

무선 센서 네트워크에서 다중 커버리지와 연결성을 위한 삼각 배치 패턴*

김용환, 김찬명, 한연희

한국기술교육대학교 첨단기술연구소 지능네트워크연구소

cherish@kut.ac.kr, cmdr@kut.ac.kr yhhan@slu.ac.kr

Triangular lattice Deployment Patterns for p -Coverage and q -Connectivity in Wireless Sensor Networks

Yong-hwan Kim, Chan-Myung Kim, Youn-Hee Han

Laboratory of Intelligent Networks, Advanced Technology Research Center

Korea University of Technology

요 약

무선 센서 네트워크에서 관심지역이 각 센서에 의하여 얼마나 잘 센싱되는지의 정도에 대한 커버리지(*coverage*)와 센서에 의하여 센싱된 데이터를 싱크노드까지 얼마나 잘 전달될 수 있는지의 정도에 관한 연결성(*connectivity*)은 중요한 연구 분야이다. 이와 관련하여 본 논문에서는 센서 네트워크에서 p -coverage와 q -connectivity ($q \leq 6$)를 만족하는 최적의 센서 배치패턴 문제에 관한 연구 결과를 기술한다. 특히, 1-coverage의 경우 최적이라 알려진 삼각 격자 패턴에 대하여 p -coverage와 6-connectivity을 만족하도록 하는 배치 방법을 제시한다.

1. 서론

센서를 효율적으로 배치하는 문제는 센서 네트워크의 설계와 운용에 있어 중요한 문제이다. 특히, 높은 커버리지와 연결성을 지니도록 네트워크를 구성하는 것은 센서 네트워크를 실제 환경에 적용함에 있어서 중요한 일이다. 여기서 커버리지(*coverage*)는 관심지역이 각 센서에 의하여 얼마나 잘 센싱되는지의 정도로서 네트워크가 제공하는 서비스의 질과 직결된다. 또한 연결성(*connectivity*)은 센서에 의하여 센싱된 데이터가 싱크노드까지 무선 통신을 통하여 얼마나 잘 전달될 수 있는지의 정도로서 네트워크의 강건성과 통신 성능과 직결된다.

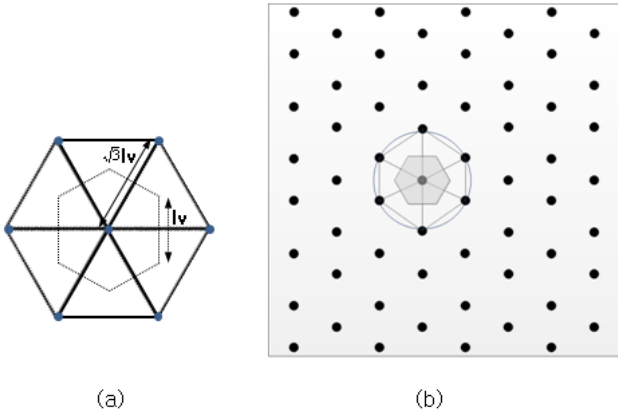
본 논문에서는 센서 네트워크에서 요구하는 p -coverage와 q -connectivity을 만족하면서 이에 필요한 센서의 수가 최소가 되도록 센서들을 배치하는 문제인 최적의 센서 배치 패턴문제에 관한 연구 결과를 기술한다. 이러한 최적의 센서 배치 패턴을 찾는 문제는 센서네트워크의 운영비용을 줄여줄 수 있으며 토폴로지 제어 알고리즘 및 프로토콜 설계하는데 있어서 지침 또는 성능평가의 지표를 제시할 수 있다는 측면에서 의미가 있다.

