

타부 탐색 알고리즘을 적용한 전력 효율적 라우팅 기법

論 文

10-3-1

An Energy Efficient Routing Scheme with Tabu Search Algorithm

염 석, 홍 원 기*

Yan Shi and Won-Kee Hong

Abstract

Wireless sensor network (WSN) is a distributed self-organizing network which contains a large number of tiny multi-functional sensor nodes. The network life time is an important issue in WSN because every sensor node has a constraint on electric supply. In this paper, an energy consumption model is described and a GA-based algorithm will be used to optimize the energy consumption by analyzing the working model of sensor nodes. The model will provide an effective reference of working pattern for WSN. This algorithm is evaluated through analysis and simulations.

Keywords : wireless sensor network, network life time, routing protocol, genetic algorithm, tabu search algorithm

I. 서 론

무선센서네트워크(wireless sensor network)는 센서, 임베디드 컴퓨팅, 무선 통신 그리고 분산 정보처리 분야가 복합된 첨단 기술이다. 무선센서 네트워크는 초기에 야전 정찰과 같은 군사 응용 분야에서 시작 되었으나, 지금은 환경 및 야생 서식지 감시를 비롯하여 헬스케어, 가정자동화, 스마트 빌딩, 운송 시스템 제어 및 다양한 산업 분야에 활용되고 있다[1-3].

무선센서네트워크는 유선 네트워크에 비해 설치용이성과 이동성 등에 강점을 갖고 있으나 오류 내성(fault tolerance), 확장성, 하드웨어의 제약 및 전력 소모 측면에서 해결되어야 할 문제를 안고 있다[4,5]. 특히, 저비용 설계로 인한 하드웨어의 제약과 배터리 운용으로 인한 전력 소모 등은 네트워크 생명 주기(network life time) 를 결정하는 결정적인 요소이다[6].

본 논문에서는 센서 노드의 효율적인 배터리 운용을 통해 전력 소모를 최적화하기 위한 유전자 알고리즘 기반의 전력 효율적인 라우팅 프로토콜을 제안한다. 이를 위해 전력 소모 모델을 제시하며, 제시된 전력 소모 모델을 기반으로 센서 노드의 작업 모델(working model)을 분석하여 유전자 알고리즘을 기반으로 한 라우팅 프로토콜을 설계한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구를 소개하며, 3장에서는 에너지 모델과 이를 기반으로 한 라우팅 프로토콜을 제시한다. 4장에서는 성능평가 결과 및 분석 내용을 설명하고 5장에서 결론을 맺는다.

II. 관련연구

무선 센서들은 배터리를 장착하여 동작하며, 재충전이나 교체 비용이 많이 들기 때문에, 무선센서네트워크는 전력 사용을 최적화할 수 있도록 설계되어야 한다. 따라서, 전력 소모를 최소화하기 위한 장치, 프로토콜 알고리즘을 설계하는 많

접수일자 : 2011년 05월 15일

심사일자 : 2011년 07월 20일

최종완료 : 2011년 09월 10일

* 교신저자, E-mail : wkhong@daegu.ac.kr

은 센서 네트워크 연구들이 진행되고 있다.

본 장에서는 라우팅 프로토콜을 중심으로 전력 소모를 줄이기 위한 기존 연구들을 살펴본다. 또한, 본 논문이 전력 소모를 줄이기 위한 최적화 경로를 찾는 데 사용되는 최적화 탐색 알고리즘들에 대해 설명한다.

