

논문 2011-4-3

수중 무선 센서 네트워크를 위한 클러스터 헤드 오류 복구 기법

A Recovery Scheme of a Cluster Head Failure for Underwater Wireless Sensor Networks

허준영*, 민 흥**

Junyoung Heo, Hong Min

요 약 수중 환경은 육상 환경과 많은 차이를 보이며 무선 통신에 사용되는 자원과 제약 조건들도 다르다. 일반적으로 수중 통신 환경은 육상 통신 환경보다 열악하고, 파도, 조류와 같은 해수의 흐름으로 인한 노드의 이동성 때문에 오류 발생 가능성이 기존의 지상 무선 센서 네트워크 보다 높다. 따라서 수중 무선 센서 네트워크의 통신 환경을 고려하여 노드 간 데이터 전송률을 향상시키기 위한 기법들에 대한 요구가 높아지고 있다. 본 논문에서는 수중 무선 센서 네트워크의 통신 환경을 고려하여 클러스터 헤드 노드의 오류 발생 시 이를 빠른 시간 내에 복구하기 위한 체크 포인팅 기법을 제안한다. 또한 실험을 통해 제안 기법이 네트워크 운영의 신뢰도를 향상 시킬 수 있을 뿐만 아니라, 에너지 소모량과 오류 복구 지연 시간 측면에서 제안 기법을 적용하지 않았을 때보다 좋은 성능을 보인다는 것을 검증한다.

Abstract The underwater environments are quite different from the terrestrial ones in terms of the communication channel and constrains. In underwater wireless sensor network, the probability of node failure is high because sensor nodes are deployed in more harsh environments than the ground based networks and moved by waves and currents. There are researches considering the communication environments of underwater to improve the data transmission throughput. In this paper, we present a checkpointing scheme of the cluster heads that recovers from a cluster head failure quickly. Experimental results show that the proposed scheme enhances the reliability of the networks and more efficient in terms of the energy consumption and the recovery latency than without checkpointing.

Key Words : 수중 무선 센서 네트워크, 클러스터, 헤드 노드, 오류 복구 기법

1. 서 론

수중에서는 음파에 의한 통신 지연 시간이 크고, 노드의 오류 발생률이 높다. 또한, 수중 센서 네트워크의 비용 및 통신비용이 높기 때문에 지상에서 사용되는 기존의

알고리즘들을 그대로 사용할 수 없다. 특히 수중 센서 네트워크에서는 에너지 소비를 줄이고 라우팅 방법이 비교적 간단한 클러스터 기반의 계층적 라우팅 기법이 주로 연구되고 있다^[1].

수중 무선 센서 네트워크는 기존의 지상에서 사용하는 무선 센서 네트워크와는 달리 몇 가지 고유한 특징들을 가지고 있다. 먼저 지상에서는 다양한 스펙트럼의 무선 주파수를 사용하여 빠른 속도로 통신을 하지만, 수중

*정회원, 한성대학교 컴퓨터공학과

**비회원, 서울대학교 컴퓨터공학부

접수일자 2011.6.2, 수정완료 2011.7.10

게재확정일자 2011.8.12

에서는 무선 주파수의 반사 또는 감쇄가 심각하기 때문에 제한된 대역폭의 음파를 통해 낮은 속도로 통신을 한다^[2]. 또한 무선 주파수 신호에 비해 음파의 전달 속도가 만 배 정도 느리기 때문에 노드 간 통신에 대한 지연 시간이 길다. 다음으로 수중 노드의 경우 지상에서 사용하는 센서 노드에 비해 제작비용이 높기 때문에 고사양의 하드웨어를 탑재하고 있지만 많은 수의 노드를 조밀하게 배치할 수 없다. 그리고 해수의 이동 때문에 노드가 움직일 수 있다. 특히 조류의 경우 7Km/h 이상의 속도로 움직이기 때문에 설치된 노드가 조류에 휩쓸려 이동할 가능성이 높다^[3]. 마지막으로 수중 센서 노드들은 해수에 오랜 시간 노출되기 때문에 부식과 같은 물리적인 손상이 발생할 가능성이 높다^[4].

