

논문 2007-44C1-1-6

2.4GHz 무선 채널 특성을 가진 센서 노드의 최적 배치

(Optimal Placement of Sensor Nodes with 2.4GHz Wireless Channel Characteristics)

정 경 권*, 엄 기 환**

(Kyung Kwon Jung and Ki Hwan Eom)

요 약

본 논문은 2.4GHz 무선 채널 특성을 가진 센서 노드의 손실 없는 데이터 전송을 위한 최적의 배치 방법을 제안한다. 제안한 방식은 무선 환경에서 log-normal path loss 모델을 구성하여 최적의 송수신 거리를 결정하고, 센서 노드의 밀도 계산을 통해서 최적의 센서 노드 개수를 구한다. 데이터 손실이 없는 전송을 위해 송수신 가능 거리와 센서 노드의 개수를 이용하여 공간에 최적으로 배치할 수 있는 위치를 SOM(Self-Organizing Feature Maps)으로 탐색한다. 논문에서 실험한 건물에서는 센서 노드의 송수신 거리는 20m이고, 최적의 센서 노드 개수는 8개가 되었으며, 시뮬레이션을 통해서 센서 노드의 최적의 위치 탐색과 센서 노드의 연결 상태를 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose an optimal placement of sensor nodes with 2.4GHz wireless channel characteristics. The proposed method determines optimal transmission range based on log-normal path loss model, and optimal number of sensor nodes calculating the density of sensor nodes. For the lossless data transmission, we search the optimal locations with self-organizing feature maps(SOM) using transmission range, and number of sensor nodes. We demonstrate that optimal transmission range is 20m, and optimal number of sensor nodes is 8. We performed simulations on the searching for optimal locations and confirmed the link condition of sensor nodes.

Keywords : Wireless sensor network, Optimal placement, Self-organizing feature maps, Log-normal path loss model

I. 서 론

센서 기술, 저전력 RF 설계 기술 등의 발달로 무선 네트워크를 통하여 연결될 수 있는 소형, 저가, 저전력의 센서 노드들이 개발되어 왔다. 이러한 센서 노드들은 센싱, 데이터 처리, 통신 컴포넌트들로 구성되며 각 노드는 ad hoc 네트워크를 구성하여 무선 네트워크를

형성한다. 이러한 무선 센서 네트워크는 환경 모니터링에 주로 사용되어 왔고 헬스, 군사, 홈 네트워크, 재난 감시 등의 다양한 응용에 적용될 수가 있다. 현재에는 유비쿼터스 환경에 적용 가능한 어플리케이션으로도 연구가 활발히 진행되고 있다^[1].

무선 센서 네트워크가 적용될 수 있는 지역은 한정되어 있기 때문에 설치하고자 하는 전체 지역에서 원하는 데이터를 모두 수집하면서 각 노드간의 원활한 통신을 고려하여야 한다. 특히 무선센서 네트워크의 각 센서 노드들은 멀티-홉(multi-hop) 방식으로 통신을 하기 때문에 노드 배치의 최적화에 관한 문제는 더욱 중요시 될 수밖에 없다. 최적의 노드 배치는 불필요한 전력 손실을 감소시키고, 설치하는 노드의 수를 줄일 수 있다면 기술적, 경제적인 측면에서 이득을 얻을 수 있을 것이다^[2-5].

* 정희원, 동국대학교 밀리미터파신기술연구센터 (MINT, Dongguk University)

** 정희원, 동국대학교 전자공학과 (Department of Electronic Engineering, Dongguk University)

※ 본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터 육성사업의 지원으로 수행되었음 (R11-1999-058-01007-0)

접수일자: 2006년8월25일, 수정완료일: 2007년1월11일

본 논문에서는 제한된 환경의 모니터링과 손실없는 데이터 전송을 위해 2.4GHz 무선 채널 특성을 이용한 최적의 센서 노드 배치 방법을 제안한다. 제안한 방법은 2.4GHz 무선 채널 모델링을 통하여 센서 노드 간의 통신 범위를 결정하고, 센서 노드의 배치 밀도를 계산하여 사용할 최소의 센서 노드 개수를 구한다. 센서 노드가 설치될 수 있는 위치 정보를 입력으로 하여 비지도 학습 신경회로망인 SOM(Self-Organizing Feature Map) 방식을 통해 최적의 노드 위치를 결정한다. SOM의 결과에 따른 센서 배치를 통해 PRR(Packet Reception Rate)을 확인하고, 전체 센서 네트워크의 연결을 확인한다. II장에서는 센서 노드의 무선 통신 범위와 log-normal path loss 방식에 대해 기술하고, III장에서는 제안한 방식을 기술하고, IV장에서는 시뮬레이션 결과를 통해 성능을 평가한다. 마지막으로 V장에서는 결론을 정리한다.