1. 라우팅 프로토콜

무선센서네트워크를 위한 다중 홉 라우팅 프로토콜은 전력 소모 측면에서 최적의 라우팅 경로를 찾을 수 있어야 한다. 클러스터 기반의 라우팅 프로토콜인 LEACH[7]는 클러스터를 관장하는 헤더를 무작위 순환 방식으로 선정하여 네트워크에 분포되어 있는 노드들의 전력 손실을 공평하게 분산시키고자 하였다. 이 연구는 클러스터 내의 모든 노드들은 클러스터 헤더까지 전송에 필요한 에너지가 동일하며 모든 클러스터 헤더는 게이트웨이 노드까지 직접 전달가능하다는 가정을 기반으로 하고 있다. GEAR (Geographical and Energy Aware Routing) [8]은 목적지 영역으로 패킷을 라우팅하기 위해 전력 소모를 감안한 이웃 노드 선택 기법을 제안하며, 패킷을 전파하는 방법으로 제한적인 플러딩 알고리즘을 사용하고 있다. 이 방법을 위해서 모든 센서 노드들이 GPS 장비나 위치 확인 시스템을 갖추고 있어야 한다. P. Berman 등은 센서 노드들이 idle 모드와 실행 모드를 번갈아 가는 센서 네트워크 모델을 제안하였다[9]. 센서마다 감시 영역, 배터리 잔량 그리고 전력 소모를 등을 따져 센서 네트워크의 라이프타임을 최대화 할 수 있는 모델을 설계하였다. LDDTA (Localized Discrete Distribution Topology-control Algorithm) [10]은 무선센서네트워크의 중복된 링크를 줄여 필요 없는 데이터의 전송을 제거한 방법이다. 무선센서네트워크의 토폴로지 링크들은 이산화 되어 있으며 일부 네트워크가 고립되어 일종의 섬을 형성하는 네트워크 섬 토폴로지(isolated network island topology)를 형성하기도 한다. 이런 고립된 네트워크 섬들을 연결하기 위해 전력 소모를 최소화하기 위한 intersubgraph 알고리즘을 제안하였다.

2. 최적화 탐색 알고리즘

유전자 알고리즘은 생물의 유전과 진화 원리를 공학적으로 모델화한 일종의 문제 해결 방법이다[11]. 이는 어떤 범위 내에 정의 되어 있는 변수 x 에 대한 함수 $f(x)$ 의 최대치 혹은 최소치를 고속으로 구하기 위한

일종의 최적화 탐색 알고리즘이다. 유전자 알고리즘은 특정 영역의 문제에만 국한되어 있지 않고 다양한 형태의 문제에 잘 적용할 수 있는 특징이 있다. 예를 들어, 함수 최적화나 조합 최적화, 스케줄링, 자동 제어, 지능 제어, 영상 처리 및 패턴 인식 등 유전자 알고리즘이 적용되어 사용되는 분야는 매우 넓다. 유전자 알고리즘은 선택(selection), 교배(crossover) 그리고 돌연변이(mutation)의 반복적인 연산을 통해 최적의 결과를 찾아낸다. 그러나, 유전자 알고리즘은 지역 탐색에서는 좋은 성능을 낼 수 없으며 조숙(premature)의 문제점을 안고 있다. 이는 돌연변이의 확률이 낮아지면 새로운 염색체(chromosome)을 생산할 기회가 낮아지고, 반대로 돌연변이의 확률이 너무 높으면, 예측 가능성이 낮아져 좋지 않은 탐색 결과가 나타나기 때문이다.

타부 탐색 알고리즘(taboo search algorithm)은 지역 탐색에 효과적인 결과를 얻을 수 있는 탐색 알고리즘이다[12]. 이 알고리즘은 메모리 기반 탐색 전략을 사용함으로써 순환 검색을 피한다. 유전자 알고리즘은 병렬 구조를 채택하여 염색체 교배를 통해 보다 다양한 해를 얻어내는 반면, 타부 탐색 알고리즘은 초기 해에 의존적인 직렬 구조를 띈다. 유전자 알고리즘의 돌연변이 연산은 타부 탐색 알고리즘의 단일점 최적화 탐색 연산과 유사하며 이는 해의 구조를 개선해 줄 수 있다. 따라서, 타부 탐색 알고리즘의 일부 연산을 유전자 알고리즘으로 대체할 경우 타부 탐색 알고리즘의 초기 해 의존성 문제를 해결해 줄 수 있을 뿐 아니라 유전자 알고리즘의 지역 탐색과 수렴 문제를 개선해 줄 수 있다.

III. 전력 소비 최적화 라우팅 알고리즘

본 장에서는 에너지 모델을 유도하기 위해 가정하고 있는 다중 홉 네트워크 태스크 모델을 기술한 후 에너지 모델에 대해 설명한다. 마지막으로 에너지 모델에 기반을 둔 라우팅 알고리즘을 제안한다.