앞서 언급했듯이 수중 환경은 오류 발생 가능성이 높고, 통신 속도가 느리기 때문에 수집된 정보의 신뢰성을 높이기 위해서 안정된 통신을 지원하기 위한 기법들이 필요하다. 기존 무선 센서 네트워크에서도 신뢰성을 향상하기 위한 많은 기법들이 제안되었지만 수중 환경의 특성 때문에 이를 그대로 사용하기가 어렵다. 또한 기존의 수중 무선 센서 네트워크 구조는 센서 노드의 오류 발생 시 효율적으로 복구하지 못하는 문제점 있다^[5]. 따라서 본 논문에서는 수중 무선 센서 네트워크의 특성을 고려하여 설계된 신뢰성 향상 기법을 제안한다. 제안 기법은 체크포인팅을 통해 헤드 노드의 오류 발생 시 이를 신속하게 복구할 수 있을 뿐만 아니라 불필요한 복구로 인한 에너지 소모를 줄일 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 수중 센서 네트워크 구조와 문제점에 대해 살펴보고, 3장에서는 체크포인팅을 통해 오류 복구에 필요한 에너지 및 시간을 단축할 수 있는 기법을 제안한다. 4장에서는 제안한 기법의 성능 평가 결과를 보이고 이를 분석한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 수중 무선 센서 네트워크

수중 센서 네트워크는 지상에서 동작하는 무선 센서 네트워크와 유사한 운영 방식을 가지고 있지만, 수중 환경이라는 특수성 때문에 하드웨어 구성과 네트워크 구조 측면에서 차이를 보인다. 본 장에서는 이러한 차이점을 살펴보고, 기존의 클러스터 기반 수중 무선 센서 네트워

크에서 발생할 수 있는 문제점을 정리한다.

1. 하드웨어 구성

수중 무선 센서 네트워크 구성을 위해 사용되는 센서 노드의 특징은 RF (Radio Frequency) 기반의 통신이 불가능하기 때문에 음파 또는 광통신 모뎀을 통해 통신이 이루어진다. 음파 모뎀의 경우 속도가 느리고 거리가 멀어질수록 감쇄현상이 심해지기 때문에 2000 bit/초 ~ 7000 bit/초 정도의 저용량 데이터 전송이 가능하다. 광통신 모뎀의 경우 320 Kbit/초 정도의 고용량 데이터 전송이 가능하지만 비용이 비싸다는 단점이 있다. 그림 1은 수중 센서 네트워크에 사용되는 노드들과 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)에 대해 보여주고 있다.

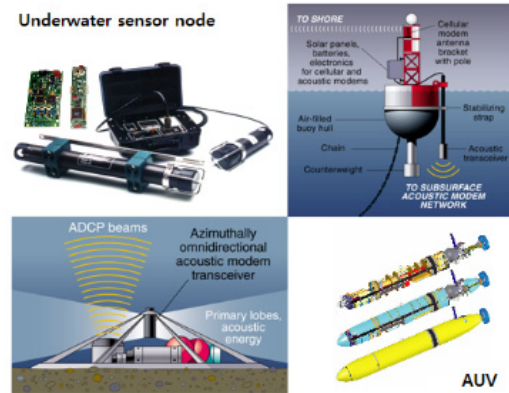


그림 1. 수중 센서 노드와 AUV
Fig. 1. Underwater sensor nodes and Autonomous Underwater Vehicles

2. 네트워크 구조

수중 센서 네트워크는 수중 센서 노드, 클러스터 헤드, 해수면 싱크, 지상 싱크로 구성되어 있다.

해저에 배치된 수중 센서 노드들은 클러스터 헤드를 중심으로 클러스터를 구성하고 생성된 정보를 수중 싱크에게 전달한다. 클러스터 헤드는 일반 노드들 보다 높은 통신 파워를 사용하여 클러스터 내에서 수중 센서 노드들에 의해 수집된 정보를 모아 주기적으로 AUV에게 전달한다. AUV은 수중에서 이동하면서 클러스터 헤드들로부터 데이터를 수집하여 해수면 싱크에게 전달한다. 해수면 싱크는 수중에서 수집된 정보를 모두 모아서 무선 주파수 또는 위성 통신을 통해 지상 싱크에게 정보를

전달한다. 그림 2은 수중 센서 네트워크의 구조를 보여주고 있다⁶⁾.