II. 센서 노드의 무선 통신 범위

센서 노드의 무선 통신 범위에 대한 연구는 RF 신호의 전파(propagation) 특성을 통해 많은 모델이 제안되고 있으며, 센서 네트워크의 coverage와 관련하여 연구가 진행되고 있다.^[6-7]

본 논문에서는 센서 노드의 전파 범위를 구하기 위해서 2.4GHz 대역의 특성을 통한 log-normal path loss 방식을 사용한다.

실험에 사용할 센서 노드는 그림 1의 TIP50CM을 사용하였다. 센서 노드의 구성은 표 1과 같이 TI사의 MSP430 프로세서를 사용하였고 RF용 칩으로는 Chipcon사의 CC2420을 사용하였다.^[8]

Path loss는 식(1)과 같이 거리가 증가함에 따라 지수적으로 증가하는 특징을 가지고 있다.

$$PL(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \quad (1)$$

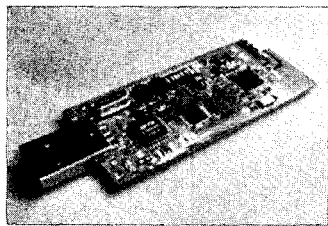


그림 1. 센서 노드
Fig. 1. Sensor node.

표 1. TIP50CM 하드웨어 사양

Table 1. TIP50CM Hardware specifications.

Item	Description
Processor	TI MSP430, 16bit RISC, 8MHz
Memory	256KB Program Flash
OS	TinyOS
Radio	Chipcon CC2420 2.4GHz
Data Rate	250Kbps
Sensor	Temperature, Humidity and Light
Network	Multi-hop & Ad-hoc
Interface	USB(UART)
Size	68×29mm
Power	3.0~3.3V
Range	70m in lab

PL 은 path loss이고, n 은 path loss exponent로 거리 송신기와 수신기 사이의 거리 d 가 증가함에 따라 얼마나 빠르게 증가하는지를 나타내는 척도이다. d_0 는 기준 거리(reference distance)이다.

Log-normal path loss 모델은 식(2)와 같다^[9].

$$PL(d)[dB] = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma} \quad (2)$$

여기서 $PL(d_0)$ 는 기준 거리 1m에서의 path loss이고, X_{σ} 는 표준 편차가 σ 인 log-normal variable이다.

실내 환경에서의 log-normal path loss 모델의 파라미터를 구하기 위해 센서 네트워크의 송신기에서 일정한 전력으로 신호를 보내고, 스펙트럼 분석기를 통해 2.4 GHz 신호의 수신 전력을 측정한다.

수신된 전력은 식(3)과 같이 나타낼 수 있고, 식(2)에서의 파라미터 n 과 σ 를 구한다.

$$P_r [dBm] = P_t [dBm] - PL(d) [dB] \quad (3)$$

여기서 P_r 은 수신 전력이고, P_t 는 송신 전력이다.

실내 환경에서 무선 센서 노드의 전송 전력을 측정하기 위하여 그림 2와 같은 실험 환경을 구축하여, 건물 복도에서 거리를 변화시키면서 전송 전력을 측정한다. 센서 노드의 송신 전력은 무선 모듈이 최대 출력할 수 있는 전력인 0dBm(1mW)으로 설정하였다.

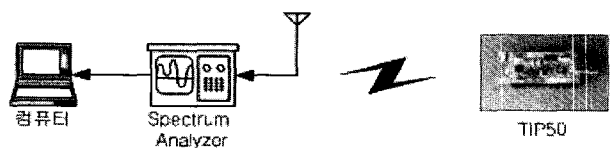


그림 2. 수신 전력 측정
Fig. 2. Measurement of received power.

수신 전력 측정은 Anritsu사의 스펙트럼 분석기 MS2668C를 사용하였고, 수신 안테나는 센서 노드에서 사용한 세라믹 안테나를 사용하였다.

실내 환경에서 2.4GHz의 log-normal path loss는 그림 3과 같이 log 스케일의 거리에 따라 선형적으로 증가한다.