1. 다중 홉 네트워크 태스크 모델

본 논문에서는 다중 홉 무선센서네트워크에서의 전력 소모 최적화 방법을 소개한다. 그림 1의

네트워크 토폴로지 구조에서 보듯이 A~H의 멤버 노드들은 다중 홉을 통해 싱크 노드와 통신을 한다. 여기서 싱크 노드는 노드 간 태스크 관리를 맡는다.

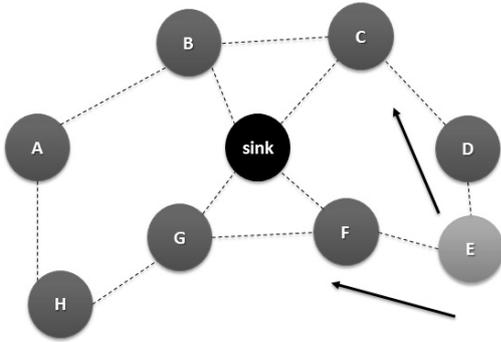


그림 1. 다중 홉 네트워크 토폴로지
Fig. 1. Multi-hop network topology

무선센서네트워크의 센서 노드들은 상호 협력 방식(collaborative approach)으로 자신의 태스크를 수행한다. 즉, 각 센서 노드들은 하나의 작업을 처리하기 위해 여러 개로 나누어진 태스크를 할당받아 노드들 간의 통신을 통해 자신의 작업을 마무리한다. 센서 노드 i 에 할당된 태스크를 t_i , 태스크 처리를 위해 노드 i 에서 j 로의 통신을 C_{ij} 라 할 때 센서 네트워크의 태스크 모델은 그림 2처럼 표현할 수 있다.

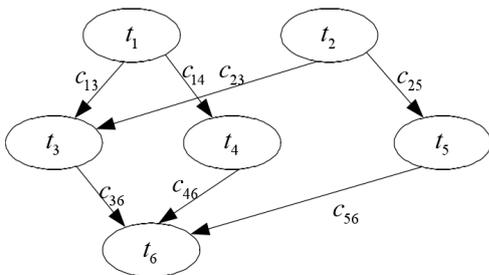


그림 2. 다중 홉 네트워크 태스크 모델
Fig. 2. Multi-hop network task model

이 무선센서네트워크의 태스크 모델 G_d 는 아래와 같은 식으로 표현 할 수 있다.

$$G_d = (P, L),$$

여기서, P 는 태스크 집합을 말하며 L 은 태스크 간의 의존 관계를 의미한다. 무선센서네트워크에서 application을 처리하기 위해 여러 태스크로 나뉘어 센서 노드에 할당되어 야 하는데, 이러한 태스크 할당 함수 Φ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi : P \rightarrow V,$$

여기서 V 는 무선센서네트워크를 구성하는 센서 노드들을 말한다. 또한 태스크간 통신 경로 함수 Γ 는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\Gamma : L \rightarrow E,$$

여기서 L 은 태스크간 데이터 통신 edge 를 말하고 E 는 센서 노드간 데이터 통신 edge 를 말한다. 함수 Φ 는 태스크의 센서 노드 할당을 결정하며, 함수 Γ 는 태스크의 수행 순서를 결정하게 된다.

2. 에너지 모델

무선센서네트워크를 구성하는 센서 노드 아키텍처는 프로세싱 모듈(processing module), 센서 모듈(sensor module), 그리고 무선 모듈(wireless module) 등 3가지 모듈로 구성되어 있다. 센서 노드는 일련의 컴퓨팅과 통신 태스크의 처리를 통해 실시간 응용을 수행하게 된다. 센서 노드의 프로세싱 모듈은 이런 일련의 수행동안 active state, sleep state, 그리고 idle state 중 하나의 상태를 갖는다. 프로세싱 모듈이 sleep혹은 idle state일 경우 센서 모듈과 무선 모듈은 모두 off 상태에 있게 된다. active state는 데이터 수집, 데이터 송수신, 데이터 처리 등의 태스크를 처리하게 되고 이때 센서 모듈과 무선 모듈의 상태는 표 1과 같다.

