

불균등 분포에 따른 센서 배치 패턴 연구¹⁾

김용환, 오영준, 한연희²⁾

한국기술교육대학교 첨단기술연구소 지능네트워크연구실
cherish@kut.ac.kr, youngjn@kut.ac.kr yhhan@slu.ac.kr

A Study on Sensor Deployment Patterns with Non-uniform Sensor Distribution

Yong-hwan Kim, Young-jun Oh, Youn-Hee Han

Laboratory of Intelligent Networks, Advanced Technology Research Center
Korea University of Technology

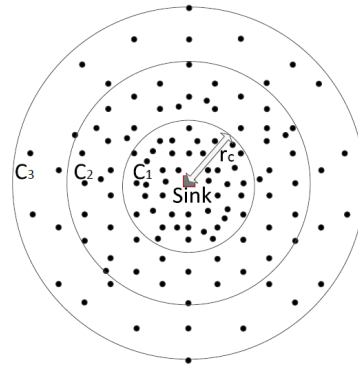
요 약

무선 센서 네트워크에서 관심지역이 배치된 센서들에 의하여 모두 관측되고 이의 데이터가 싱크노드까지 전달되는 동시에 네트워크의 수명을 최대화하도록 센서들을 배치하는 연구는 중요하다. 본 논문에서는 센서 에너지 소모의 균등화를 통해 네트워크 수명의 최대화를 이루기 위해 불균등 분포를 따르면서 네트워크의 기능이 올바르게 동작할 수 있도록 하는 센서의 배치 패턴을 제시한다.

1. 서론

센서를 효율적으로 배치하는 문제는 센서 네트워크의 설계와 운용에 있어 중요한 문제이다. 센서를 어느 위치에 배치하는지 설계함에 있어서 커버리지(coverage)와 연결성(connectivity)을 보장하도록 하는 것은 센서 네트워크를 실제 환경에 적용함에 있어서 중요한 일이다. 이러한 센서 배치 패턴을 찾는 문제는 센서네트워크의 운영비용을 줄여줄 수 있으며 토폴로지 제어 알고리즘 및 프로토콜 설계하는데 있어서 지침 또는 성능평가의 지표를 제시할 수 있다는 측면에서 의미가 있다 [1].

센서 배치 패턴을 찾는 문제에서 에너지 효율성 또한 중요한 고려해야 할 사항이다. 무선 센서 네트워크에서 데이터의 전송 흐름은 대부분 다 대 일의 형태이기 때문에 싱크 노드 주변의 센서에 데이터 트래픽이 몰리는 현상이 발생한다. 따라서 싱크노드로부터 위치상으로 멀리 배치된 센서에 비하여 싱크노드 근처의 센서들이 더 빨리 에너지를 소모하고 네트워크에서 제외되게 된다. 이는 결과적으로 네트워크의 수명을 단축시키게끔 하는 원인이 된다. 그러나 기존의 센서 배치 패턴을 찾는 문제에서는 이러한 에너지 소모의 불균형을 고려하지 않고 있다. 본 논문에서는 센서 에너지 소모의 균등화를 통해 네트워크 수명의 최대화를 달성하기 위해 싱크노드에 가까울수록 더 많은 센서를 배치하는 불균등 분포에 따라 센서의 배치 패턴을 제시한다.



(그림 1) 여러개의 코로나로 구성된 원형의 영역

본 논문에서는 불균등 분포를 따르면서 커버리지와 연결성을 보장하는 패턴으로써 삼각, 마름모, 사각, 그리고 육각 패턴을 제시한다. 그리고 수치 결과에서 제안한 패턴을 네트워크에서 요구하는 센서의 수의 측면에서 비교한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 네트워크 모델을 제시하고 본 논문에서 해결하고자 하는 문제를 정의한다. 3장에서는 불균등 분포를 따르면서 커버리지와 연결성을 보장하는 패턴을 제시한다. 4장에서 이에 대한 수치 결과를 제시하고 5장에서 본 논문의 결론을 짓는다.

2. 네트워크 모델 및 문제 정의

본 논문에서는 N 개의 센서를 원형의 영역 A 에 배치한다고 가정한다. 이 때 싱크노드는 영역 A 의 중심에 존재한다고 한다. 또한 영역 A 는 그림 1에서 보이는 것과 같이 R 개의 코로나들로 나누어진다. i 번째 코로나는 C_i 로 표기하고 각 코로나의 폭은 센서의 통신 반경 r_c 와 같다.