RF 수신 전력 측정 데이터를 통해서 구한 모델은 그림 4와 같고, 파라미터는 표 2와 같다.

센서 노드의 전파 범위를 구하기 위해 우선 두 센서

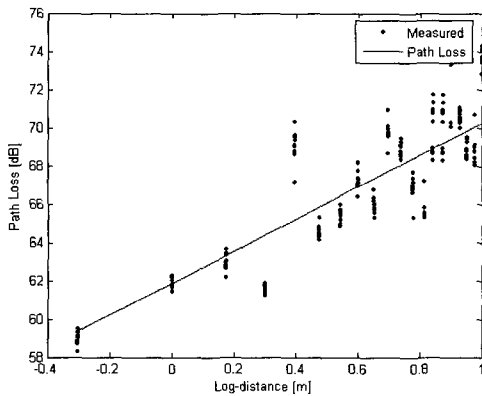


그림 3. Log-normal path loss
Fig. 3. Log-normal path loss.

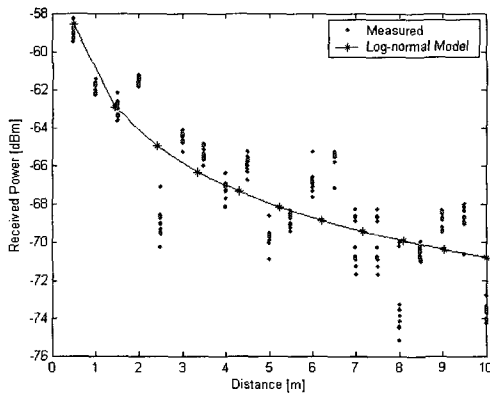


그림 4. RF 수신 전력 및 channel modeling 결과
Fig. 4. RF received power and channel modeling results.

표 2. Log-normal path loss 모델 파라미터
Table 2. Log-normal path loss model parameters.

Path loss at 1m , $PL(d_0)$ [dBm]	Path loss exponent n	Standard deviation σ
61.903	0.8329	0.7924

노드 사이에 패킷이 수신될 확률(PRR)을 계산한다. 패킷이 수신될 확률을 P 라 하면

$$P = (1 - P_e)^{f_b} \tag{4}$$

이고, 여기서 f_b 는 preamble, payload, CRC로 구성된 프레임 사이즈로 비트단위이다. P_e 는 비트 에러 확률(BER)이다.

센서 노드의 RF 모듈인 CC2420은 O-QPSK (Offset-Quadrature Phase Shift Keying) 변조방식을 사용한다. 일반적으로 O-QPSK 방식의 BER은 식(5)와 같다^[9].

$$P_e = Q\left(\sqrt{2 \cdot \frac{E_b}{N_0}}\right) \tag{5}$$

여기서 $Q(\cdot)$ 는 error function이고, E_b 는 비트 당 전송 에너지이고, N_0 는 1Hz 당 노이즈 전력이다. 식(2)와 식(3)으로부터 얻어진 거리 d 에 따른 SNR과의 관계는 식(6)과 같다.

$$SNR = \frac{E_b R}{N_0 B} \tag{6}$$

R 은 전송속도로 CC2420은 250kbps이고, B 는 시스템 대역폭으로 250kHz로 한다^[10].

표 2의 2.4GHz 채널 모델을 이용하여 패킷이 수신될 확률 P 를 구하면 그림 5와 같다. 이때 프레임 사이즈는 preamble과 SFD, payload, CRC를 포함하여 80바이트로 하였다.

그림 5에서 거리가 20m까지는 패킷 수신 확률이 1에 가깝게 되어 보내는 패킷을 모두 수신할 수 있는 영역

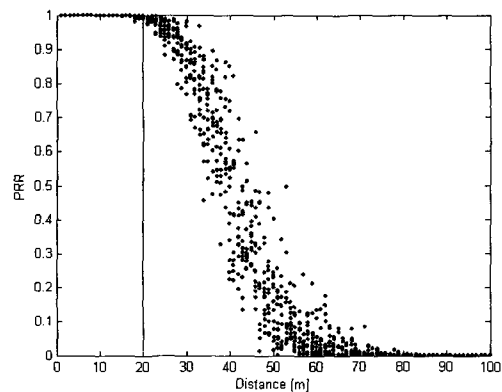


그림 5. 거리에 따른 패킷 수신 확률
Fig. 5. Distance vs. packet reception rate.