최적의 배치 패턴을 찾는 문제와 관련하여 [1]의 연구

에서는 접근적으로 1-coverage을 만족하는 최적의 패턴이 삼각 격자 패턴이라는 점을 밝혔다. 하지만 [1]에서는 센싱 반경과 통신 반경이 각각 r_s 및 r_c 일 때 $r_c/r_s \geq \sqrt{3}$ 라는 조건하에서만 성립하기 때문에 $r_c/r_s < \sqrt{3}$ 의 경우, [1]의 결과는 적합하지 않다. 실제로 많은 센서들이 다양한 r_c/r_s 값을 가지기 때문에 이와 관련하여 $r_c/r_s < \sqrt{3}$ 의 경우, 1-coverage와 q -connectivity ($q \leq 6$)를 만족하는 최적 배치 패턴을 찾는 연구가 활발하게 진행되어 왔다 [2][3]. 그러나 다중 coverage 네트워크의 경우, 네트워크의 토폴로지가 1-coverage의 경우와 다르다. 센서 네트워크가 다중 coverage을 만족시키도록 하기 위해 더 많은 센서가 요구되고 이에 따라 패턴을 구성하는 센서간의 간격과 그들 사이의 통신 반경은 coverage에 따라 작아지기 때문이다. 이러한 문제로 다중 coverage에서의 최적의 배치 패턴연구는 최근 [4]에서 2-coverage의 경우만을 제시되었으며 아직까지 임의의 정수 p, q 에 대한 p -coverage와 q -connectivity을 만족하는 최적의 센서 배치 패턴을 찾는 문제는 미해결 상태에 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 p -coverage와 6-connectivity을 만족하는 삼각 격자 패턴을 제시하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시스템 모델을 제시하고 본 논문에서 해결하고자 하는 문제를 제시한다. 3장에서는 p -coverage와 6-connectivity을 만족하는 삼각 격자 패턴을 제시한다. 4장에서는 이에 대한 수치 결

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



(그림 1) 삼각 격자 패턴. (a) 삼각 격자 패턴에서의 보로노이 다각형(선은 센서를 잇는 직선이며 점선은 l_v). (b) 3-coverage와 6-connectivity를 위한 삼각 격자 패턴(원은 센서의 센싱 영역).

과를 제시하고 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 짓는다.

2. 시스템 모델 및 문제 정의

본 논문에서는 각 센서의 센싱과 통신기능을 모델링하기 위하여 이진 모델(binary model)을 사용한다. 즉, 센싱 대상이 센서의 센싱 반경 r_s 내부에 있으면 항상 센싱되며 서로 다른 두 센서가 서로의 통신 반경 r_c 안에 존재할 때 두 센서는 연결되어 서로 이웃한다고 가정한다. 또한 각 센서의 r_s 및 r_c 값은 모두 동일하다고 가정한다. 비록 실제 환경에서 센싱과 통신기능은 원의 형태가 아닌 비규칙적인 형태를 따른다 할지라도 이진 모델을 사용하는 r_s 와 r_c 에 대해 최소한의 경계범위를 제시할 수 있다는 측면에서 본 논문의 결과는 실제 환경에서도 의미를 지닐 수 있다. 마지막으로 문제의 단순화를 위해 최적의 배치 패턴 문제를 해결함에 있어 관심 영역의 경계에 관한 제약은 없다고 가정한다. 만약 관심 영역의 경계를 고려한다면 경계의 모양에 따라 최적의 배치 패턴이 달라질 것이기 때문이다.

다음은 본 논문에서 언급한 p -coverage와 q -connectivity 배치에 관한 정의이다.

[Definition 1] p -coverage와 q -connectivity 센서 배치 (p -coverage and q -connectivity sensor deployment): p -coverage와 q -connectivity 센서 배치는 다음의 두 조건을 만족하는 배치 (p 와 q 는 임의의 양의 정수).

- 1) (p -coverage) 관심지역의 모든 지점이 적어도 p 개의 센서에 의하여 관측되어야 한다.
- 2) (q -connectivity) 임의의 센서 사이에 적어도 q 개의 서로소인 경로가 존재하여야 한다.

본 논문에서 해결하고자 하는 최적의 배치 패턴 문제는

다음과 같이 정의된다.

[Definition 2] 최적의 배치 패턴 문제 (Optimal deployment pattern problem): 무선 센서 네트워크에서 coverage 정도 p 와 connectivity 정도 q 가 요구될 때, 센서의 수를 최소로 하는 p -coverage와 q -connectivity 센서 배치 패턴을 찾는 문제 (p 와 q 는 임의의 양의 정수).