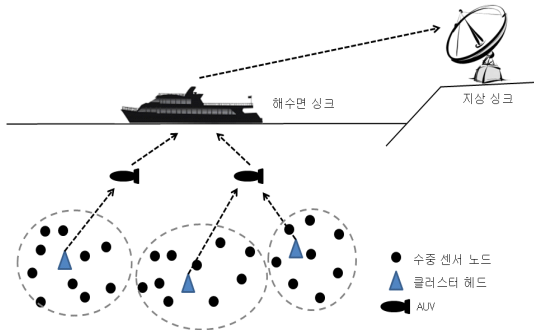


그림 2. 수중 무선 센서 네트워크의 구조
Fig. 2. The architecture of underwater wireless sensor networks

3. 문제점

수중 환경에서는 전파의 산란과 감쇠현상으로 인해 무선 주파수를 사용할 수 없기 때문에 음파를 통해 통신한다. 음파의 경우 무선 주파수에 비해 만 배정도 느리고, 한 번에 전달할 수 있는 데이터의 양도 작다. 따라서 수중 센서 노드들이 클러스터를 구성하고 데이터를 모아 전송하는 기법이 주로 사용된다. 클러스터 기반 수중 라우팅 기법은 먼저 각 클러스터 별로 클러스터 헤드를 선출하며, 클러스터 헤드로 선출된 노드는 모든 주변 노드들에게 자신의 ID (Identification)을 전송한다. 클러스터 구성을 위해 클러스터 헤드의 ID를 받은 주변의 노드들은 클러스터 헤드에게 가입 요청메시지를 보낸다. 이렇게 클러스터가 구성 단계가 종료되면 클러스터 헤드는 TDMA (Time division Multiple Access) 방식으로 클러스터 내에서의 전송 스케줄을 작성하고 작성된 스케줄을 클러스터 멤버들에게 전송한다.

클러스터 멤버 노드들은 클러스터 헤드의 정상동작 여부를 주기적으로 확인하고, 클러스터 헤드에서 오류가 발생하여 동작하지 않으면 이를 다른 멤버 노드들에게 이를 알린다. 해당 클러스터의 멤버 노드들은 클러스터 헤드를 재선출하는 과정을 통해 발생한 오류를 복구한다. 이러한 복구 과정은 많은 시간과 에너지를 소모할 뿐만 아니라 멤버노드의 잘못된 판단으로 인해 불필요한 클러스터 헤드 재선출 과정이 유발될 수 있다. 또한 클러스터 멤버들이 클러스터 헤드의 상태를 모니터링 해야 하기

때문에 이로 인한 에너지 소모가 크다.

III. 클러스터 헤드 오류 복구 기법

기존의 클러스터 기반 수중 센서 네트워크에서 클러스터 헤드는 자신이 속한 클러스터 내의 모든 노드들이 수집한 정보를 저장하고 이를 수중 싱크에 전달하기 때문에 그 역할이 멤버 노드들 보다 중요하다. 클러스터 헤드의 오류 발생 여부를 신속하게 감지하지 못한다면 클러스터 내의 정보를 수집할 수 없고, 많은 에너지를 소모하여 의미 없는 데이터를 전송하게 된다. 또한 멤버 노드의 잘못된 판단으로 인해 클러스터 재선출 과정이 발생하면 불필요한 복구 과정으로 인해 지연 시간이 발생한다. 따라서 클러스터 헤드의 상태를 주기적으로 모니터링하고 상태정보를 저장할 수 있는 결합허용 기법이 필요하다.

1. 제안 오류 복구 기법의 개요

클러스터 기반 수중 센서 네트워크에서 클러스터 헤드의 오류 발생 시 피해를 최소화하기 위해 본 논문에서는 체크포인팅 기법을 적용한다. 클러스터 구성 단계에서, 클러스터 헤드의 상태를 저장할 수 있는 백업 노드를 추가로 선정한다.