이 되고, 70m 이후는 패킷을 전혀 수신할 수 없는 영역으로 나눌 수 있다. 2.4 GHz 실내 환경에서 원활한 데이터 전송을 위해서는 센서 노드의 전파거리를 20m로 설정한다.

III. 제안한 방식

1. 최적의 센서 노드 수

전파 범위(radio range) r 내에서 센서 노드 사이에 통신이 가능하려면 그림 6(a)와 같이 전파 반경 내에 다른 센서 노드가 위치해야 ad hoc이 가능하게 되고 그림 6(b)와 같이 형성되면 통신이 이루어 지지 않는다.

그림 7에서 센서 노드 사이의 거리를 d 라 하면, 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (7)$$

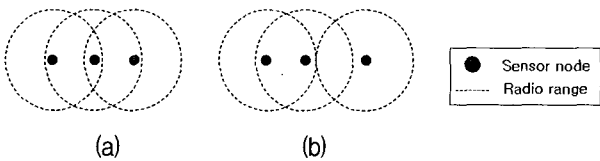


그림 6. 통신 범위
Fig. 6. Communication range.

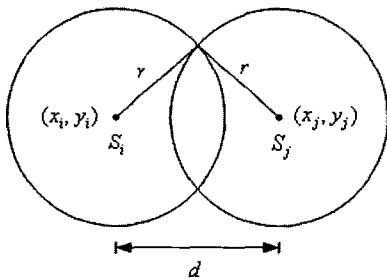


그림 7. 센서 노드 사이의 거리
Fig. 7. Distance between sensor nodes.

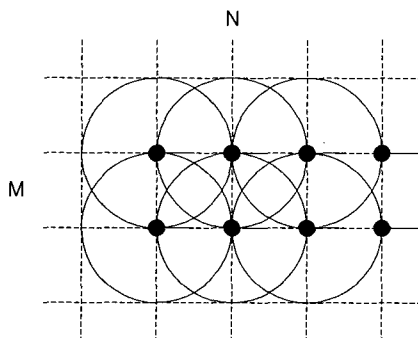


그림 8. 격자 구조의 센서 노드
Fig. 8. Sensor nodes of grid structure.

센서 노드 사이에 원활한 통신이 이루어지기 위해서는 센서 사이의 거리 d 가 전파 반경 r 과 같아야 한다.

실내 건물에 그림 8과 같이 격자구조로 센서 노드를 배치하게 되면 $M \times N$ 개의 센서 노드가 만들 수 있는 전파 영역 S 식(8)과 같다.

$$S = \pi r^2 + (N-1) \left(\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) r^2 + (M-1) \left(N \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} - 1 \right) + \frac{\pi}{3} - \sqrt{3} \right) r^2 \quad (8)$$

실내 건물의 면적을 A 라고 하면 센서 노드가 만들 수 있는 전파 영역은 건물의 면적보다 같거나 큰 관계가 되어야한다. 이러한 조건으로부터 실내 환경에서 센서 노드의 배치 밀도가 계산된다.

$$\pi r^2 + (N-1) \left(\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) r^2 + (M-1) \left(N \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} - 1 \right) + \frac{\pi}{3} - \sqrt{3} \right) r^2 \geq A \quad (9)$$

식(9)를 센서 개수 $M \times N$ 에 대해 정리하면 식(10)과 같고, 양변을 A 로 나누면 센서 노드의 배치 밀도 ρ 가 된다.

$$MN \geq \frac{A - \left(\left(\frac{\pi}{3} - \sqrt{3} \right) M + \left(\frac{\pi}{3} - \sqrt{3} + 1 \right) N \right) r^2}{\left(\frac{3\sqrt{3}}{2} - 1 \right) r^2} \quad (10)$$

$$\rho = \frac{MN}{A} \geq \frac{1 - \left(\left(\frac{\pi}{3} - \sqrt{3} \right) M + \left(\frac{\pi}{3} - \sqrt{3} + 1 \right) N \right) \frac{r^2}{A}}{\left(\frac{3\sqrt{3}}{2} - 1 \right) r^2} \quad (11)$$

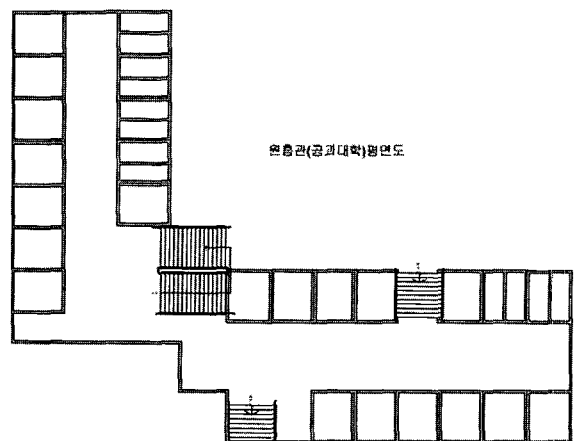


그림 9. 건물의 평면도
Fig. 9. Plane figure.