표 1. 센서 노드의 상태

Table 1. The status of sensor node

state	Processing module	Sensor module	Wireless module	task
s_0	Active	On	Send/Rec	Active
s_1	Active	On	Off	Data collection
s_2	Active	Off	Off	Data processing
s_3	Active	Off	Send/Rec	Data transmission
s_4	Idle	Off	Off	Wait
s_5	Sleep	Off	Off	Sleeping

임의의 시구간에서 센서 노드의 전력 손실은 아래 식으로 표현할 수 있다.

$$E = \sum_{i=0}^5 T_i P_{s_i},$$

, 여기서 T_i 는 상태 s_i 에 있었던 시간을 의미하며, P_{s_i} 는 상태 s_i 에서 노드의 전력 손실을 말한다.

무선 통신 모듈의 경우 Gross와 Harris가 제시한 간단한 전력 소모 모델[13]을 따르면 다음과

같다.

- 데이터 전송시 무선 통신 모듈의 전력 손실은 다음 식과 같다.

$$E_t = e_d b d^a + e_i b,$$

여기서 e_d 는 데이터 전송시 비트당 소모되는 전력 손실로써 $e_d = 1 \times 10^{-10} J$ 이다. b 는 전송 데이터 비트 수이며, d 는 전송 거리를 말하고 a 는 환경에 영향을 받는 상수이다.

- 데이터 수신 시 무선 통신 모듈의 전력 손실은 다음 식과 같다.

$$E_r = e_i b,$$

여기서 e_i 는 데이터 전송시 비트당 소모되는 전력으로써 $e_i = 5 \times 10^{-8} J$ 이다.

- 센서 모듈에서 소모되는 전력 손실은 다음과 같다.

$$E_s = e_s b,$$

여기서 e_s 는 데이터 샘플링시 비트 마다 소모되는 전력 손실로써 $e_s = 5 \times 10^{-8} J$ 이다.

3. 라우팅 알고리즘

유전자 알고리즘에 적용하기 위한 노드 에너지 적합도(fitness) 함수 F' 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F' = \begin{cases} E(T) \\ E_{\max} \end{cases}$$

여기서 E_{\max} 는 매우 큰 양의 정수이다.

다음은 전력 소모를 최소화하기 위한 최적의 라우팅 경로를 찾기 위한 과정이다.

step1. 원시 데이터와 패러미터 입력; 패러미터는 전송 대역폭, 데이터 패킷 크기, 시간간격, 노드 버퍼 크기, 노드 패킷 처리율, 상태에 따른 전력 소모 값임.

step 2. 초기 그룹 생성; 염색체 부호화 규칙에 따라 개체의 수를 무작위로 정하여 생성함.

step 3. 개체의 적합도를 계산.

step 4. 유전자 알고리즘의 수렴 상태를 만족하는지 결정; 만일 $k_{GA} \geq T_{\max}$ 이거나 $\left| \frac{\Delta F'}{F'} \right| < \epsilon$, 종료하며, 최적화 결과값을 얻고, 그렇지 않으면, $k_{GA} = k_{GA} + 1$. 여기서, k_{GA} 는 유전자 알고리즘의 반복 횟수, T_{\max} 는 최대 반복 횟수, ϵ 은 수렴 기준값을 말함.

step 5. 최적화 보존 전략을 활용한 선택과 교

배 수행; 현재 그룹에서 가장 적합도가 높은 개체는 교배와 돌연변이 연산에 제외하며 적합도가 가장 낮은 개체로 대체하여 타부 탐색 수행.

step 6. 타부 탐색의 moving 연산 수행; 매 타임 유닛마다, 프로세서 모듈은 3가지 상태 중 하나에 있으며, 센서 모듈과 무선 모듈은 두 종류의 상태에 있음; 타부 탐색의 moving 연산은 모듈의 상태를 변화시키고 주변 해를 생성함.

step 7. 적합도 계산.

step 8. 타부 탐색 알고리즘은 리스트를 처리하고 scorn norm을 수행; 타부 최적화 해가 현 최적화 해보다 좋으면, 타부 최적화 해를 현재의 해로 지정; 그렇지 않으면 현재의 해로 다른 최적화 해를 취함.

step 9. $k_{TS} \geq T_{\max}$ 이거나 $\left| \frac{\Delta F}{F} \right| < \epsilon$ 이면 타부 탐색을 멈춤. 여기서 k_{TS} 는 타부 탐색 알고리즘의 반복 횟수를 말함.

