

센서 네트워크 비용 절감을 위한 에너지 공급장치 배치 기법

준회원 최 윤 범*, 김 용 호*, 정회원 김 재 준**, 종신회원 김 훈*

A Cost-Efficient Energy Supply Sources Deployment Scheme in Wireless Sensor Networks

Yun-Bum Choi*, Yong-Ho Kim* Associate Members

Jae Joon Kim** Regular Member, Hoon Kim*^o Lifelong Member

요 약

본 고에서는 각 센서에 필요한 에너지를 공급하는 장치를 포함한 센서 네트워크 시스템을 고려하고, 에너지 공급 장치의 설치 및 운용 비용을 최소화하는 방법을 제안한다. 센서와 에너지 공급원이 정방형으로 배치되는 구조 하에서 센서 노드의 밀도, 에너지 공급장치당 센서 노드 커버 범위 등에 따라 에너지 공급 장치의 설치 및 운용 비용을 함수화한다. 또한 주어진 센서 노드밀도 환경에서 총 비용을 최소화하는 에너지 공급장치당 센서 노드 커버 범위를 결정하여 에너지 공급장치가 포함된 센서 네트워크의 배치를 최적화한다. 모의 실험을 통해 기존 방법에 비해 제안된 방법이 약 19%의 센서 네트워크 비용을 절감하는 효과를 가짐을 보인다.

Key Words : Sensor networks, Energy supply source, Network cost, Cost minimization, Power transmission

ABSTRACT

This paper considers the cost minimization issue for sensor network systems where sensor energy is supplied by remote energy sources wirelessly. Assuming symmetric structures of sensor nodes and energy sources, cost minimization problem is formulated, where the cost of sensor networks is represented as a function of sensor node density and energy source coverage. The optimal solution for the problem is provided and simulation results show that the proposal scheme achieves around 19% cost reduction in comparison to a conventional scheme.

1. 서 론

무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network, WSN)는 데이터를 센서 노드에서 감지하여 중앙의 노드에 전달하는 다수의 센서 노드로 구성되는 무선 네트워크이다. 무선 센서 네트워크는 빌딩 감시 및 관리, 목표물의 위치 파악 및 추적, 의학적인 용도, 환경 모니터링 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 이러한

WSN에서 사용되는 센서는 외부에서 전원 공급을 받지 않고, 배터리를 통해 한정된 에너지를 이용하게 되므로, 무선 전력 공급이 이슈가 되어왔다. 그리고 최근 무선 전력 전송 기술의 발달로 인해 센서 네트워크에서 이와같은 무선 전력 전송 기술이 적용되고 있다. 그러므로 무선 센서 네트워크에서 센서 동작에 요구되는 에너지를 무선으로 원활히 공급하면서 통신 및 센싱 기능을 효율적으로 유지하는 네트워크 운용이

* 이 논문은 인천대학교 2009년도 자체연구비 지원에 의하여 연구 되었음.

* 인천대학교 전자공학과 무선정보전송 연구실(cyb_love@naver.com, kim_yong_ho@nate.com, hoon@incheon.ac.kr) (° : 교신저자)

** Georgia Tech. Georgia Electronic Design Center(mr.jaejoonkim@gmail.com)

논문번호 : KICS2011-04-169 접수일자 : 2011년 4월 6일, 최종논문접수일자 : 2011년 6월 9일

요구된다.