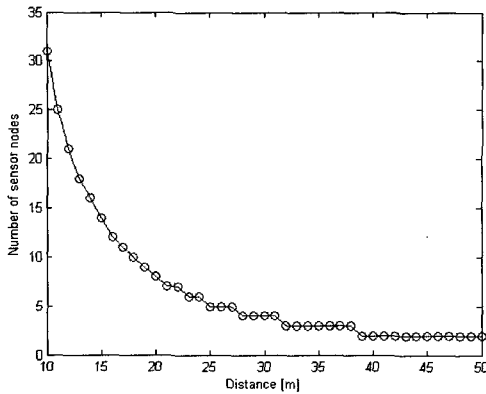


그림 10. 거리에 따른 센서 노드 개수
Fig. 10. Distance vs. number of sensor nodes.

만약 $A \gg r^2$ 이라고 가정하면 센서 노드의 배치 밀도는 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = \frac{MN}{A} \geq \frac{1}{\left(\frac{3\sqrt{3}}{2} - 1\right)r^2} \quad (12)$$

식(12)로부터 건물 면적 A 를 포함할 수 있는 최소의 센서 노드 개수를 구할 수 있다.

본 논문에서는 그림 9와 같은 약 $4,800m^2$ 의 면적을 가진 건물에서의 센서 배치를 고려하면 센서 노드의 전파 범위에 따른 센서 노드의 개수는 그림 10과 같다.

II장에서의 결과를 바탕으로 20m에서의 센서 노드 개수는 최소 8개 이상이 되면 전파 영역이 건물 면적을 덮을 수 있게 된다.

2. 센서 노드의 최적 배치

센서 노드의 전파 범위와 그에 따른 센서 노드의 개수가 정해진 후의 진행은 센서 노드를 어떤 위치에 효과적으로 배치하는가이다. 2.4GHz 무선 채널 환경이 데이터 전송에 영향을 미치기 때문에 데이터의 손실없는 전송이 이루어지는 위치의 탐색이 요구된다.

본 논문에서는 비슷한 입력 데이터를 군집화 (clustering)하는 특징의 SOM을 이용하여 센서 노드가 놓일 수 있는 최적의 위치를 탐색한다^[11-12].

SOM의 구조는 그림 11과 같고, 각 입력 패턴 x 에 대하여 고정 이웃 반경 내에서 연결 강도 m_j 는 식(13)과 같이 조정한다.

SOM의 입력은 센서 노드가 위치할 수 있는 좌표로 하고, 최적의 센서 노드의 위치를 SOM의 출력층과 대응시켜서 인접한 출력 뉴런 사이의 거리가 전파 범위내

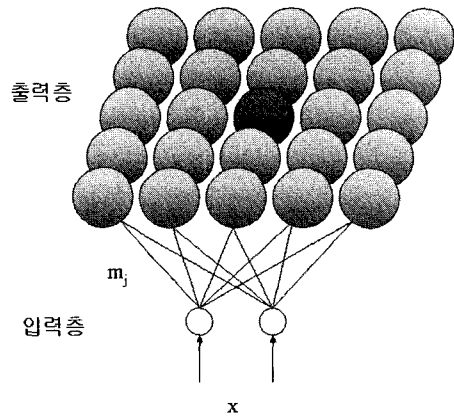


그림 11. SOM 구조
Fig. 11. SOM architecture.

에 위치하도록 학습을 수행하여 최적의 위치를 찾는다.

$$m_j(t+1) = m_j(t) + h_{cj}[x - m_j(t)] \quad (13)$$

여기서 h_{cj} 는 이웃 반경 함수이고, c 는 best-matching node, j 는 승리뉴런이다.

IV. 시뮬레이션

건물의 내부 등 제한된 지역에 구성되는 무선 센서 네트워크는 노드의 위치를 지정해 줌으로서 최적의 성능을 이끌어 낼 수 있다. 본 논문에서는 SOM을 센서 노드 배치에 적용함으로써 최적의 위치를 찾아내는 시뮬레이션을 수행하였다.