IV. 실험

무선센서네트워크는 Matlab-Simulink 2010a로 모델링하여 실험하였다. Matlab-Simulink를 통해 matrix 연산, 함수와 데이터 plotting, 알고리즘의 구현, 사용자 인터페이스의 구현 및 C, C++, fortran 등 다른 프로그램 언어로 작성된 프로그램과 간단하게 interface할 수 있도록 해 준다. 본 논문에서는 Matlab-Simulink 2010a의 m-file을 이용해 실험 환경을 구축하였다.

1000x1000의 sensor network 필드에서 20개의 센서 노드를 random으로 배치하였다. 무선센서네트워크에서 전력 소모를 줄이기 위한 주요 기술은 노드 활동 메커니즘과 라우팅 알고리즘이다. 제안한 라우팅 알고리즘과 에너지 모델을 이용하여 소스 노드에서 싱크 노드까지 에너지 소모를 최소화하는 경로를 찾을 수 있다. 유전자 알고리즘의 입력으로 population 크기는 20, 돌연변이 확률은 0.7, 교배 확률은 0.8로 설정하였다.

그림 3은 센서 필드에서 제안한 라우팅 알고리즘을 이용하여 최적의 경로를 찾는 과정을 보여준다. 좌측 하단의 빨간 점은 데이터 전송을 최초로 시작하는 소스 노드이며, 우측 상단의 검은 점은 싱크 노드를 나타낸다.

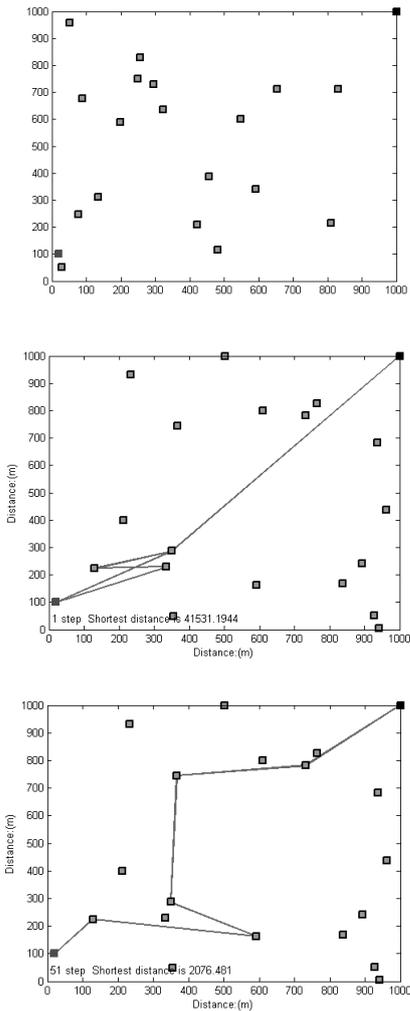


그림 3. 소스노드-싱크노드 경로 탐색
Fig. 3. path search between source to sink node

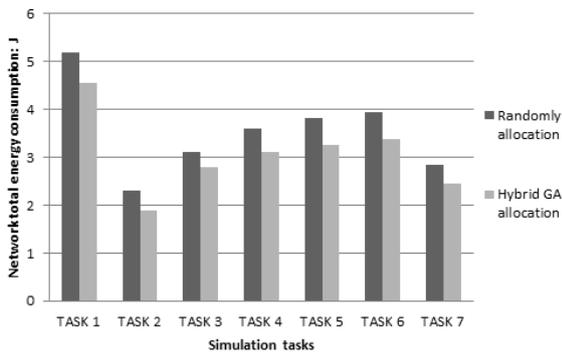


그림 4. 임의 경로와 하이브리드 유전자 알고리즘을 통한 최적 경로의 전력 소모
Fig. 4. energy consumption over randomly allocation and hybrid GA allocation

$$\text{식 } \min F = \sum_{\tau \in P} w(\tau) + \sum_{e_{ij} \in L} c(e_{ij}) + w_1 \max T_u + w_2 \max E(u) \text{ 에}$$

기반하여 w_1 과 w_2 를 0이라고 가정하면 최적화의 목표는 실시간 제약을 위한 전력 소모를 최소화 하는 것이다. 테이블은 random하게 생성된 태스크 관련 패러미터이고 그림 4는 무작위로 생성된 태스크를 수행하는데 소모되는 네트워크 전체 전력을 보여준다. 무작위로 분산되어 할당된 태스크와 비교할 때, 타부 탐색 알고리즘을 적용한 하이브리드 유전자 알고리즘을 이용한 태스크 할당이 네트워크 전력 소모 측면에서 효율적이며 에너지 소모를 평균 12.2% 줄여주었다.