기존 WSN 연구에서 센싱 범위 (coverage)를 확보하고 센서간 통신 기능을 유지 (connectivity)하면서 최소의 네트워크 비용을 유지하고 성능을 향상시키는 효율적인 센서 배치 방안과 센서 간 정보전송 방식 등이 주로 연구되어 왔다. 이를 위해 기존 연구에서 최적화 기법에 기반한 센서 배치 문제에 최적화 기법들을 채택 하였으며, 많은 논문들이 SA(simulated annealing)기법을 적용하여 네트워크 구축 비용을 절감하는 방법을 제안한 바 있다¹⁻⁴⁾. 이와 같은 센서 배치를 기반으로 센서 간 접속 시점, 센서 노드의 duty cycle 조절 등을 효과적으로 제어하여 시스템 전체 성능을 향상시키며, 소비 전력 절감을 시키는 센서 노드 스케줄링 기법 등의 연구가 이루어지고 있다⁵⁻⁸⁾. 이와 같이 기존 논문에서 센서의 연결성과 센싱 범위에 대한 성능과 그에 따른 효율적인 센서 배치에 대한 연구와 센서 노드 자체의 전력 절감을 위한 스케줄링에 관한 연구가 주를 이뤄 진행되었다. 최근 필립스 전기의 자회사인 파워캐스트에서는 라디오파를 이용해서 낮은 전력을 요구하는 전자기기에 무선으로 전력을 전달할 수 있는 기술을 발표하였으며, 2003년부터 현재 피츠버그 동물원에 무선 에너지 전송을 통한 무선 센서 네트워크를 구축하고 관리하고 있다⁹⁾. 이렇게 센서 네트워크에서의 무선 전원 공급 기술에 대한 관심이 많아지고 관련 연구가 활발히 진행됨에 따라 센서와 별개로 동작되고 설치되는 에너지 공급원에 대한 효과적인 구축 및 운용 방안이 중요한 문제로 여겨지고 있다.

본 논문에서는 에너지 공급원 시스템에서 주어진 센서 노드와 에너지 공급원을 센서에 필요한 요소로 인식하고, 에너지가 정해진 상황에서의 에너지 공급원 배치 문제를 다룬다. 특히 본고에서는 최근 무선 전송 공급에 대한 관심 및 기술 수요 증가가 점차적으로 높아짐에 따라 무선공급장치인 에너지 공급원(Energy supply source, ESS)을 포함한 센서 네트워크를 가정하여 센서 밀도에 따라 최소의 비용이 드는 에너지 공급원 배치 문제를 고려한다. ESS는 가까운 거리의 센서 노드에 에너지를 공급하는 역할을 하고, 센서에 충분한 에너지를 공급한다고 가정한다. 이 때 센서 네트워크 비용은 기존 센서 노드 설치 비용에 ESS 설치 비용과 운용비용의 합으로 나타낼 수 있다. 여기서 설치비용이란 에너지를 공급하는 에너지 공급원을 설치할 때 드는 비용이고, 운용비용이란 에너지 공급원과 센서 노드를 연결하는 연결선의 비용을 말한다. ESS를 적게 배치할 경우 설치비용은 적게 들겠지만 운용

비용이 많이 들 수 있고 반대로 ESS를 많이 배치 할 경우 운용비용은 적게 들겠지만 설치비용이 많이 드는 단점이 있다. 이런 문제를 해결하기 위해 센서 네트워크 비용에 대해 수식화하여 설치비용과 운용비용을 종합적으로 고려하여 센서 네트워크 비용을 최소로 하는 ESS 배치 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 시스템 모델을 제시하고, 3장에서는 ESS 배치 문제 및 제안 기법을 제안한다. 4장에서는 제안 기법으로 한 모의실험 결과를 설명하고 마지막 5장에서 본 논문을 마무리 한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 센서 에너지 공급에 필요한 ESS를 포함하는 WSN을 고려하며, 센서와 ESS로 구성된 그림 1과 같은 시스템을 가정한다. 센서 배치는 고정되어 있고, $k \times k$ 의 정방형 형태로 놓여진다고 가정한다. k 는 각 ESS당 한축의 커버 범위를 말한다. D 는 센서 네트워크 영역의 길이를 의미한다. ESS는 그림 1와 같이 정방형으로 놓여진 센서 노드 사이에 위치하고 ESS 역시 정방 배치된다고 가정한다. ESS는 거리가 가까운 $k \times k$ 센서 노드에 에너지를 공급한다.