SOM은 입력 뉴런의 개수는 2개, 출력 뉴런의 개수는 배치될 센서 노드 수로 하였으며, 학습율은 0.9에서 학습이 진행됨에 따라 감소하도록 설정하였다. 연결강도의 초기값은 [0,1] 사이의 임의의 값으로 하였으며, 학습회수는 1000회로 설정하였다. 시뮬레이션 환경은

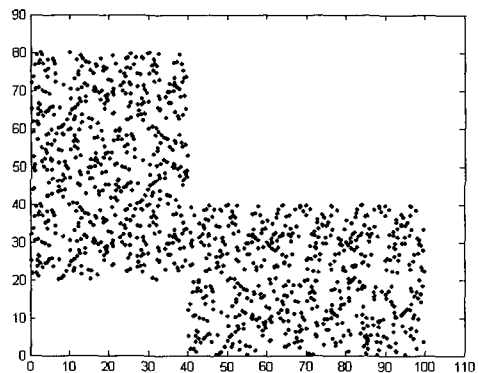


그림 12. 센서 노드의 위치
Fig. 12. Positions of sensor nodes.

P4 3GHz에서 Matlab을 사용하였다.

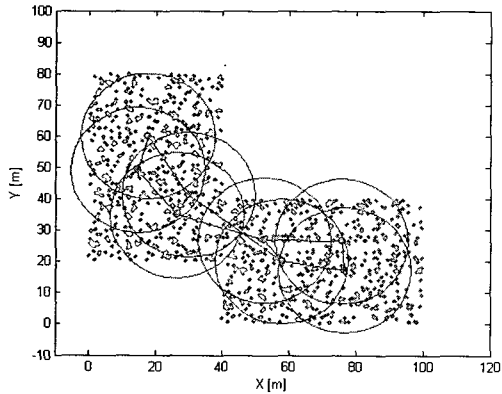
여기에서 건물의 가로폭이 약 40m이므로 전파 범위가 20m인 센서노드 2개를 배치하면 영역을 커버할 수 있기 때문에 출력층의 특징지도는 2×4로 하였다.

센서 노드의 통신 범위는 채널 모델링을 통해 얻어진 20m로 하였고, 센서 노드의 개수는 8개를 택하여 수행

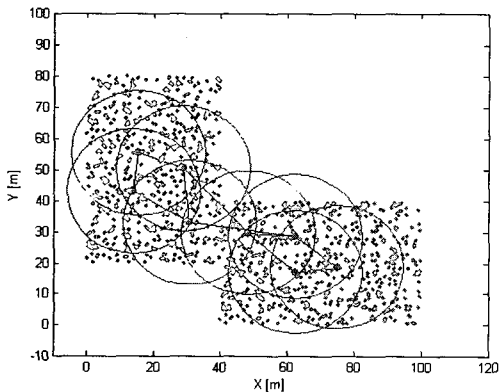
하였다. 그림 9와 같은 건물을 모델로 하여 그림 12와 같이 임의로 생성한 센서 노드의 위치 정보에 대해 학습을 통해 노드간의 최적의 위치를 찾아내도록 하였다.

학습 횟수에 따른 SOM의 특징지도를 2차원 배열로 하여 최적의 위치를 탐색하면 그림 13과 같다. 학습 횟수가 500번 이후에서는 최적 조건인 전파 범위 20m 이내에 배치가 됨을 확인하였다.