1) 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행(2011-0005057)되었으며, 또한 이 논문은 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과입니다

2)한연희: 교신저자

모든 센서는 단위 영역마다 같은 데이터 생산율을 가진다. C_i 에서 생성된 임의의 데이터 패킷은 $C_{i-1}, C_{i-2}, \dots, C_1$ 을 통하여 싱크 노드까지 전송된다. 여기서 데이터의 압축은 고려하지 않는다. 관측 반경 r_s 및 통신 반경 r_c 는 모든 센서에 대해 동일하다고 가정한다. 마지막으로 본 논문에서 사용하는 기호들은 다음과 같다.

- A_i : 코로나 C_i 영역의 넓이
- N_i : 코로나 C_i 에 존재하는 센서들의 수
- p_i : 코로나 C_i 의 센서 밀집도 ($p_i = N_i/A_i$)
- ND_i : 코로나 C_i 에 속한 임의의 센서가 전송하는 데이터 패킷의 개수

앞서 정의한 네트워크 모델에 따르면 내부 코로나에 속하는 센서들은 자신이 관측한 데이터와 외부 코로나에 속하는 센서들로부터 생성된 데이터 모두 전송해야 한다. 결과적으로 내부 코로나에 속한 센서들을 외부 코로나에 속한 센서들보다 빠르게 에너지를 소모하게 된다. 이러한 불균형한 에너지의 소모는 네트워크의 수명을 줄어지게 만든다. 에너지 소모의 균형을 위하여 본 논문에서는 센서의 배치가 싱크 노드와 코로나의 거리가 가까울수록 센서들의 밀집도를 높이는 불균등 분포를 따르도록 한다.

다음은 본 논문에서 해결하고자 하는 문제의 정의이다.

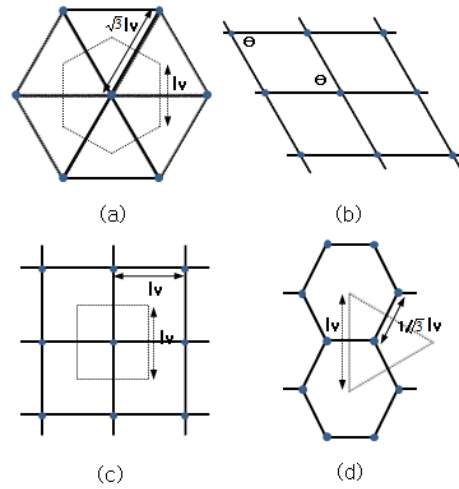
[Definition 1] 센서의 배치 패턴 문제: N 개의 센서를 싱크 노드가 중심에 있는 원형의 영역 A 에 배치 할 때, 다음의 조건을 만족하는 센서의 배치 패턴 찾기

- 1) (커버리지) 영역 A 의 모든 지점이 센서에 의하여 관측되어야 한다.
- 2) (연결성) 임의의 센서 사이에 데이터 전송 경로가 존재하여야 한다.
- 3) (불균등 분포) 각 코로나 C_i 에 속하는 센서들의 배치는 에너지 소모의 균형을 이루기 위해 밀집도 p_i 에 따라야 한다.
- 4) 1), 2), 3)을 만족하기 위해 요구되는 센서들의 수를 최소화해야 한다.

3. 불균등 분포를 따르는 센서 배치 패턴

본 장에서는 커버리지와 연결성을 보장하고 불균등 분포를 따르는 센서 배치 패턴으로 삼각, 마름모, 사각, 그리고 육각 패턴을 제시한다. 2장에서 제시한 센서의 배치 패턴 문제를 해결하기 위하여 먼저 균등 분포에 따라 센서들을 배치할 경우, 커버리지와 연결성을 보장하면서 요구되는 센서들의 수를 최소화할 수 있는 배치를 제시한다. 그리고 나서 에너지 소모의 균형을 이루기 위해 각 코로나 C_i 에 요구되는 밀집도 p_i 을 만족시키기 위해 추가적으로 센서들을 배치하는 방안에 대하여 제시한다.