본 논문에서의 센서 네트워크 비용은 센서배치 설치 비용과 ESS 설치 비용 그리고, ESS로부터 센서로

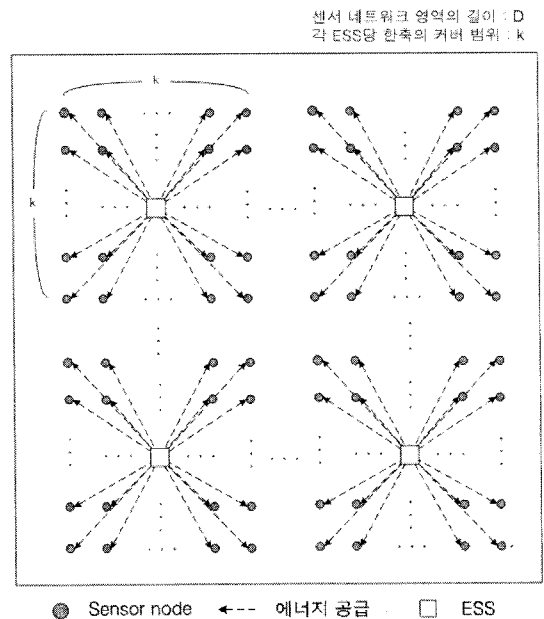


그림 1. 센서 네트워크 모델

의 에너지 공급에 소모되는 비용을 고려한다. 또한 여기서 센서 배치는 고정되어 있다고 가정하면 센서 네트워크 비용을 최소화 하는 문제는 ESS 설치 비용과 ESS로부터 센서로의 에너지 공급에 소모되는 비용의 합을 최소화 하는 ESS 배치에 관한 것이 된다.

ESS 배치 비용을 설치비용, ESS로부터 센서로의 에너지 공급에 필요한 비용을 운용비용이라 한다. 설치비용은 ESS 단가에 설치되는 ESS개수를 곱한 결과로 계산된다. ESS 하나의 설치비용을 C_1 이라고 하고, 설치되는 ESS개수를 N 이라 하면, 설치비용은 다음과 같이 표현된다.

$$C_1 N \tag{1}$$

여기서 ESS 센서개수는 센서영역의 넓이를 센서 개수로 나눈 것으로 나타낼 수 있으므로 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$C_1 \left(\frac{D}{k}\right)^2 \tag{2}$$

운용비용이란 ESS와 센서 노드의 연결에 관계되는 비용으로 ESS로부터 에너지가 공급되는 센서 간의 길이에 비례함을 가정한다. 그러므로 운용비용은 ESS와 센서 노드를 연결하는 연결선의 합으로 나타낼 수 있다. ESS에서 센서 노드로의 단위거리당 운용비용을 C_2 라고 하고, ESS와 센서 노드를 연결하는 연결선의 거리를 d_{ij} 라고 하면 운용 비용은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_j \sum_i C_2 \cdot (d_{ij})^2 \tag{3}$$

여기서 거리 d_{ij} 를 k 로 나타내야 하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_2 \cdot \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{i=0}^{k-1} \left(\left(id - \frac{d(k-1)}{2} \right)^2 + \left(jd - \frac{d(k-1)}{2} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{D}{k}\right)^2 \tag{4}$$

그러므로 센서 네트워크의 비용은 다음과 같은 설치비용과 운용비용으로 구성된다.

$$\begin{aligned} \text{cost} &= \text{설치비용} + \text{운용비용} \\ &= \text{에너지 공급원의 에너지 용량} + \\ &\quad \sum \text{Energy source와 Sensor node를} \\ &\quad \text{연결하는 연결선} \end{aligned} \tag{5}$$

또한 센서 네트워크의 비용을 나타내기 위해 ESS의 설치비용과 운용비용의 합으로 나타내면 다음의 식이 된다.

$$C_1 \left(\frac{D}{k}\right)^2 + C_2 \cdot \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{i=0}^{k-1} \left(\left(id - \frac{d(k-1)}{2} \right)^2 + \left(jd - \frac{d(k-1)}{2} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{D}{k}\right)^2 \tag{6}$$

III. ESS 배치 문제 및 제안 기법

3.1 ESS 배치 문제

본 논문에서 고려하는 센서 네트워크 문제는 ESS의 설치비용 및 운용비용의 최소화이다. 이를 위해 각 ESS당 한축의 커버 범위인 k 를 결정하여 ESS를 배치해야 한다. 센서 네트워크 비용은 2장에서 언급 했듯이 ESS의 설치비용과 운용비용의 합으로 나타낸다.