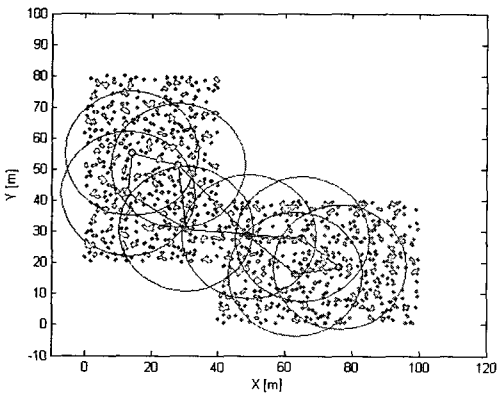
III장에서 구한 2.4GHz 무선 채널 모델을 이용하여



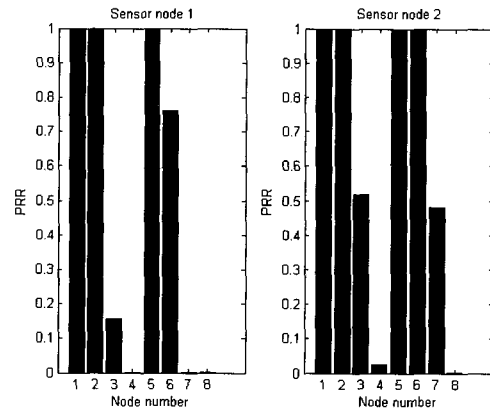
(a) 학습 횟수 100번



(b) 학습 횟수 500번

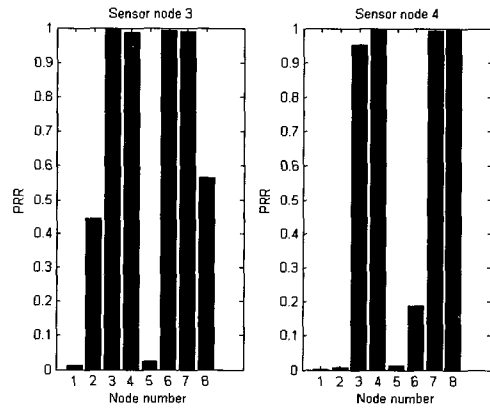


(c) 학습 횟수 1000번



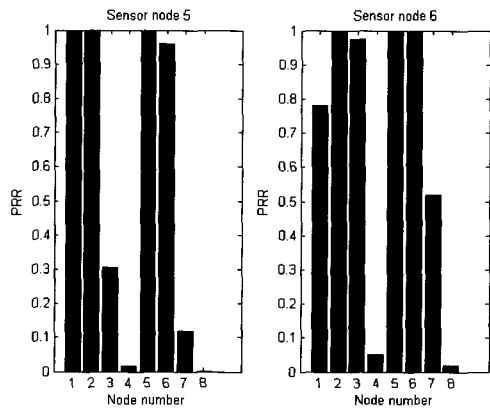
(a) 1번 센서 노드

(b) 2번 센서 노드



(c) 3번 센서 노드

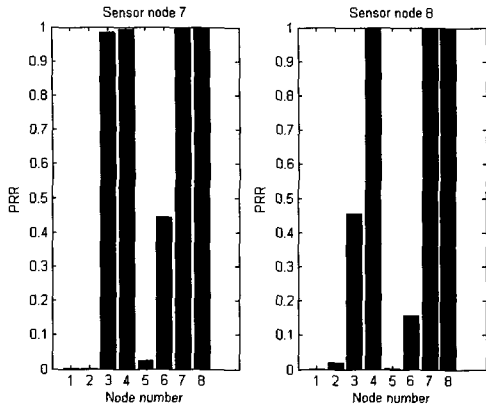
(d) 4번 센서 노드



(e) 5번 센서 노드

(f) 6번 센서 노드

그림 13. 2x4 특징지도를 이용한 네트워크의 구성
Fig. 13. Network configuration with 2x4 feature map.



(g) 7번 센서 노드 (h) 8번 센서 노드

그림 14. 이웃 노드 간의 PRR
Fig. 14. PRR between neighborhood nodes.

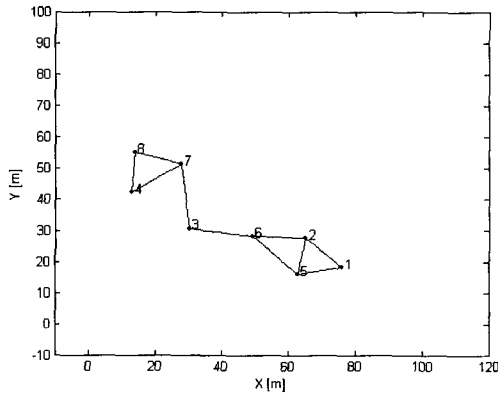


그림 15. 센서 노드의 최적 배치
Fig. 15. Optimal placement of sensor nodes.

탐색한 최적의 위치에 대해서 이웃 노드 사이의 PRR을 구하면 그림 14와 같다. 그림 14는 각 센서 노드와 나머지 센서 노드와의 PRR을 나타낸 그래프로 가로축은 센서 노드 번호이고, 세로는 PRR을 나타낸다. 자기 자신과 번호가 같은 경우에는 PRR은 1이고, 0인 경우는 전혀 통신이 이루어지지 않음을 의미한다. 그림 14(a)를 예로 들면 1번 센서 노드는 자기 자신을 제외한 2번과 5번 노드와 연결이 가능하고, 그림 14(b)의 2번 센서 노드는 1번과 5번, 6번 노드와 연결이 가능함을 보여준다.