각 센서노드가 센싱을 담당해야하는 영역은 이웃노드들 간의 등거리에 해당하는 선분으로 이뤄진 보로노이 다각형의 넓이와 같다 [2]. 그림 2에서 점선으로 구성된 도형



(그림 2) 배치 패턴, (a) 삼각 패턴 (b) 마름모 패턴, (c) 사각 패턴 (d) 육각 패턴

이 그 도형의 중간에 위치한 센서의 보로노이 다각형이다. 여기서 보로노이 다각형을 이루는 선분들 길이를 l_v 라고 하자. 센서의 배치가 균등 분포를 따를 경우, 전체 영역 A 을 관측하기 위해 요구되는 최소 센서의 수는 다음과 같다.

$$\text{센서의 수} = \left\lceil \frac{A}{A_v} \right\rceil \quad (1)$$

여기서 A_v 임의의 센서의 보로노이 다각형의 넓이이다. 그러므로 균등 분포의 경우에 센서 배치 패턴을 찾는 문제는 패턴을 구성하는 임의의 센서의 보로노이 다각형의 넓이를 최대화하는 패턴을 찾는 문제라 할 수 있다. 이러한 패턴은 앞서 정의한 센서의 배치 패턴 문제의 조건 1)과 2)의 조건을 만족하게 된다. 따라서 본 논문에서는 삼각, 마름모, 사각, 그리고 육각 패턴을 구성하는 임의의 센서의 보로노이 다각형의 최대 넓이를 각각 $A^{T_{\max}}$, $A^{R_{\max}}$, $A^{S_{\max}}$, 그리고 $A^{H_{\max}}$ 라 명명하고 이를 다음과 같이 제시한다.

$$A^{T_{\max}} = \frac{3}{2} \sqrt{3} \left(\min \left\{ l_v, \frac{r_c}{\sqrt{3}} \right\} \right)^2 \quad (2)$$

$$A^{R_{\max}} = r_c^2 \sin \theta \quad (3)$$

$$A^{S_{\max}} = (\min \{ l_v, r_c \})^2 \quad (4)$$

$$A^{H_{\max}} = \frac{1}{4} \sqrt{3} (\min \{ l_v, \sqrt{3} r_c \})^2 \quad (5)$$

$$A_{\max} = \begin{cases} A^{T_{\max}}, & \text{when } 0 < \frac{r_c}{r_s} < \frac{1}{2} 3^{\frac{3}{4}} \\ A^{R_{\max}}, & \text{when } \frac{1}{2} 3^{\frac{3}{4}} < \frac{r_c}{r_s} < \sqrt{2} \\ A^{S_{\max}}, & \text{when } \sqrt{2} < \frac{r_c}{r_s} < \sqrt{3} \\ A^{H_{\max}}, & \text{when } \sqrt{3} < \frac{r_c}{r_s} \end{cases} \quad (6)$$

수식 (2), (3), (4), (5)로부터 위와 같이 r_c/r_s 값에 따라 보로노이 다각형의 넓이를 최대화하는 패턴을 알 수 있는 수식 (6)을 도출해 낼 수 있다.

앞서 정의한 센서의 배치 패턴 문제의 조건 3)을 만족하기 위해서 본 논문에서는 [3]에서 제시하는 불균등 분포는 활용한다. 에너지 소모의 균형이란 네트워크에 존재하는 모든 센서들이 동시에 자신의 모든 에너지를 소모하는 할 때 이뤄진다. [3]에서는 에너지 소모의 균형을 이루기 위해 다음과 같이 임의의 코로나 C_i 에서 요구되는 밀집도 p_R 와 p_i 를 제시한다 (p_R 은 가장 바깥쪽의 코로나 C_R 의 밀집도).

$$p_R = \frac{N}{A} \cdot \frac{6R}{4R^2+3R-1} \quad (7)$$

$$p_i = \frac{N}{A} \cdot \frac{6R}{4R^2+3R-1} \cdot \frac{R^2-(i-1)^2}{2 \cdot i-1} \quad (8)$$

직관적으로 보면, 다 대 일 트래픽에 의하여 싱크 노드 주변의 센서의 에너지 소모가 크기 때문에 센서의 밀집도 p_i 는 외곽에서 싱크 노드 중심으로 올수록 커져야 한다. 따라서 전체 네트워크 입장에서 보면 이러한 불균등 분포를 따르는 센서의 밀집도 p_i 는 다음의 성질을 지닌다.