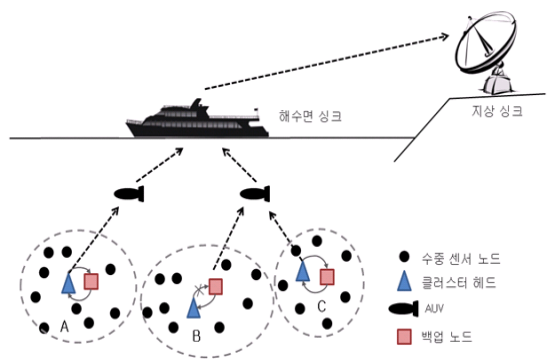


그림 3. 제안 오류 복구 기법의 개요
Fig. 3. The overview of the proposed recovery scheme

백업 노드의 선정 기준은 클러스터 헤드와 거리로 가장 근접한 노드를 백업 노드로 선정한다. 클러스터 헤드

는 멤버 노드들로부터 수집된 센싱 정보를 주기적으로 백업노드에 저장하며, 백업 노드는 클러스터 헤드의 오류 발생 여부를 감시하고, 클러스터 헤드가 일시적으로 동작하지 못할 경우 저장된 체크포인팅 정보를 바탕으로 그 역할을 대신해서 수행한다. 그림 3은 클러스터 기반 라우팅 프로토콜에 제안된 기법을 적용했을 때의 동작방식을 보여주고 있다.

클러스터 A와 C의 경우 클러스터 헤드가 정상적으로 동작하고 있기 때문에 백업 노드에 주기적으로 체크포인트 정보가 저장된다. 클러스터 B의 경우 클러스터 헤드가 일시적인 장애가 발생해서 백업 노드가 체크포인트 정보를 받을 수 없게 되면 백업 노드는 클러스터 헤드의 오류를 감지하고 그 역할을 대신해서 수행한다. 이러한 기법을 통해 헤드 노드의 오류로 인한 정보손실을 막을 수 있을 뿐만 아니라, 복구를 위한 지연 시간도 줄일 수 있다.

2. 에너지 소모 모델

클러스터 기반 수중 센서네트워크를 위한 체크포인팅 기법을 적용한 기법이 이를 적용하지 않는 기존 기법에 비해 에너지 소모 측면에서 어떤 성능을 보이는지 알아보기 위해 에너지 소모 모델을 설계하였다. 수중 환경에서 통신에 필요한 에너지를 천해 (수심 100m 이하)와 심해 (수심 100m 이상)로 구분하여 모델링 할 수 있다^[7]. 본 논문에서는 천해에서 사용하는 에너지 모델을 사용하였다.

본 논문에서 에너지 소모 모델을 정의하기 위해 사용하는 표기법은 표 1과 같다.

수중 환경에서 두 노드 간 통신에 필요한 에너지는 다음과 같이 정리해 볼 수 있다.

$$E_{tx} = S \cdot T_{tx} \cdot K, S = 2\pi \cdot H \cdot I \quad (1)$$

체크 포인팅 기법을 적용하지 않은 수중 센서 네트워크의 경우, 클러스터 헤드에 오류가 발생했을 때 클러스터 헤드를 재선출하고, 다시 클러스터내의 정보를 수집하는 추가적인 비용이 발생한다. 클러스터 헤드의 재선출 과정은 시작 메시지 전송 ($n-1$), 모든 노드가 자신의 에너지 잔량을 다른 노드에게 전달($(n-1)^2$), 새로 선출된 헤드 노드가 자신의 ID전송의 순서로 이루어진다 ($n-1$). 다음은 이러한 과정에서의 에너지 소모량을 모델링한 것이다.

표 1. 표기법 목록

Table 1. The list of notations

표기법	설명
E_{tx}	데이터 전송 시 필요한 에너지
S	송신 출력 (dBm)
d	두 노드사이의 거리 (m)
H	수심 (m)
I	음파 전달 손실률
T_{tx}	통신 시간
K	전송할 패킷의 크기
P_k	K번째 전송 시 오류 발생 확률
E_{pre}	기존 기법의 에너지 소모량
E_{ckpt}	제안 기법의 에너지 소모량
I_{ckpt}	체크포인팅 주기
D_{pre}	기존 기법의 복구지연시간
D_{ckpt}	제안 기법의 복구지연시간
d_{max}	가장 거리가 먼 노드와의 거리
δ	가드 타임
λ	노드의 오류 발생 빈도

$$E_{pre} = \sum_{k=0}^{n-1} [(1 - P_k) \cdot E_{tx} + P_k \cdot \{(n-1)^2 + 2(n-1)\} \cdot E_{tx}] \quad (2)$$

체크포인팅 기법을 적용한 수중 센서 네트워크의 경우, 클러스터 헤드에 오류가 발생했을 때 백업 노드가 저장된 체크포인팅 정보를 통해 클러스터 헤드의 상태를 복원하고 클러스터 헤드의 역할을 대신 수행한다. 따라서 일정 주기마다(I_{ckpt}) 체크 포인팅을 하기 위한 추가적인 에너지 소모가 발생하지만, 클러스터 헤드의 재선출로 인한 불필요한 에너지 소모를 줄일 수 있다. 다음은 이러한 과정에서의 에너지 소모량을 모델링한 것이다.