센서 네트워크의 비용을 감소시키려는 문제는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \min \quad & \text{cost} \\ \text{Subject to} \quad & \sum_{i \in S} e_i \leq E_s \end{aligned} \tag{7}$$

E_s 는 ESS s 가 공급 가능한 에너지이고, S 는 ESS s 로부터 에너지를 공급받는 센서 노드의 집합이며, e_i 는 각 센서 노드 i 에 필요한 에너지이다. (7)에서 cost 는 시스템 비용을 의미한다. (7)에서 E_s 는 공급 가능한 에너지이고 $\sum_{i \in S} e_i$ 는 각 노드에 필요한 에너지의 합이다. 센서 노드에 필요한 에너지가 공급된 에너지 보다 크면 안된다. 즉, ESS 모두에서 각기 에너지 공급을 담당하고 있는 센서에 충분한 에너지를 공급해야 함을 의미한다.

3.2 제안 기법

본 논문에서는 무선 에너지 공급 장치의 설치 및 운용 비용을 함수화 하여서 주어진 센서 노드 밀도 환경에서 총 비용을 최소화 하는 최적의 에너지 공급 장치당 센서 노드 커버 범위인 k^* 를 도출한다. 이를 위해서 제약 조건을 만족하고 가능한 범위에서 최소비용을 만족하는 k 를 찾는다.

3.2.1 제약 조건을 만족하는 k 범위 산정

센서 네트워크 비용을 최소화 하려면 다음과 같은

제약조건을 만족해야 한다. 먼저 k 는 0보다는 커야하며 정수이다.

$$k > 0, k \text{는 정수} \quad (8)$$

또한 (7)에서 E_s 는 에너지 공급원의 에너지 용량 이므로 에너지 용량 상수를 C_3 이라고 하고, 센서 개 수를 k^2 이라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$E_s \geq k^2 \cdot C_3 \quad (9)$$

이것을 k 에 대해 정리하면 다음과 같은 식이 된다.

$$k \leq \sqrt{\frac{E_s}{C_3}} \quad (10)$$

그리고 위 식을 만족하는 최대의 k 를 k_M 이라고 정의하고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_M = \left\lfloor \sqrt{\frac{E_s}{C_3}} \right\rfloor \quad (11)$$

[x]:x보다 작은 최대의 정수

따라서 제약조건을 모두 만족하는 k 의 범위는 다음과 같이 표현 된다.

$$k = (0, \left\lfloor \sqrt{\frac{E_s}{C_3}} \right\rfloor] \quad (12)$$

3.2.2 최적의 k 도출

제약 조건을 만족하고 센서 네트워크의 최소비용을 만족하는 k 를 도출하면 다음과 같다. 센서 네트워크 비용을 나타내는 (6)을 k 에 대해 정리하면 아래와 같은 식이 된다.

$$\frac{4\alpha k^6 - 2\alpha k^5 - 4\alpha k^4 - 8\alpha k^2 + (16\alpha - 2\beta)k}{k^4} \quad (13)$$

여기서 α 는 $\frac{D^2 C_2 d^2}{6}$ 을 의미하고, β 는 $3\alpha + D^2 C_1$ 을 의미한다.

(13)을 최소 비용을 만족하는 k 값을 찾기 위해 k 에 대해서 미분하면 다음과 같고 최소값 k 를 찾기 위해 (14)가 0이 되는 k 를 k' 라 한다.

$$\frac{4\alpha k^6 - 2\alpha k^5 - 4\alpha k^4 - 8\alpha k^2 + (16\alpha - 2\beta)k}{k^4} \quad (14)$$

모든 제약 조건을 만족하는 k 의 범위는 (15)와 같고, 이 제약조건 범위 안에서 센서 네트워크 최소비용을 만족하는 k 값인 k' 을 만족하는 최적의 k 값인 k^* 은 (16)이 된다.

$$k = (0, k_M] \quad (15)$$

$$k^* = \begin{cases} k' & , k' < k_M \\ k_M & , k' > k_M \end{cases} \quad (16)$$

표 1. 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값
배치 영역 (D)	10km
센서 배치 간격 (d)	0.1km
설치 비용 상수 (C1)	1
운영 비용 상수 (C2)	1
에너지 용량 상수 (C3)	1

IV. 모의실험 결과

4.1 모의실험 환경

센서 네트워크의 비용을 최소로 하는 센서 배치와 그 비용을 비교 한다.

