left and right sensors with half turn: two heat sources



[Fig. 13] Angle updates of each sensor to find the local maximum temperature, i.e. direction of nearby heat source: left sensor



[Fig. 14] Angle updates of each sensor to find the local maximum temperature, i.e. direction of nearby heat source: right sensor

찬가지로 식 (9)를 사용하여 구한 구배값을 사용하여 식 (10)에 따라 각도값을 갱신하여 그 결과 [Fig. 13] 및 [Fig. 14]와 같이 열원 방향으로 수렴함을 알 수 있다.

섭동 신호의 주요 설정값인 진폭,  $\epsilon$ 은 추정 구배값의 정확도에 직접 영향을 미치므로 매우 중요한 요소이다. 섭동 입력

의 진폭이 충분히 작을수록 참값에 가까운 구배값을 얻게 됨은 자명하고, 이 값을 0으로 근사 했을 때를 수학적 미분으로 정의한다. 그러나 실제로는 진폭이 작으면 충분한 함수값의 변화를 얻지 못하므로 Persistent Excitation 조건을 만족하지 못한다. 또한 센서를 구동하는 경우는 구동 시스템의 동역학적 특성으로 인한 threshold 값이 존재하여 완전한 정형과 형태의 움직임을 구현할 수 없다. 다른 한편으로 진폭을 크게 할수록 선형 모델과 실제 함수와의 차이가 커지게 되는 결과를 얻는다. 따라서 다음과 같은 지수를 정의하여 이를 사용하면 주어진 진폭에 대한 선형화 모델의 적정성을 정량적으로 표현할 수 있다.

$$J = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} [S(\phi_i) - (a_0 + a_1 \phi_i)]^2 \quad (15)$$

한 주기 동안 측정점의 개수  $n$ 은 그 값이 클수록 정확도를 높여주나 측정 시간이 증가되는 문제점이 있으며, 최소값은 Shannon의 샘플링 이론에 의하면  $n$ 은 적어도 2보다 커야 한다. 실제로 2보다는 충분히 큰 값을 사용한다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 일부 동물들의 특별한 감각기능의 기본원리가 피동적인 감지가 아니라 능동적인 신호의 입력에 대한 반응을 감지하는 것이며, 한 순간의 측정값이 아니라 이의 구배값을 활용하는 것임을 바탕으로 이를 수학적으로 기술하였다. 또한 온도 센서를 사용한 스테레오 센서 시스템을 구성하여 이를 실험적으로 검증하였다. 제안한 방법으로 측정값의 구배값을 정확히 추정할 수 있으며, 이를 사용하여 최대 측정 값 방향을 정확히 추정하며, 스테레오 특성으로 양쪽 센서로부터 추정된 방향의 교점으로부터 열원의 위치도 추정할 수 있었다.

#### References

- [1] K. C. Catania and F. E. Remple, "Asymptotic Prey Profitability Drives Star-nosed Moles to the Foraging Speed Limit," *Nature*, vol. 433, pp. 519-522, Feb., 2005.
- [2] S. Park, J. Chung, S. Seodong, and E. Hong, *Animals with Poison*, MID, 2015.
- [3] P. A. Guerra1, C. Merlin, R. J. Gegear, and S. M. Reppert, "Discordant Timing between Antenna Disrupts Sun Compass Orientation in Migratory Monarch Butterflies," *Nature Communication*, 2012, DOI: 10.1038/ncomms1965.
- [4] Q. Gaudry, E. J. Hong, J. Kain, B. L. de Bivort, and R. I. Wilson, "Asymmetric Neurotransmitter Release Enables Rapid Odor Lateralization in Drosophila," *Nature*, vol. 493, pp. 424-428, 2013.
- [5] V. Callier, "How Bees Sense a Flower's Electric Field," *Science*, 2016, DOI:10.1126/science.aag0578.
- [6] S. Lee, "Environment Perception using Artificial Neural Network with Spatial Gradient Inputs," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 25, no. 6, pp. 485-491, 2019.



#### 이 수 용

1989 서울대학교 기계공학과(공학사)  
 1991 서울대학교 기계설계학과(공학석사)  
 1996 Massachusetts Institute of Technology, Mechanical Engineering(공학박사)  
 1996~1999 한국과학기술연구원, 선임연구원  
 2000~2003 Texas A&M University, Mechanical Engineering, Assistant Professor  
 2003~현재 홍익대학교, 기계시스템디자인 공학과, 교수

관심분야: Robotics