$$E_{ckpt} = \sum_{k=0}^{n-1} [(1 - P_k) \cdot E_{tx} + P_k \cdot (n-1) \cdot E_{tx}] + \left[\frac{k}{I_{ckpt}} \right] \cdot E_{tx} \quad (3)$$

3. 복구지연시간

클러스터 헤드의 오류 발생 시점에서부터 오류를 복구하고 다시 재동작하는 시점까지의 시간을 복구 지연

시간으로 정의하였다. 체크 포인팅 기법을 적용하지 않은 수중 센서 네트워크와 체크 포인팅 기법을 적용한 수중 센서 네트워크 사이의 복구 지연 시간은 다음과 같이 비교해 볼 수 있다.

$$D_{pre} = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{d_{max,k}}{1500} + 2 \cdot \left(\frac{d_{max}}{1500} \right) + (n+1) \cdot \delta \quad (4)$$

$$D_{ckpt} = \frac{d_{max}}{1500} + \delta \quad (5)$$

수중에서 음파는 1500m/s 속도로 이동하며 클러스터 내의 노드들은 시분할 방식에 의해 자신의 순서에 따라 메시지를 전송한다. 이 때 노드 사이에 메시지 충돌을 막기 위하여 각 노드가 메시지를 전송할 슬롯 사이에 가드 타임 (δ)이 할당 된다. 복구 지연 시간은 메시지의 개수와 노드 사이의 거리에 비례한다. 브로드캐스팅 메시지 전송의 경우 가장 먼 거리(d_{max})에 있는 노드가 메시지를 받았을 때 완료 된다.

IV. 실험 및 결과

체크 포인팅 기법이 적용되지 않은 기존의 클러스터 기반 수중 센서 네트워크와 체크 포인팅 기법이 적용된 클러스터 기반 수중 센서 네트워크 간의 에너지 소모량과 복구 지연시간을 비교하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위해서 다음과 같이 실험인자들의 값을 설정하였다.

표 2. 실험 파라미터
Table 2. Simulation Parameters

실험 인자	실험 값
H	50m
I	0.073dBm
T_{tx}	283 ms
K	64 bytes
I_{ckpt}	2.47 sec
δ	600 ms
λ	$0 < \lambda < 1.0$

그림 4는 오류 확률과 클러스터 내의 노드 개수에 따른 에너지 소모량을 보여주고 있다. 에너지 소모량에 대한 시뮬레이션 결과 오류 확률 보다는 노드의 개수에 따라 변화하는 정도가 크게 나타났다. 체크 포인팅을 적용하지 않은 기법은 노드의 수가 늘어남에 따라 클러스터 헤드 재선출에 필요한 메시지의 수가 급격하게 증가한다. 체크 포인팅 기법의 경우 체크포인팅 해야 할 정보의 양이 늘어나기 때문에 에너지 소모량이 증가하지만 증가하는 정도는 기존의 기법에 비해 완만하다.

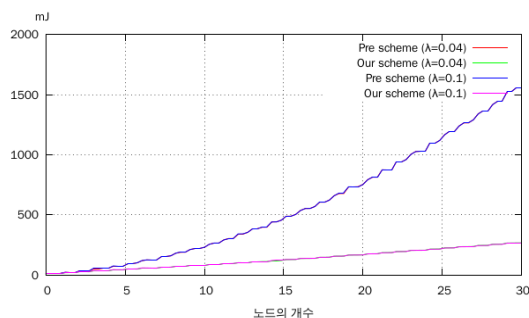


그림 4. 에너지 소모량 비교
Fig. 4. Comparing the energy consumption

그림 5는 체크 포인팅을 적용하지 않은 기존 기법과 체크 포인팅을 적용한 제안 기법 사이의 복구 지연 시간을 비교한 결과를 보여주고 있다. 에너지 소모 모델과 마찬가지로 기존 기법의 클러스터 헤드 재선출로 인한 메시지 수의 증가와 멤버 노드들 간의 통신 순서를 정하는 스케줄링으로 인한 지연이 발생한다. 제안 기법에서는 백업 노드가 체크 포인팅 정보를 바탕으로 오류가 발생한 클러스터 헤드의 역할을 대신 수행하기 때문에 부가적인 메시지의 전송을 최소화 할 수 있다.