모의실험은 기존기법과 제안기법을 비교하는 방식으로 한다. 기존 기법은 센서 밀도에 상관없이 k 를 2개, 3개, 4개로 일정하게 배치한 상태로 모의실험 하는 것이고, 제안 기법은 제안하는 솔루션을 만족하는 k 값으로 모의실험을 하는 것이다.

센서의 배치는 정방형이고 센서의 개수는 정수라고 가정한다. 이때 전체 배치영역 D 는 10, 설치비용에 관한 비용상수 $C1$ 은 1, 운영비용에 관한 비용상수 $C2$ 는 1, 그리고 에너지 공급원의 용량상수 $C3$ 은 1로 정한다. 또한 센서의 배치 간격은 0.1로 정하고 모의실험 한다.

4.2 모의실험 결과

그림 2는 센서 밀도 배치 변화에 따른 k^* 값을 도식한 것이다. 센서 밀도가 커질수록 k^* 가 단조감소함을 보인다. 여기서 전체적으로는 감소하나 센서 밀도가 0.3~0.6구간에서는 일정함을 보이는데 이는 k 가 정수 값을 가져야 하기 때문이다.

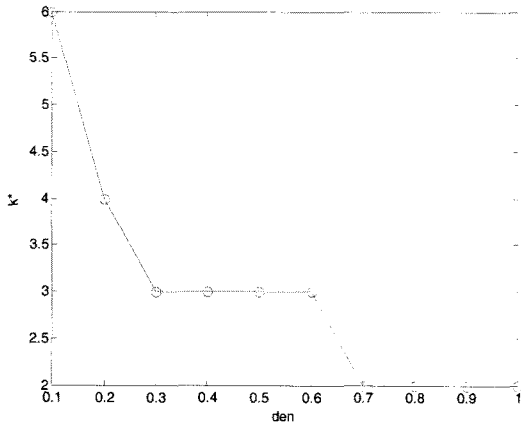


그림 2. 센서 밀도 변화에 따른 k*

그림 3은 센서 밀도 변화에 따라 센서 네트워크 비용을 도시 한 것이다. 기존 기법은 센서 밀도에 상관 없이 k를 2개, 3개, 4개로 일정하게 배치한 상태로 모의실험 하였고, 제안 기법은 제안하는 솔루션을 만족 하는 k로 모의실험 했다. 모의실험 결과, 기존 기법을 사용한 방법에서는 각각, 일부구간에서만 최소의 비용을 보인다. 즉 센서 밀도가 0.1~0.3인 구간에서는 k가 4일때, 0.3~0.7인 구간에서는 k가 3일때, 0.7~1인 구간에서는 k=2 일때 최소의 비용을 보인다. 그러나 전 구간에서는 제안 기법이 가장 적은 센서 네트워크 비용이 든다. 제안방법이 적응적인 성격을 갖기 때문에 기존 방법들보다 가장 적은 수치의 비용이 드는 것을 알 수 있다.