각 그림에서 노드가 서로 안정적인 데이터를 송수신하는 경우를 고려하여 PRR이 0.99 이상인 노드를 연결하면, 그림 15와 같이 통신이 가능한 경로를 얻을 수 있다. 각 노드들은 전파 범위 20m이내의 거리에서 하나 혹은 두 개의 연결 경로를 확보하여 노드 간의 통신이 이루어지게 된다.

V. 결 론

본 논문에서는 최소의 센서 노드를 사용하여 데이터 손실없는 전송이 이루어지도록 신경회로망을 이용한 센서 노드의 최적 배치 방식을 제안하였다. 제안한 방식은 비지도 학습 신경회로망인 SOM을 이용하여 각각의 센서 노드가 전파 범위에 위치하도록 배치하는 방식이다. 센서 노드가 배치될 위치를 임의로 생성하여 입력 데이터를 군집화(clustering)하는 SOM의 특성을 이용하여 센서 노드 배치의 특징지도를 구성하고, 출력 뉴런 사이의 거리가 센서 노드의 전파 범위 이내에 위치하게 반복학습을 수행한다. 센서 노드의 전파 범위는 2.4GHz의 무선 채널을 log-normal path loss 모델로 모델링하여 거리에 따른 PRR로부터 최적의 통신 거리인 20m로 결정하였으며, 센서 노드의 개수는 건물 면적과 센서 노드의 밀도 관계로부터 최적의 개수인 8개를 구하였다. SOM을 이용한 시뮬레이션을 통해 센서 노드가 배치되어야 할 최적의 위치를 탐색하였고, 센서 노드 간에 원활한 통신이 가능함을 PRR을 통해서 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] D. Culler, D. Estrin, and M. Srivastava, "Overview of Sensor Networks," *IEEE Computer*, vol. 37, no. 8, pp.41-49, Aug. 2004.
- [2] M. Ishizuka, and M. Aida, "Performance study of node placement in sensor networks," *Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, pp. 598-603, 2004.
- [3] Holger Karl, and Andreas Willig, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*, John Wiley & Sons, 2005.
- [4] Feng Zhao, and Leonidas Guibas, *Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach*, Morgan Kaufmann, 2004.
- [5] Maulin Patel, R. Chandrasekaran, and S. Venkatesan, "Energy efficient sensor, relay and base station placements for coverage, connectivity and routing," *2005 IEEE International Performance Computing and Communications Conference*, pp. 581-586, 2005.
- [6] Bang Wang, Wei Wang, V. Srinivasan, and Kee Chang Chua, "Information coverage for wireless sensor networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 11, pp.967-969, Nov. 2005.

- [7] Xiang-Yang Li, Peng-Jun Wan, and o. Frieder, "Coverage in wireless ad hoc sensor networks," IEEE Transactions on Computers, vol. 52, no. 6, pp.753-763, June 2003.
- [8] <http://www.maxfor.co.kr>
- [9] Bernard Sklar, Digital Communications: Fundamentals and Applications, Prentice Hall, 2001.
- [10] Leon W. Couch, Digital and Analog Communication Systems, Prentice Hall, 2001.
- [11] Martin T. Hagan, Howard B. Demuth, and Mark H. Beale, Neural Network Design, Martin Hagan, 2002.
- [12] Teuvo Kohonen, Self-Organizing Maps, Springer, 2000.

 저 자 소 개



정 경 권(정회원)

1998년 2월 동국대학교
전자공학과 공학사
2000년 2월 동국대학교
전자공학과 공학석사
2003년 8월 동국대학교
전자공학과 공학박사

2006년~현재 동국대학교 밀리미터파신기술연구
센터 연구원

<주관심분야 : 디지털 신호처리, 인공지능, 시스템 응용, 밀리미터파 수동 이미징 시스템>



엄 기 환(정회원)

1972년 동국대학교
전자공학과 학사 졸업
1986년 동국대학교
전자공학과 박사 졸업
1989년~1990년 Toho Univ. Post
Doc.

2000년~2001년 Univ. of Canterbury Visiting
Professor.

1994년~현재 동국대학교 전자공학과 교수
<주관심 분야 : 시스템 응용, 홈 네트워크>