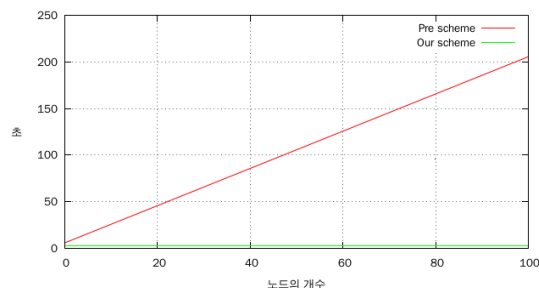


그림 5. 복구지연시간 비교
Fig. 5. Comparing the recovery latency

V. 결 론

클러스터 기반 수중 센서 네트워크는 기존의 지상에서 동작하는 무선 센서 네트워크 보다 열악한 환경 하에서 운영된다. 수중 환경이라는 특수성 때문에 기존 무선 센서 네트워크와는 다른 특성들을 가지고 있다. 또한 급격한 주변 환경의 변화로 인해 다양한 물리적인 충격에 노출 될 수밖에 없다. 이러한 험준한 환경에서 센서 노드들이 안정적으로 동작하기 위해서는 효과적인 결함허용 기법이 필요하다. 본 논문에서는 기존의 클러스터 기반 수중 센서 네트워크의 문제점인 클러스터 헤드의 결함으로 인한 데이터 손실과 긴 복원 지연 시간을 해결하기 위해, 체크포인팅 기법을 적용하였다. 백업 노드들은 주기적으로 클러스터 헤드의 상태를 모니터링 하고 클러스터 헤드에서 오류가 발생하면 체크포인팅 정보를 바탕으로 빠른 시간 내에 복구하고, 클러스터 헤드의 역할을 대신 해서 수행한다. 시뮬레이션 결과들은 제안된 체크포인팅 기법이 기존의 기법에 비해 에너지 효율성과 복구 지연 시간 측면에서 성능이 향상되었다는 것을 보여준다.

참 고 문 헌

- [1] Erdal Cayirci, Hakan Tezcan, Yasar Dogan, Vedat Coskun, "Wireless sensor networks for underwater surveillance systems", Ad Hoc Networks, 4(4), pp.431-446, 2006.
- [2] Mari Carmen Domingo, Rui Prior, "A Distributed Clustering Scheme for Underwater Wireless Sensor Networks", Proc. of IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pp.1-5, 2007.
- [3] Ian F. Akyildiz, Dario Pompili, Tommaso Melodia, "Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges", Ad Hoc Networks, 3(3), pp.257-279, 2005.
- [4] John Heidemann, Wei Ye, Jack Wills, Affan Syed, Yuan Li, "Research Challenges and Applications for Underwater Sensor Networking", Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp.228-235, 2006.
- [5] Pu Wang, Jun Zheng, Cheng Li, "Cooperative fault-detection mechanism with high accuracy and bounded delay for underwater sensor networks", Wireless Communications & Mobile Computing, 9(2), pp.143-153, 2009.
- [6] Jim Partan, Jim Kurose, Brian Neil Levine, "A Survey of Practical Issues in Underwater Networks", ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 11(4), pp.23-33, 2007.
- [7] Mari Carmen Domingo, Rui Prior, "Energy analysis of routing protocols for underwater wireless sensor networks", Computer communications, 31(6), pp.1227-1238, 2008.

※ 본 연구는 한성대학교 교내연구비 지원과제임. 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0013774)

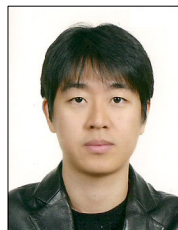
저자 소개

허 준 영(정회원)



- 1998년 : 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사).
- 2009년 : 서울대학교 컴퓨터공학부 졸업(박사).
- 2009년 ~ 현재 : 한성대학교 컴퓨터공학과 전임강사. 관심 분야는 운영체제, 무선 센서 네트워크, 임베디드 시스템, 결함허용 시스템.

민 흥(비회원)



- 2004년 : 한동대학교 전산학과 졸업(학사).
- 2011년 : 서울대학교 컴퓨터공학부 졸업(박사). 관심 분야는 운영체제, 무선 센서 네트워크, 임베디드 시스템, 결함허용 시스템