각 센서노드가 센싱을 담당해야 하는 영역의 넓이는 센서 s_i 와 s_j 의 이웃노드들 간의 등거리에 해당하는 선분으로 이뤄진 보로노이 다각형의 넓이와 같다. 그림 1(a)에서 점선으로 구성된 도형이 그 도형의 중간에 위치한 센서의 보로노이 다각형이다. 여기서 보로노이 다각형을 이루는 선분을 길이를 l_v 라고 하자. 센싱을 해야 하는 전체 영역을 AoI (Area of Interest)라 할 때, AoI 전체를 관측하기 위해 필요한 최소 센서의 수는 다음과 같다.

$$\text{센서의 수} = \left\lceil \frac{\text{Area}(AoI)}{A_T} \right\rceil \quad (1)$$

그러므로 최적의 배치 패턴을 찾는 문제는 패턴을 구성하는 임의의 센서의 보로노이 다각형의 넓이를 최대화하는 패턴을 찾는 문제라 할 수 있다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 삼각 격자 패턴을 구성하는 임의의 센서의 보로노이 다각형의 넓이를 A_T 라 명명하고 이를 다음과 같이 제시한다.

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

3. p -coverage와 q -connectivity를 위한 삼각 격자 패턴

본 장에서는 임의의 양의 정수 p 와 q 에 대하여 p -coverage와 q -connectivity를 만족하는 삼각 격자 패턴을 제시한다. p -coverage와 q -connectivity 센서 배치를 위해서는 패턴을 구성하는 센서간의 간격과 적절한 r_c/r_s 값에 대한 정보가 필요하다. 이러한 정보를 얻기 위해 본 논문에서는 먼저 삼각 격자 패턴형태로 센서들이 배치되었을 때, 커버리지 정도 p 를 계산하는 정리를 제시한다. 사실 이는 [5]의 논문에서 이미 제시되어 있다. 본 논문에서는 이의 정리를 역으로 적용하여 센서 배치를 위해 필요한 2가지 정보를 획득하고자 한다.

센서 배치 패턴이 p -coverage를 만족하도록 하기 위해 먼저 [5]에서 제안한 보조정리와 정리를 제시한다. 보조정리 1은 수식의 정확성을 위하여 $i = - \lfloor r_s / \sqrt{3} l_v \rfloor$ 을 $i = - \lceil r_s / \sqrt{3} l_v \rceil$ 로 수정하였다.

보조정리 1. 삼각 격자 형태의 센서 배치에서 l_v 가 주어질 때, r_s 을 센싱 반경으로 하는 센서의 센싱 영역에 존

재하는 센서의 수는 다음과 같다.

$$n(r_s) = \sum_{i=-\lfloor \frac{r_s}{\sqrt{3}l_v} \rfloor}^{\lfloor \frac{r_s}{\sqrt{3}l_v} \rfloor} \left(1 + 2 \left\lfloor \frac{\sqrt{r_s^2 - 3l_v^2 i^2}}{3l_v} \right\rfloor \right) + 4 \sum_{i=0}^{\lfloor \frac{r_s}{\sqrt{3}l_v} \frac{1}{2} \rfloor} \left(1 + \left\lfloor \frac{\sqrt{r_s^2 - 3l_v^2 (i+1/2)^2}}{3l_v} - \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \quad (3)$$

정리 1. 삼각 격자 패턴형태로 센서들이 배치되었을 때, 커버리지 정도 p 는 다음과 같다.

$$p \geq \frac{n(r_s) - 1}{3} + \frac{n(\sqrt{3}r_s) - n(r_s)}{6} \quad (4)$$

삼각 격자 패턴의 형태로 배치된 센서 네트워크에서 임의의 센서는 6개의 센서 노드들로 둘러싸여 있다. 임의의 센서와 이들과의 통신으로 위해서는 r_c 가 적어도 그들 사이의 거리보다 커야한다($r_c \geq \sqrt{3}l_v$). 이 조건이 만족되면 삼각 격자 패턴은 적어도 6-connectivity를 만족한다.

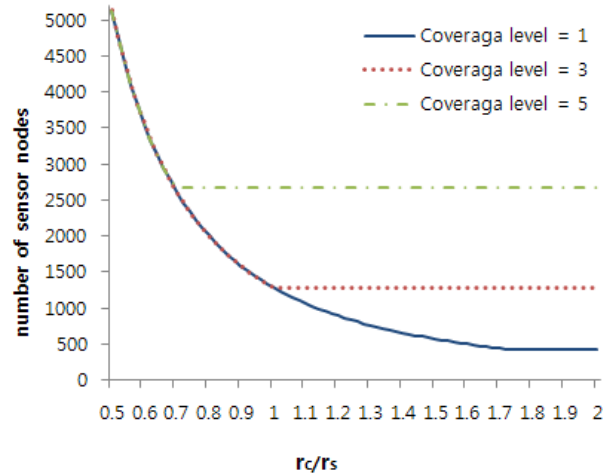
삼각 격자 패턴에서 정리 1을 활용하면 l_v 와 r_s 가 주어질 때, 커버리지 정도 p 을 얻을 수 있다. 반대로 정리 1에 역으로 적용하면 p 와 r_s 가 주어질 때, l_v 의 값을 얻을 수 있다. 따라서 그림 1(a)에서 확인할 수 있듯이 계산된 l_v 을 통해 삼각 격자 패턴의 경우 $\sqrt{3}l_v$ 이라는 센서간의 거리 정보를 알 수 있다. 게다가 삼각 격자 패턴에서 $r_c \geq \sqrt{3}l_v$ 이면 6-connectivity를 만족할 수 있으므로 다음과 같은 정리 2를 유도할 수 있다.