V. 결 론

무선센서네트워크에서 전력 제약은 다양한 응용에 적용하기 위해 해결되어야 할 가장 중요한 문제 중 하나이다. 본 논문에서는 네트워크의 수명을 늘리기 위한 새로운 전력 절약형 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 이를 위해 센서 노드의 위킹 모델을 설계하고 무선센서네트워크의 전력 소모를 모델링하였다. 이를 기반으로 유전자 알고리즘에 타부 탐색 알고리즘을 적용하여 새로운 하이브리드 유전자 알고리즘을 제안하였다. 실험을 통해 제안한 유전자 알고리즘을 통해 최적화된 노드 간 경로가 평균 12.2%의 전력 소모를 줄여 줄 수 있음을 확인하였다.

향후 기존의 대표적인 라우팅 알고리즘인 LEACH, GEAR 등과의 성능 비교를 통해 제안하는 라우팅 알고리즘의 전력 소모 우수성을 검증하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2011학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

[참고 문헌]

[1] D. Estrin, L. Girod, G. Pottie, and M. Srivastava, "Instrumenting the World with Wireless Sensor Networks," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 2033-2036, 2001.
[2] T. Brooks, "Wireless Technology for Industrial Sensor

and Control Networks," *ISA/IEEE Conference on Sensors for Industry*, pp. 73-77, 2001.

[3] B. Nickerson, and R. Lally, "Development of a Smart Wireless Networkable Sensor for Aircraft Engine Health Management," *IEEE Aerospace Conference*, vol. 7, pp. 3257-3262, 2001.

[4] I. F. Akyildiz and et. al., "wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, Vol. 38, pp. 393-422, 2002..

[5] 최락현, 홍원기, "자원 효율적인 네트워크 리프로그래밍 프로토콜 설계," 산업정보학회논문지, 제15권 3호, pp. 67-75, 2010.

[6] C. Clift, *Faster Fault Finding and Service Restoration*, Transmission & Distribution World Magazine, July 2003.

[7] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks," *Proceedings of the 33rd IEEE Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, vol. 2, pp. 1-10, 2000.

[8] Y. Yu, R. Govindan, and D. Estrin, "Geographical and energy aware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks," *Technical Report, UCLA-CSDTR-01-0023*, 2001.

[9] P. Berman, G. Calinescu, C. Shah, and A. Zelikovsky, *Efficient Energy Management in Sensor Networks*, Ad hoc and sensor networks, Nova Science Publishers, 2005.

[10] H. Xuyong, L. Pei, "A discrete distributed topology-control algorithm of wireless sensor network," *International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems : Networking and Services*, pp. 17-21, 2006.

[11] C. Ahn and R. S. Ramakrishna, "A genetic algorithm for shortest path routing problem and the sizing of populations," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol, 6, no. 6, pp. 566-579, 2002.

[12] A. Hertz, E. Taillard, and D. Werra, "A tutorial on tabu search," Technical Report, EPFL, Department de Mathematique, MA-Ecublens, 1995.

[13] D. Gross, C. Harris, *Fundamentals of queuing theory*, John Wiley & Sons Inc. Fourth Edition, 2008.

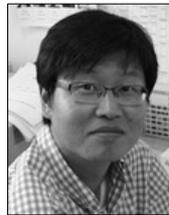
Biography



염석

2008년 대구대학교 정보통신공학부 졸업
 2011년 대구대학교 정보통신공학과 졸업(공학 석사)
 2011년~현재 중국 Tietong 통신회사

<관심분야> 무선센서네트워크, 임베디드시스템
 <e-mail> darrenyane@hotmail.com



홍원기

1995년 연세대학교 전산학과 졸업
 1997년 연세대학교 컴퓨터과학과(공학석사)
 2001년 연세대학교 컴퓨터과학과(공학박사)
 2004년~현재 대구대학교 부교수
 <관심분야> 무선센서네트워크, 차량용

네트워크, 임베디드시스템
 <e-mail> wkhong@daegu.ac.kr