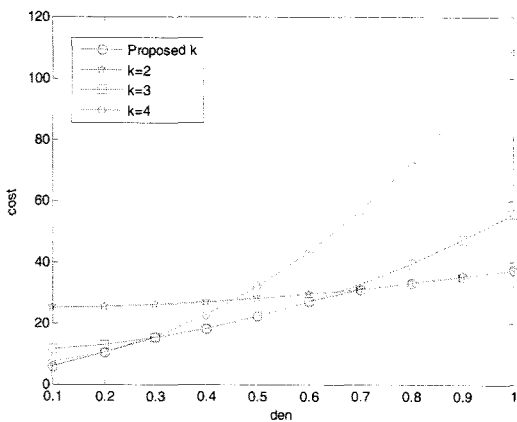


그림 3. 센서 밀도 배치 변화에 따른 센서 네트워크 비용

V. 결 론

본 고에서는 각 센서에 필요한 에너지를 공급하는

장치를 포함한 센서 네트워크 시스템을 고려하고, 에너지 공급 장치의 설치 및 운용 비용을 최소화하는 방법을 제안한다. 센서와 에너지 공급원이 정방형으로 배치되는 구조하에서 센서 노드의 밀도, 에너지 공급 장치당 센서 노드 커버 범위 등에 따라 에너지 공급 장치의 설치 및 운용 비용을 함수화하고, 주어진 센서 노드밀도 환경에서 총 비용을 최소화하는 에너지 공급장치당 센서 노드 커버 범위를 결정한다. 또한 모의 실험을 통해 기존 기법으로 고정배치 대비 평균 19% 정도의 비용 절감 효과를 얻음을 보인다. 향후 보다 실제적인 배치 환경을 감안 3차원 공간상의 ESS 센서 배치 문제에 관한 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] PL Chiu, FYS Lin, "A simulated annealing algorithm to support the sensor placement for target location", *IEEE, Electrical and Computer Engineering*, pp.867-870 Vol.2, 2004.
- [2] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing", *Science, New Series*, Vol.220, No.4598, pp. 671-680, May 13, 1983.
- [3] S. Kirkpatrick, "Optimization by Simulated Annealing: Quantitative Studies", *Journal of Statistical Physics* 34, pp.975-986, 1984.
- [4] Y. S. Lin and P. L. Chiu, "A simulated annealing algorithm for energy-efficient sensor network design" *In Proc. of the WiOpt*, pp. 183-189, 2005.
- [5] T. Moscibroda and R. Wattenhofer, "Maximizing the lifetime of dominating sets", *in Proc. of the 19th IEEE Int'l parallel and Distributed Processing Symposium*, pp.242b-242b, 2005.
- [6] R. Draves, J. Padhye, B. Zill, "Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks.", *ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.114-128, 2004.
- [7] Injong Rhee, Ajit Warrier, Mahesh Aia and Jeongki Min, "ZMAC: a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks", *In Proc. of 3rd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2005)*, 2005.
- [8] Peng Lin, Chunming Qiao, and Xin Wang.

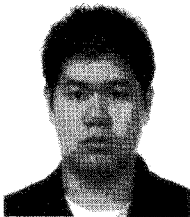
"Medium access control with a dynamic duty cycle for sensor networks", In Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp.1534-1539, 2004.

[9] www.powercastco.com

[10] A. Karalis et al., "Efficient Wireless Non-radiative Mid-range Energy Transfer," *Annals of Physics*, Vol.323, pp.34-48, 2008.

최 윤 범 (Yun-Bum Choi)

준회원



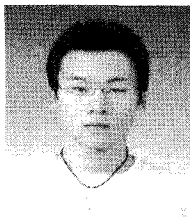
2010년 2월 인천대학교 전자공학과

2010년 2월~현재 인천대학교 전자공학과 석사과정

<관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 센서네트워크

김 용 호 (Yong-ho Kim)

준회원



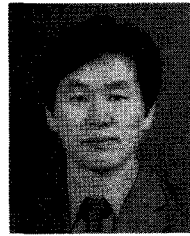
2010년 2월 인천대학교 전자공학과

2010년 2월~현재 인천대학교 전자공학과 석사과정

<관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 센서네트워크, 그림 IT

김 재 준 (Jae Joon Kim)

정회원



1996년 2월 한양대 전자공학과 졸업

1998년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 석사

2003년 2월 KAIST 전자전산학과 박사

2001년~2002년 Berkana Wireless (현 Qualcomm), Design Engineer

2003년~2005년 Hynix(현 Magnachip) 선임연구원

2005년~현재 지식경제부(구 정보통신부) 사무관

2009년~현재 Georgia Institute of Technology, Senior Research Engineer

<관심분야> 센서네트워크, 차세대 통신시스템, IT기반 융합 시스템, 바이오센서 시스템, 무선전력 전송시스템

김 훈 (Hoon Kim)

종신회원



1998년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업

1999년 2월 ICU 공학부 석사

2004년 2월 ICU 공학부 박사

1998년~2000년 ETRI 위촉연구원

2004년~2005년 삼성종합기술원 책임연구원

2005년~2007년 정보통신부 사무관

2007년~2008년 Stanford Univ. 박사후연구원

2008년~현재 인천대학교 조교수

<관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 펌토셀 네트워크, 무선자원관리