정리 2. 커버리지 정도 p 와 r_s 가 주어질 때, 센서 간의 거리가 $\sqrt{3}l_v$ 이고 $r_c \geq \sqrt{3}l_v$ 라는 조건을 만족하는 삼각 격자 패턴은 p -coverage와 6-connectivity를 만족한다. 여기서 l_v 는 보조정리 1과 정리 1을 역으로 적용하여 얻어진 값이다.

그림 1(b)에서는 3-coverage와 6-connectivity를 만족하는 삼각 격자 패턴을 보여주고 있다. 이를 위해 패턴을 구성하는 센서간의 간격은 $\sqrt{3}l_v$ 으로 r_c 는 적어도 $\sqrt{3}l_v$ 보다 크게 설정하여야 한다. 이의 경우의 l_v 의 값은 r_s 와 같다.

4. 수치 결과

본 장에서는 1-, 3-, 5-coverage와 6-connectivity를 만족하도록 삼각 격자 패턴 형태로 센서들을 배치할 때 요구되는 센서의 수를 제시한다. 실험에서 $r_s=30m$ 인 센서들을 $1000m \times 1000m$ 의 영역에 배치하였다. 요구되는 센서의 수를 계산하기 위해 수식 (1)을 사용하였다. 그림 2는 r_c/r_s 가 0.5에서 2까지 변화함에 따라 삼각 격자 패턴이 1-, 3-, 5-coverage와 6-connectivity를 만족하기 위해 필



(그림 2) 1-, 3-, 5-coverage와 6-connectivity를 만족하는 삼각 격자 패턴을 구성하기 위해 필요한 센서의 수.

요한 센서의 수를 보인다. 1-, 3-, 5-coverage와 6-connectivity를 만족하는 삼각 격자 패턴에서 각각 $r_c/r_s \geq \sqrt{3}$, $r_c/r_s \geq 1$, $r_c/r_s \geq 2\sqrt{3}/5$ 일 때, 필요한 센서의 수가 일정하게 수렴되는 것을 볼 수 있다. 이는 수식 (2)에서 $r_c \geq \sqrt{3}l_v$ 가 되는 지점이다.

5. 결론

무선 센서 네트워크에서 높은 수준의 coverage와 connectivity를 유지하는 것은 네트워크의 신뢰도를 높이기 위해 중요하다. 이와 관련하여 본 논문에서는 센서 네트워크가 p-coverage와 6-connectivity를 만족하도록 하는 삼각 격자 패턴에 관한 연구 결과를 제시하였다.

참고문헌

[1] R. Kershner. The Number of Circles Covering a Set. American Journal of Mathematics, 61:665-671, 1939.
 [2] X. Bai, S. Kumar, D. Xuan, Z. Yun, and T. H. Lai, "Deploying Wireless Sensors to Achieve Both Coverage and Connectivity," in Proc. ACM MobiHoc, 2006, pp. 131 - 142.
 [3] X. Bai, D. Xuan, Z. Yun, T. Lai and W. Jia, "Optimal Deployment Patterns for Full-Coverage and K-Connectivity (k<=6) Wireless Sensor Networks," ACM Mobihoc08, IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, pp. 934-947.
 [4] X. Bai, , Z. Yun. D. Xuan, B. Chen, and W. Zhao "Optimal Multiple-Coverage of Sensor Network," INFOCOM 2011, pp. 2498-2506.
 [5] N. Bartolini, T. Calamoneri, E. Guido Fusco, A. Massini, S. Silvestri. Push & Pull: autonomous deployment of mobile sensors for a complete coverage. Wireless Netw, 2010.