$$p_1 > p_2 > \dots > p_i > \dots > p_R \quad (9)$$

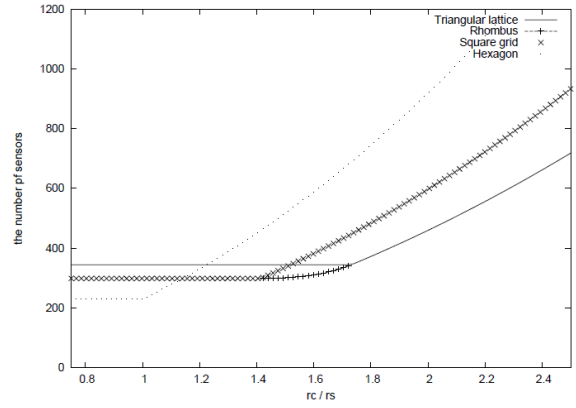
수식 (9)로부터 위와 같은 불균등 분포를 따르는 경우, 가장 외곽에 존재하는 코로나 C_R 의 센서 밀집도 p_R 가 가장 작음을 알 수 있다. 그렇기 때문에 센서 밀집도 p_R 로써 센서들이 배치되었을 때 커버리지와 연결성을 보장할 수 있다면 전체 네트워크 관점에서 커버리지와 연결성이 보장된다고 할 수 있다. 다시 말하면, 코로나 C_R 에 속하는 임의의 센서는 A_R/N_R 의 영역을 자신이 충분히 관측할 수 있어야 하며 이웃 노드와 통신을 할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 수식 (6)에서 제시된 센서 자신의 최대 보로노이 다각형의 넓이가 자신이 담당해야 하는 A_R/N_R 의 영역의 넓이보다 커야 한다.

$$A_{\max} \geq \frac{A_R}{N_R} = \frac{1}{p_R} = \frac{A}{N} \cdot \frac{4R^2+3R-1}{6R} \quad (10)$$

위의 수식으로부터 우리는 다음과 같이 전체 네트워크에서 요구하는 센서의 수의 하한 값을 얻을 수가 있다.

$$N \geq \frac{A}{A_{\max}} \cdot \frac{4R^2+3R-1}{6R} \quad (11)$$

r_c 와 r_s 값이 주어졌을 때, 수식 (6)에 의해 효율적인 배치 패턴을 형태를 얻을 수 있으며 이 때 수식 (11)에 따라 센서의 배치 패턴 문제의 조건을 만족하기 위하여 전체 네트워크가 요구하는 센서의 수 N 을 계산할 수 있다. 이의 정보를 기반으로 하여 먼저 센서들을 전체 영역 A 에 수식 (7)에서 계산한 밀집도 p_R 로써 수식 (6)에 의거하여 효율적인 배치 패턴으로 네트워크에 배치를 시킨다. 그리고 나서, 임의의 코로나 C_i 에서 만족해야 하는 밀집도 p_i 을 채우기 위하여 추가적으로 센서들을 배치시킨다. 이 때



(그림 3) r_c/r_s 값에 따라 삼각, 마름모, 사각, 육각 패턴에서 요구되는 센서들의 수

임의의 코로나 C_i 에서 추가적으로 배치시켜야 할 센서들의 수를 N_i^n 의 기호로 표현하며 이는 다음과 같다.

$$p_i = \frac{N_i}{A_i} = \frac{N_i^n + A_i p_R}{A_i} \quad (12)$$

$$N_i^n = A_i (p_i - p_R)$$

4. 수치 결과

본 장에서는 센서의 배치 패턴 문제를 해결책으로써 3장에서 제안한 4가지 패턴들을 센서들의 수 측면에서 비교한다. 본 논문에서는 센싱 반경이 $20m \leq r_s \leq 65m$, 통신 반경이 $r_c = 50m$ 인 센서들을 반지름이 $250m$ 인 원형의 영역 A 에 배치하는 시나리오를 상정한다. 그림 3으로부터 우리는 각 패턴에서 요구하는 센서들의 수는 수식 (6)에서 제시하는 결과와 같으며 이는 수식 (11)과 같음을 알 수 있다.

5. 결론

무선 센서 네트워크에서 센서를 배치함에 있어 관심지역이 배치된 센서들에 의하여 모두 관측되고 이의 데이터가 싱크노드까지 전달되는 일과 네트워크의 수명을 최대화 시키는 일은 중요하다. 본 논문에서는 이를 위하여 불균등 분포를 따르면서 커버리지와 연결성을 보장하는 패턴으로써 삼각, 마름모, 사각, 그리고 육각 패턴을 제시하였다. 또한 수치 결과를 통하여 제안한 패턴을 센서의 수의 측면에서 비교해 보았다.

참고문헌

- [1] Z. Yun, X. Bai, D. Xuan, T.H. Lai, and W. Jia, "Optimal Deployment Patterns for Full Coverage and k-connectivity Wireless Sensor Networks," IEEE/ACM Transaction on Networking, vol.18, pp.934 - 947, June 2010.
- [2] F. Aurenhammer, "Voronoi Diagrams - A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure," 1991.
- [3] M. Cardei, Y. Yang, and J. Wu, "Non-uniform Sensor Deployment in Mobile Wireless Sensor Networks," IEEE WoWMoM'08, Washington, DC, USA, pp.1 - 8, 2008.